

Reihe KLIMOPASS-Berichte

Projektnr.: 4500188624/23

Regionale Klimafolgen für die  
Energiewirtschaft in Baden-Württemberg  
– Eine modellgestützte Analyse von  
konkurrierenden Wassernutzungen

von M. Cassel, M. Johst, J. Scherzer, B. Rothstein

Finanziert mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg

Februar 2015

**KLIMOPASS**

**Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg**  
**Grundlagenforschung zu regionalen Klimafolgen**



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

<b>HERAUSGEBER</b>	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Postfach 100163, 76231 Karlsruhe
<b>KONTAKT KLIMOPASS</b>	LUBW Referat Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Klimawandel; Dr. Kai Höpker, Tel.:0721/56001465, <a href="mailto:Kai.Hoepker@lubw.bwl.de">Kai.Hoepker@lubw.bwl.de</a> Daniel Schulz-Engler, Tel.:0721/56001554, <a href="mailto:daniel.schulz-engler@lubw.bwl.de">daniel.schulz-engler@lubw.bwl.de</a> , <a href="mailto:klimopass@lubw.bwl.de">klimopass@lubw.bwl.de</a>
<b>FINANZIERUNG</b>	Gefördert im Rahmen des Forschungsprogramms KLIMOPASS - Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg aus Mitteln der Zukunftsoffensive III
<b>BEARBEITUNG UND VERANTWORTLICH FÜR DEN INHALT</b>	Prof. Dr. Benno Rothstein, Dr. Martin Cassel, Dr. Margret Johst Hochschule Konstanz, Brauneggerstr. 55, D-78462 Konstanz Tel.: 07531-206-714, <a href="mailto:rothstein@htwg-konstanz.de">rothstein@htwg-konstanz.de</a> <a href="http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/91063/">http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/91063/</a> Dr. Jörg Scherzer UDATA – Inhaber Dr. Jörg Scherzer, Hindenburgstraße 1, 67433 Neustadt/Wstr. Tel.: 06321-9989430, <a href="mailto:info@udata.de">info@udata.de</a>
<b>BEZUG STAND</b>	ID Umweltbeobachtung U60-W03-N10 Februar 2015, Internetausgabe Februar 2015

Verantwortlich für den Inhalt sind die Autorinnen und Autoren. Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die in den Beiträgen geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Nachdruck für kommerzielle Zwecke - auch auszugsweise - ist nur mit Zustimmung der LUBW unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>5</b>
<b>1 EINFÜHRUNG</b>	<b>6</b>
1.1 Zielsetzung des Projektes	7
1.2 Stand der Forschung	8
1.2.1 Auswirkungen des Klimawandels	8
1.2.2 Energiewirtschaft	9
1.2.3 Wasserwirtschaft	9
1.2.4 Energiewende	10
<b>2 ANALYSE DER WASSERHAUSHALTSSITUATION AM NECKAR</b>	<b>11</b>
2.1 Wasserhaushalt, Wasserverbrauch und Wassereinleitungen am Neckar	12
2.2 Befragung von landwirtschaftlichen Bewässerungsbetrieben	13
2.2.1 Konzeption und Durchführung der Befragung	14
2.2.2 Aktuelle Bewässerungspraxis und -menge	14
2.2.3 Erfahrungen mit Wasserknappheit und Zukunftseinschätzungen	16
2.2.4 Schlussfolgerungen und zukünftige Entwicklung	18
2.3 Befragung von Klärwerksbetreibern	19
2.4 Befragung von industriellen Wassernutzern	19
2.5 Kühlwasserbedarf, regenerative Energien und Wasserkraftnutzung am Neckar	20
2.5.1 Energiewende und Stromerzeugung in Baden-Württemberg	20
2.5.2 Kühlwasserverbrauch thermischer Kraftwerke	21
2.5.3 Möglichkeiten einer Regelennergiebereitstellung durch Laufwasserkraftwerke am Neckar	23
<b>3 AUSWIRKUNGEN DER ENERGIEWENDE AUF DEN KÜHLWASSERBEDARF</b>	<b>25</b>
3.1 Zusammenhang zwischen Photovoltaik-/Wind-Stromeinspeisung und dem Betrieb thermischer Kraftwerke	25
3.1.1 Berechnungsgrundlagen des Modells PVW <sup>2</sup>	25
3.2 Szenarien „Sukzessiver Betrieb“ und „Gleichzeitiger Betrieb“	26
3.3 Fallbeispiele für den Neckar	27
3.3.1 Datengrundlage	27
3.3.2 Ergebnisse für einen Zeitraum mit hoher PV-Einspeisung	28
3.3.3 Ergebnisse für einen Tag sehr hoher Kühlwassereinsparung	28

3.4	Relevanz für die Wasserkraftnutzung	29
3.5	Diskussion und Ausblick	30
<b>4</b>	<b>SZENARIEN FÜR DIE ZUKÜNFTIGE VERÄNDERUNG DES WASSERHAUSHALTS AM NECKAR</b>	<b>31</b>
4.1	Zukünftig mögliche Änderungen des „natürlichen“ Neckarabflusses gemäß LARSIM-Wasserhaushaltssimulationen	33
4.2	Abschätzung der möglichen Änderungen des Kühlwasserverbrauchs	35
4.3	Zukünftig mögliche Änderung sonstiger Wassernutzungen	36
<b>5</b>	<b>HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN</b>	<b>38</b>
5.1	Systemanalyse zur Ableitung von Handlungsempfehlungen	38
5.1.1	Grundlagen der Systemanalyse	38
5.1.2	Systemanalyse der möglichen Wassernutzungskonflikte bei Niedrigwassersituationen am Neckar	38
5.1.3	Ableitung von Handlungsempfehlungen aus der Systemanalyse	40
5.1.3.1	Handlungsempfehlungen im Bereich Landwirtschaft	40
5.1.3.2	Handlungsempfehlungen im Bereich der Energiewirtschaft	41
5.1.3.3	Handlungsempfehlungen im Bereich der Abwasserwirtschaft	41
5.1.3.4	Allgemeine Handlungsempfehlungen	41
<b>6</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN UND WEITERER FORSCHUNGSBEDARF</b>	<b>42</b>
<b>7</b>	<b>LITERATUR</b>	<b>43</b>
<b>8</b>	<b>LISTE DER IM RAHMEN DES PROJEKTS ERSTELLTEN VERÖFFENTLICHUNGEN, KONFERENZBEITRÄGE UND ABSCHLUSSARBEITEN</b>	<b>50</b>
8.1	Veröffentlichungen, Konferenzbeiträge	50
8.2	Abschlussarbeiten	51

# Zusammenfassung

In diesem KLIMOPASS-Projekt wurden unter Berücksichtigung der Energiewende die Auswirkungen des Klimawandels auf die Energiewirtschaft am Neckar untersucht. Vor dem Hintergrund des hohen Kühlwasserbedarfs thermischer Kraftwerke werden potenziell auftretende Wassernutzungskonkurrenzen herausgearbeitet und Handlungsstrategien zum Umgang mit kritischen Niedrigwassersituationen erarbeitet. Hierbei werden aktuelle Umbrüche in der Energiepolitik wie der Wegfall von Kernkraftwerken als Grundlastversorger und der Ausbau Photovoltaik und Windkraft mit in die Betrachtung einbezogen. Basierend aus den Recherche- und Befragungsergebnissen wurde das Modell PVW2 (PV+Wind+Water) erstellt. Es dient in einem ersten Schritt zur Abschätzung der eingesparten Kühlwassermenge am energiewirtschaftlich intensiv genutzten Neckar für den Zeitraum Juli 2011 – Juni 2013. In einem zweiten Schritt wurden für das Jahr 2030 verschiedene Annahmen getroffen und konkrete herbstliche Niedrigwassersituationen mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM szeniert. Hierbei wurden einerseits mögliche Änderung des „natürlichen“ Wasserhaushalts abgeschätzt, andererseits die zu erwartenden Wassernutzungsänderungen wie Kühlwassernutzung, Abwassereinleitung und Beregnung in der Landwirtschaft, berücksichtigt. Ausgehend von dem für die Zukunft projizierten Wasserdargebot und Wasserbedarf wurden mögliche Wassernutzungskonkurrenzen identifiziert. Aus den Ergebnissen der Befragungen und der Modellergebnisse werden sektorbezogene, sowie allgemeine Handlungsempfehlungen für das Management des Wasserhaushalts des Neckars abgeleitet.

Die Ergebnisse zeigen, dass die relativ knappen Wasserreserven im Neckargebiet ein Risiko darstellen. In der Landwirtschaft ist zukünftig mit einem Ausbau der Bewässerung zu rechnen, wobei bereits jetzt schon wassersparende Verfahren eingesetzt werden. Neben einer weiteren Optimierung der Bewässerungstechniken können bestimmte Maßnahmen in der Bodenpflege, der Feld- und Bewirtschaftungsstruktur, der Sortenauswahl und der Einsatz neuere Technologien zur Wassereinsparung führen. Die Einleitung von Wässern über die Kläranlagen trägt einen relevanten Anteil am Neckarabfluss bei. Die bisherige Drosselung der thermischen Kraftwerke aufgrund der Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien führt hingegen nur zu einer geringfügigen Kühlwassereinsparung am Neckar. Das dadurch leicht erhöhte Wasserkraftpotenzial entspricht etwa der Leistung einer Windkraftanlage. Die LARSIM-Szenarien für die herbstlichen Niedrigwassersituationen in der Dekade 2021–2030 zeigen unerwartet hohe Abflüsse, wobei extreme Niedrigwassersituationen durch das Modell nicht abgebildet werden können. Im Jahr 2030 halbiert sich der Kühlwasserverbrauch durch den Nutzungsrückgang der thermischen Kraftwerke. Eine sukzessive Nachrüstung bestehender Kraftwerke mit wassersparenden Kühlsystemen und der weitere Ausbau der Erneuerbaren Energien können hier noch zu einer weiteren, wenn auch geringem Abflusszugewinn führen. In einem ähnlichen Umfang nehmen jedoch die in den Neckar eingeleiteten Abwassermengen bei Trockenwetter ab. Hier könnten eine Veränderung des Abwassersystems und eine Überleitung und Speicherung von Wässern aus dem Bodensee zusätzliche Wassermengen bei extremen Niedrigwassersituationen bereitstellen. Darüber hinaus können länderübergreifende Maßnahmen umgesetzt werden, die in der Summe zu einer deutlichen Minimierung des Risikos knapper Wasserreserven im Neckargebiet beitragen. Darunter fallen z. B. die Sicherung von Grundwasserneubildungsgebieten, ein Umbau in der Forstwirtschaft, technische und strategische Maßnahmen zur Nutzung von Retentionsräumen oder flexiblere Wassernutzungserlaubnisse in der Landwirtschaft.

# 1 Einführung

Energiewirtschaft und Wassernutzung stehen aufgrund der großen Bedeutung von Kohle-, Kern-, und Wasserkraftwerken in Baden-Württemberg in einem engen Zusammenhang. Niedrige Flusswasserstände können in Trockenzeiten zu Konflikten zwischen den verschiedenen Wassernutzern z.B. der Kühlwassernutzung (Abbildung 1), Bewässerung sowie der Nutzung des Neckars als Schifffahrtsstraße führen. Seit dem Trockensommer 2003 nimmt das Bewusstsein für die Relevanz konkurrierender Wassernutzungen, u.a. von Kühlwassernutzung, Bewässerung für die Landwirtschaft, Nutzung der Wasserwege für den Transport von Massengütern sowie für Belange des Naturschutz zu.

Das Neckargebiet ist aufgrund seines eher trockenen Einzugsgebiets, der dichten Besiedlung, der starken Industrialisierung und der großen Bedeutung der Energiewirtschaft als Wassernutzer (u.a. thermische Kraftwerke, Laufwasserkraftwerke) besonders von Klimafolgen betroffen. Länger anhaltende Trocken- und Hitzeperioden führen hier aufgrund der naturräumlichen Gegebenheiten schnell zu niedrigen Abflüssen, wodurch in der Vergangenheit bereits häufig wasserrechtliche Grenzwerte für thermische Kraftwerke erreicht wurden, so z.B. in den Sommern 2003 und 2006 oder bei herbstlichem und winterlichem Niedrigwasser. Der Klimawandel trägt nicht nur durch eine Erhöhung der Lufttemperatur sondern potenziell auch auf indirekte Weise zu einer Verschärfung der Wassernutzungskonkurrenzen bei. Das Wasserdargebot wird gerade in den kritischen Sommermonaten zukünftig potenziell weiter abnehmen. Auf Seiten der energiewirtschaftlichen Wassernutzung ist dagegen zu erwarten, dass während dieser Jahreszeit der Elektrizitätsbedarf weiter ansteigen wird. Die thermischen Kraftwerke am Neckar werden auch in Zukunft einen wichtigen Beitrag zur Elektrizitätserzeugung und Versorgungssicherheit in Baden-Württemberg leisten (insbesondere in Form von Schattenkraftwerken) und somit einen gleichbleibenden, eventuell steigenden, Kühlwasserbedarf haben. Gleichzeitig wird der Bewässerungsbedarf der Landwirtschaft trotz innovativer Technologien weiter zunehmen.

Ein weiterer Faktor, der die Situation der Energiewirtschaft in Baden-Württemberg verschärft, ist die im Nachgang der Nuklearkatastrophe von Fukushima vom März 2011, eingeleitete Energiewende in Deutschland. Die dadurch verursachten Umbrüche in der Energiepolitik verändern die energiewirtschaftliche Perspektive drastisch. Kernkraftwerke fallen als Grundlastversorger weg und müssen durch andere Energieerzeugung kompensiert werden. Laut dem baden-württembergischen Landesumweltminister Untersteller (Pressemitteilung vom 09.01.2012) sollen bis zum Jahr 2020 rund 38% des Energiebedarfs durch Erneuerbare Energien, primär Wind und Sonne, in Baden-Württemberg erzeugt werden. Bis der Anteil der Erneuerbaren diesen Wert erreicht, muss vor allem die Grund- und Mittellast der Elektrizitätserzeugung durch den Bestand an thermischen Kraftwerken und bestehenden Wasserkraftwerken gedeckt werden. Dies stellt erhöhte Anforderungen an den Mindestabfluss und die Wassertemperaturen für die Kühlung. Für die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Klimawandel und zukünftiger Wassernutzungskonkurrenz ist die Berücksichtigung der Energiewende folglich von entscheidender Bedeutung.

Für eine modellhafte Anpassung an den Klimawandel und die Energiewende im Bereich der Energiewirtschaft gilt es daher, Wassernutzungskonflikte auszugleichen. Hierfür ist eine langfristige Bewirtschaftungsplanung notwendig, die insbesondere die zu erwartenden Änderungen des Strombedarfs und der Stromerzeugung (sowie der Demographie und der Landnutzung) vor dem Hintergrund des Klimawandels berücksichtigt.



Abbildung 1: Kraftwerk Altbach/Deizisau (links) Heizkraftwerk Heilbronn (rechts); beide am Neckar (Fotos Johst).

Das Programm KLIMOPASS („Klimawandel und modellhafte Anpassungen in Baden-Württemberg“, Projektträger: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Projektlaufzeit: 2012–2014) ist Teil der Zukunftsoffensive III des Landes Baden-Württemberg. In dem hier vorgestellten Teilprojekt werden unter Berücksichtigung der Energiewende die Auswirkungen des Klimawandels auf die Energiewirtschaft am Neckar analysiert. Vor dem Hintergrund des hohen Kühlwasserbedarfs thermischer Kraftwerke sollen potenziell auftretende Wassernutzungskonkurrenzen erkannt und modellhaft Handlungsstrategien zum Umgang mit kritischen Niedrigwassersituationen erarbeitet werden. Hierbei werden neben der energiewirtschaftlichen Wassernutzung (Kühlwassernutzung thermischer Kraftwerke, Wasserkraftwerke, Kohletransport) auch die Nutzung durch die Industrie (Prozesswasser) und die Landwirtschaft (Bewässerung, verstärkter Energiepflanzenanbau) sowie die Nutzung als Vorflut für die Abwasserentsorgung betrachtet. Analog zu den zugrunde gelegten Klimawandelszenarien werden Zukunftsszenarien bis in das Jahr 2050 entwickelt.

#### 1.1 ZIELSETZUNG DES PROJEKTES

Ziel des hier vorgestellten Teilprojektes „Regionale Klimafolgen für die Energiewirtschaft in Baden-Württemberg – eine modellgestützte Analyse von konkurrierenden Wassernutzern“ ist es, auf der Basis der sich durch den Klimawandel ändernden Energiebereitstellung sowie der zu erwartenden Landnutzungsänderungen, gegenwärtige und zukünftige Wassernutzungskonkurrenzen für die Energiewirtschaft im Einzugsgebiet des Neckars zu identifizieren, zu analysieren und zu vergleichen.

Die Zielsetzung und Vorgehensweise des Projektes wurden im Projektzeitraum an die durch das Fukushima-Ereignis und die daraus resultierende Energiewende veränderten Ausgangsbedingungen angepasst. In Ergänzung zum projektierten Klimawandel wurde auch die nun veränderte energie-wirtschaftliche Perspektive betrachtet. In Anknüpfung an die bereits bestehenden Wasserhaushalts-simulationen unter Klimawandelbedingungen wurden diese mit den im KLIMOPASS-Auftaktworkshop vorgestellten klimatologischen Rahmenbedingungen (worst case 85%-Perzentil) verglichen.

Die Bedeutung des Projektes für das Land Baden-Württemberg liegt im Beitrag zu fachlich fun-dierten und reproduzierbaren Planungsentscheidungen im Hinblick auf die Energiewirtschaft, die ökonomische, gesellschaftliche und ökologische Belange und Entwicklungen berücksichtigt.

## **1.2 STAND DER FORSCHUNG**

### **1.2.1 AUSWIRKUNGEN DES KLIMAWANDELS**

Trotz hoher Anstrengungen im Klimaschutz führen die bereits in der Atmosphäre befindlichen Treibhausgase zu globalen und regionalen Veränderungen der oberflächennahen Lufttemperatur und des Niederschlagsgeschehens, welche wiederum vielfältige Wirkungen auf die menschliche Gesundheit, die Ökosysteme und die Wirtschaft haben.

Die Jahresmitteltemperatur wird entsprechend verschiedener Klimawandelszenarien bis zum Jahr 2050 zwischen 0,8 und 1,7 °C zunehmen im Vergleich zum Bezugszeitraum 1971–2000 (UM & LUBW 2012, KLIWA 2010). Hitzetage mit einer Maximaltemperatur von mindestens 30 °C dürf-ten dann sogar doppelt so häufig auftreten. Für das Neckar-Einzugsgebiet sind im Gegensatz zum Rhein-Einzugsgebiet geringere Klimawandel bedingte Veränderungen des Wasserhaushalts zu erwarten (KLIWA 2009, LUBW 2010 und 2011): Da die Winterniederschläge in Zukunft eher zunehmen werden, dürfte der Grundwasserstand, je nach tatsächlich eintretender Lufttempera-turzunahme, klimatisch bedingt nicht oder nur sehr wenig absinken. Die Niedrigwassersituation könnte sich jedoch infolge der Wechselwirkung zwischen erhöhter Lufttemperatur und erhöhter Wassernutzung (z.B. höherer Bewässerungsbedarf der Landwirtschaft, höherer Kühlwasserbedarf, höherer Trinkwasserbedarf) verschärfen.

Da alle Komponenten des Wasserkreislaufs eine hohe Sensitivität gegenüber den Veränderungen des Klimas zeigen, sind die Energie- und Wasserwirtschaft hoch vulnerablen Bereiche in Deutsch-land (Rothstein & Halbig 2010, Zebisch et al. 2005). Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, Strate-gien z.B. für den Umgang mit einem veränderten Auftreten von Hoch- und Niedrigwasserereignis-sen sowie einer veränderten Wasserverfügbarkeit zu entwickeln und umzusetzen. Von zentraler Bedeutung ist hierbei die Berücksichtigung und Einbeziehung aller Sektoren, die aufgrund ihrer Bedeutung für den Wasserhaushalt Einfluss auf das zukünftige Wasserdargebot oder den zukünftigen Wasserverbrauch haben. Sektoren, welche Potenzial im Bereich der Anpassung aufweisen, müssen ebenfalls berücksichtigt werden. Um die Auswirkungen des Klimawandels möglichst gut zu kompensieren, beschloss die Bundesregierung bereits 2005 die Entwicklung einer Anpassungs-strategie, welche die Anpassungsoptionen der einzelnen Sektoren bündelt.

### 1.2.2 ENERGIEWIRTSCHAFT

Mittlerweile liegen zahlreiche Forschungsergebnisse zu den Auswirkungen des Klimawandels auf den Energieverbrauch (z.B. Mimler et al. 2009; Mimler & Rothstein 2007), sowie die Energiebereitstellung und -versorgung in Baden-Württemberg (z.B. Rothstein & Parey 2011; Rothstein 2007) vor. Thermische Kraftwerke (z.B. Kohle, Kernenergie) benötigen das Kühlwasser für die Abfuhr der Kondensationswärme des Speisewasserkreislaufs. Die Wärme wird hierbei indirekt an das Flusswasser und, bei Einsatz eines Kühlturms, an die Luft abgegeben. Werden wasserrechtlich vorgegebene Grenzwerte (Wassertemperatur: 28 °C bzw. Niedrigwasserabfluss am Pegel Lauffen: 25 m<sup>3</sup>/s) erreicht, muss die Kühlwasserentnahme und damit die Kraftwerksleistung gedrosselt werden. In der Vergangenheit wurde der Wassertemperatur-Grenzwert am Neckar beispielsweise in den Hitzesommern 2003 und 2006 erreicht, womit es zu Leistungseinschränkungen der thermischen Kraftwerke kam und die Gefahr eines Energie-Versorgungsengpasses bestand (Strauch 2011).

Der Wirkungsgrad thermischer Kraftwerke ist dann am höchsten, wenn die Differenz der Dampfeintritts- und Dampfaustritts-Temperatur vor und nach der Turbine möglichst hoch ist. Die Dampfaustritts-Temperatur wird durch die Temperatur des Kühlwassers bestimmt. Folglich ist mit einer starken Zunahme der Hitzetage und damit verbundenen höheren Kühlwasser-Temperaturen eine Wirkungsgradverringerung der thermischen Kraftwerke verbunden (Rothstein et al. 2008a und 2008b und Rothstein & Parey 2011).

Auch für Laufwasserkraftwerke ist die Leistung bei Niedrigwasser geringer als bei Mittel- oder Hochwasser: Trotz steigender Fallhöhe nimmt die Elektrizitätsproduktion mit sinkenden Abflüssen wegen der geringeren Durchflussmenge ab (Rothstein & Halbig 2010).

Niedrige Flusswasserstände schränken die Schifffahrt und damit den Kohletransport ein. Durch die 27 Staustufen am Neckar kann der Niedrigwasserabfluss i.d.R. bislang gut gestützt werden, so dass es eher selten zu eingeschränkten Fahrverhältnissen kommt. Der Neckar kann jedoch nur über den Rhein erreicht werden, an dem es in den vergangenen Jahren infolge von Niedrigwasser mehrmals zu Transportengpässen kam (Scholten & Rothstein 2012).

### 1.2.3 WASSERWIRTSCHAFT

Der Einfluss unterschiedlicher Landnutzungen bzw. Bodenbedeckungen auf Infiltration, Grundwasserneubildung und Oberflächenabfluss sowie letztendlich auf die Abflussmengen im Vorfluter ist prinzipiell bekannt. Eine Waldbedeckung wirkt sich zum Beispiel abflussvermindernd aus, während Bodenversiegelung tendenziell einen erhöhten und beschleunigten Oberflächenabfluss in Richtung Vorfluter zur Folge hat. Auf der Ebene unterschiedlicher Anbausysteme in der Landwirtschaft wiederum sind solche mit höherem Wasserbedarf aus Niederschlag oder Bewässerung von solchen mit geringerem zu unterscheiden.

Vor dem Hintergrund des Klimawandels wurde bereits 1999 von den Ländern Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz sowie dem Deutschen Wetterdienst das Projekt KLIWA ([www.kliwa.de](http://www.kliwa.de)) ins Leben gerufen. Weitere große Verbundprojekte mit ähnlicher Zielsetzung sind z.B. GLOWA-Elbe ([www.glowa-elbe.de](http://www.glowa-elbe.de), z.B. Wechsung et al. 2006) oder GLOWA-Danube ([www.glowa-danube.de](http://www.glowa-danube.de), z.B. Barthel et al. 2008). Das deutschlandweit angelegte UBA-Projekt WASKlim ([www.wasklim.de](http://www.wasklim.de)) hatte die Entwicklung wasserwirtschaftlicher Anpassungsstrategien an den Klimawandel zum Ziel (Scherzer et al. 2010). In KliWEP wurden die Auswirkungen der für Sachsen

prognostizierten Klimaveränderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt der Parthe untersucht (Pöhler et al. 2007, Pöhler et al. 2008).

Ziel von KLIWA ist es, die bisherigen Veränderungen des Klimas und des Wasserhaushalts zu ermitteln und die Auswirkungen möglicher Klimaveränderungen auf den Wasserhaushalt abzuschätzen. Hierzu bedarf es des Einsatzes von flächendetaillierten numerischen Einzugsgebietsmodellen, die auf physikalischer Grundlage auch für größere Gebiete und Regionen Aussagen zum künftigen hydrologischen Regime treffen können. In Baden-Württemberg (LUBW) und Rheinland-Pfalz (LUWG) wird hierzu das Wasserhaushaltsmodell LARSIM (Bremicker 2000, Ludwig und Bremicker 2006) verwendet. Die zeitliche Auflösung der KLIWA-Modelle beträgt 1 Tag bei einem räumlichen Raster von 1km x 1km.

In Baden-Württemberg wurden bereits Studien zur gegenwärtigen und zukünftigen Entwicklung von Trockenperioden, Niedrigwasser und Hitzewellen auslösenden kritischen Wetterlagen erstellt. Danach haben solche kritischen Wetterlagen in den vergangenen Jahrzehnten hoch signifikant zugenommen. Gemäß den regionalen Klimaprojektionen werden diese kritischen Wetterlagen weiter zunehmen (Caspary 2007, 2009, KLIWA 2010a, KLIWA 2010b). Wasserhaushaltssimulationsberechnungen in Baden-Württemberg wurden auf der Grundlage der regionalen Klimaprojektionen nach Enke, WETTREG 2006, WETTREG SÜDWEST 2009 (CEC 2009) und COSMO-CLM 4.2 durchgeführt. Eine Analyse der daraus sich ergebenden Wassernutzungskonflikte steht noch aus.

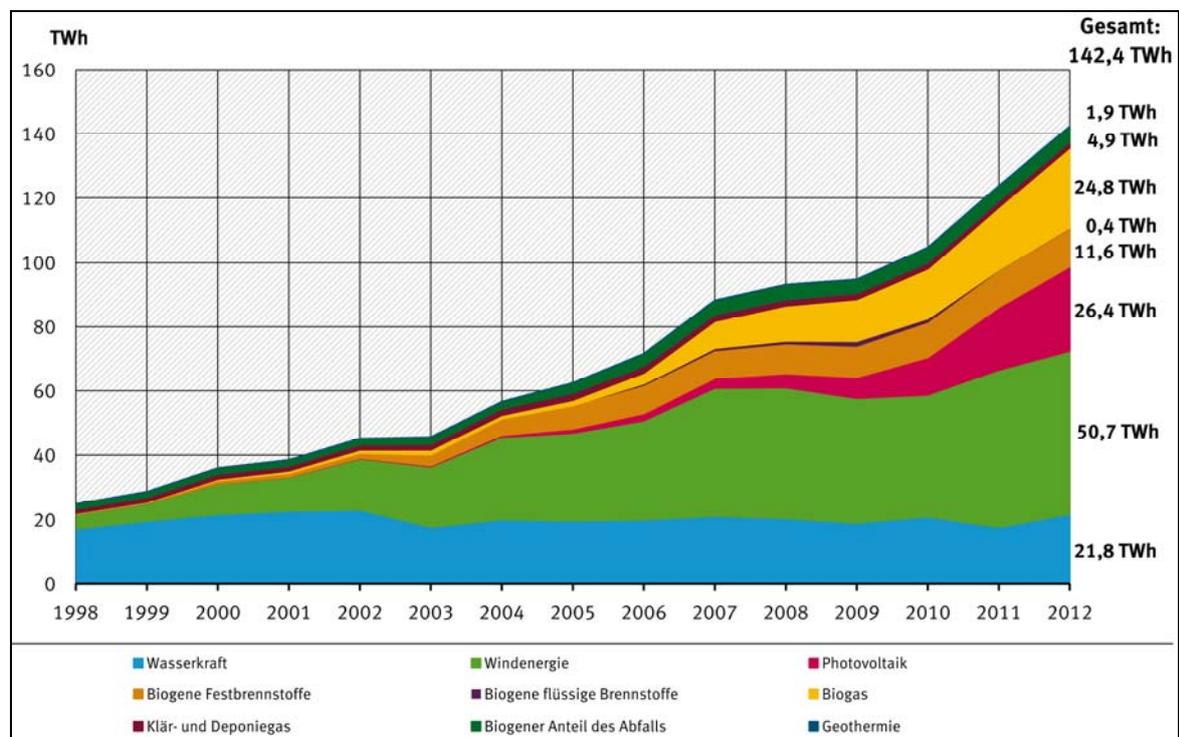


Abbildung 2: Entwicklung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien seit 1998 (BMU, 2013).

#### 1.2.4 ENERGIEWENDE

Die Nuklearkatastrophe von Fukushima vom März 2011 und die dadurch verursachten Umbrüche in der Energiepolitik veränderten die energiewirtschaftliche Perspektive drastisch. Laut baden-württembergischen Landesumweltminister Untersteller (Pressemitteilung vom 09.01.2012) sollen

in Baden-Württemberg bis zum Jahr 2020 rund 38% des Energiebedarfs durch Erneuerbare Energien erzeugt werden. In der letzten Dekade hat sich der Anteil der erneuerbaren Energien am deutschen Strommix mehr als verdreifacht (Abbildung 2). Ende 2013 lag der Anteil der Erneuerbaren Energien bundesweit bei 25,6% (Abbildung 3). Für die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Klimawandel und zukünftiger Wassernutzungskonkurrenz ist die Berücksichtigung der Energiewende folglich von großer Bedeutung.

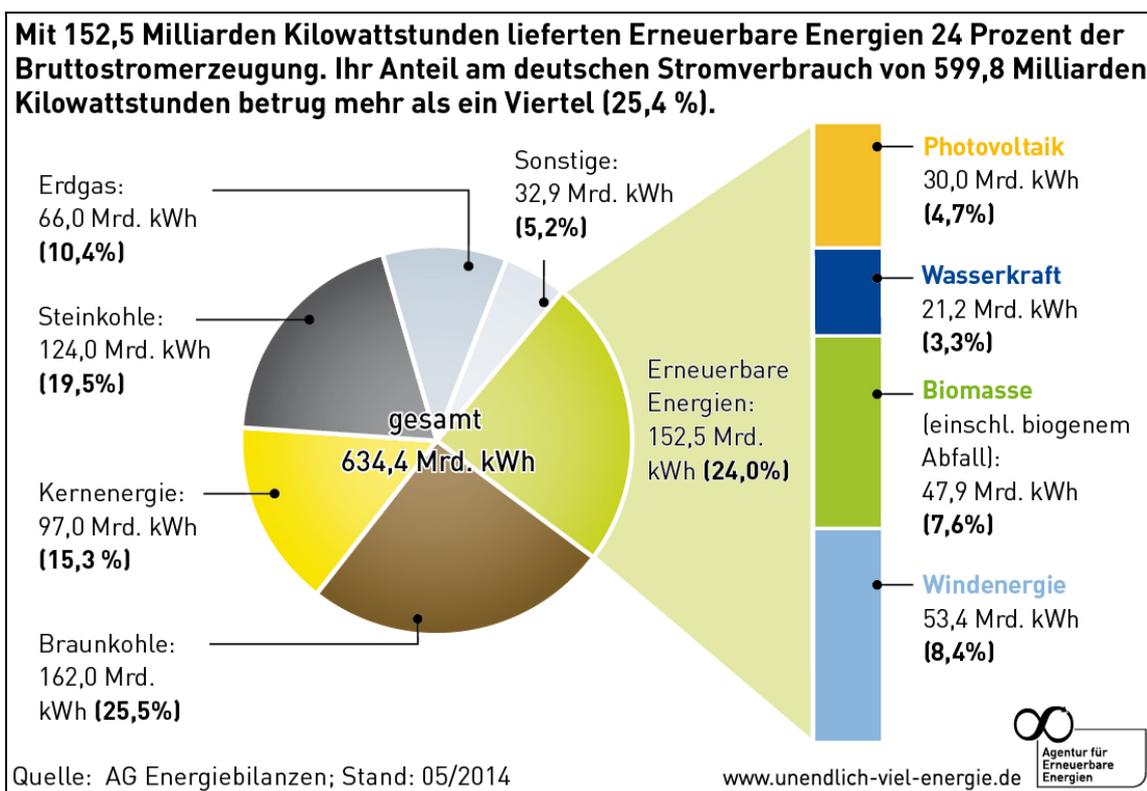


Abbildung 3: Strommix in Deutschland Ende 2013 mit Anteilen der erneuerbaren Energien (Agentur für Erneuerbare Energien 2014). Analyse der Wasserhaushaltssituation am Neckar

## 2 Analyse der Wasserhaushaltssituation am Neckar

In der ersten Projektphase wurden vorhandene Studien und Publikationen zu Auswirkungen des Klimawandels und der Energiewende auf den Wasserhaushalt (BMBWS 2007, Hennegriff et al. 2008, BMBVS 2009, KLIWA 2009, Scherzer et al. 2010, LUBW 2010, LUBW 2011, UM & LUBW 2012) und die Energiewirtschaft (LfU 2005, Rothstein et al. 2008a, Rothstein et al. 2008b, Rothstein & Halbig 2010, Greis et al. 2011, Rothstein & Parey 2011, Strauch 2011, Scholten & Rothstein 2012) untersucht, gesichtet und hinsichtlich ihrer Relevanz für Baden-Württemberg ausgewertet. In zahlreichen dieser Studien wurde primär die Veränderung der Klimagrößen Niederschlag und Lufttemperatur untersucht und die anthropogenen Einflussfaktoren (z.B. Entwicklung

der Trink- und Brauchwassernutzung) nur am Rande betrachtet. Letztere sind jedoch für die Abflussverhältnisse am Neckar und damit für zukünftige Wassernutzungskonkurrenzen von entscheidender Bedeutung.

## 2.1 WASSERHAUSHALT, WASSERVERBRAUCH UND WASSEREINLEITUNGEN AM NECKAR

Eine Recherche zu rezenten Abflussverhältnissen während Trockenwetterlagen gibt Einblick in die bisher aufgetretenen Niedrigwassersituationen (vgl. Tabelle 1), sowie konkreten Zahlenwerten zur Einleitung (Tabelle 2) und Verbrauch von Wasser (Tabelle 3) für den Neckar. Diese Daten stellen die Grundlage für die Szenarien zukünftiger Wassernutzungskonkurrenzen dar. Auffällig ist hierbei, dass die Abwassereinleitung einen großen Anteil zum Niedrigwasserabfluss des Neckars liefert (Tabelle 2).

Tabelle 1: Niedrigwasserverhältnisse am Neckar (NNQ: absolut niedrigster Abfluss, MNQ: mittlerer Niedrigwasserabfluss)

Pegel und Kenngröße	Abflussmenge [m³/s]	Quelle
Plochingen NNQ (26.10.1985)	8,2	HVZ Baden-Württemberg
Lauffen NNQ (21.09.2003)	16,7	HVZ Baden-Württemberg
Rockenau NNQ (21.08.1993)	18,4	HVZ Baden-Württemberg
Plochingen MNQ	10,8	HVZ Baden-Württemberg
Lauffen MNQ	25,7	HVZ Baden-Württemberg
Rockenau MNQ	35,7	HVZ Baden-Württemberg

Tabelle 2: Fernwassereinleitungen in den Neckar

Neckarabschnitt	Einleitungsmenge [m³/s]	Quelle
bis Plochingen	1,4	LfU (2001)
bis Ziegelhausen	6,6	LfU (2001)
bis Ziegelhausen	6,3	Bremicker (2000)

Tabelle 3: Wasserverbrauch durch Kraftwerkskühlung und landwirtschaftliche Beregnung (auf verschiedenen Quellen basierende vorläufige Schätzwerte)

Verbraucher	Wassermenge [m³/s]	Quelle
Kraftwerkskühlung	0,9 m³/s	Schätzwert nach verschiedenen mündlichen Aussagen
Beregnung Kreis Ludwigsburg <sup>1)</sup>	0,3 m³/s	Schätzwert nach Anfrage an Landratsamt Ludwigsburg
Beregnung Kreis Heilbronn <sup>1)</sup>	0,6 m³/s	Schätzwert nach Anfrage an Landratsamt Heilbronn

<sup>1)</sup> Entnahme aus dem Grundwasser und öffentlicher Wasserversorgung

Bei Niedrigwasser setzt sich der Abfluss des Neckars aus Grundwasser (inkl. des Zustroms über die Seitenflüsse) und dem Abwasser der Metropolregion Stuttgart zusammen. Dieses Abwasser stammt originär nicht aus dem Neckar-Einzugsgebiet sondern wird diesem über Fernwasserleitungen (Bodensee-Wasserversorgung und Landeswasserversorgung) zugeführt. Einen Überblick über die Wasserzu- und -abflüsse am Neckar ist in Abbildung 4 dargestellt.

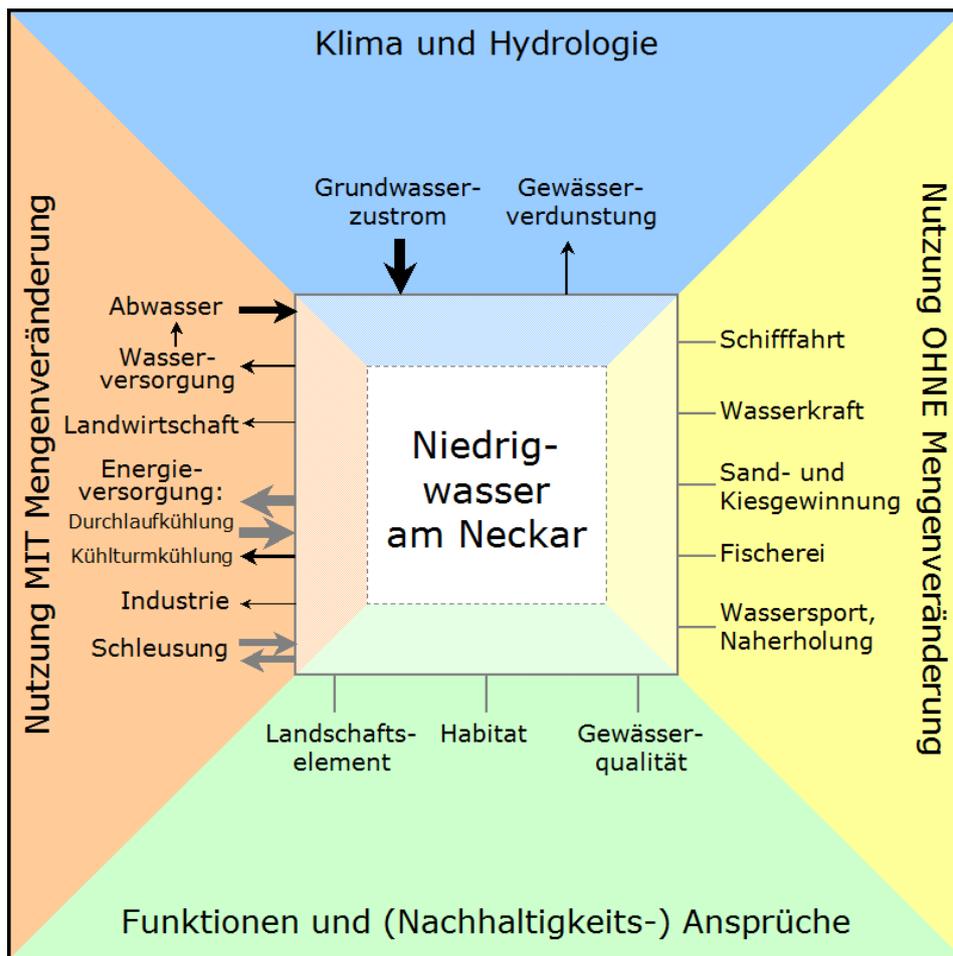


Abbildung 4: Einflussfaktoren auf den Niedrigwasserstand am und Ansprüche an den Neckar (schwarze Pfeile: Mengenzunahme bzw. -abnahme durch Zustrom / Einleitung bzw. Verdunstung / Entnahme; graue Pfeile: Mengenverlagerung) (Johst 2013).

Zur Feststellung der Relevanz verschiedener Wassernutzergruppen am Neckar, sowie ihres jeweiligen Einflusses auf die Niedrigwassersituation, wurden von Oktober 2012 bis Januar 2013 drei Wassernutzungsgruppen entlang des Neckars (Landwirtschaft, Klärwerke und Industrie) zur aktuellen und zukünftigen Wassernutzung befragt. Die vierte wichtige Wassernutzungsgruppe am Neckar stellt die Energieerzeugung dar. Die anonymisierte Befragung erfolgte mittels dreier Online-Fragebögen, die in der Cloud-Software „SoSciSurvey“ ([www.soscisurvey.de](http://www.soscisurvey.de)) erstellt wurden und sich in acht bis zehn Minuten beantworten ließen.

## 2.2 BEFRAGUNG VON LANDWIRTSCHAFTLICHEN BEWÄSSERUNGSBETRIEBEN

Das Neckarbecken zwischen Stuttgart und Heilbronn zählt in Baden-Württemberg zu den trockenere Regionen. Infolge des warmen Klimas, des flachwelligen Reliefs und der hochwertigen Lößlehmböden wird hier großflächig Ackerbau betrieben und an Hängen Wein angebaut. Die Sommerniederschläge reichen jedoch oft nicht aus, um den Wasserbedarf der Pflanzen zu decken. In den Landkreisen Esslingen, Ludwigsburg und Heilbronn ist der Anteil der Bewässerungsbetriebe mit 10–20% aller Betriebe relativ hoch (Schaber 2012). Die Bewässerung ist oft unverzichtbar, da beispielsweise Gemüse und Obst unter einem qualitativen Mindeststandard gar nicht verkäuflich sind (Mastel 2002).

Zur Abschätzung des aktuellen und zukünftigen Wasserbedarfs seitens der Landwirtschaft sowie zur Bewertung möglicher Anpassungsmaßnahmen wurde eine Befragung von Bewässerungsbetrieben durchgeführt. Hierbei wurde nach der bewässerten Fläche, den Kulturarten, dem Bewässerungsverfahren, der Wasserherkunft und der Wassermenge gefragt. Zudem war anzugeben seit wann, in welchen Monaten und nach welcher Entscheidungsgrundlage bewässert wird. Des Weiteren sollten Erfahrungen mit Wasserknappheit und Wassernutzungsverböten angegeben werden. Eine Einschätzung des zukünftigen Wasserbedarfs sowie eine Bewertung möglicher Anpassungsmaßnahmen an Wasserknappheit ergänzten den Fragebogen.

### **2.2.1 KONZEPTION UND DURCHFÜHRUNG DER BEFRAGUNG**

Der Online-Fragebogen bestand aus 16 nach Relevanz geordneten Punkten. Es handelte sich einerseits um Freitextfragen, in denen das Erfahrungswissen der Landwirte gefordert wurde, andererseits um Auswahlfragen mit vorgegebenen möglichen Antworten. Bei der Erhebungsmethodik und Fragenformulierung wurden bisherige klimawandelbezogene Befragungen (z.B. Stölzle & Stahl 2010, Pechan et al. 2011 und Scholten & Rothstein 2012) sowie die Erhebungsbögen des Statistischen Landesamts (Nacherhebung zur Bewässerung 2010) hinzugezogen. Die Fragen ließen sich anonymisiert in etwa 8 bis 10 Minuten beantworten.

Die Kreisbauernverbände Heilbronn/Ludwigsburg und Esslingen sowie vier regionale Gemüsegroßhändler wurden um die Weiterleitung des Befragungsaufrufs an Ihre Mitglieder bzw. Erzeuger gebeten. Zudem wurden acht Gemüseanbaubetriebe direkt angeschrieben.

An der Befragung beteiligten sich 48 Bewässerungsbetriebe, vorwiegend aus den Landkreisen Heilbronn und Ludwigsburg. Laut Statistischem Landesamt haben in den beiden Landkreisen etwa 290–580 Betriebe die Möglichkeit zur Bewässerung. Folglich dürfte die Teilnahmequote zwischen 8% und 17% liegen. Die Auswahlfragen wurden von nahezu allen Befragungsteilnehmern beantwortet, die Freitextfragen von etwa der Hälfte.

### **2.2.2 AKTUELLE BEWÄSSERUNGSPRAXIS UND -MENGE**

Den Befragungsergebnissen zufolge wird im Mittel pro Betrieb eine Fläche von 15 ha bewässert. Die größte bewässerte Fläche umfasst 150 ha, die kleinste 0,15 ha. Ob die angegebene Bewässerungsfläche mit einer fest installierten oder einer mobilen Bewässerungsanlage ausgestattet ist, wurde nicht abgefragt. Bei fest installierten Bewässerungsanlagen kann die gesamte Fläche zeitgleich versorgt werden, bei mobilen Anlagen werden hingegen meist Teilflächen hintereinander bewässert.

Von den Befragten werden Gemüse, Kartoffeln, Zuckerrüben, Reben sowie Beeren-, Kern- und Steinobst bewässert (Abbildung 5). Bei Nennung mehrerer Kulturarten wurde die bewässerte Fläche auf die genannten Kulturarten zu gleichen Teilen aufgeteilt. An der Befragung beteiligten sich relativ viele Weinbaubetriebe: 20 der 48 Teilnehmer bewirtschaften ausschließlich Rebflächen.

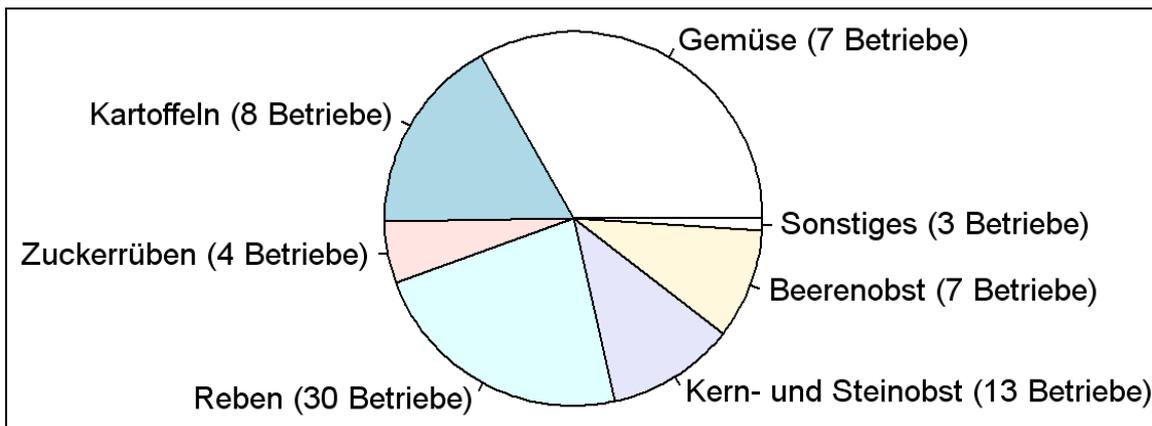


Abbildung 5: Bewässerte Kulturarten mit ungefährem Flächenanteil und Anzahl der Betriebe (Johst und Rothstein 2013).

Wann und wie lange bewässert wird, entscheiden die Landwirte größtenteils eigenständig anhand von Trockenheitsindikatoren (z.B. Bodenfeuchtemessungen, Pflanzenzustand, „Gefühl“) sowie entsprechend der Wetterlage und der Wettervorhersage. Gemeinschaftlich genutzte oder amtliche Entscheidungshilfen wurden nur selten genannt (z.B. Amtlicher Rebschutzdienst, Obstbauberatung, Bewässerungsgemeinschaft, Agrowetter Beregnungsberatung des Deutschen Wetterdienstes).

Die bewässerungsintensivsten Monate sind Juni, Juli und August, wobei für Gemüse, Kartoffeln und Beeren auch bereits im Mai und für Rebflächen auch noch im September eine intensive Bewässerung notwendig sein kann.

Die Bewässerung erfolgt in den meisten Fällen (93%) bodennah durch die sogenannte Tröpfchen- bzw. Wurzelbewässerung. 35% der Befragten, primär Gemüse- und Kartoffelanbaubetriebe, praktizieren zudem bzw. in drei Fällen ausschließlich eine Über-Kopf-Beregnung (z.B. durch Sprinkleranlagen). Reben und Obstbäume werden ausschließlich durch Tröpfchenbewässerung versorgt.

Unter den befragten Betrieben nutzen 17 Betriebe (36%) ausschließlich Grundwasser, sieben Betriebe (15%) ausschließlich Fluss- oder Seewasser, drei kleine Betriebe (6%) bewässern ausschließlich mit Wasser aus dem öffentlichen Versorgungsnetz und zwei Betriebe (4%) haben die Möglichkeit das Beregnungswasser komplett aus betriebseigenen Zisternen oder Speicherbecken zu entnehmen. Die restlichen 18 Betriebe (38%) nutzen mehrere Wasserherkunftsquellen. Mengemäßig stammt das Bewässerungswasser zu etwa 43% aus dem Grundwasser, zu 43% aus Flüssen und Seen, zu etwa 11% aus betriebseigenen Speichern und zu etwa 3% aus der öffentlichen Wasserversorgung (Abbildung 6).

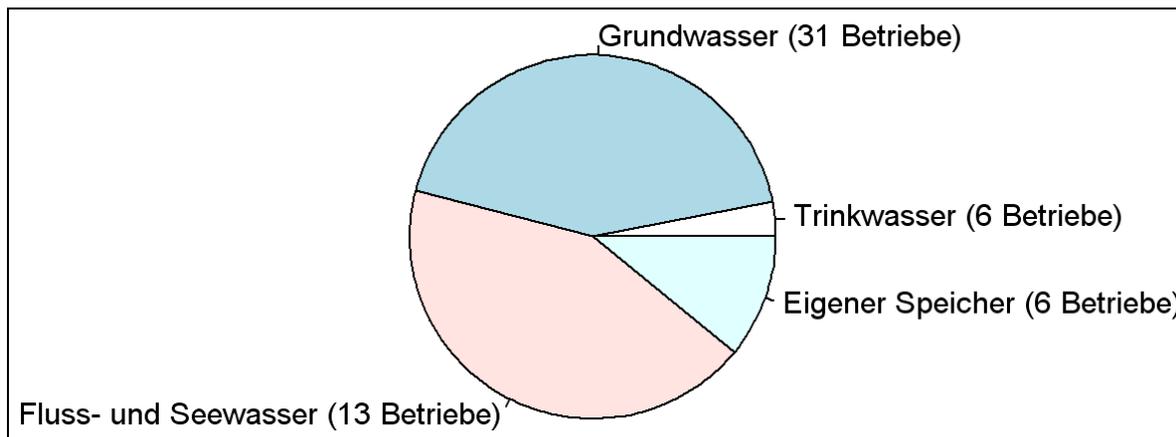


Abbildung 6: Herkunft des Bewässerungswassers und ungefährer Mengenanteil (Johst und Rothstein 2013).

Die maximalen Bewässerungsmengen liegen zwischen 6 und 1200 m<sup>3</sup>/d bzw. zwischen 1 und 160 m<sup>3</sup>/h und im Mittel bei 240 m<sup>3</sup>/d bzw. 40 m<sup>3</sup>/h. Werden die einzelnen Mengenangaben auf die zugehörige Beregnungsfläche bezogen, so ergibt sich rechnerisch ein Mittelwert von 20 mm/h, der jedoch wegen der nicht abgefragten Mobilität des Bewässerungssystems nur als theoretisch angesehen werden kann.

### 2.2.3 ERFahrungen mit WASSERKNAPPHEIT UND ZUKUNFTSEINSCHÄTZUNGEN

Gut die Hälfte der Befragten begann mit der systematischen Bewässerung zwischen 1997 und 2012. Die meisten Bewässerungssysteme wurden im Trockenjahr 2003 aufgebaut (Abbildung 7). 78% der Befragten gaben an, dass ihr Wasserbedarf in den vergangenen 15 Jahren gestiegen ist, 18% stellten keine Veränderung fest und bei 4% ist der Wasserbedarf gesunken.

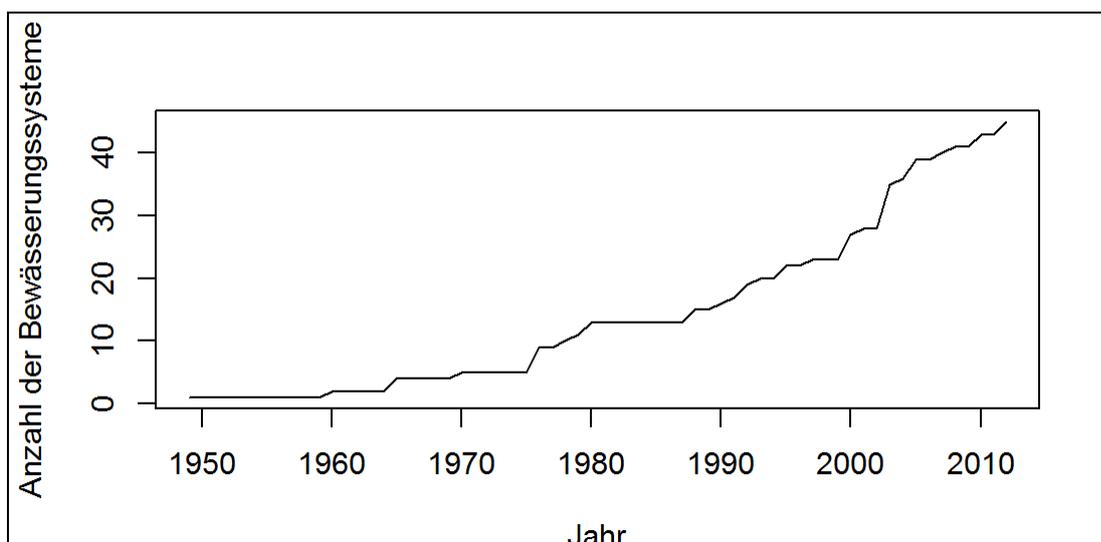


Abbildung 7: Zunahme der Bewässerungssysteme in den Jahren 1949–2012 (Johst und Rothstein 2013).

Die Einflussfaktoren hinsichtlich des Wasserbedarfs für die kommenden 20 Jahren wurden als Freitext abgefragt: Laut 67% der Befragten dürfte der zukünftige Wasserbedarf durch das Klima, die Jahresniederschlagsverteilung bzw. die sommerliche Witterung beeinflusst werden. Für 25% ist der

zukünftige Wasserbedarf von der betrieblichen Entwicklung (Anbaufläche, Intensivierung und Strukturwandel) abhängig, wobei einige Teilnehmer konkrete Pläne zur Vergrößerung der Anbauflächen und dem Ausbau der Bewässerungssysteme beschrieben. 19% gaben an, dass ihr Wasserbedarf von der Nachfrage und der Preisentwicklung für die angebauten Kulturen abhängt. Lediglich zwei Befragungsteilnehmer (4%) erwähnten die eingesetzte Bewässerungstechnik als bedeutsam hinsichtlich ihres zukünftigen Wasserbedarfs.

Der Großteil der Befragten war bisher nicht von Wassernutzungs-Einschränkungen (z.B. durch wasserbehördliche Entnahmeverbote) betroffen: für 10% war eine Bewässerung in den vergangenen 15 Jahren etwa ein bis zwei Mal längere Zeit nicht möglich, für 4% bestanden etwa drei bis zehn Mal Wassernutzungs-Einschränkungen. Nahezu alle Befragten wiesen auf Ertrags- und Qualitätseinbußen bei einer gegebenenfalls eingeschränkten Bewässerung hin. Im Kartoffel-, Gemüse- und Obstanbau sind vertraglich festgelegte Mengen termingerecht und mit strikten Qualitätsvorgaben (Form, Optik, Eigenschaften) zu liefern. Eine Verringerung der Produktionsmenge und -qualität würde somit nicht nur zu Umsatzeinbußen sondern eventuell auch zur Auslistung der Produkte im Handel bzw. zur Vertragskündigung des Vermarktungspartners führen. Sieben Betriebe gaben an, dass eine eingeschränkte Wassernutzung die Existenz bedrohen oder den Komplettausfall der Produktion nach sich ziehen würde.

Bei häufigerer, länger anhaltender Trockenheit würden etwa drei Viertel der Betriebe ihr Bewässerungssystem aus- oder umbauen (Abbildung 8). Ebenso viele Betriebe würden jedoch zudem oder stattdessen Ertragseinbußen in Kauf nehmen. Etwa 40% müssten die Preise erhöhen und etwa 38% würden die Betriebsstruktur verändern. Infolge häufigerer Trockenzeiten würden nur etwa 12% der Betriebe andere Kulturarten anbauen.

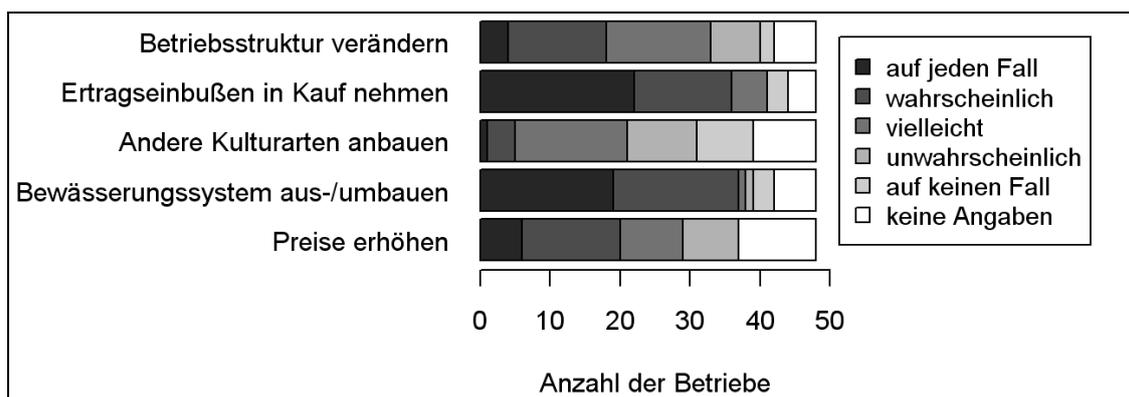


Abbildung 8: Reaktion der Bewässerungsbetriebe auf häufigere Trockenzeiten, z.B. mehrere Hitzesommer hintereinander (Johst und Rothstein 2013).

Zur Anpassung an Wasserknappheit wurden den Befragten fünf Maßnahmen vorgestellt: Den Einsatz von wassersparender Technologien bewerten 56% als (eher) gut umsetzbar (Abbildung 9). Etwa 38% halten den Bau von Wasserspeichern für (eher) gut realisierbar. Die Verbesserung des Wassernutzungsmanagements, den Anbau von Kulturarten mit weniger Wasserbedarf und eine Marktpreis gesteuerte Wasserverbrauchsregulierung bewerten die meisten Befragten als eher schlecht umsetzbar.

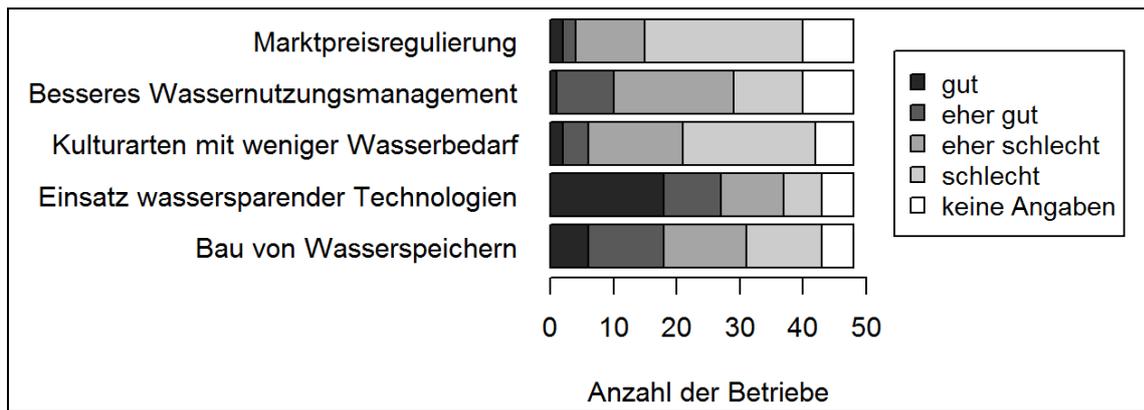


Abbildung 9: Bewertung der Umsetzbarkeit von Maßnahmen zur Anpassung an Wasserknappheit (Johst und Rothstein 2013).

#### 2.2.4 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG

Die relativ knappen Wasserreserven im Neckargebiet stellen ein Risiko dar. Die hohe Teilnahmequote an der Onlinebefragung weist darauf hin, dass die Landwirte sich dieses Risikos bewusst sind. Den Befragungsergebnissen zufolge ist zukünftig mit einem Ausbau der Bewässerung für Gemüse, Kartoffeln, Obst und Reben zu rechnen. Ein Großteil der Befragten nutzt bereits das wassersparende Verfahren der Tröpfchenbewässerung. Den Einsatz weiterer wassersparender Technologien und die Wasserspeicherung hält etwa die Hälfte der Befragten für gut realisierbar. Veränderungen hinsichtlich der angebauten Kulturarten und der Betriebsstruktur werden hingegen als schlechter umsetzbar angesehen.

Im Gegensatz zur Forstwirtschaft kann sich die Landwirtschaft durch die oftmals nur einjährige Fruchtfolge relativ schnell an den Klimawandel anpassen. Mit dem Klimawandel sind für die Landwirtschaft gleichermaßen Chancen und Risiken verbunden (Schulz & BioConsult 2011). Folgende Maßnahmen könnten dazu beitragen, die Wassernutzung zu optimieren, Nutzungskonflikte zu verringern und den Wasserbedarf der Landwirtschaft nachhaltig zu sichern:

**Bodenschonende Bearbeitung und Bodenpflege:** Einige Cross Compliance Verpflichtungen (z.B. Erosionsschutz, Humuserhalt) gehen mit einer höheren Infiltration, einer verstärkten Grundwasserneubildung und einer höheren Bodenwasserspeicherkapazität einher und sind folglich auch als Anpassungsmaßnahmen an zunehmende Trockenheit zu sehen. An Rebhängen lässt sich die Bodenwasserversorgung durch eine Bodenabdeckung mit grobem und langsam verrottbarem Material (z.B. Holzhäcksel, Rindenmulch) deutlich verbessern (Prior 2007).

**Wasserspeicherung im regenreichen Frühjahr:** Durch Rücknahme oder Umbau von Drainagesystemen sowie eine Ableitung des Wassers von Wegen in die Fläche erhöht sich die Bodenfeuchte und die Grundwasserneubildung. In Hochwasserzeiten könnte Flusswasser entnommen und gespeichert werden.

**Anbau trocken- und hitzeresistenter Sorten:** Die Anbaumöglichkeit wärmeliebender Rebsorten ist eine Chance für innovative Winzer.

Finanzielle Anregung zur wassereffizienten Bewirtschaftung (z.B. Staffelung des Wasserentnahme-Entgelts): Im Kartoffelanbau sind die Kosten der Tröpfchenbewässerung beispielsweise wegen des großen Arbeitsaufwandes beim Verlegen der Schläuche höher als die Einsparung durch geringeren Wasserverbrauch (Schoellkopf 2011).

Ausbau der Bewässerungsberatung: Aktuelle Forschungsergebnisse, neue Technologien und Erfahrungen aus anderen Beregnungsregionen sollten von zentraler Stelle recherchiert und an die Landwirte weitergegeben werden. Das ausgefeilte Beregnungsberatungssystem des Oberrheingraben könnte beispielsweise bis in den Neckarraum erweitert werden.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass der Aufbau und laufende Betrieb eines Bewässerungssystems mit erheblichen Kosten verbunden ist, die von den Landwirten nur dann investiert werden wenn diese Kosten wieder erwirtschaftet werden können. Bei der Bewässerung geht es weniger um eine Gewinnsteigerung sondern mehr um eine dringliche Maßnahme zur Erhaltung der vielen landwirtschaftlichen Kulturen und Sicherung der erforderlichen Qualität und Menge.

### **2.3 BEFRAGUNG VON KLÄRWERKS BETREIBERN**

Die Befragung der Klärwerksbetreiber verlief zunächst unerwartet schleppend, da die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) sowie der Deutsche Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW, Bezirksgruppe Mittlerer Neckar) nicht bereit waren, einen Befragungsauftrag an Ihre Mitglieder weiterzuleiten. Somit musste die Kontaktaufnahme mit den Klärwerksbetreibern direkt, meist zunächst per Telefon erfolgen. Schließlich haben sich alle sechs der angefragten Klärwerksbetreiber an der Befragung beteiligt. Die Kernaussagen in den Antworten waren so eindeutig und einheitlich, dass von weiteren Telefonbefragungen abgesehen wurde. Alle Befragten gaben an, dass die Trockenwetter-Abwassermengen in Zukunft abnehmen werden, da einerseits der Fremdwasseranteil weiterhin sinken wird und andererseits der Wasserbedarf der Privathaushalte und der Industrie tendenziell weiter abnehmen wird. Diese Aussagen wurden durch einen Experten des Stuttgarter Hauptklärwerks (U. Schmidt, Gespräch am 11.04.2013) teilweise bestätigt: Die Stuttgarter Stadtentwässerung geht für die kommenden 20 Jahre jedoch davon aus, dass der Trockenwetter-Abwasseranteil gleich bleibt oder geringfügig abnimmt. Herr Schmidt hat zudem Zeitreihen der Abwassermengen der vier großen Stuttgarter Klärwerke für die Jahre 1997–2013 bereitgestellt.

### **2.4 BEFRAGUNG VON INDUSTRIELLEN WASSERNUTZERN**

Im Zuge der Befragung der industriellen Wassernutzer wurden 40 am Neckar angesiedelte Unternehmen per Email um die Teilnahme an der Online-Befragung gebeten. Zudem wurden 37 weitere Unternehmen telefonisch kontaktiert und zur Wassernutzung direkt befragt. An der Online-Befragung beteiligte sich leider keines der Unternehmen. Der Großteil der telefonisch befragten Betriebe entnimmt kein Wasser aus dem Neckar. Ein Kies- und Betonwerk entnimmt große Mengen Wasser aus tiefliegenden Grundwasserspeichern, die jedoch nicht mit dem Neckar in Kontakt stehen. Diejenigen Unternehmen, die vermutlich größere Mengen Neckarwasser nutzen (z.B. BASF, Daimler) waren nicht bereit, darüber Auskunft zu geben und verwiesen auf die Auskunfts-

pflicht der Landratsämter. Unsere dementsprechende Anfrage vom Juni 2012 bei den Landratsämtern Ludwigsburg, Esslingen und Heilbronn konnte jedoch wegen fehlender Bearbeitungskapazität nicht bearbeitet werden.

## 2.5 KÜHLWASSERBEDARF, REGENERATIVE ENERGIEN UND WASSERKRAFTNUTZUNG AM NECKAR

### 2.5.1 ENERGIEWENDE UND STROMERZEUGUNG IN BADEN-WÜRTTEMBERG

Mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz war im Jahr 2000 der Grundstein gelegt für einen massiven Ausbau von Biogas-, Photovoltaik- und Windkraftanlagen. In Baden-Württemberg stieg der Anteil der erneuerbaren Energieträger an der Stromerzeugung von 9% im Jahr 2004 auf 20% im Jahr 2011 (STALA 2012). Hierbei war der Anstieg der Photovoltaik-Stromerzeugung mit einer Zunahme von 0,2% auf 5,6% am größten, gefolgt von der Biomasse, deren Anteil von 1,5% auf 5,6% stieg. Der Bau von Windkraftanlagen verlief in Baden-Württemberg wegen planungsrechtlicher Restriktionen hingegen schleppend: Die Stromerzeugung durch Windkraft stieg zwischen 2004 und 2011 lediglich von 0,4% auf 1%. Ein im Mai 2012 beschlossenes neues Landesplanungsgesetz dürfte jedoch in den nächsten Jahren zu einem starken Windkraftausbau führen. Das Ausbauziel für Windkraft liegt bei 10%, für Photovoltaik bei 12% (Abbildung 10).

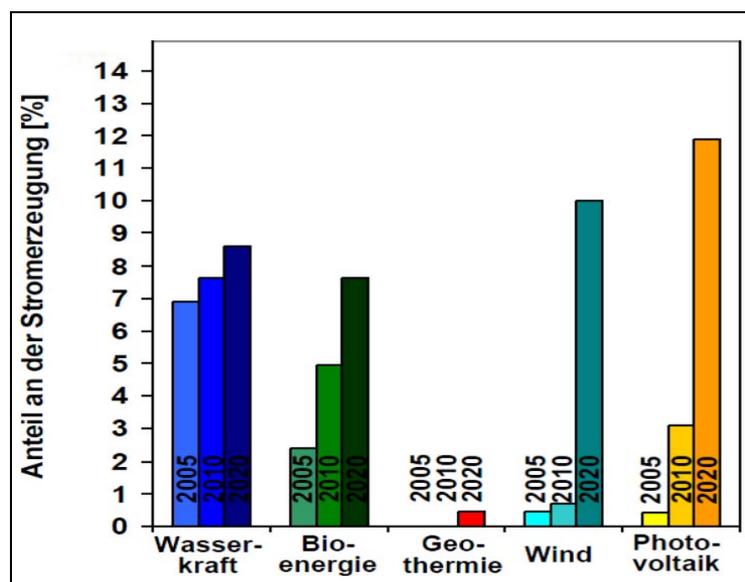


Abbildung 10: Ausbauziele der baden-württembergischen Landesregierung für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (verändert nach Staiß & Schmidt 2012)

Unter den konventionellen Kraftwerken in Baden-Württemberg produzieren die beiden Kernkraftwerke Phillipsburg 2 und Neckarwestheim 2 am meisten Strom. Nach Abschaltung der Kernkraftwerke Phillipsburg 1 und Neckarwestheim 1 ist der Anteil der Kernenergie an der baden-württembergischen Stromerzeugung von 50% (Mittelwert für die Jahre 2004–2010) auf etwa 40% (geschätzter Wert für 2012) gesunken. Gleichzeitig ist die importierte Strommenge um etwa 10% gestiegen (STALA & UM 2012). Mit Steinkohle wurden im Jahr 2011 rund 26%, mit Erdgas 5% des insgesamt in Baden-Württemberg produzierten Stroms generiert (STALA 2012).

Entsprechend des hohen Energiebedarfs der Metropolregion Stuttgart sind entlang des Neckars zahlreiche Kraftwerke zu finden: Auf einer Strecke von 86 Flusskilometern zwischen Plochingen und Heilbronn liegen sieben konventionelle Kraftwerksstandorte, die z.T. jeweils mehrere Blöcke vereinen. Den Löwenanteil an Strom liefern die Steinkohlekraftwerke Altbach-Deizisau (Abbildung 11) und Heilbronn sowie das Kernkraftwerke Neckarwestheim II mit einer installierten elektrischen Leistung von insgesamt 3600 MW. Zudem wird zwischen Plochingen und Mannheim an 29 Laufwasserkraftwerken Strom mit einer Maximalleistung von 102 MW erzeugt.



Abbildung 11: Kohlekraftwerk Altbach-Deizisau mit Hybridkühlturm (Foto: Johst 2013)

### 2.5.2 KÜHLWASSERVERBRAUCH THERMISCHER KRAFTWERKE

In thermischen Kraftwerken werden zur Kondensation des Abdampfes der Turbinen große Mengen an Kühlwasser benötigt. Gemäß LAWA (1991) werden vier weithin gebräuchliche Kühlverfahren unterschieden (Abbildung 12), die mit einem unterschiedlichen Wasserverbrauch und Wärmeeintrag ins Gewässer verbunden sind (Tabelle 4 & Tabelle 5): Bei der Durchlaufkühlung wird das kontinuierlich aus dem Fluss entnommene Wasser nach der Kühlung wieder vollständig in den Fluss zurückgeleitet. Die Flusswassererwärmung führt hier zu einer erhöhten Gewässerverdunstung. Zur Reduktion des Wärmeeintrags in das Gewässer kann der Kondensation im Ablauf ein Kühlturm nachgeschaltet werden. Diese sogenannte Ablaufkühlung ist mit einem höheren Wasserverbrauch durch Verdunstung und Tröpfchenauswurf verbunden. Bei der Umlaufkühlung wird das über den Kühlturm gekühlte Wasser wieder dem Kühlwasserkreislauf zugeführt, womit nochmals ein reduzierter Wärmeeintrag in das Gewässer, jedoch auch ein geringerer Kraftwerkswirkungsgrad und bei Verwendung eines Nasskühlturms ein höherer Wasserverbrauch verbunden ist. Durch Einsatz eines Hybridkühlturms anstelle eines Nasskühlturms ist die im Kühlturm verdunstende Wassermenge kleiner, da hier neben der Nasskühlung eine Trockenkühlung erfolgt: Das Kühlwasser wird zunächst auf Rohre verteilt, die durch ventilierende Luft gekühlt werden. Der Kühleffekt wird in Hybridkühltürmen somit auch durch Konvektion (Trockenkühlung) und nicht nur durch Verdunstung (Nasskühlung) erreicht.

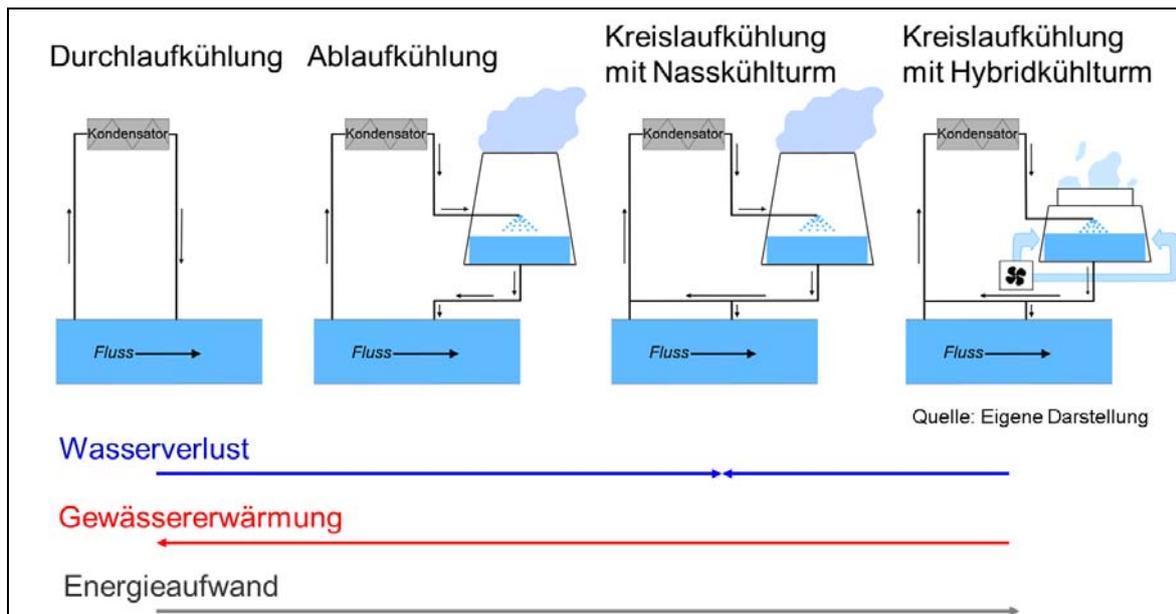


Abbildung 12: Wasserverlust, Gewässererwärmung und Energieaufwand bei verschiedenen Kraftwerkskühlformen (Johst 2013).

Die tatsächlichen Verdunstungsmengen hängen von den meteorologischen Bedingungen und dem aktuell gewählten Kühlbetrieb ab. Anlagen mit Umlaufkühlung können beispielsweise im Mischkühlbetrieb gefahren werden, bei dem nur ein Teil des Kühlwassers nach der Kühlung in den Fluss zurück geleitet wird und der andere Teil im Kühlwasserkreislauf verbleibt.

Die größten thermischen Neckar-Kraftwerke sind mit Kreislaufkühlsystemen ausgestattet, bei denen das Wasser in einem geschlossenen Kreislauf zirkuliert und nur bei Hinzuschalten eines Kühlturms Wasser durch Verdunstung verloren geht. Die beiden größten Kraftwerke Altbach-Deizasau und Neckarwestheim verfügen über Hybridkühltürme, bei denen deutlich weniger Wasser verdunstet als bei den verbreitet eingesetzten Naturzug-Kühltürmen (z.B. Heizkraftwerk Heilbronn). Die Kraftwerksbetreiber haben sich also bereits an die eingeschränkte Wassernutzungssituation am Neckar angepasst.

Tabelle 4: Mittlerer Wasserverbrauch [ $m^3/s$ ] durch Verdunstung im Kraftwerk und erhöhter Verdunstung im Gewässer bei verschiedenen Kühlarten bezogen auf 1000 MWeI (LAWA 1991)

Kühlverfahren	Konventionelle Kraftwerke	Kernkraftwerke
Durchlaufkühlung	0,25	0,40
Ablaufkühlung mit Nasskühlturm	0,33	0,52
Umlaufkühlung mit Nasskühlturm	0,37	0,59
Umlaufkühlung mit Hybridkühlturm <sup>1)</sup>	0,27	0,44

<sup>1)</sup> Annahme: Anteil Trockenkühlung = 30%

Tabelle 5: Benötigte Wassermengen (Kühl- und Brauchwasser) eines thermischen Kraftwerks für die Elektrizitätserzeugung. (Rothstein 2007 nach Wagner 2003; Kobus & Bürkle 1996; Efferz & Fichte 1984)

Verfahren	Wasserbedarf pro 1.000 MW Kraftwerksleistung	Verwendungszweck	Anmerkung
Wasser-Dampf-Kreisläufe	Einmalig: 1.000 bis 2.000 m <sup>3</sup> Wasser Laufender Verbrauch: 4 bis 10 m <sup>3</sup> /h Speisewasser	Füllung der Kessel bzw. des Kühlkreislaufs incl. der für Notfälle gespeicherten Mengen für Ausgleich von Wasser- und Dampfverluste	Verwendung von entsalztem Wasser, hohe Reinheitsanforderungen; ständige Reinigung während des Betriebs erforderlich.
Durchlaufkühlung	50 m <sup>3</sup> /s (bzw. 180.000m <sup>3</sup> /h)	Übertragung der Kondensationswärme im Kondensator auf das Kühlwasser	Geringere Qualitätsanforderungen als an das Speisewasser; dieses Verfahren gestattet höchste energetische Ausnutzung der zur Stromerzeugung eingesetzten Brennstoffe, da so größte Temperaturdifferenz zwischen „vorderem Ende“ und „hinterem Ende“ des Wasser-Dampf-Prozesses erreichbar ist.
Kühlturm	0,3 bis 0,6 m <sup>3</sup> /s (bzw. 1080 bis 2160 m <sup>3</sup> /h) Zusätzlich ggf. noch Ergänzungswasser: ca. 0,3 m <sup>3</sup> /s (bzw. 1080 m <sup>3</sup> /h) Wasserbedarf insges. also 0,3 bis 0,9 m <sup>3</sup> /s (bzw. 1080 bis 3240 m <sup>3</sup> /h)	Übertragung der Kondensationswärme im Kondensator auf das Kühlwasser Ergänzungswasser wird benötigt, damit sich die in den Gewässern mitgeführten Schwebstoffe und Salze im Kühlwasserkreislauf nicht zu stark anreichern.	Die Menge des Wassers, die durch den Kühlturm entweicht, hängt direkt von der momentanen Leistung des Kraftwerks ab (proportional).

### 2.5.3 MÖGLICHKEITEN EINER REGELENERGIEBEREITSTELLUNG DURCH LAUFWASSERKRAFTWERKE AM NECKAR

Bedingt durch den fortwährenden Ausbau erneuerbarer Energien steigt die Bedeutung von regelenergiebereitstellenden Technologien kontinuierlich an. Prinzipiell können bereits heute Laufwasserkraftwerke mittels einer Durchlaufspeicherung Regelenergie erzeugen. Unter rein technischen Gesichtspunkten ist eine Durchlaufspeicherung am Unteren Neckar möglich. Innerhalb einer Aufstauhöhe von 5 cm ist es seitens der Kraftwerksbetreiber durchaus möglich diese ohne erheblichen Mehraufwand zu realisieren.

Abbildung 13 stellt das zur Verfügung stehende Stauvolumen sowie die Bereitstellungsdauer sämtlicher Kraftwerke des Unteren Neckars bei einer Durchlaufspeicherung mit 5 cm Pegelschwankung dar. Die Berechnung der Bereitstellungsdauer beruht auf dem mittleren Niedrigwasserzufluss des Unteren Neckars (36,2 m<sup>3</sup>/s). Eine Durchlaufspeicherung in dem Gewässerabschnitt Gundelsheim bis Neckargmünd ist möglich. Die fehlende Bereitstellungsdauer an den Standorten Esslingen, Wieblingen und Schwabenheim ist durch die Restriktion des installierten Turbinendurchfluss zu erklären. An allen drei Kraftwerken ist das Schluckvermögen der Turbinen bereits bei einem mittleren Niedrigwasserzufluss erreicht, was eine Durchlaufspeicherung stark einschränkt. Auffällig bei der Betrachtung ist, dass ein großes Stauvolumen nicht zwingend mit einer hohen Bereitstellungsdauer einhergeht. Dies lässt sich durch den unterschiedlichen Ausbaudurchfluss der einzelnen Standorte erklären. Oberesslingen weist beispielsweise ein geeignetes Stauvolumen von 13.940 m<sup>3</sup> sowie einen Ausbaudurchfluss von 45 m<sup>3</sup>/s auf. Dem gegenübergestellt zeichnet sich Hirschhorn durch ein Stauvolumen von 900.014 m<sup>3</sup> und einen Turbinendurchfluss von 150 m<sup>3</sup>/s aus.

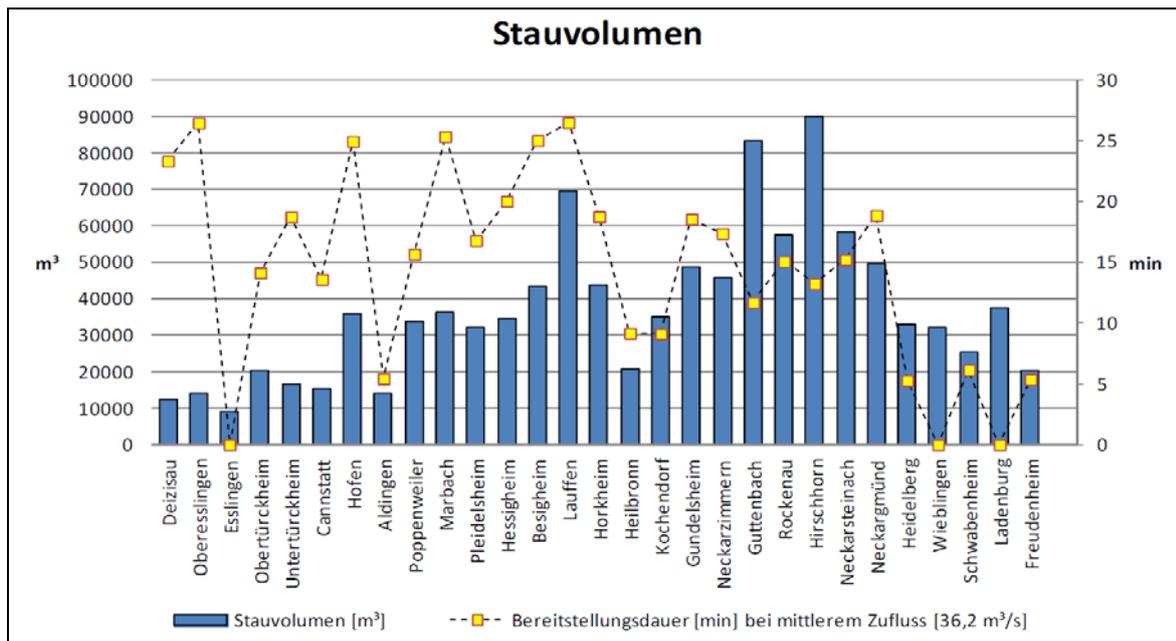


Abbildung 13: Stauvolumen mit potentieller Bereitstellungsdauer der untersuchten Laufwasserkraftanlagen (Lerche et al. 2015).

Speziell die automatisierte Abfluss- und Stauzielregelung des Unteren Neckars, bietet erhebliche Vorteile hinsichtlich einer Durchführbarkeit. Erste Ergebnisse (Lerche et al. 2015) belegen, dass sowohl geeignete Turbinenregler vorhanden sind, als auch die einschlägigen Schutzbestimmungen eingehalten werden können. Negative Auswirkungen auf die Gewässerfauna treten aller Wahrscheinlichkeit nicht auf, jedoch sollte dies durch eine weitere Studie noch geprüft werden.

Hindernisse für eine Durchlaufspeicherung am Unteren Neckar sind jedoch die deutlichen Auswirkungen auf die Binnenschifffahrt, die möglichst konstante und vorhersagbare Wasserstände benötigt. Diese Problematik wird durch die ohnehin bereits starken Wasserspiegelschwankungen des Neckars weiter verstärkt. Es ist davon auszugehen, dass die Stauzieltoleranz in Höhe von 15 cm alleinig zur Einhaltung der optimalen Schifffahrt benötigt wird. Außerdem ist eine derart genaue Regelung der Stauzieltoleranz (bis auf wenige cm genau) in der Praxis oftmals schwierig zu realisieren. Folglich stehen die, im obigen Abschnitt beschriebenen, 5 cm Stauzieltoleranz praktisch nicht zur Durchführung einer Durchlaufspeicherung am Unteren Neckar zur Verfügung.

Somit sind generell die Möglichkeiten einer Durchlaufspeicherung am Unteren Neckar zur Regelenergiebereitstellung als eher gering zu bewerten. Unter den gegebenen Bedingungen ist keines der Wasserkraftwerke am Neckar dazu geeignet, Primär- und Sekundärregelung sowie Minutenreserve zu Verfügung zu stellen (Lerche et al. 2015). Weder angebotene Leistung noch Bereitstellungsdauer können die Mindestvoraussetzungen der Präqualifikation erfüllen. Heutzutage werden überwiegend Kraftwerke mit mindestens 100 MW Leistung zur Bereitstellung von Primärregelung verwendet. Dies wäre lediglich mittels eines Zusammenschlusses aller 29 Wasserkraftwerke am Unteren Neckar möglich. Ein solch umfassender Kraftwerksverbund scheint jedoch derzeit weder realisierbar noch praktikabel.

Bei einem kleineren Zusammenschluss mehrerer Kraftwerken zu einem virtuellen Kraftwerk, ist eine Minutenreserverdeckung jedoch durchaus denkbar. Möglich ist beispielsweise ein Verbund von acht Kraftwerken über eine Gesamtstrecke von 73 km, beginnend ab Kochendorf bis Neckargmünd.

Der Untere Neckar spielt in wirtschaftlicher und energetischer Sicht eine besondere Rolle in Baden-Württemberg, die u.a. auch auf der Schiffbarkeit des Flusses basiert. Eine abschließende Bewertung des Potenzials des Unteren Neckars zur Regelenergiebereitstellung durch Laufwasserkraftwerke kann daher nur Abwägung der schiffahrtsspezifischen und wirtschaftlichen Folgen getroffen werden.

## 3 Auswirkungen der Energiewende auf den Kühlwasserbedarf

Die Klimaziele Deutschlands in der Mitigation von treibhausrelevanten Gasen erfordern mittelfristig einen Umbau des Energiesystems weg von großen Kraftwerken mit fossilen Brennstoffen, hin zu größeren Anteilen, dezentralisierten Einspeisung von erneuerbaren Energien. Dieser Prozess ist mit der in Deutschland in Folge des Fukushima Ereignisses eingeleiteten Energiewende beschleunigt worden. Die verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien beeinflusst die fossil- bzw. konventionell betriebenen Kraftwerke am Neckar und damit auch auf den Kühlwasserbedarf. Für Deutschland existieren bislang noch keine Analysen zum Zusammenhang der Stromeinspeisung aus Photovoltaik (PV) und Windkraft einerseits und der sich hieraus ergebenden verminderten Wassernutzung konventioneller Kraftwerke andererseits.

### 3.1 ZUSAMMENHANG ZWISCHEN PHOTOVOLTAIK-/WIND-STROMEINSPEISUNG UND DEM BETRIEB THERMISCHER KRAFTWERKE

Zum Zusammenhang zwischen Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien und Leistung thermischer Kraftwerke wurde eine Berechnungsmodell (PVW<sup>2</sup>, Abbildung 14) konzipiert, mit dem unter bestimmten Annahmen der Kühlwasserbedarf kontinuierlich simuliert werden kann (vgl. projektrelevante Bachelorarbeiten von H. Kammer und S. Raiber).

#### 3.1.1 BERECHNUNGSGRUNDLAGEN DES MODELLS PVW<sup>2</sup>

Das Modell PVW<sup>2</sup> wurde in der frei verfügbaren Interpretersprache „R“ programmiert und für Baden-Württemberg auf das zweite Halbjahr 2011 angewendet, um die eingesparte Kühlwassermenge am Neckar zu berechnen. Als Eingangsdatensätze werden Zeitreihen der Photovoltaik- und Wind-Stromeinspeisung, der Netzlast sowie Kenndaten zu den thermischen Kraftwerken in Baden-Württemberg benötigt. Für Biomasse und Wasserkraft werden mittlere Grundlast-Einspeisewerte verwendet. Im Modell PVW<sup>2</sup> sind zudem die einzelnen Kraftwerkstypen mit deren installierter Leistung und mittlerem Kühlwasserverbrauch zu definieren. Unter den getroffenen Annahmen lässt sich mit den Modellergebnissen zeigen, dass am Neckar im Sommer 2011 bis zu 500 l/s weniger

Kühlwasser primär infolge der hohen PV-Einspeisung in den Mittagsstunden verdunstete. Dies bedeutet, dass die Einsparung dann am größten ist, wenn die Last gering und die Einspeisung der erneuerbaren Energien hoch sind.

Die Kühlwassereinsparung entlang eines bestimmten Flussabschnitts wird für eine bestimmte Netzlast folgendermaßen berechnet: Zunächst wird von der Netzlast die Leistung aus Wasserkraft, Biomasse, Wind- und Photovoltaik abgezogen (gemäß EEG hat Strom aus erneuerbaren Energien Einspeisevorrang gegenüber konventionell erzeugtem Strom). Die Residuallast muss durch die konventionellen Kraftwerke gedeckt werden. Stromimporte und -exporte sowie Pumpspeicherkraftwerke werden im PVW<sup>2</sup> bisher nicht berücksichtigt. Aus der Leistung eines bestimmten thermischen Kraftwerks lässt sich der zugehörige Kühlwasserverbrauch ableiten. Wird ein Kraftwerk mit Kühlwasserbetrieb infolge der Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien gedrosselt oder gar vollständig heruntergefahren, so wird weniger bzw. kein Kühlwasser benötigt. Die Menge der Kühlwassereinsparung ergibt sich aus der Differenz der Kühlwassermengen ohne und mit Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien. Schließlich werden die Kühlwassereinsparungen der Kraftwerke entlang des betrachteten Flussabschnittes addiert.

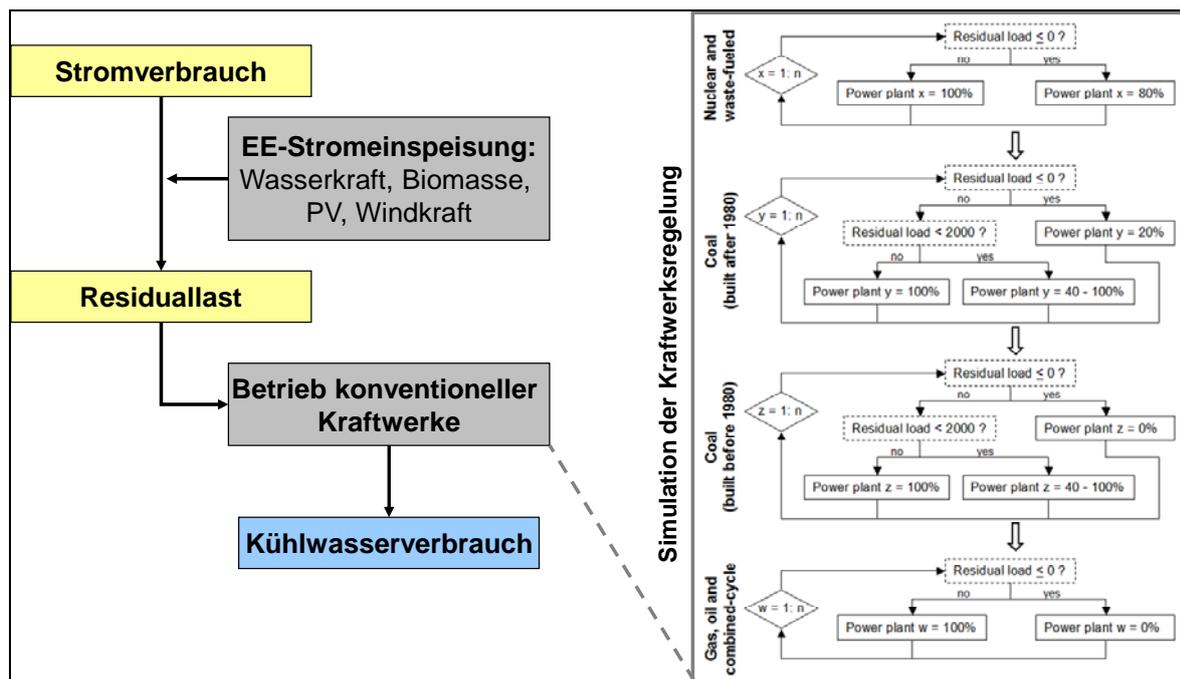


Abbildung 14: Modellaufbau PVW<sup>2</sup> (PV+Wind+Water) zur Berechnung des Kühlwasserverbrauchs am Neckar (Johst & Rothstein 2014)

### 3.2 SZENARIEN „SUKZESSIVER BETRIEB“ UND „GLEICHZEITIGER BETRIEB“

Die Reihenfolge der Kraftwerke, die in oder außer Betrieb gehen richtet sich nach der sogenannten Merit-Order, in der die Kraftwerke nach ihren Stromerzeugungs-Grenzkosten geordnet sind. Die Grundlast wird im Wesentlichen durch Kraftwerke mit niedrigen Grenzkosten und ständiger Verfügbarkeit (Kernkraftwerke, Wasserkraft und Biomasse) gedeckt. Im unteren Mittellastbereich kommen verstärkt Kohlekraftwerke und im oberen Mittellastbereich Gas- und Dampf-

Kombikraftwerke (GuD-Kraftwerke) hinzu. In Spitzenlastzeiten werden zudem die kurzfristig anschaltbaren, relativ kostenintensiven Gaskraftwerke hinzugeschaltet.

Das Auf- bzw. Abschalten der einzelnen Kraftwerke eines Lastbereichs kann im PVW<sup>2</sup> mit zwei verschiedenen Ansätzen berechnet werden: Im Ansatz „Sukzessiver Betrieb“ wird der Einsatz eines Kraftwerks durch das Baujahr bestimmt, d.h. die älteren und damit teureren Kraftwerke mit schlechterem Wirkungsgrad gehen erst dann in Betrieb wenn die jüngeren bereits auf Vollast fahren. Umgekehrt werden bei Lastabfall die älteren Kraftwerke als erstes abgeschaltet.

Im Ansatz „Gleichzeitiger Betrieb“ sind alle Kraftwerke eines Lastbereichs gleichzeitig in bzw. außer Betrieb, wobei die Last proportional zur Maximalleistung der einzelnen Kraftwerke aufgeteilt wird. Liegt die Last beispielsweise im unteren Mittellastbereich, so werden die Kernkraftwerke mit Vollast gefahren und die Leistung eines einzelnen Kohlekraftwerks wird dann durch Multiplikation der Maximalleistung dieses Kohlekraftwerks mit dem Anteil der Restlast an der Maximalleistung aller Kohlekraftwerke multipliziert.

### **3.3 FALLBEISPIELE FÜR DEN NECKAR**

#### **3.3.1 DATENGRUNDLAGE**

Das Modell PVW<sup>2</sup> wurde für den Neckar und für den Zeitraum Juli bis Dezember 2011 angewendet. Für sämtliche Kraftwerke entlang des Neckars wurden, die installierte Leistung, die Feuerungsart sowie die Kühlverfahren recherchiert (BNETZA 2012, STRAUCH 2011, mündliche Mitteilungen) und gemäß Tabelle 4 die entsprechenden mittleren Wasserverbrauchsmengen zugewiesen. Die größten thermischen Neckar-Kraftwerke werden mit Umlaufkühlung betrieben, die Spitzenlastkraftwerke hingegen alle mit Durchlaufkühlung. Die großen Kraftwerke Altbach-Deizisau (HKW1 und KKW2) und Neckarwestheim 2 wurden als erste Kraftwerke in Deutschland mit Hybridkühltürmen ausgestattet. Zudem wird in neueren Kraftwerken durch den Einsatz von Kraft-Wärmekopplung grundsätzlich weniger Kühlwasser benötigt. Die Kraftwerksbetreiber haben sich also bereits an die eingeschränkte Wassernutzungssituation am Neckar angepasst.

Datengrundlage der Netzlast waren stündliche Lastwerte für ganz Deutschland, die auf der Internetseite von ENTSO-E (2012) frei verfügbar sind. Da der Letztverbraucherabsatz des baden-württembergischen Übertragungsnetzbetreibers TransnetBW in den letzten Jahren kontinuierlich bei 13% lag (BNETZA 2008–2011), betrug die baden-württembergische Netzlast etwa 13% der gesamtdeutschen Netzlast.

Daten zur Photovoltaik- und Wind-Stromeinspeisung werden über TransnetBW im Internet bereitgestellt (TRANSNETBW 2012). Diese im Viertelstundentakt vorliegenden mittleren Leistungen wurden in Stundenwerte umgewandelt. Die Stromeinspeisung der Biomasse- und Wasserkraftwerke wurde, anders als bei den konventionellen Kraftwerken, nicht die Leistung der einzelnen Kraftwerke betrachtet, sondern es wurde die durchschnittliche stündliche Leistung dieser Kraftwerke aus der tatsächlich produzierten Strommenge berechnet. Die stündliche Durchschnittsleistung im Jahr 2011 betrug für die Wasserkraft 466 MW<sub>el</sub>, für die Biomasse 360 MW<sub>el</sub> (STALA 2012).

### 3.3.2 ERGEBNISSE FÜR EINEN ZEITRAUM MIT HOHER PV-EINSPEISUNG

An Werktagen liegt das Maximum der Netzlast in den Mittagsstunden. Um diese Zeit ist normalerweise auch die Photovoltaik-Stromeinspeisung am höchsten, so dass beispielsweise im August 2011 zur Spitzenlastdeckung kein Einsatz von Gasturbinen und GuD-Kraftwerken nötig war. Durch die hohe PV-Einspeisung können die Steinkohlekraftwerke in den Mittagsstunden gedrosselt werden (Abbildung 15). Den Modellberechnungen zufolge würden dadurch bis zu  $0,54 \text{ m}^3/\text{s}$  weniger Kühlwasser verdunsten, was einer Kühlwassereinsparung von 39% entspräche. Die höchsten Kühlwassereinsparungen werden dann erreicht, wenn die Netzlast niedrig und die Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien hoch ist, wie dies beispielsweise am Sonntag in Abbildung 15 der Fall ist.

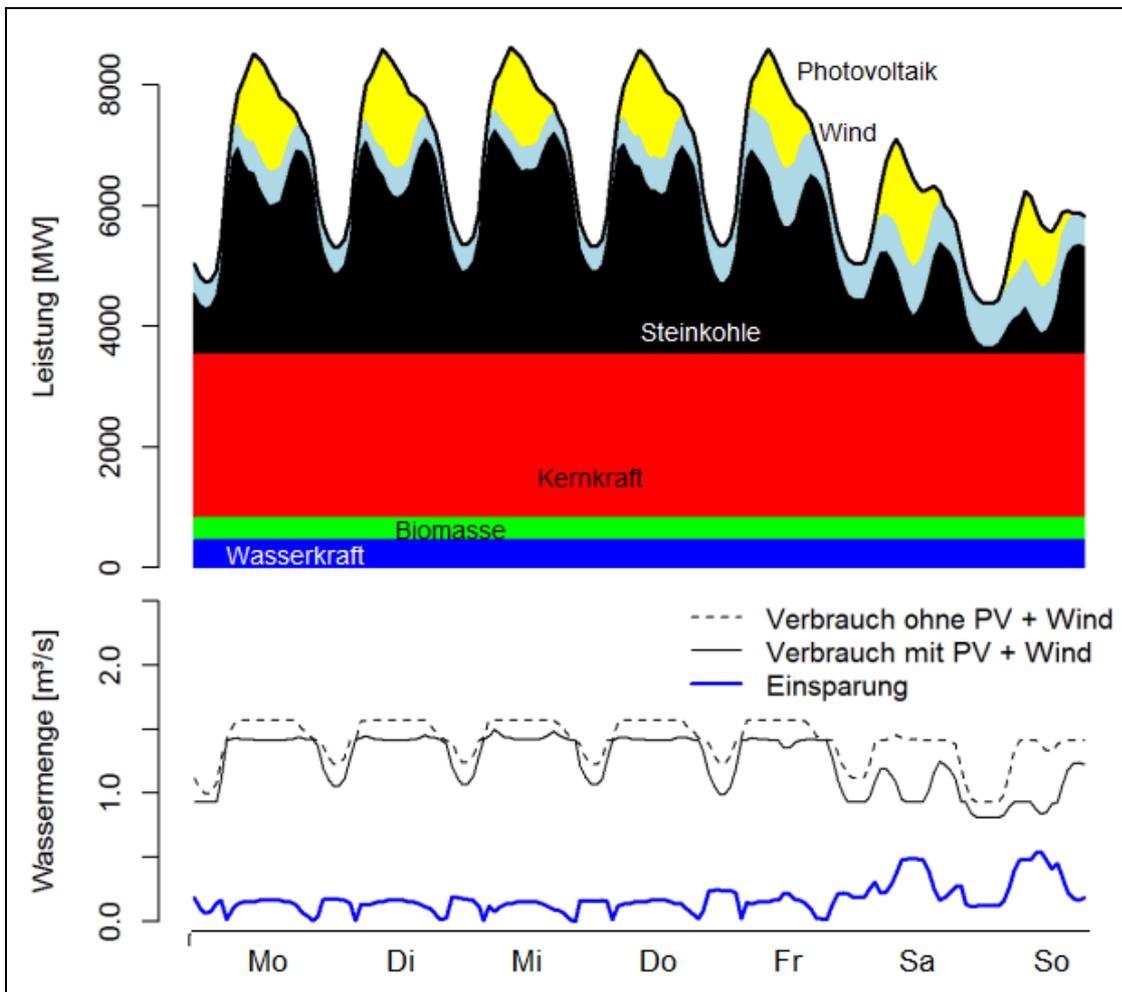


Abbildung 15: Stromeinspeisung in Baden-Württemberg (oben) und für die Kühlung verbrauchte bzw. eingesparte Wassermenge am Neckar (unten) im Sommer (Szenario „Sukzessiver Betrieb“): (Johst et al. 2013)

### 3.3.3 ERGEBNISSE FÜR EINEN TAG SEHR HOHER KÜHLWASSEREINSPARUNG

An Sonntagen ist die Netzlast niedriger als an Werktagen und die Maxima liegen nicht nur in den Mittags- sondern auch in den Abendstunden. Am 27.11.2011 war die Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien wegen des starken Windes besonders hoch (Abbildung 16). Die Photovoltaik- und Windeinspeisung dieses Tages wurde mit einem typischen Sonntags-Lastprofil kombiniert. Unter der Annahme, dass sämtliche Steinkohlekraftwerke entlang des Neckars (das Müllheizkraft-

werk Stuttgart-Münster eingeschlossen) den Betrieb komplett her-unterfahren würden, läge die eingesparte Kühlwassermenge bei 0,63 m<sup>3</sup>/s. Dies entspräche einer Kühlwassereinsparung von 43%. Durch eine Drosselung des Kernkraftwerks Neckarwestheim 2 könnte am Neckar weiteres Kühlwasser eingespart werden. In den in Abbildung 2 dargestellten Modellergebnissen wurde jedoch lediglich das ältere Kernkraftwerk Philippsburg 2 am Rhein gedrosselt, entsprechend des Szenarios „Sukzessiver Betrieb“.

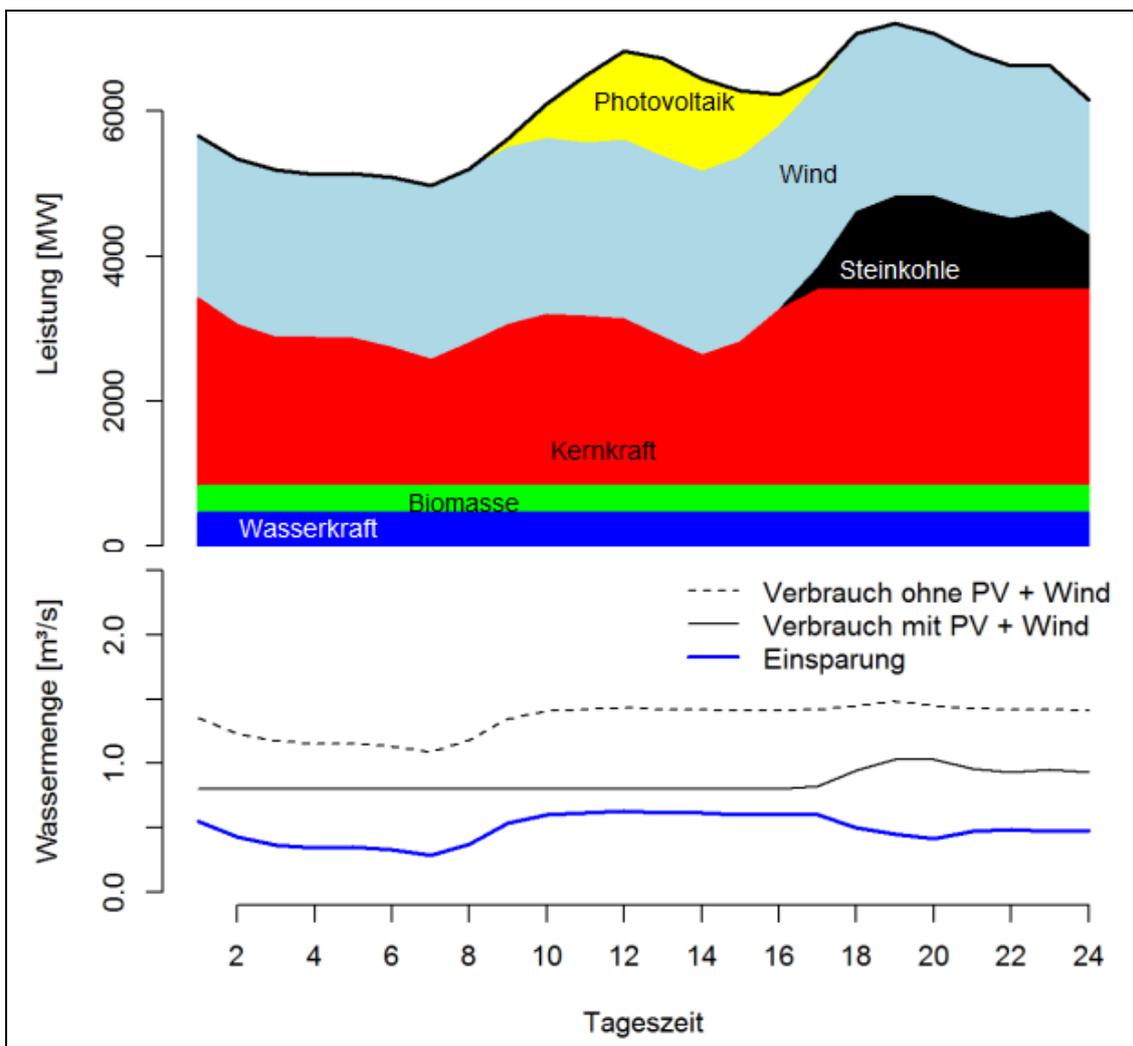


Abbildung 16: Stromeinspeisung in Baden-Württemberg (oben) und für die Kühlung verbrauchte bzw. eingesparte Wassermenge am Neckar (unten) für einen Tag mit niedriger Netzlast und hoher Einspeisung aus Wind und Photovoltaik (Szenario „Sukzessiver Betrieb“); (Johst et al. 2013).

### 3.4 RELEVANZ FÜR DIE WASSERKRAFTNUTZUNG

Ist der Durchfluss am Neckar höher, so ist im Normalfall auch die Stromerzeugung an den insgesamt 29 Laufwasserkraftwerken höher. Um den Effekt der Kühlwassereinsparung auf die Wasserkraft-Stromerzeugung zu bewerten, wurde das zusätzliche Wasserkraftpotenzial P entsprechend Gleichung (1) berechnet:

$$P = Q \cdot \Delta h \cdot \rho \cdot g \quad (1)$$

mit

$Q$  = erhöhter Durchfluss durch Kühlwassereinsparung [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$\Delta h$  = Fallhöhe [m]

$\rho = 1 \text{ kg/m}^3$  (Dichte des Wassers)

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$  (Erdbeschleunigung)

Die Fallhöhen aller flussabwärts eines bestimmten thermischen Kraftwerks liegenden Wasserkraftwerke wurden kumuliert. Somit konnte das Potenzial, das durch die Kühlwassereinsparung eines Kraftwerks frei wird, in Abhängigkeit von der Lage am Neckar berechnet werden (Abbildung 17). Durch eine maximale Kühlwassereinsparung (kein Wasserverlust durch Verdunstung) würde sich das Wasserkraftpotenzial um 1380 kW erhöhen. Unter der Annahme, dass der erhöhte Durchfluss an etwa zwei Drittel der Tage im Jahr genutzt werden kann (LfU 2005) entspricht dies einer zusätzlichen Leistung von rund 8 MWh/a.

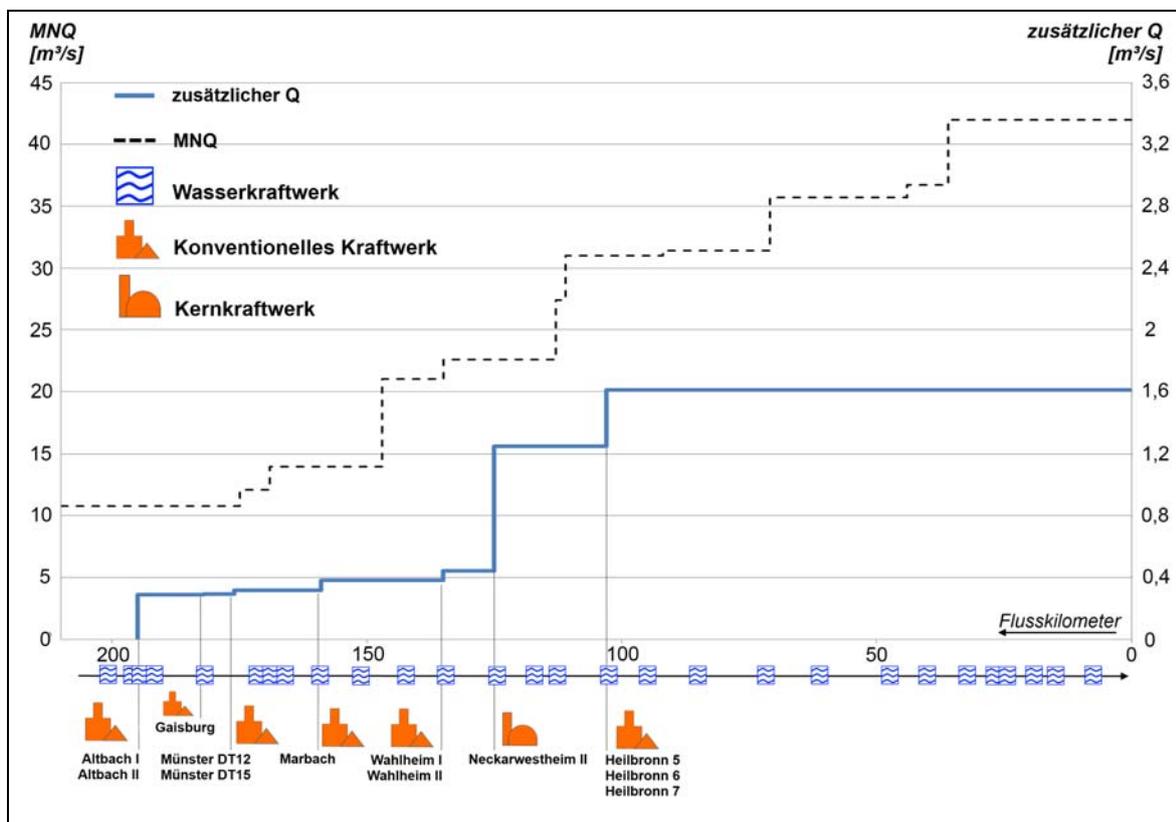


Abbildung 17: Lage der Kraftwerke am Neckar; erhöhter Durchfluss Q bei maximaler Kühlwassereinsparung (Johst et al. 2013).

### 3.5 DISKUSSION UND AUSBLICK

Durch die Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien kann die Leistung der thermischen Kraftwerke gedrosselt werden. Dies ist mit einer geringfügigen Kühlwassereinsparung verbunden, die hinsichtlich der starken Wassernutzungskonkurrenz am Neckar sowie der Gewässerökologie positiv zu bewerten ist. Wegen der bereits wassersparenden Kühlverfahren der großen Kraftwerke sind

die Einsparungen jedoch relativ gering, so dass sich das Wasserkraftpotenzial durch die Kühlwassereinsparung nur sehr wenig erhöht: Die Potenzialerhöhung entspricht etwa der Leistung einer Windkraftanlage. Positiv zu bewerten ist die sommerliche Spitzenlastabdeckung durch Photovoltaik, durch die im Sommer im Falle einer Leistungsrosselung der thermischen Kraftwerke auch der kühlwasserbedingte Wärmeeintrag reduziert wird.

Die Auslastung und Fahrweise von Kraftwerken ist von vielen Einflussfaktoren abhängig. Der in dieser Untersuchung verwendete Ansatz fährt ausschließlich die Last in Baden-Württemberg nach. In der Realität spielen der Handel an der Strombörse, Stromim- und -exporte sowie die Speicherung von Strom mit Hilfe von Pumpspeicherkraftwerken eine wichtige Rolle. Folglich kann das hier vorgestellte Modell lediglich als eine grobe Näherung gesehen werden.

Der weitere starke Ausbau der fluktuierenden erneuerbaren Energien Wind und Photovoltaik wird in Zukunft zu einem deutlich veränderten Kraftwerkspark und Lastmanagement führen. Auch aufgrund der Abschaltung des Kernkraftwerks Neckarwestheim im Jahr 2022 ist künftig eher eine verringerter Kühlwasserverbrauch und Wärmeeintrag in den Neckar zu erwarten. Dies kann als positiver, wenngleich auch sehr geringer Ausgleich für die durch den Klimawandel bedingten höheren Wassertemperaturen und niedrigeren Sommerabflüsse gesehen werden.

## 4 Szenarien für die zukünftige Veränderung des Wasserhaushalts am Neckar

Ausgangspunkt für die Szenierung der Niedrigwasserentwicklung am Neckar sind auf verschiedene Klimawandelszenarien aufsetzende Wasserhaushaltssimulationen. In Abbildung 18 werden die für die Untersuchung der Niedrigwasserentwicklung am Neckar relevanten Systemelemente dargestellt. Sie beschreiben den Einfluss der sich ändernden „natürlichen“ Klimaelemente, sowie der zu erwartenden „anthropogenen“ Entwicklung auf den Neckar-Abfluss. Neben den Entwicklungen zu einem heißeren, und in Teilen trockeneren zukünftigen Klima, verschärfen vor allem die Faktoren Bevölkerungsentwicklung, Trink- und Abwassermengenänderungen, Flächenversiegelung, Bewässerungsbedarfs und zukünftiger Wasserbedarf der Industrie und Energiewirtschaft, die Niedrigwassersituation.

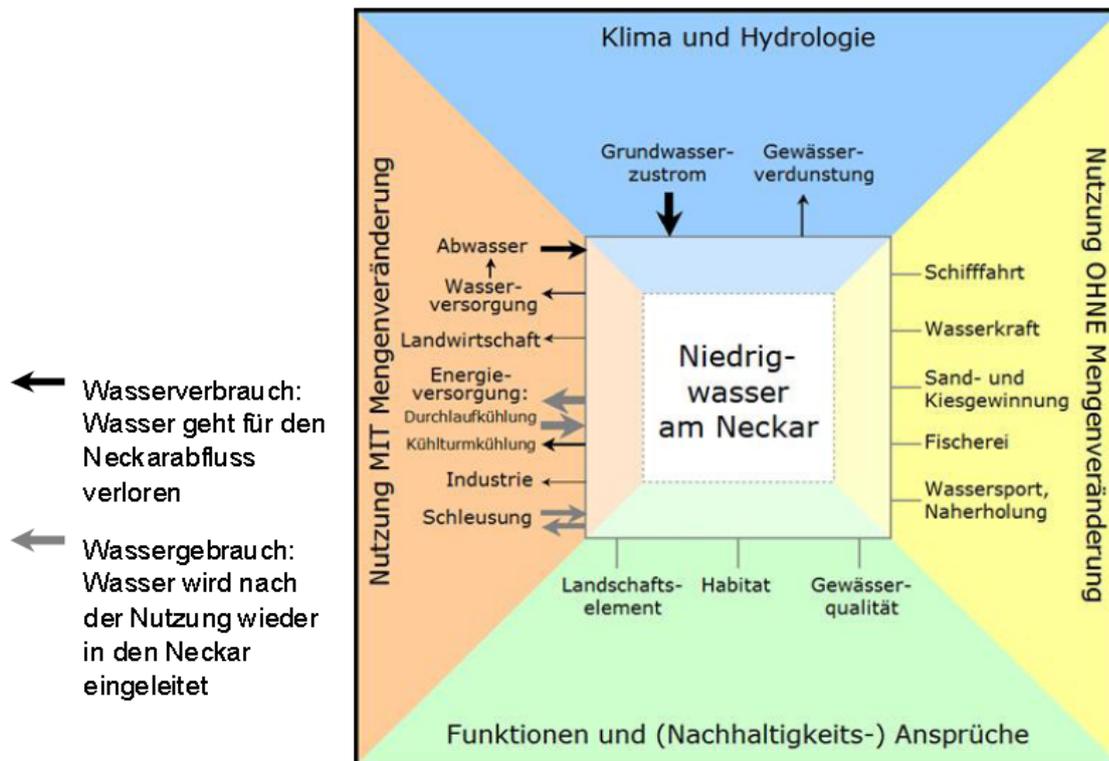


Abbildung 18: Relevante Systemelemente im System Niedrigwasser am Neckar.

Ausgehend von den in den vorherigen Kapiteln vorgestellten Recherche-, Befragungs- und Modellergebnissen für den IST-Zustand der Wassermengen am Neckar, wurden verschiedene Annahmen für das Jahr 2030 getroffen (Tabelle 6) und konkrete herbstliche Niedrigwassersituationen szeniert. Hierbei wurden einerseits mögliche Änderung des „natürlichen“ Wasserhaushalts abgeschätzt, andererseits die zu erwartenden Wassernutzungsänderungen (Kühlwasser, Abwassereinleitung, Beregnung) berücksichtigt (Abbildung 20).

Hierbei wurden auch mögliche Entwicklungen im Energiesektor (z.B. zukünftiger Energiebedarf, zukünftiger Energiemix) mit in Betracht gezogen. Ausgehend von dem für die Zukunft projektierten Wasserdargebot und Wasserbedarf können mögliche Wassernutzungskonkurrenzen identifiziert werden. Neben der Szenarienentwicklung wurden, ausgehend von den Befragungsergebnissen und Expertengesprächen, Handlungsoptionen zum Umgang mit kritischen Niedrigwassersituationen entwickelt (z.B. Kühlturmnutzung zur Kühlung und Durchlüftung des Neckarwassers während Zeiten mit hoher Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien, Nutzung solarer Kühlsysteme, Überleitung von Bodensee-/Donauwasser, Speicherung von Wasser während Hochwasserzeiten).

Tabelle 6: Datengrundlage für die Abschätzung (aktueller und) zukünftiger Abflussmengen.

Einflussgröße	Datengrundlage	Bedeutung
Abfluss [m³/d]	Vergangenheit: Messwerte (2003–2011) Zukunft: LARSIM-Simulationen (2021–2050)	Integraler Zustandsparameter
Abwassereinleitung [m³/d]	Vergangenheit: Messwerte der vier Stuttgarter Klärwerke (1997–2013) Zukunft: Abschätzung ausgehend von Bevölkerungsvor-ausberechnung und Befragungsergebnissen (2021–2050)	Wichtiger Zustrom
Kühlwassernutzung [m³/s]	Vergangenheit: PVW²-Modellberechnung (2011–2013) Zukunft: PVW²-Modellberechnung (2021–2050) für mögliche energiewirtschaftliche Entwicklungen	Stärkster Wasserverbrauch
Bewässerung [m³/Monat]	Vergangenheit: Ergebnisse der Befragung Zukunft: Hochrechnung auf Grundlage der Befragung	ansteigende Wassernutzung, infolge des Klimawandels

#### 4.1 ZUKÜNFTIG MÖGLICHE ÄNDERUNGEN DES „NATÜRLICHEN“ NECKARABFLUSSES GEMÄß LARSIM-WASSERHAUSHALTSSIMULATIONEN

Für das Neckareinzugsgebiet waren mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM (Bremicker 2000) Wasserhaushaltsberechnungen für die Jahre 1971–2000 und 2021–2050) durchgeführt worden (LUBW 2011; Abbildung 19). Die Eingangsdaten der Zukunftssimulationen stammten vom Klimawandelmodell COSMO-CLM (Version 4.8, run1) des Instituts für Meteorologie und Klimaforschung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT, Arbeitsgruppe Dr. Schädler).

Ergebnisse der LARSIM-Wasserhaushaltsmodellierung waren u.a. die Abflüsse an mehreren Neckarpegeln in Tageszeitschritten. Diese LARSIM-Wasserhaushaltssimulationen werden als Grundlage für die Szenierung zukünftiger potenzieller Wassernutzungsänderungen verwendet und wurden folgendermaßen ausgewertet: Für die Zeiträume 2021–2030 („Dekade 2030“) und 2041–2050 („Dekade 2050“) wurden lediglich die Abflüsse für August bis Oktober betrachtet, da dies die typischen Niedrigwassermonate sind. Anschließend wurden für diese drei Monate für beide Dekaden einerseits mittlere Abflüsse berechnet (z.B. mittlerer Abfluss am 01. August gemittelt aus den simulierten Abflüssen des 01. Augusts der zehn Jahre 2021–2030) und andererseits die jeweils niedrigsten Abflüsse (minimale Abflüsse als Szenario für ein ausgeprägtes Trockenjahr). Bei den LARSIM-Abflusssimulationen war die Abwassereinleitung in den Neckar mit einem mittleren Wert von 6,3 m³/s berücksichtigt worden. Da die Veränderung der Abwassereinleitung Gegenstand unserer Untersuchung sein sollte, wurden von den mittleren und den minimalen Abflüssen jeder Dekade jeweils 6,3 m³/s abgezogen.

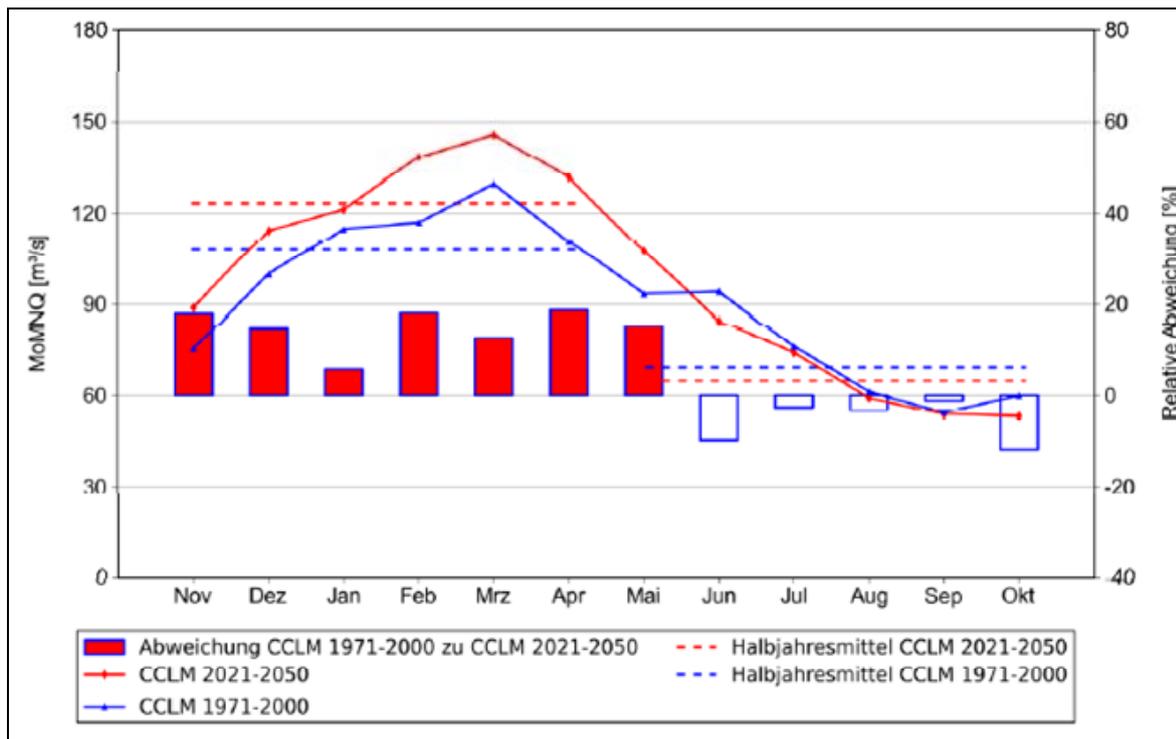


Abbildung 19: LARSIM Wasserhaushaltsberechnungen für die Jahre 1971–2000 und 2021–2050; COSMO-CLM (Version 4.8, run1; (LUBW 2011)).

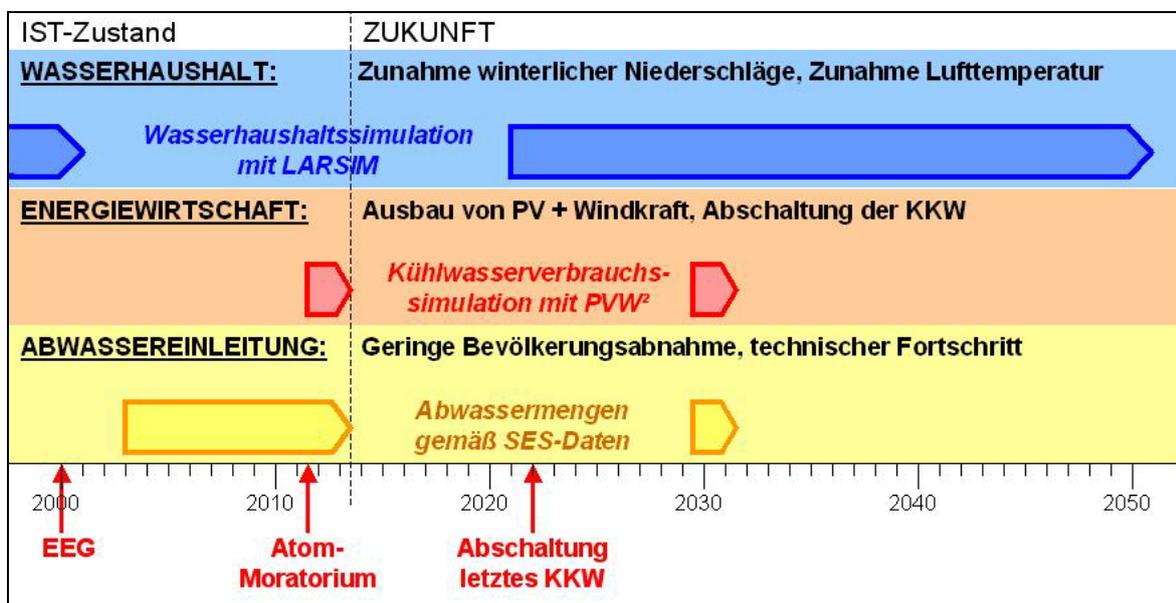


Abbildung 20: Zeiträume der aktuellen und zukünftigen Wassermengen-Berechnung für den Wasserhaushalt, die energie-wirtschaftliche Kühlwassernutzung und die Abwassereinleitung.

Für die beiden Dekaden lagen die mittleren Abflüsse am Pegel Lauffen mindestens  $15 \text{ m}^3/\text{s}$  über dem Grenzwert von  $25 \text{ m}^3/\text{s}$ , ab dem die thermischen Stromerzeugungskraftwerke die kühlungsbedingte Verdunstungswassermenge einschränken müssen. Die minimalen Abflüsse lagen hingegen für beide Dekaden mehrere Tage sehr nahe am Niedrigwassergrenzwert. Für die Dekade 2050 war der mittlere Abfluss etwa  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  niedriger als für die Dekade 2030.

Im Vergleich zum IST-Zustand sind die szenierten zukünftigen Abflüsse unerwartet hoch: Für die Dekade 1991–2000 lagen die niedrigsten Herbstabflüsse nahezu durchweg unterhalb des Grenzwertes von  $25\text{m}^3/\text{s}$  und etwa  $15\text{m}^3/\text{s}$  niedriger als für die Dekade 2021–2030 (Abbildung 21). Auch in der Dekade 2001–2010 waren die niedrigsten Abflüsse deutlich niedriger als für die Zukunft szeniert (Hitzesommer 2003). Folglich scheinen in den für die Zukunft berechneten Abflüssen extreme Niedrigwassersituationen nicht enthalten zu sein.

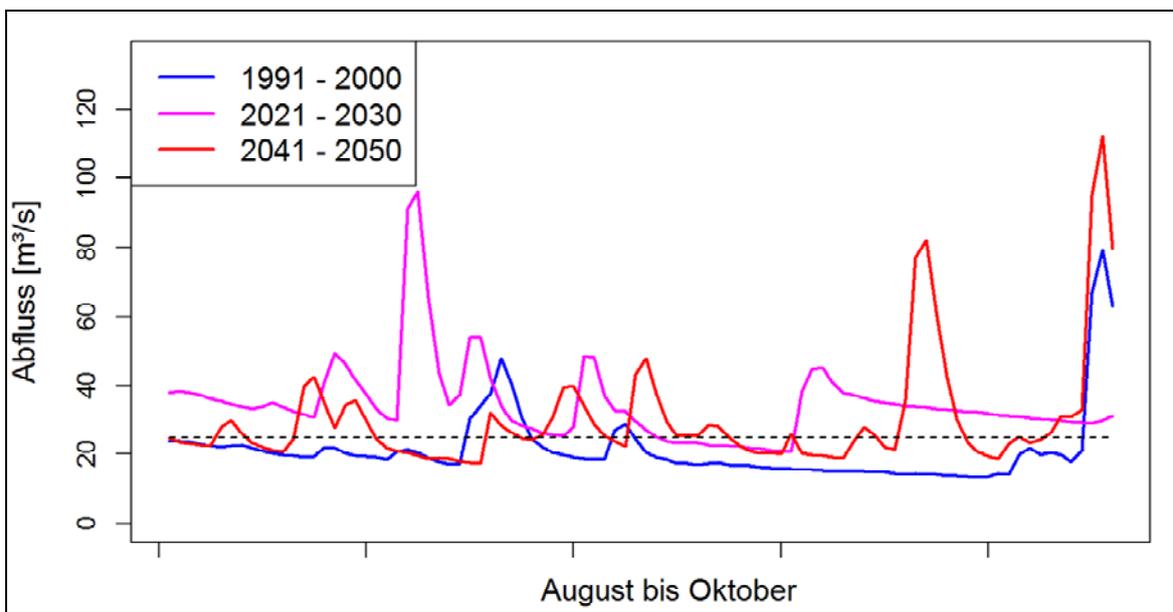


Abbildung 21: Szenierung der niedrigsten Herbstabflüsse auf Basis der LARSIM-Wasserhaushalts-simulation mit Klimaszenario COSMO-CLM 4.8 (LUBW 2011).

Für eine konservative Abschätzung möglicher zukünftiger extremer Niedrigwassersituationen muss diesem Fakt Rechnung getragen werden. Für die Ableitung realistischer Handlungsempfehlungen müssen extreme Niedrigabflüsse, wie im Hitzesommer 2003 beobachtet, ausreichend berücksichtigt werden.

#### 4.2 ABSCHÄTZUNG DER MÖGLICHEN ÄNDERUNGEN DES KÜHLWASSERVERBRAUCHS

Das bereits oben beschriebene Modell PVW<sup>2</sup> wurde weiterentwickelt, indem einerseits der Netto-Stromimport bei der Simulation des Kraftwerksbetriebs berücksichtigt wurde. Andererseits wurde die Regelung der thermischen Kraftwerke realitätsnäher nachgebildet (geringe Regelbarkeit von Kernkraftwerken und alten Kohlekraftwerken, keine Komplettabschaltung neuerer Kohlekraftwerke). Das Modell wurde für den Zweijahreszeitraum vom 01.07.2011 bis zum 30.06.2013 angewendet, wobei frei verfügbare Stundenwerte des Strombedarfs, der PV- und Windeinspeisung und der Lastflüsse ins/vom Ausland verwendet wurden. Die Modellannahmen und -ergebnisse wurden mit Experten der Transnet-BW GmbH besprochen und von diesen als plausibel und realitätsnah bewertet.

Zur Abschätzung des Kühlwasserverbrauchs im Jahr 2030 wurden die Berechnungen mit folgenden Änderungen durchgeführt: Das Kernkraftwerk Neckarwestheim wurde aus dem Kraftwerkspark

entfernt. Zudem wurde entsprechend der baden-württembergischen Ausbauziele (Staiß & Schmidt 2012) der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung erhöht (Wasserkraft 1,1-fache, Biomasse 1,3-fach, PV 2-fach und Wind 4-fach).

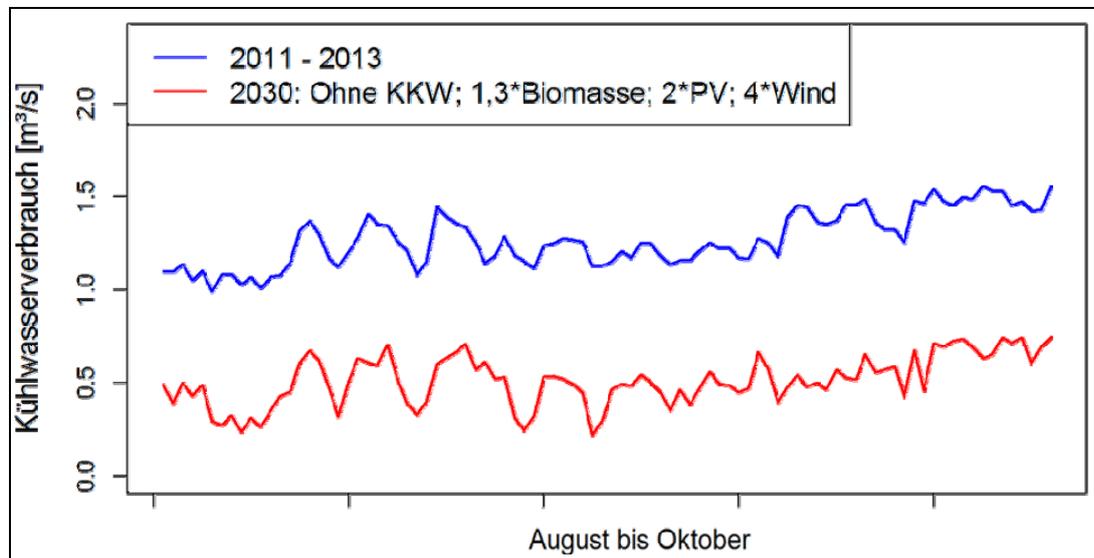


Abbildung 22: Entwicklung des herbstlichen Kühlwasserverbrauchs am Neckar; 2011-2013 verglichen mit 2030 (Johst 2013).

Die Abschaltung des Kernkraftwerks Neckarwestheim lässt eine relative Einsparung beim Kühlwasserverbrauch erwarten. Allerdings sind die Absolutwerte relativ gering im Vergleich zum Neckarabfluss (max. 1,6 m<sup>3</sup>/s).

#### 4.3 ZUKÜNFTIG MÖGLICHE ÄNDERUNG SONSTIGER WASSERNUTZUNGEN

Die von der Stadtentwässerung Stuttgart (SES) übergebenen Daten der Abwassermengen der vier großen Stuttgarter Klärwerke wurden folgendermaßen aufbereitet: Betrachtet wurden tägliche Trockenwetter-Abwassereinleitungen für die zehn Jahre 2003–2012, in denen visuell kein Trend und kein Bruch zu erkennen war. Fehlwerte (z.B. infolge von Niederschlägen) wurden durch Interpolation gefüllt und die Trockenwetter-Abwassereinleitungen der vier Klärwerke addiert. Dieser Datensatz wird im Folgenden als „SES-Abwassereinleitung“ bezeichnet. Für die Landkreise Esslingen, Stuttgart, Ludwigsburg und Heilbronn wurden die Kenngrößen aller Klärwerke recherchiert (Daten wurden vom Landratsamt Konstanz bereitgestellt). Das Verhältnis der Einwohnerkennwerte aller Klärwerke oberhalb des Pegels Lauffen zu den Einwohnerkennwerten der SES-Klärwerke wurde berechnet und die SES-Abwassereinleitung mit diesem Faktor multipliziert. Damit konnte für die vergangenen zehn Jahre die tägliche Abwassereinleitung für die genannten Landkreise bis zum Pegel Lauffen rekonstruiert werden. Für diesen zehnjährigen Datensatz wurden, analog zum oben beschriebenen Vorgehen, mittlere Einleitungen für alle Tage der drei Monate August bis Oktober berechnet. Die aus dem Bodensee und der Donau stammende (Fernwasserversorgung) SES-Abwassereinleitung in den Neckar, stellt damit einen wichtigen Faktor für extreme Niedrigwasserjahre im Neckar dar (Tabelle 7).

Tabelle 7: Berechnung der Abflussmittelwerte für Herbstmonate

Kühlwasserverbrauch:	- 110 000 m <sup>3</sup> /d
Beregnung:	- 646 m <sup>3</sup> /d
Sonstiges	- 1 780 m <sup>3</sup> /d
Abwassereinleitung	+ 440 000 m <sup>3</sup> /d
Datengrundlage: Trockenwettereinleitung d. Stuttgarter Stadtentwässerung 2003–2012 (extrapoliert für Landkreise ES, LB und S) Strombedarf, Stromeinspeisung aus EE, Kraftwerks-betrieb und Kühlwasserverbrauch 2011–2013 (Modell PVW <sup>2</sup> ) Wasserentnahmen mit Verwendungszweck für 2003, 2006 und 2009 (Daten des baden-württembergischen UIS) (nur Entnahmen aus oberirdischen Gewässern, Landkreise ES, LB und S, Beregnung: halbe Jahreswassermenge bezogen auf 92 Tage)	

Für die Zukunft nehmen, nach Aussagen mehrerer Klärmeister, die Abwassermengen tendenziell ab. Dies wird erstens durch einen Bevölkerungsrückgang bis 2030 um -5% bis -8% ([www.statistik-bw.de/BevoelkGebiet/BevProg/](http://www.statistik-bw.de/BevoelkGebiet/BevProg/)), zweitens durch einen geringfügig abnehmenden spezifische Trinkwasserverbrauch pro Einwohner um -1%, bedingt durch technischen Fortschritt in den kommenden Jahren, sowie drittens durch einen geringeren Fremdwasserzustrom in das Kanalnetz von -5% bis -15%, bedingt sein. Für unsere Zukunftsszenarien gehen wir folglich von einem Rückgang der Abwassereinleitungen in den Neckar zwischen 10% und 20% aus, was in den Handlungsempfehlungen zu berücksichtigen ist. Diese zu erwartende Abflussabnahme liegt in der Größenordnung der Abflusszunahme durch den geringeren Kühlwasserverbrauch.

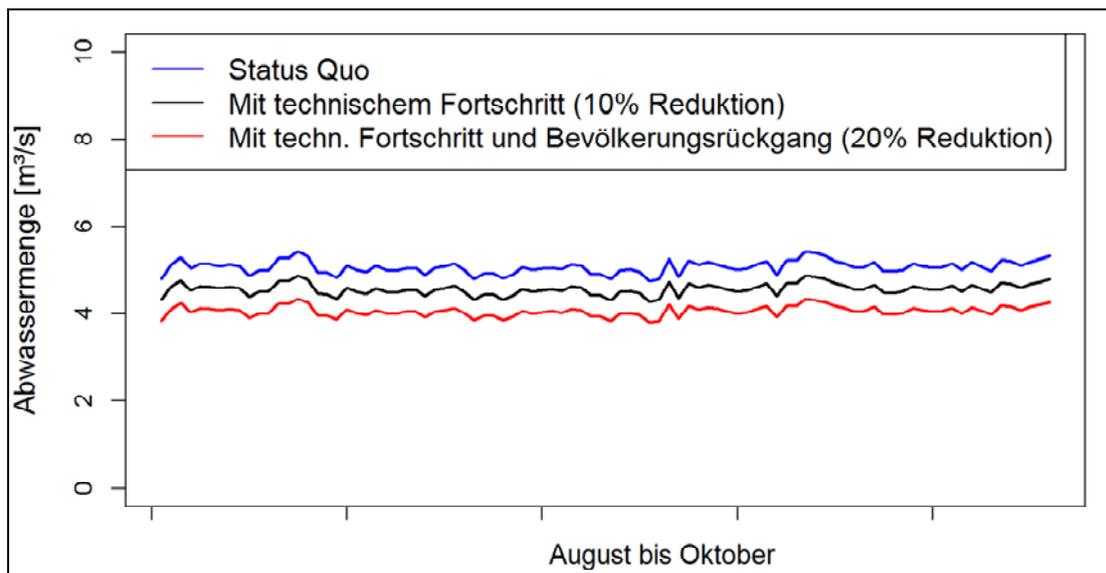


Abbildung 23: Entwicklung der mittleren Trockenwetter-Abwassereinleitung im Herbst (Johst 2013).

# 5 Handlungsempfehlungen

## 5.1 SYSTEMANALYSE ZUR ABLEITUNG VON HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

### 5.1.1 GRUNDLAGEN DER SYSTEMANALYSE

Dynamische Systeme, ein Teilgebiet der Systemtheorie, liefert einen methodologischen Rahmen zur Konfliktanalyse in komplexen sozio-ökologischen Systemen wie der Nutzung der Ressource Wasser. Die Systemtheorie bietet ein holistisches Werkzeug um die zeitliche Entwicklung von abstrakten Strukturen zu analysieren (Heylighen und Joslyn 1992). Der Fokus liegt dabei auf den Wechselwirkungen von Systemteilen und nicht so sehr an den Veränderungen der einzelnen Elemente an sich.

Die Systemtheorie wurde in den 1940er Jahren von dem Biologen Ludwig von Bertalanffy in der Umweltforschung eingeführt. Die Grundlagen des Ansatzes gehen auf den Deutsch-Schweizer Philosophen und Physiker Johann Heinrich Lambert (1728 - 1777) zurück. Anwendungsbereiche der Systemtheorie reichen von philosophischen konzeptuellen Ansätzen bis zur mathematischen Modellierung und Informationstheorie mit ihren Anwendungsbereichen in Ingenieurs-, Computerwissenschaften, Ökologie und Management (Heylighen und Joslyn 1992). Die Systemtheorie wird in der Entscheidungsfindung bei Problemen der Identifikation und Rekonstruktion von Systemzusammenhängen sowie der Kontrolle von komplexen Systemen verwendet. Dabei werden verschiedenen Vorgaben, Einschränkungen und Eigenschaften von dem untersuchten System berücksichtigt. Ziel ist es, mögliche Handlungsentscheidungen mit ihren Vor- und Nachteilen im dynamischen System zu untersuchen. Dieser Zweig der Systemtheorie wird als Systemdynamik bezeichnet und ist eng mit der Kybernetik verwandt.

Die Systemdynamik untersucht die Veränderungen im Verhalten komplexer Systeme. Wichtig für das mittel- bis langfristige Verhalten eines Systems sind die aus den Interaktionen zwischen den Systemelementen entstehenden Rückkopplungsmechanismen. Ein sehr bekanntes Beispiel für Systemdynamik ist das „World Dynamics“ Modell von Jay Forrester (Forrester 1971), welches die Grundlage der Analyse des Club of Rome zu den „Grenzen des Wachstums“ lieferte (Meadows et al. 1972, 1992). Parallel zu dieser Entwicklung am amerikanischen Massachusetts Institute of Technology (MIT), führte der deutsche Umweltbiologe Frederic Vester die Systemdynamik in die deutsche Debatte um eine „Nachhaltigen Entwicklung“ in den 1970er Jahren ein (Vester und v. Hesler, 1980; Vester 2007). Er nutzte verschiedene Werkzeuge der Systemdynamik zur qualitativen Analyse von Umweltproblemen. Besonders sein „Sensitivitätsmodell“ erweist sich noch heute als ein effektives Werkzeug der Systemanalyse in partizipativen Ansätzen. In der letzten Dekade wurden im Bereich der Anpassung an den Klimawandel verstärkt systemische Vulnerabilitäts- und Resilienzansätze genutzt. Partizipative, systemdynamische Ansätze zeigen hier vor allem im Bereiche der Nutzungskonkurrenz um sich verändernde Ressourcen gute Resultate (Cassel-Gintz 2004, Cassel-Gintz et al. 2004, Ibrahim und Midgley 2013, Zicherman et al. 2011).

### 5.1.2 SYSTEMANALYSE DER MÖGLICHEN WASSERNUTZUNGSKONFLIKTE BEI NIEDRIGWASSERSITUATIONEN AM NECKAR

Die Einflussstärke der „natürlichen“ und der „anthropogenen“ Faktoren sowie deren Wechselwirkungen und Beeinflussbarkeit wird mithilfe der Einflussmatrix (siehe Abbildung 24) des Sensitivitätsmodells nach Vester (Vester und v. Hesler, 1980; Vester 2007) dargestellt und analysiert. Dieses sehr transparente und flexible qualitative Verfahren der Systemanalyse erlaubt die Bewertung der Wirksamkeit von Maßnahmen und

erleichtert den Dialog mit den Wassernutzern und Entscheidungsträgern. Die Analyse der Sensitivität von Systemelementen erlaubt die Identifikation von geeigneten Steuerungselementen im System. Dies ermöglicht den wasserbehördlichen Entscheidungsträgern, das untersuchte System in seiner Gesamtheit gemeinsam mit den Wassernutzern zu diskutieren und Vernetzungen verschiedener Einflussfaktoren zu erkennen. Durch eine Erweiterung der Einflussmatrix um konkrete Handlungsansätze können unterschiedliche Handlungsszenarien bewertet, sowie Handlungsempfehlungen abgeleitet werden.

### Einflussmatrix zur Wassernutzung am Neckar

Einflussbereich: Klima und Wasserhaushalt Land- und Forstwirtschaft Energiewirtschaft und Industrie Trink- und Abwasser Sonstiges	auf	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Kumulierte Einflussstärke
		Anzahl heißer Tage	Anzahl an Sommertagen	Jahresmitteltemperatur	Jahresniederschlagssumme	Grundwasserneubildung	Bewässerungsmenge	Flächenversiegelung	Aufforstung	Kühlwasserbedarf	Regelenergiebedarf	Anteil erneuerbarer Energien	Wassersparende Technologien	Trinkwasserbedarf	Abwassereinleitung	Schleusung	Aktueller Niedrigwasserabfluss	
<b>Einflussstärke:</b> 0: kein Einfluss 1: schwach und indirekt 2: mittel und direkt 3: stark und direkt																		
<b>Einfluss von</b>																		
1 Anzahl heißer Tage	—	1	3	1	2	3	0	0	2	1	1	2	2	1	1	3	23	
2 Anzahl an Sommertagen	1	—	2	1	3	0	0	2	1	1	2	2	1	0	3	20		
3 Jahresmitteltemperatur	1	1	—	1	2	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	11		
4 Jahresniederschlagssumme	1	1	1	—	3	2	0	0	0	1	1	1	0	1	3	15		
5 Grundwasserneubildung	0	0	0	0	—	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3		
6 Bewässerungsmenge	0	0	0	0	2	—	0	0	0	0	2	0	0	0	1	6		
7 Flächenversiegelung	0	0	1	0	2	1	—	1	0	0	0	0	2	0	1	8		
8 Aufforstung	1	0	1	0	2	0	1	—	0	0	0	0	0	0	1	6		
9 Kühlwasserbedarf	0	0	0	0	1	0	0	0	—	0	1	2	0	0	3	7		
10 Regelenergiebedarf	0	0	0	0	0	0	0	0	1	—	0	0	0	0	1	2		
11 Anteil erneuerbarer Energien	0	0	0	0	0	1	0	0	1	2	—	0	0	0	1	5		
12 Wassersparende Technologien	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	—	1	1	0	6		
13 Trinkwasserbedarf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	—	3	0	2	6		
14 Abwassereinleitung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	—	2	3	7		
15 Schleusung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	—	2	3		
16 Aktueller Niedrigwasserabfluss	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	2	2	—	6		
<b>Kumulierte Beeinflussbarkeit</b>		4	3	8	3	14	14	1	1	9	6	4	14	6	12	5	29	

Abbildung 24: Sensitivitätsmodell Einflussmatrix zur Wassernutzung am Neckar.

Die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Niedrigwassersituation im Neckar sind erwartungsgemäß die Klima- und Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag, Lufttemperatur, und Grundwasserneubildung (Abbildung 25). Sie haben eine hohe kumulierte Einflussstärke auf den Niedrigwasserabfluss. Die klimawandelbedingten Veränderungen im Wasserhaushalt zeigen, dass der herbstliche Abfluss im Mittel geringfügig niedriger sein wird. Eine Unsicherheit besteht weiterhin in der Frage, ob kritische Extremsituationen in den verwendeten Klimawandelszenarien ausreichend abgebildet sind. Die Entwicklungen der letzten Jahre lässt eher auf eine Unterschätzung der Klimawandelauswirkungen in den bisher verwendeten Klimaszenarien schließen (Barker et al. 2008, IPCC 2013). Die Entwicklung der zukünftigen Niederschläge und Lufttemperatur stellt den wichtigsten Einflussfaktor hinsichtlich des Niedrigwasserabflusses im Neckar dar. Eine Steuerung der natürlichen Faktoren des Wasserhaushalts im Neckar ist kaum möglich. Eingriffsmöglichkeiten bieten sich jedoch in den anthropogenen Faktoren. Die Entwicklung der Bewässerungsmenge in der Landwirtschaft, die Verwendung

wassersparender Technologien und die SES Abwassereinleitung sind hierbei kritische Faktoren für die Entwicklung der Niedrigwassersituation am Neckar.

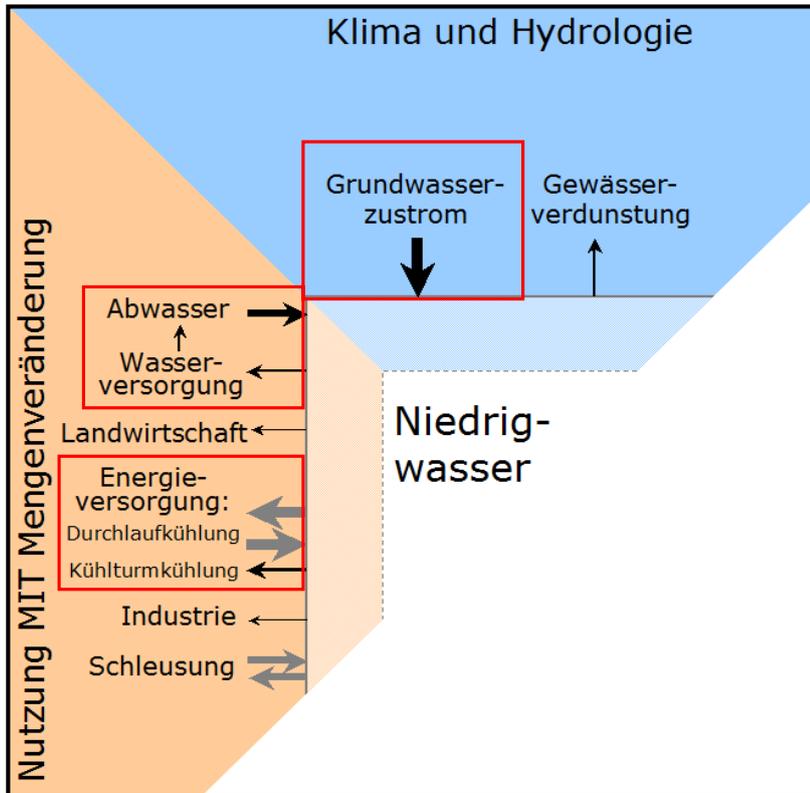


Abbildung 25: Wichtigste Einflussfaktoren auf die Niedrigwassersituation am Neckar.

### 5.1.3 ABLEITUNG VON HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN AUS DER SYSTEMANALYSE

#### 5.1.3.1 HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN IM BEREICH LANDWIRTSCHAFT

Im Bereich der Landwirtschaft im Neckar besteht bereits heute ein Druck auf die Wasserressourcen bei Niedrigwassersituationen. Den Landwirten ist dies bewusst und sie implementieren bereits Anpassungsmaßnahmen. Der Einsatz wassersparender Technologien und die Wasserspeicherung wird bereits genutzt und kann zukünftig auch noch weiter intensiviert werden. Unter Bedingungen des Klimawandels muss auch über eine Änderung der verwendeten Kulturarten, Anbauweisen und Betriebsstrukturen nachgedacht werden. Die Landwirtschaft kann allerdings sich durch die oftmals nur einjährige Fruchtfolge relativ schnell an den Klimawandel anpassen.

Maßnahmen zur Optimierung der Wassernutzung, Verringerung von Nutzungskonflikten und der nachhaltigen Sicherung der Wasserressourcen für die Landwirtschaft sind z.B.:

- Bodenschonende Bearbeitung und Bodenpflege: Einige Cross Compliance Verpflichtungen (z.B. Erosionsschutz, Humuserhalt) gehen mit einer höheren Infiltration, einer verstärkten Grundwasserneubildung und einer höheren Bodenwasserspeicherkapazität einher und sind folglich auch als Anpassungsmaßnahmen an zunehmende Trockenheit zu sehen. An Rebhängen lässt sich die Bodenwasserversorgung durch eine Bodenabdeckung mit grobem und langsam verrottbarem Material (z.B. Holzhäcksel, Rindenmulch) deutlich verbessern.
- Wasserspeicherung im regenreichen Frühjahr: Durch Rücknahme oder Umbau von Drainagesystemen sowie eine Ableitung des Wassers von Wegen in die Fläche erhöht sich die Bodenfeuchte und die Grundwasserneubildung. In Hochwasserzeiten könnte Flusswasser entnommen und gespeichert werden.

- Anbau trocken- und hitzeresistenter Sorten: Die Anbaumöglichkeit wärmeliebender Rebsorten ist z.B. eine Chance für innovative Winzer.
- Finanzielle Anregung zur wassereffizienten Bewirtschaftung (z.B. Staffelung des Wasserentnahme-Entgelts): Im Kartoffelanbau sind die Kosten der Tröpfchenbewässerung beispielsweise wegen des großen Arbeitsaufwandes beim Verlegen der Schläuche höher als die Einsparung durch geringeren Wasserverbrauch.
- Ausbau der Bewässerungsberatung: Aktuelle Forschungsergebnisse, neue Technologien und Erfahrungen aus anderen Beregnungsregionen sollten von zentraler Stelle recherchiert und an die Landwirte weitergegeben werden. Das ausgefeilte Beregnungsberatungssystem des Oberrheingrabens könnte beispielsweise bis in den Neckarraum erweitert werden.
- Einrichtung und Stärkung von landwirtschaftlichen Beregnungsverbänden für ein verbessertes Wassermengen-Management

#### 5.1.3.2 HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN IM BEREICH DER ENERGIEWIRTSCHAFT

Die energiewirtschaftliche Entwicklung im Bereich Kühlwassernutzung von Kraftwerken führt in Richtung eines geringeren Kühlwasserverbrauchs. Im Bereich der Stromeinspeisung aus Erneuerbaren Energien (EE) ergibt sich eine positive Rückkopplung auf den Niedrigwasserhaushalt am Neckar. Eine erhöhte EE-Stromeinspeisung führt zu geringeren Wasserverlusten. Allerdings kann es unter bestimmten Situationen zu dem Risiko eines Versorgungsengpasses kommen, so z.B. in der Situation, dass im Herbst ein hoher Strombedarf auf eine niedrige EE-Stromeinspeisung in das Netz trifft. Hier werden dann konventionelle Kraftwerke verstärkt die Grund- und Mittellast abdecken müssen und der Kühlwasserbedarf ansteigen.

- Als energiewirtschaftliche Maßnahmen werden beispielsweise empfohlen:
- Sukzessive Nachrüstung bestehender Kraftwerke mit wassersparenden Kühlsystemen.
- Weiterer flächendeckender Ausbau der Erneuerbaren Energien und Netze, um durch verbesserte Vernetzung und dezentrale Verteilung die von konventionellen Kraftwerken abzudeckende Grund- und Mittellast verringern zu können. Hierzu zählt auch der weitere Ausbau von Stromspeichern.
- Nutzung des sommerlichen PV-Stromüberschusses z.B. zur Trockenkühlung und Sauerstoffanreicherung des Neckarwassers mittels der (ehemaligen) Kraftwerkskühltürme („Wassertemperatur-Zertifikate“)

#### 5.1.3.3 HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN IM BEREICH DER ABWASSERWIRTSCHAFT

Da im Neckar die SES Abwassereinleitung aus dem Bodensee eine bedeutende Rolle spielt, muss auch dieser Faktor als Steuerungselement in Betracht gezogen werden. Die zu erwartende Abnahme der Trockenwetter-Abwassereinleitung dürfte zwischen 5% und 15% (= 0,25 – 0,75 m<sup>3</sup>/s) liegen.

- Bei Änderungen im Abwassersystem in der Region Stuttgart müssen die Fernwirkungen auf den Neckar immer mit betrachtet werden.
- Überleitung und Speicherung maximal möglicher Wassermengen aus dem Bodensee und der Donau

#### 5.1.3.4 ALLGEMEINE HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

Folgende allgemeine Maßnahmen mit Auswirkungen auf den Wasserhaushalt im Neckargebiet werden empfohlen:

- Der Schutz von Grundwasserneubildungsgebieten ist für die Sicherung und eventuelle Erhöhung des Grundwasserzustroms im Spätsommer sind von zentraler Bedeutung
- Umbau in der Forstwirtschaft hin zu vermehrten Laubwäldern (wie z.B. von Leist 2007 – Wasserversorgung in Deutschland empfohlen)
- Synergien von Hochwasserschutz und Niedrigwasservorsorge nutzen durch die Füllung von Retentionsflächen bei Hochwassersituationen, die bei Niedrigwasser in den Wasserlauf zurückgeführt werden können, oder direkt zur Bewässerung genutzt werden können.
- Flexiblere Wassernutzungserlaubnisse (z.B. Lockerung im Winter, strengere Vorgaben im Spätsommer)
- Länderübergreifende Betrachtung von Klimawandel und Energiewende

## 6 Schlussfolgerungen und weiterer Forschungsbedarf

Bedingt durch den anthropogenen Klimawandel besteht ein politischer Handlungsbedarf die entstehenden Wassernutzungskonflikte frühzeitig zu erkennen, zu moderieren, zu verringern und wenn möglich, zu vermeiden. Beteiligte Akteure im Bereich des Neckars sind vor allem die Landwirtschaft, die Energieerzeuger und die Abwasserbetriebe. Lösungsansätze zur Konfliktmitigation sollten nach Möglichkeit alle Akteure beteiligen.

Im Bereich der Folgen einer steigenden Wassertemperatur und dem Umgang mit seltenen Extremsituationen besteht ein weiterer Forschungs- und Handlungsbedarf. Die Entwicklung regionaler Szenarien und Klimamodelle hinkt den bereits global gewonnen und im 5. Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2013, 2014) veröffentlichten Fakten hinterher. Daher sollte in Zukunft untersucht werden, inwieweit kritische Extremsituationen in den verwendeten Klimawandelszenarien und regionalen Klimamodellen ausreichend abgebildet sind.

Die im Rahmen des KLIMOPASS Projektes durchgeführte Analyse wurde ausschließlich die Wasserentnahme am Neckar quantifiziert und könnte zukünftig jedoch auf ganz Baden-Württemberg oder zumindest auf weitere wichtige Fließgewässer ausgeweitet werden.

Um exaktere Aussagen zu den Auswirkungen der vermiedenen Wasserentnahme im Hinblick auf den Klimawandel und auf Niedrigwassersituationen zu treffen, müsste eine genaue Betrachtung der Abflussmengen am Neckar über einen bestimmten Zeitraum folgen. Eine Möglichkeit wäre die differenzierte Betrachtung der einzelnen Kraftwerke im Hinblick auf die jeweiligen Grenzwerte und den vermiedenen Wasserverbrauch durch erneuerbare Energien. Im Vergleich mit den realen Abflussmengen könnte dann eine Aussage über den Einfluss der Stromeinspeisung erneuerbarer Energien auf die geringere Häufigkeit des Erreichens von wasserrechtlichen Grenzwerten thermischer Kraftwerke getroffen werden.

Ein weiterer Forschungsbedarf liegt in der konkreten Analyse von im Zuge des Klimawandels potenziell auftretenden Interessens- und Nutzungskonflikten um die Ressource Wasser in kleineren Einzugsgebieten. Hier könnten alle beteiligten Akteure (Energienutzung, Landwirtschaft, kommunale Entwässerung, Ökologie, Tourismus, etc.) in einem Prozess zusammengebracht und so fachlich fundierte und reproduzierbare Handlungsoptionen für diese Interessens- und Nutzungskonflikte um die Ressource Wasser identifiziert werden. Dies erfordert einen partizipativen Ansatz mit Integration der verschiedenen Akteure. Durch partizipative Prozesse können die Akzeptanz für Moderations- und Lösungsansätze deutlich gesteigert werden. Als ein geeigneter Ansatz für die Ressourcenkonfliktmoderation zwischen verschiedenen Akteursgruppen hat sich in vielen Situationen ein systemtheoretischer Ansatz herausgestellt (Vennix 1996, Cassel-Gintz 2004; Cassel-Gintz et al. 2004, Cassel et al. 2012, Cassel und Hinsberger 2013, Zicherman et al. 2011).

Im Prozess des Managements von Interessens- und Nutzungskonflikten um Querschnittsthemen wie Wasser, müssen ökonomische, gesellschaftliche und ökologische Belange adäquat berücksichtigt werden und in einem partizipativen Prozess zwischen den verschiedenen Akteuren ausgehandelt werden. An Hand von kleineren Beispieleinzugsgebieten könnte der Prozess zur Identifikation von Konflikten, die Ableitung von Kon-

fliktlösungsstrategien und Handlungsempfehlungen beispielhaft durchgeführt werden. Die Moderation und Identifikation von Lösungsansätzen in bestehenden und zukünftigen Interessens- und Nutzungskonflikten um die Ressource Wasser in den Beispielregionen kann als systematische Herangehensweise dann auch auf andere Regionen Baden-Württembergs übertragen werden.

## 7 Literatur

Barker, T., Bergall, O., Bodin, S., Cassel-Gintz, M., Cornelius, S., De Brabante, E., Fuentes, U., Füssel, H.-M., Gillet, M., Hain, B., Hare, W., Klaasen, G., Knopf, B., Krogh Andersen, K., Luderer, G., Matthews, B., MCGovern, F., Meinshausen M. (Ed.), Midgley, P., Radunsky, K., Rakovec, J., Rösner, S., Van Ierland, T., War-Rilow, D., and Weiss, M. (2008): The 2°C target: Background on Impacts, Emission Pathways, Mitigation Options and Costs. Information Reference Document prepared and adopted by EU Climate Change Expert Group 'EG Science'. Internal Document.

Barthel, R., Janisch, S., Schwarz, N., Trifkovic, A., Nickel, D., Schulz, C. and Mauser, W. (2008): An integrated modelling framework for simulating regional-scale actor responses to global change in the water domain; *Environmental Modeling and Software*, 23, 1095-1121.

BMBVS (2007): *Schifffahrt und Wasserstraßen in Deutschland – Zukunft gestalten im Zeichen des Klimawandels*. Bestandsaufnahme. Hrsg.: Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn.

BMBVS (2009): *Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland*. 1. KLIWAS-Statuskonferenz am 18. und 19. März. Hrsg.: Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn.

BNETZA (Bundesnetzagentur) (2012): *Kraftwerksliste der Bundesnetzagentur*. Stand 04.05.2012. In: [http://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetGas/Sonderthemen/Kraftwerksliste/VeroeffKraftwerksliste\\_node.html](http://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetGas/Sonderthemen/Kraftwerksliste/VeroeffKraftwerksliste_node.html) (10.06.2012).

Braun, R., Koller, H.P., Hauenstein, W., Hennegriff, W., Rudel, E. Hundhausen, M. und Kirnbauer, R. (2009): *Stromwirtschaft im Klimawandel*. Verein für Ökologie und Umweltforschung (Hrsg.), Schriftenreihe für Ökologie und Ethologie 35, Facultas, Wien.

Bremicker, M. (2000): *Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele*. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 11.

Bundesnetzagentur (BNetzA) (2012): *Kraftwerksliste der Bundesnetzagentur*. Stand 04.05.2012. In: <http://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetGas/>.

Bundeszentrale für politische Bildung (BPB) (2010): *Wasserverbrauch. Fakten*. In: <http://www.bpb.de/wissen/VGPF7A,0,0,Wasserverf%FCgbarkeit.html> (21.02.2013).

Caspary (2007): *Trockenperioden, Niedrigwasser und Hitzewellen in Südwestdeutschland auslösende „kritische“ Wetterlagen*, unveröffentlichte Studie im Auftrag der LUBW.

Caspary (2009): Analyse der Trocken- und Niedrigwasserperioden in den Bundesländern Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz auslösenden „kritischen“ Wetterlagen auf der Basis von NCAR-Reanalysen und verschiedener regionaler Klimamodelle, unveröffentlichte Studie im Auftrag der LUBW, LUWG Rheinland-Pfalz und LfU Bayern.

Cassel, M. and Hinsberger, M. (2013): Flood Partnerships - A Participatory Approach to Develop and Implement the Flood Risk Management Plans. Journal of Flood Risk Management. Special Issue on the Flood Risk Management Plan Article first published online: 2 DEC 2012, DOI: 10.1111/jfr3.12086.

Cassel, M., Boettcher, R. und Jansen, R. (2012): Identifikation möglicher Hochwasserschutzziele in einem partizipativen Prozess am Beispiel der Stadt Vallendar. WasserWirtschaft 11/2012 Vieweg & Teubner.

Cassel-Gintz, M. (2004): Group model Building – a transdisciplinary method of knowledge integration for the NCCR North-South. Internal NCCR North-South Dialogue Paper. <http://www.nccr-north-south.unibe.ch>.

Cassel-Gintz, M., Gallati, J. and Sietz, D. (2004): Group Model Building – a Transdisciplinary Method of Knowledge Integration for the NCCR North-South. Part 2: Report, Outcomes and Conclusions of the JACS Workshop East Africa 2004. Internal NCCR North-South Dialogue Paper. <http://www.nccr-north-south.unibe.ch>.

Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH (CEC) (2009): Analyse möglicher zukünftiger Klimate im Rheineinzugsgebiet bis Worms, unveröffentlichte Studie im Auftrag der LUBW und des LUWG Rheinland-Pfalz.

ENTSO-E (2012): Hourly load values for specific country for a specific month. Homepage der European Network of Transmission System Operators for Electricity. In: <https://www.entsoe.eu/db-query/consumption/mh1v-a-specific-country-for-a-specific-month/> (15.06.2012).

European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E) (2012): Hourly load values for specific country for a specific month. In: <https://www.entsoe.eu/db-query/consumption/mh1v-a-specific-country-for-a-specific-month/> (21.02.2013).

Forrester, J.W. (1971) World Dynamics. MIT Press, Cambridge.

Göbbling-Reisemann, S.; Bardt, H.; Bieberle, H.; Dördelmann, O.; Herrmann, A.; Stührmann, S.; Wachsmuth, J. (2012): Klimawandel: Regionale Verwundbarkeit der Energieversorgung in Deutschland. S. 60-63. in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen. Heft 4. 60 – 63. in: [http://et-energie-online.de/Portals/0/PDF/zukunftsfragen\\_2012\\_04\\_komplett.pdf](http://et-energie-online.de/Portals/0/PDF/zukunftsfragen_2012_04_komplett.pdf) (21.02.2013).

Greis, S., Strauch, U. & Rothstein, B. (2011): Untersuchungen zur Gewässertemperaturentwicklung ausgewählter Flüsse mit thermischen Kraftwerksstandorten in Deutschland. Korrespondenz Wasserwirtschaft, 1/11, S. 35-40.

Hennegriff, W., Ihringer, J., Kolokotronis, V. (2008): Prognose von Auswirkungen des Klimawandels auf die Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg. Korrespondenz Wasserwirtschaft 6/2008, S. 309-314.

Heylighen, F. and Joslyn, C. (1992) What is Systems Theory? In: Heylighen, F., Joslyn, C. and Turchin, V. (eds): Principia Cybernetica Web. Principia Cybernetica, Brussels. In: <http://pespmc1.vub.ac.be/SYSTHEOR.html> (26.03.2013).

IPCC (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (eds): Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

IPCC (2014): Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (eds): Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp.

Ibrahim, M. and Midgley, T. (2013) Participatory learning approaches for resilience: Bringing conflict sensitivity, disaster risk reduction, and climate change adaptation together. Policy and Practice Paper. World Vision UK London, [www.worldvision.org.uk](http://www.worldvision.org.uk) (04.02.2014).

KLIWA (2009): Auswirkungen des Klimawandels auf Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz, KLIWA-Berichte, Heft 14.

KLIWA (2010): 4. KLIWA-Symposium am 3. und 4. Dezember 2009 in Mainz – Fachvorträge, KLIWA-Berichte Heft 15.

LfU (2005): Mindestabflüsse in Ausleitungsstrecken. Grundlagen, Ermittlung und Beispiele.

LAWA (1991): Grundlagen für die Beurteilung für die Kühlwassereinleitung in Gewässer. 3. Auflage. Erich Schmidt Verlag. Hrsg.: Länderarbeitsgemeinschaft Wasser.

Leist, H.-J. (2007): Wasserversorgung in Deutschland - Kritik und Lösungsansätze. oekom verlag München, ISBN-13: 978-3-86581-078-6.

LUBW (2010): Wasserhaushaltssimulation mit COSMO-CLM-Daten (Version 4.2) und mit WETTREG-Daten für das Rhein-Einzugsgebiet bis zum Pegel Worms. Unveröffentlichte Studie im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg.

LUBW (2011): Wasserhaushaltssimulation mit COSMO-CLM-Daten (Version 4.8) für das Rhein-Einzugsgebiet bis zum Pegel Worms. Unveröffentlichte Studie im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg.

Ludwig, K. & Bremicker, M. (Hrsg. 2006): The Water Balance Model LARSIM – Design, Content and Applications. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 22. Institut für Hydrologie, Universität Freiburg.

- Mastel, K. (2002): Beregnung und Bewässerung landwirtschaftlicher und gärtnerischer Kulturen. Hrsg.: Landesanstalt für Pflanzenbau, Forchheim. Merkblätter für die Umweltgerechte Landbewirtschaftung, Nr. 24.
- Mastel, K. (2008): Herausforderungen Klimawandel – Mögliche Anpassungsreaktionen der Landwirtschaft in Baden-Württemberg. Vortrag auf der Tagung „Herausforderung Klimawandel“ am 05.03.2008 in Karlsruhe.
- Meadows, D.H., Meadows, D.L. and Randers, J. (1992) Beyond the Limits. Chelsea Green Publishing Company, Post Mills.
- Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J. and Behrens, W.W. III (1972) The Limits to Growth. Universe Books, New York.
- Mimler, S.; Müller, U.; Greis, S.; Rothstein, B. (2009): Impacts of Climate Change on Electricity Generation and Consumption. In: LEAL FILHO, W. (Hrsg.): Interdisciplinary Aspects of Climate Change. Peter Lang Scientific Publishers. Frankfurt. 11-37. ISBN 978-3-631-58153-7.
- Mimler, S.; Rothstein, B. (2007): Klimawandel und Elektrizitätsnachfrage – Eine Untersuchung zu klimawandelbedingten Änderungen in der Elektrizitätsnachfrage durch langfristig sich ändernde Durchschnittstemperaturen und extreme Hitzeereignisse. Posterveröffentlichung Deutscher Geographentag 2007. 29.09.-05.10.2007. Bayreuth.
- Nabe, C. (2006): Effiziente Integration erneuerbarer Energien in den deutschen Elektrizitätsmarkt. Wirtschaft und Management der Technischen Universität Berlin. Dissertation. 161 S.
- Pechan, A., Rotter, M. und Eisenack, K. (2011): Eingestellt auf Klimafolgen? Ergebnisse einer Unternehmensbefragung zur Anpassung der Energie- und Verkehrswirtschaft. Schriftenreihe des IÖW 200/11.
- Pöhler, H., Chmielewski, F.-M., Jasper, K., Hennings, Y., und Scherzer, J. (2007): KLI-WEP – Abschätzung der Auswirkungen der für Sachsen prognostizierten Klimaveränderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt im Einzugsgebiet der Parthe. Weiterentwicklung von WASIM-ETH: Implikation dynamischer Vegetationszeiten und Durchführung von Testsimulationen für sächsische Klimaregionen. Abschlussbericht. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie.
- Pöhler, H., Müller, M., Jasper, K., Scherzer, J. (2008): KliWEP – Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt im Parthe-Einzugsgebiet. Abschlussbericht. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie.
- Prior, B. (2007): Tropfbewässerung oder effizientere Nutzung der Niederschläge? Das Deutsche Weinmagazin, Nr. 6, S. 26-32.
- Rothstein, B. and Halbig, G. (2010): Weather Sensitivity of Electricity Supply and Data Services of the German Met Office. In: Troccoli, A. (Hrsg.): Management of Weather and Climate Risk in the Energy Industry. NATO Science Series. Springer Academic Publisher. Dordrecht. 253-266.

Rothstein, B. and Parey, S. (2011): Impacts of and Adaptation to climate change in the electricity sector in Germany and France. In: Ford, J. D. & Ford, L. B. (Hrsg.): Climate change adaptation in developed nations. Springer. Netherlands. S. 231-241.

Rothstein, B. (2007): Elektrizitätswirtschaft als Betroffene des Klimawandels – Eine Identifikation von Betroffenenheiten und Ansätze zur Anpassung an den Klimawandel dargestellt am Beispiel der Energieunternehmen EnBW und EDF. Habilitation Universität Würzburg. 398 S.

Rothstein, B., Müller, U., Greis, S., Schulz, J., Scholten, A. und Nilson, E. (2008a): Elektrizitätsproduktion im Kontext des Klimawandels. Korrespondenz Wasserwirtschaft (1), Nr. 10, S. 555-561.

Rothstein, B., Scholten, A., Müller, U., Greis, S., Schulz, J. und Nilson, E. (2008b): Auswirkungen des Klimawandels auf die Elektrizitätsproduktion – unter besonderer Berücksichtigung des Aspekts Wasser. Schriftenreihe „Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung“. Heft 24.08. 193-214. Hennef.

Rothstein, B.; and Halbig, G. (2010): Weather Sensitivity of Electricity Supply and Data Services of the German Met Office. In: TROCCOLI, A. (Hrsg.): Management of Weather and Climate Risk in the Energy Industry. NATO Science Series. Springer Academic Publisher. Dordrecht. 253-266. ISBN 978-90-481-3690-2.

RP STUTTGART (2009): Bewirtschaftungsplan Bearbeitungsgebiet Neckar gemäß EG-Wasserrahmenrichtlinie (2000/60/EG). Stand: 26. November 2009.

Schaber, J. (2012): „Wasser marsch!“ für Gemüse, Mais und Co. Ersatz fehlender Niederchläge durch Bewässerung sichert Menge und Qualität. Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg 5/2012, S. 29-33.

Schaeffer, R., Szklo, A.S., Pereira de Lucena, A.F., Borba, B.S.M.C., Nogueira, L.,P.P., Fleming, F.P., Troccoli, A., Harrison, M. and Boulahya, M.S. (2012): Energy sector vulnerability to climate change: A review. Energy, 38, p. 1-12.

Scherzer, J., Disse, M., Jacoby, C., Heinisch, T., Grigoryan, G., Schultze, B., Stadelbacher, V., Niederberger, J. and Pöhler, H. (2010): WASKlim Entwicklung eines übertragbaren Konzeptes zur Bestimmung der Anpassungsfähigkeit sensibler Sektoren an den Klimawandel am Beispiel der Wasserwirtschaft - Block 1: Methodenentwicklung zur Bestimmung der Anpassungskapazität und Vulnerabilität - Block 2: Anpassungskonzepte für den Wassersektor und Umgang mit Nutzungskonflikten. UBA-Schriftenreihe 47/2010.

Schoellkopf, B (2011): Kartoffel-Bewässerung: Acht Verfahren im Vergleich. Top agrar 5/2011, S. 84-89.

Scholten, A. und Rothstein, B. (2012): Auswirkungen von Niedrigwasser und Klimawandel auf die verladende Wirtschaft, Binnenschifffahrt und Häfen entlang des Rheins. Würzburger Geographische Arbeiten, Heft 107. Würzburg. ISSN 0510 – 9833.

Schulz, D. und BioConsult (2011): Anpassung an den Klimawandel LANDWIRTSCHAFT. Themenblatt: Anpassung an Klimaänderung in Deutschland. Hrsg.: Umweltbundesamt, Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung.

Simon, A. (2010): Wer erhält Vorfahrt? in: Erneuerbare Energien Das Magazin. in: <http://www.erneuerbareenergien.de/wer-erhaelt-vorfahrt/150/492/28735/> (21.02.2013).

STALA (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg) (2009): Statistik Aktuell. Wasserversorgung in Baden-Württemberg. In: [http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/veroeffentl/Statistik\\_AKTUELL/803409006.pdf](http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/veroeffentl/Statistik_AKTUELL/803409006.pdf) (21.02.2013).

STALA (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg) (2012): Landesdaten zu Umwelt, Verkehr und Energie. Online unter <http://www.statistik-bw.de/> (letzter Zugriff: 18.02.2013).

STALA & UM (Statistisches Landesamt & Umweltministerium Baden-Württemberg) (2012): Energiebericht 2012.

Staiß, F. und Schmidt, M. (2012): Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Baden-Württemberg. Pressekonferenz mit dem Umweltminister des Landes Baden-Württemberg Franz Untersteller, Haus des Landtags, Stuttgart 9. Januar 2012. Online abrufbar unter <http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/89900/Anlage.pdf?command=downloadContent&filename=Anlage.pdf> (12.02.2013).

Stölzle, M. und Stahl, K. (2011): Wassernutzung und Trockenheitsindikatoren in Baden-Württemberg. Eine Umfrage unter betroffenen Akteuren. Zeitschrift für Angewandte Geographie 35, S. 94-101.

Strauch, U. (2011): Wassertemperaturbedingte Leistungseinschränkungen konventioneller thermischer Kraftwerke in Deutschland und die Entwicklung rezenter und zukünftiger Flusswassertemperaturen im Kontext des Klimawandels. Würzburger Geographische Arbeiten, Heft 106.

TRANSNET-BW (2012): Photovoltaikeinspeisung. Homepage der Transnet BW GmbH. in: <http://www.transnetbw.de/kennzahlen/erneuerbare-energien/photovoltaikeinspeisung/> (14.08.2012).

UM und LUBW (2012): Klimawandel in Baden-Württemberg. Fakten – Folgen – Perspektiven. Herausgegeben vom Umweltministerium und der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz, Baden-Württemberg.

Vennix, J.A.M. (1996) Group Model Building: Facilitating Team Learning using System Dynamics. John Wiley & Sons, Chichester, New York.

Vester, F. (2007): Die Kunst vernetzt zu denken. Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität. dtv-Verlag, München.

Vester, F. und v. Heseler, A. (1980) Sensitivitätsmodell. Ökologie und Planung in Verdichtungsgebieten. UNESCO Man and the Biosphere Project 11. Regionale Planungsgemeinschaft Untermain.

Wechsung, F.; Hanspach, A.; Hattermann, F.; Werner, P.C. und Gerstengarbe F.-W. (2006): Klima- und Anthropogene Wirkung auf den Abfluss der mittleren Elbe, Konsequenzen für Unterhaltungsziele und Ausbaunutzen. PIK. S.7, 45.

Zebisch, M.; Grothmann, T.; Schröter, D.; Hasse, C.; Fritsch, U. und Cramer, W. (2005): Klimawandel in Deutschland – Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. Umweltbundesamt, Climate Change 08/05 (UFOPLAN 201 41 253). Dessau. <http://www.umweltbundesamt.org/fpdf-1/2947.pdf>.

Zicherman, N., Khan, A., Street A., Heeyer, H. and Chevreauet, O. (2011) Applying conflict sensitivity in emergency response - Current practice and ways forward. Humanitarian Practice Network (HPN), Overseas Development Institute, London [www.odihpn.org](http://www.odihpn.org) (04.02.2014).

# 8 Liste der im Rahmen des Projekts erstellten Veröffentlichungen, Konferenzbeiträge und Abschlussarbeiten

## 8.1 VERÖFFENTLICHUNGEN, KONFERENZBEITRÄGE

Johst, M., Haßdenteufel, M. und Rothstein, B. (2012): Steuerbarkeit von kritischen Niedrigwassersituationen am Neckar. Poster-Beitrag beim Dialog zu öffentlichem und privatem Risikomanagement im Klimawandel am 11./12. Okt 2012 am Umweltbundesamt in Dessau.

Johst, M. & Rothstein, B. (2012): Auswirkungen des Klimawandels und der Energiewende auf den Landschaftswasserhaushalt im Neckar-Einzugsgebiet. Vortrag auf dem 5. Hochschultag Ländlicher Raum am 12. Okt 2012 an der Akademie Ländlicher Raum Baden-Württemberg in Stuttgart.

Johst, M., Scherzer, J. und Rothstein, B. (2012): Steuerbarkeit von kritischen Niedrigwassersituationen am Neckar. Poster-Beitrag beim 5. KLIWA-Symposium am 6./7.12.2012 in Würzburg.

Rothstein, B. und Johst, M. (2012): Regionale Klimafolgen für die Energiewirtschaft in Baden-Württemberg – Eine modellgestützte Analyse von konkurrierenden Wassernutzungen am Neckar. HTWG FORUM, Forschungsmagazin der Hochschule Konstanz, 48-51.

Johst, M., und Rothstein, B. (2013): Auswirkungen des Klimawandels und der Energiewende auf den Landschaftswasserhaushalt im Neckareinzugsgebiet. In: Megerle, H. (Hrsg.): Handlungsoptionen für zukunftsfähige Ländliche Räume Tagungsbeiträge des fünften Hochschultages Ländlicher Raum Baden-Württemberg, Band 2 Geographie in Wissenschaft und Praxis (Herausgegeben von Heidi Megerle und Lutz-Michael Vollmer). S. 132-144; Kersting-Verlag. Rottenburg am Neckar. ISBN 978-3-937559-15-5

Johst, M., Rothstein, B., Raiber, S. & Kammer, H. (2013): Zusammenhang zwischen Photovoltaik- und Windstromeinspeisung, Kühlwassereinsparung und Wasserkraft am Neckar. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 32.13, 153-162.

Johst, M., und Rothstein, B. (2013): Energie und Wasser – zwei (fast) untrennbare Partner. Vortrag beim Deutsch-Französischen Hochschulseminar der Universität Konstanz am 28.02.2013 in Konstanz.

Johst, M. (2013): Folgen des Klimawandels und der Energiewende für die Energiewirtschaft in Baden-Württemberg. Vortrag beim Netzwerktreffen Energiemanagement am 11.03.2013 an der Hochschule Ludwigshafen.

Johst, M., Rothstein, B., Raiber, S. und Kammer, H. (2013): Zusammenhang zwischen Photovoltaik- und Windstromeinspeisung, Kühlwassereinsparung und Wasserkraft am Neckar. Vortrag auf dem Tag der Hydrologie am 05.04.2013 in Bern.

Johst, M., Rothstein, B., Raiber, S. und Kammer, H. (2013): Zusammenhang zwischen Photovoltaik- und Windstromspeisung, Kühlwassereinsparung und Wasserkraft am Neckar. In: Weingartner, R. & Schädler, B. (Hrsg.): Wasserressourcen im globalen Wandel. Beiträge zum Tag der Hydrologie 4. bis 6. April in Bern. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 32.13, S. 153-162.

Rothstein, B., Johst, M., Kammer, H. und Raiber, S. (2013): Vermiedene Kühlwasserentnahme entlang des Neckars durch PV- und Windkraftspeisung. Korrespondenz Wasserwirtschaft. Korrespondenz Wasserwirtschaft (6), Nr. 7, S. 379 – 384. DOI: 10.3243/kwe.2013.07.002.

Rothstein, B. und Johst, M. (2013): KLIMOPASS: Regionale Klimafolgen für die Energiewirtschaft in Baden-Württemberg. Poster für den Schaukasten des Instituts für Angewandte Forschung der Hochschule Konstanz.

Rothstein, B. und Johst, M. (2013): Nutzung von TransnetBW-Daten im Kontext des geowissenschaftlichen Ressourcenmanagements mit Schwerpunkt Wasser. Vortrag bei der TransnetBW GmbH am 08.07.2013 in Stuttgart.

Johst, M. und Rothstein, B. (2013): Niedrigwasser und energiewirtschaftliche Kühlwassernutzung am Neckar. Vortrag beim Geographentag am 02./03. Oktober 2013 in Passau.

Johst, M. and Rothstein, B. (2014): Reduction of cooling water consumption due to photovoltaic and wind electricity feed-in. Renewable and Sustainable Energy Reviews 35 (2014) 311–317. ISSN: 1364-0321. DOI 10.1016/j.rser.2014.04.029. <http://authors.elsevier.com/sd/article/S1364032114002561> Impact Factor 2013: 5.510.

Rothstein, B. (2014): Reduction of cooling water consumption due to photovoltaic and wind electricity feed-in. DFG-Workshop Rural Sustainable Tourism and Land Use. Indo-German Centre for Sustainability – IGCS. Chennai. India. 29th of September to 1st of October 2014.

Lerche, I., Süß, R., und Rothstein, B. (2015): Möglichkeiten einer Regelenergiebereitstellung durch Laufwasserkraftwerke dargestellt am Beispiel der Bundesschiffahrtsstrasse Neckar. In: Korrespondenz Wasserwirtschaft (8), Nr. 5, S.290 – 295.

Leitung Fachsitzung 71: „Regionale Risikoanalyse Kritischer Infrastrukturen“ durch Prof. Dr. Benno Rothstein und Prof. Dr. Joachim Vogt beim Geographentag am 02./03. Oktober 2013 in Passau.

## **8.2 ABSCHLUSSARBEITEN**

Kammer, H. (2012): Kühlwassereinsparung durch Photovoltaik-Einspeisung. Modell zur Simulation der verminderten Leistungsabgabe konventioneller Kraftwerke durch die Photovoltaik-Einspeisung und die dadurch vermiedene Kühlwasserentnahme entlang des Neckars. Bachelorarbeit an der Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg.

Raiber, S. (2012): Kühlwassereinsparung durch Windkraftspeisung. Modell zur Simulation der verminderten Leistungsabgabe konventioneller Kraftwerke durch die Windkraft-Einspeisung und die dadurch ver-

miedene Kühlwasserentnahme entlang des Neckars. Bachelorarbeit an der Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg.

Fritz, T. (2012): Anpassungen der Land- und Forstwirtschaft an den Klimawandel und deren Einfluss auf den Landschaftswasserhaushalt. Bachelorarbeit an der Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg, Studiengang Ressourcenmanagement Wasser.

Lerche, L. (2013): Regelenergie durch Laufwasserkraft – Erstellung von Kriterien zur Beurteilung einer möglichen Durchlaufspeicherung am Beispiel des unteren Neckars. Bachelorarbeit an der Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg.

Süss, A.R. (2013): Durchlaufspeicherung am Neckar - Eine Potentialanalyse zur Regelenergiebereitstellung an der Bundesschiffahrtsstraße Neckar. Bachelorarbeit an der Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg.



