

# Anpassungsstrategie Baden-Württemberg an die Folgen des Klimawandels

Fachgutachten für das Handlungsfeld Wasserhaushalt

- Teil A: Langfassung -

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

Autorengruppe:

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



Stand: Oktober 2013

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



- Auftraggeber:** © Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft  
Baden-Württemberg, Stuttgart
- Fachliche Begleitung:** LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz  
Baden-Württemberg, Postfach 10 01 63, 76231 Karlsruhe  
Ref. 23 – Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Klimawandel  
Dr. Kai-Achim Höpker, Dagmar Berberich, Daniel Schulz-Engler
- Ressortarbeitskreis Wasserhaushalt unter Leitung von  
Herrn Markus Lehmann, UM, Ref. 51 - Verwaltung und Recht  
und Mitwirkung von  
Gerhard Spilok, UM, Ref. 51  
Dr. Steffen Ochs, UM, Ref. 52  
Annegret Heer, UM, Ref. 53  
Markus Langner, UM, Ref. 54  
Markus Ziegler, UM, Ref. 54  
Hans-Martin Waldner, UM, Ref. 55  
Bernd Katzenberger, LUBW, Ref. 43
- Auftragnehmer** Universität Stuttgart – Wasserforschungszentrum Stuttgart  
(<http://www.uni-stuttgart.de/>, <http://www.wfz.uni-stuttgart.de/>)
- Bearbeitet von** Projektleiter:  
Prof. Dr.-Ing. Heidrun Steinmetz,  
Prof. Dr.-Ing. Silke Wieprecht,  
Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. András Bárdossy
- Mitarbeiter:  
Dipl.-Ing. David Bendel,  
Dr.-Ing. Ulrich Dittmer,  
Dipl.-Ing. Ralf Minke,  
Dr.-Ing. Birgit Schlichtig,  
Dipl.-Ing. Eva Fenrich, M.Sc.,  
Dipl.-Ing. Dirk Schlabing,  
Dr. rer. nat. Jochen Seidel,  
Dr. rer. nat. Karolin Weber



**Stand:** Oktober 2013

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



# Inhaltsverzeichnis

---

<b>1</b>	<b>EINFÜHRUNG UND BESCHREIBUNG DES HANDLUNGSFELDES WASSERHAUSHALT .....</b>	<b>1</b>
1.1	DAS HANDLUNGSFELD WASSERHAUSHALT.....	1
1.2	BEZÜGE ZU ANDEREN HANDLUNGSFELDERN .....	4
1.3	GRUNDDATEN ZUM WASSERHAUSHALT, ZUM MONITORING UND ZUM ZUSTAND DER GEWÄSSER IN BADEN- WÜRTTEMBERG .....	5
1.3.1	<i>Fließgewässer</i> .....	6
1.3.2	<i>Stehende Gewässer</i> .....	9
1.3.3	<i>Grundwasser</i> .....	11
1.3.4	<i>Wassergewinnung, Wassernutzung und Trinkwasserversorgung</i> .....	15
1.3.5	<i>Abwasser</i> .....	17
1.4	SONSTIGE REGIONALE UND GLOBALE EINFLÜSSE.....	18
<b>2</b>	<b>WIRKSAME KLIMAFAKTOREN .....</b>	<b>19</b>
2.1	KLIMATISCHE LEITPLANKEN FÜR BADEN-WÜRTTEMBERG.....	19
2.2	UNSIKERHEITEN.....	21
2.2.1	<i>Klimamodelle und Unsicherheiten</i> .....	21
2.2.2	<i>Anmerkungen zu den Klimaleitplanken</i> .....	23
2.3	LUFTEMPERATUR .....	24
2.4	NIEDERSCHLAG .....	27
2.4.1	<i>Jahresmittel und Jahresgang</i> .....	27
2.4.2	<i>Starkniederschlag</i> .....	30
2.4.3	<i>Kurzfristige Extreme und Niederschlagskontinuum</i> .....	32
2.4.4	<i>Trockenperioden</i> .....	35
2.5	GLOBALSTRAHLUNG .....	37
2.6	WIND.....	38
<b>3</b>	<b>VULNERABILITÄT .....</b>	<b>40</b>
3.1	HOCHWASSER.....	45
3.1.1	<i>Exposition</i> .....	45
3.1.2	<i>Sensitivität und potenzielle Auswirkungen</i> .....	45
3.1.3	<i>Anpassungskapazität</i> .....	51
3.1.4	<i>Dringlichkeit</i> .....	52
3.1.5	<i>Gesamtbetrachtung der Vulnerabilität</i> .....	53
3.2	NIEDRIGWASSER.....	53
3.2.1	<i>Exposition</i> .....	53
3.2.2	<i>Sensitivität und potenzielle Auswirkungen</i> .....	54
3.2.3	<i>Anpassungskapazität</i> .....	63
3.2.4	<i>Dringlichkeit</i> .....	63
3.2.5	<i>Gesamtbetrachtung der Vulnerabilität</i> .....	64
3.3	GEWÄSSERÖKOLOGIE .....	65
3.3.1	<i>Exposition</i> .....	65

3.3.2	<i>Sensitivität und potenzielle Auswirkungen</i> .....	66
3.3.3	<i>Anpassungskapazität</i> .....	76
3.3.4	<i>Dringlichkeit</i> .....	76
3.3.5	<i>Gesamtbetrachtung der Vulnerabilität</i> .....	77
3.4	SIEDLUNGSENTWÄSSERUNG .....	79
3.4.1	<i>Exposition</i> .....	79
3.4.2	<i>Sensitivität und potenzielle Auswirkungen</i> .....	81
3.4.3	<i>Anpassungskapazität</i> .....	90
3.4.4	<i>Dringlichkeit</i> .....	93
3.4.5	<i>Gesamtbetrachtung der Vulnerabilität</i> .....	94
3.5	GRUNDWASSER .....	94
3.5.1	<i>Exposition</i> .....	94
3.5.2	<i>Sensitivität und potenzielle Auswirkungen</i> .....	100
3.5.3	<i>Anpassungskapazität</i> .....	101
3.5.4	<i>Dringlichkeit</i> .....	102
3.5.5	<i>Gesamtbetrachtung der Vulnerabilität</i> .....	102
3.6	TRINKWASSER .....	103
3.6.1	<i>Exposition</i> .....	105
3.6.2	<i>Sensitivität und potenzielle Auswirkungen</i> .....	106
3.6.3	<i>Anpassungskapazität</i> .....	110
3.6.4	<i>Dringlichkeit</i> .....	121
3.6.5	<i>Gesamtbetrachtung der Vulnerabilität</i> .....	121
3.7	BODENSEE.....	123
3.7.1	<i>Exposition</i> .....	123
3.7.2	<i>Sensitivität und potenzielle Auswirkungen</i> .....	126
3.7.3	<i>Anpassungskapazität</i> .....	127
3.7.4	<i>Dringlichkeit</i> .....	128
3.7.5	<i>Gesamtbetrachtung der Vulnerabilität</i> .....	129
3.8	GESAMTBEURTEILUNG ZUR VULNERABILITÄT UND ZUM HANDLUNGSDRUCK .....	129
	<i>Gesamtbeurteilung der Vulnerabilität</i> .....	130
	<i>Gesamtbeurteilung des Handlungsdruckes</i> .....	130
<b>4</b>	<b>ANPASSUNGSZIELE UND –MAßNAHMEN</b> .....	<b>134</b>
4.1	HOCHWASSER.....	134
4.1.1	<i>Hochwasser-Flächenmanagement</i> .....	136
4.1.2	<i>Technisch-Infrastruktureller Hochwasserschutz</i> .....	137
4.1.3	<i>Hochwasservorsorge</i> .....	139
4.2	NIEDRIGWASSER.....	142
4.2.1	<i>Niedrigwasservorsorge</i> .....	143
4.2.2	<i>Niedrigwassermanagement</i> .....	145
4.3	GEWÄSSERÖKOLOGIE .....	149
4.4	SIEDLUNGSENTWÄSSERUNG .....	155
4.5	GRUNDWASSER .....	159
4.6	TRINKWASSER .....	161

4.7	BODENSEE.....	165
4.7.1	<i>Zirkulationsverhalten.....</i>	<i>165</i>
4.7.2	<i>Niedrigwasser/Flachwasserzone.....</i>	<i>167</i>
4.8	GEWICHTUNG UND PRIORISIERUNG DER ANPASSUNGSZIELE UND –MAßNAHMEN .....	167
<b>LITERATUR .....</b>		<b>174</b>
<b>ANHANG .....</b>		<b>I</b>
ANLAGE 1 - DEFINITION DER RELEVANTEN KLIMAKENNZAHLEN .....		I
	<i>Kennzahlen der Lufttemperatur .....</i>	<i>I</i>
	<i>Kennzahlen des Niederschlags .....</i>	<i>I</i>
	<i>Kennzahlen der Globalstrahlung .....</i>	<i>II</i>
	<i>Kennzahlen der Windgeschwindigkeit.....</i>	<i>III</i>

# Abbildungsverzeichnis

---

ABBILDUNG 1: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES WASSERKREISLAUFS DER ERDE [ZAHLENGABEN AUS BAUMGARTNER UND REICHEL 1974].....	2
ABBILDUNG 2: DER KREISLAUF DES WASSERS [KLIWA 2012A].....	3
ABBILDUNG 3: DAS HANDLUNGSFELD WASSERHAUSHALT UND DIE WECHSELWIRKUNGEN MIT ANDEREN HANDLUNGSFELDERN.....	4
ABBILDUNG 4: JAHRESMITTELWERTE AN GESAMTPHOSPHOR, ZIRKULATIONSINDEX UND SAUERSTOFFMINIMUM 1 M ÜBER GRUND IM BODENSEE (OBERSEE) [LUBW2012A].....	10
ABBILDUNG 5: KARTE DER HYDROGEOLOGISCHEN EINHEITEN IN BADEN-WÜRTTEMBERG, STAND 2008 [KARTE DES LANDESAMTES FÜR GEOLOGIE, ROHSTOFFE UND BERGBAU IM REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG ( <a href="http://www.lgrb.uni-freiburg.de">HTTP://WWW.LGRB.UNI-FREIBURG.DE</a> ; LGRB).....	12
ABBILDUNG 6: KARTE DER GRUNDWASSERERGIEBIGKEITEN IN BADEN-WÜRTTEMBERG HÜK 350 [KARTE DES LANDESAMTES FÜR GEOLOGIE, ROHSTOFFE UND BERGBAU IM REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG ( <a href="http://www.lgrb.uni-freiburg.de">HTTP://WWW.LGRB.UNI-FREIBURG.DE</a> ), LGRB).....	13
ABBILDUNG 7: WASSERÜBERSCHUSS- UND WASSERMANGELGEBIETE IN BADEN-WÜRTTEMBERG [ZVLW 2009].....	14
ABBILDUNG 8: VERTEILUNG DER GRUNDWASSERNEUBILDUNG IM JAHR 2011 IN MM/JAHR (LINKS) UND IN % VOM MITTEL DER PERIODE 1961-1990 (RECHTS) [QUELLE: LUBW 2012d].....	15
ABBILDUNG 9: VERTEILUNG DES WASSERS IN BADEN-WÜRTTEMBERG IM JAHR 2010 [QUELLE: STATISTISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG, STUTTGART, 2012].....	16
ABBILDUNG 10: MODELLKETTE FÜR UNTERSUCHUNGEN ZUM REGIONALEN KLIMAWANDEL [ABGEÄNDERT NACH KLIWA 2012B]... ..	20
ABBILDUNG 11: ZUNAHME DER KOMPLEXITÄT UND UNSICHERHEIT MIT DER VORHERSAGEZIELGRÖÖE [LAWA 2010].....	23
ABBILDUNG 12: JAHRESMITTELTEMPERATUREN IN BADEN-WÜRTTEMBERG 1901-2011 [QUELLE: UM UND LUBW 2012].....	25
ABBILDUNG 13: MONATSMITTELTEMPERATUR FÜR DIE ZEITRÄUME 1971-2000, 2021-2050 UND 2071-2100 (LINKS) SOWIE DIE VERÄNDERUNG IN DER ZUKUNFT GEGENÜBER DEM BEZUGSZEITRAUM (RECHTS); EIGENE DARSTELLUNG.....	25
ABBILDUNG 14: JAHRESMITTELTEMPERATUR (°C) FÜR DAS 15., 50. UND 85. PERZENTIL FÜR DEN IST-ZUSTAND (1971-2000) UND DIE NAHE ZUKUNFT (2021-2050) SOWIE DEREN DIFFERENZ; EIGENE DARSTELLUNG AUF DER GRUNDLAGE DER VON DER LUBW ZUR VERFÜGUNG GESTELLTEN KLIMAKENNZAHLEN IN DER AUFLÖSUNG 25 x 25 KM <sup>2</sup> .....	26
ABBILDUNG 15: NIEDERSCHLAGSSUMMEN (MM) IM HYDROLOGISCHEN WINTERHALBJAHR (NOVEMBER BIS APRIL) FÜR DAS 15., 50. UND 85. PERZENTIL FÜR DEN IST-ZUSTAND (1971-2000) UND DIE NAHE ZUKUNFT (2021-2050) SOWIE DEREN DIFFERENZ; EIGENE DARSTELLUNG AUF DER GRUNDLAGE DER VON DER LUBW ZUR VERFÜGUNG GESTELLTEN KLIMAKENNZAHLEN IN DER AUFLÖSUNG 25 x 25 KM <sup>2</sup> .....	28
ABBILDUNG 16: NIEDERSCHLAGSSUMMEN (MM) IM HYDROLOGISCHEN SOMMERHALBJAHR (APRIL BIS SEPTEMBER) FÜR DAS 15., 50. UND 85. PERZENTIL FÜR DEN IST-ZUSTAND (1971-2000) UND DIE NAHE ZUKUNFT (2021-2050) SOWIE DEREN DIFFERENZ; EIGENE DARSTELLUNG AUF DER GRUNDLAGE DER VON DER LUBW ZUR VERFÜGUNG GESTELLTEN KLIMAKENNZAHLEN IN DER AUFLÖSUNG 25 x 25 KM <sup>2</sup> .....	29
ABBILDUNG 17: MITTLERER MONATSNIEDERSCHLAG FÜR DIE ZEITRÄUME 1971-2000, 2021-2050 UND 2071-2100 (LINKS) SOWIE DIE PROJIZIERTE VERÄNDERUNG IN DER ZUKUNFT GEGENÜBER DEM BEZUGSZEITRAUM (RECHTS); EIGENE DARSTELLUNG.....	30

ABBILDUNG 18: STARKNIEDERSCHLAGSHÖHEN (MM) FÜR DAS 15., 50. UND 85. PERZENTIL FÜR DEN IST-ZUSTAND (1971-2000) UND DIE NAHE ZUKUNFT (2021-2050) SOWIE DEREN DIFFERENZ; EIGENE DARSTELLUNG AUF DER GRUNDLAGE DER VON DER LUBW ZUR VERFÜGUNG GESTELLTEN KLIMAKENNZAHLEN IN DER AUFLÖSUNG 25 X 25 KM <sup>2</sup> .....	31
ABBILDUNG 19: ANZAHL DER TAGE MIT STARKNIEDERSCHLAG FÜR DAS 15., 50. UND 85. PERZENTIL FÜR DEN IST-ZUSTAND (1971-2000) UND DIE NAHE ZUKUNFT (2021-2050) SOWIE DEREN DIFFERENZ; EIGENE DARSTELLUNG AUF DER GRUNDLAGE DER VON DER LUBW ZUR VERFÜGUNG GESTELLTEN KLIMAKENNZAHLEN IN DER AUFLÖSUNG 25 X 25 KM <sup>2</sup> .....	32
ABBILDUNG 20: MINIMUM, MEDIAN UND MAXIMUM DER MITTLEREN JÄHRLICHEN MAXIMALWERTE DES NIEDERSCHLAGS IN 15 MIN (LINKS), 60 MIN (MITTE) UND 1440 MIN (RECHTS) FÜR DIE ZEITRÄUME NSK1990 (BLAU) UND NSK2050 (ROT) ÜBER ALLE SIEBEN UNTERSUCHTEN STANDORTE IN BADEN-WÜRTTEMBERG SOWIE FÜR DIE ZEITRÄUME KLP IST (GRÜN) UND KLP NAH (VIOLETT).....	34
ABBILDUNG 21: MINIMUM, MEDIAN UND MAXIMUM DER MITTLEREN ANZAHL DER STARKNIEDERSCHLAGSTAGE PRO JAHR (LINKS) UND DES MITTLEREN ANTEILS DES IN 60 MIN FALLENDEN TAGESNIEDERSCHLAGES DER ERSTEN 24 MAXIMA PRO JAHR (RECHTS) FÜR DIE ZEITRÄUME NSK1990 (BLAU) UND NSK2050 (ROT) ÜBER ALLE SIEBEN UNTERSUCHTEN STANDORTE IN BADEN-WÜRTTEMBERG SOWIE FÜR DIE ZEITRÄUME KLP IST (GRÜN) UND KLP NAH (VIOLETT) .....	35
ABBILDUNG 22: ANZAHL DER TROCKENPERIODEN PRO JAHR (ANZAHL TAGE) FÜR DAS 15., 50. UND 85. PERZENTIL FÜR DEN IST-ZUSTAND (1971-2000) UND DIE NAHE ZUKUNFT (2021-2050) SOWIE DEREN DIFFERENZ; EIGENE DARSTELLUNG AUF DER GRUNDLAGE DER VON DER LUBW ZUR VERFÜGUNG GESTELLTEN KLIMAKENNZAHLEN IN DER AUFLÖSUNG 25 X 25 KM <sup>2</sup> .....	37
ABBILDUNG 23: MITTLERE WINDGESCHWINDIGKEITEN (M/S) FÜR DAS 15., 50. UND 85. PERZENTIL FÜR DEN IST-ZUSTAND (1971-2000) UND DIE NAHE ZUKUNFT (2021-2050) SOWIE DEREN DIFFERENZ; EIGENE DARSTELLUNG AUF DER GRUNDLAGE DER VON DER LUBW ZUR VERFÜGUNG GESTELLTEN KLIMAKENNZAHLEN IN DER AUFLÖSUNG 25 X 25 KM <sup>2</sup> .....	39
ABBILDUNG 24: SCHEMA VULNERABILITÄTSANALYSE [NACH IPCC] .....	41
ABBILDUNG 25: WIRKUNGSKETTE DES HANDLUNGSFELDES WASSERHAUSHALT .....	43
ABBILDUNG 26: VORGEHENSWEISE ZUR ANALYSE DER VULNERABILITÄT SOWIE ZUR ABLEITUNG UND PRIORISIERUNG VON ANPASSUNGSMAßNAHMEN .....	44
ABBILDUNG 27: ZUKÜNFTIGE VERÄNDERUNG DER MITTLEREN HOCHWASSERABFLÜSSE INFOLGE DES KLIMAWANDELS AN BEISPIELHAFT AUSGEWÄHLTEN GEWÄSSERN [HENNEGRIFF, REICH 2007] .....	46
ABBILDUNG 28: JAHRESGANG DER MITTLEREN MONATLICHEN HOCHWASSERABFLÜSSE DER KINZIG/SCHWARZWALD AM PEGEL SCHWAIBACH: ZUNAHME DER HALBJAHRESMITTEL IM WINTER UM 35 %, IM JANUAR SOGAR UM 50 %, DAGEGEN ABNAHME IM SOMMER UM 7 %, IM JULI SOGAR UM 50 %. DAMIT VERÄNDERT SICH DER JAHRESGANG DER KINZIG DEUTLICH [HENNEGRIFF, REICH 2007]. .....	48
ABBILDUNG 29: JAHRESGANG DER MITTLEREN MONATLICHEN HOCHWASSERABFLÜSSE DES NECKARS AM PEGEL ROCKENAU: ZUNAHME DER HALBJAHRESMITTEL IM WINTER UM 39 %, IM JANUAR SOGAR UM 50 %. DAGEGEN IST DAS HALBJAHRESMITTEL IM SOMMER NAHEZU UNVERÄNDERT, IM JULI JEDOCH ABNAHME UM 33 %. DAMIT VERÄNDERT SICH DER JAHRESGANG DES NECKARS AM PEGEL ROCKENAU DEUTLICH [HENNEGRIFF, REICH 2007]. .....	48
ABBILDUNG 30: RÄUMLICHE VERTEILUNG DER ZU ERWARTENDEN VERÄNDERUNGEN DES MITTLEREN NIEDRIGWASSERABFLUSSES MNQ DES SOMMERHALBJAHRES, ABGELEITET AUS DEN MITTLEREN MONATLICHEN NIEDRIGWASSERABFLÜSSEN MNQ(M), INFOLGE KLIMAÄNDERUNG [HENNEGRIFF ET AL. 2008]. .....	55
ABBILDUNG 31: JAHRESGANG DER MITTLEREN MONATLICHEN NIEDRIGWASSERABFLÜSSE ALS VERHÄLTNIS ZUKÜNFTIG ZU ERWARTENDER ZU DERZEITIGEN NIEDRIGWASSERABFLÜSSEN FÜR DIE BISHER UNTERSUCHTEN FLUSSGEBIETE (WERTE <1	

BEDEUTEN EINE ABNAHME DER NIEDRIGWASSERABFLÜSSE) (ERGEBNISSE DER KLIMAPROJEKTION WETTREG-2006/A1B, WASSERHAUSHALTSMODELL LARSIM, SIMULATIONSZEITRÄUME 2021-2050 IM VERGLEICH MIT DATEN VON 1971-2000) [KLIWA 2009c].	56
ABBILDUNG 32: VERHÄLTNIS DER MITTLEREN NIEDRIGWASSERABFLÜSSE MNQ IM SOMMERHALBJAHR ZWISCHEN ZUKUNFTS-ZUSTAND (2021-2050) UND IST-ZUSTAND (1971-2000) [KLIWA2009A].	57
ABBILDUNG 33: ANTEIL DER LANDWIRTSCHAFTSBETRIEBE MIT BEWÄSSERUNG [QUELLE: STATISTISCHES LANDESAMT 2012].	61
ABBILDUNG 34: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER KLIMAWANDELBEDINGTEN VERSCHIEBUNG VON FISCHREGIONEN INNERHALB EINES FLIEßGEWÄSSERS IN RICHTUNG QUELLE	70
ABBILDUNG 35: VULNERABILITÄT VON BÖDEN DURCH EROSION BEI AKTUELLER LANDNUTZUNG GEGENÜBER KLIMAWANDEL IN DEN LANDSCHAFTSÖKOLOGISCHEN REGIONEN BADEN-WÜRTTEMBERGS UND GRÖßERMAßSTÄBIGER LANDSCHAFTSAUSSCHNITT (GEOBASISDATEN © LUBW, LGL, WWW.LGL-BW.DE, AZ: 2851.9-1/19) [QUELLE: BODENGUT, INSTITUT FÜR BODENKUNDE UND STANDORTSLEHRE DER UNIVERSITÄT HOHENHEIM 2013].	75
ABBILDUNG 36: VULNERABILITÄT VON BÖDEN DURCH AUSWASCHUNG BEI AKTUELLER LANDNUTZUNG GEGENÜBER KLIMAWANDEL IN DEN LANDSCHAFTSÖKOLOGISCHEN REGIONEN BADEN-WÜRTTEMBERGS, N85 IST MIT AUSNAHME VON SCHWÄBISCHE ALB/BAAR VERGLEICHBAR, (GEOBASISDATEN © LUBW, LGL, WWW.LGL-BW.DE, AZ: 2851.9-1/19) [QUELLE: BODENGUT, INSTITUT FÜR BODENKUNDE UND STANDORTSLEHRE DER UNIVERSITÄT HOHENHEIM 2013].	75
ABBILDUNG 37: SIEDLUNGSENTWÄSSERUNG ALS BESTANDTEIL DER SIEDLUNGSWASSERWIRTSCHAFT.	79
ABBILDUNG 38: VERHÄLTNIS VON VERSIEGELTER FLÄCHE ZUR FLÄCHE DES HYDROLOGISCHEN EINZUGSGEBIETES (B-WERT) [LGL 2013]	86
ABBILDUNG 39: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER INFILTRATION VON GRUNDWASSER IN DEN KANAL (LINKS) UND DER EXFILTRATION VON ABWASSER AUS DEM KANAL INS GRUNDWASSER (RECHTS)	88
ABBILDUNG 40: KLIMATISCHE WASSERBILANZ FÜR DIE ZEITRÄUME 1971-2000, 2021-2050 UND 2071-2100 (LINKS) SOWIE DIE VERÄNDERUNG IN DER ZUKUNFT GEGENÜBER DEM BEZUGSZEITRAUM (RECHTS); EIGENE DARSTELLUNG.	95
ABBILDUNG 41: KLIMATISCHE WASSERBILANZ (MM) FÜR DAS 15., 50. UND 85. PERZENTIL FÜR DEN IST-ZUSTAND (1971-2000) UND DIE NAHE ZUKUNFT (2021-2050) SOWIE DEREN DIFFERENZ; EIGENE DARSTELLUNG AUF DER GRUNDLAGE DER VON DER LUBW ZUR VERFÜGUNG GESTELLTEN KLIMAKENNZAHLEN IN DER AUFLÖSUNG 25 x 25 KM <sup>2</sup>	96
ABBILDUNG 42: DARSTELLUNG DER MITTLEREN GRUNDWASSERNEUBILDUNG AUS NIEDERSCHLAG FÜR DAS KLIWA-GEBIET AUF BASIS VON WETTREG2006 ANGABEN ZWISCHEN 1971 UND 2000 (LINKS) UND FÜR DEN ZEITRAUM 2021-2050 (RECHTS) [QUELLE: KLIWA 2012B]	97
ABBILDUNG 43: TROCKENHEITSINDEX IN TAGE/JAHR FÜR DAS KLIWA GEBIET AUF BASIS VON WETTREG2006 ANGABEN FÜR 1971 BIS 2000 (LINKS) UND FÜR DEN ZEITRAUM 2021-2050 (RECHTS) [QUELLE: KLIWA 2012]	98
ABBILDUNG 44: INTERANNUELLE VERÄNDERUNGEN IN DER GESAMTABFLUSSHÖHE (NIEDERSCHLAG-VERDUNSTUNG) ALS MAßGEBLICHE GRÖßE FÜR DIE GRUNDWASSERNEUBILDUNG [KLIWA 2012B]	99
ABBILDUNG 45: SCHEMATISCHE UNTERGLIEDERUNG UND ZUSAMMENWIRKEN DER KLIMABEEINFLUSSTEN UNTERTEILBEREICHE DES TEILBEREICHS TRINKWASSER; EIGENE DARSTELLUNG.	103
ABBILDUNG 46: GEGENWÄRTIGE STRUKTUR DER WASSERVERSORGUNG IN BADEN-WÜRTTEMBERG (IN ANLEHNUNG AN [HOFMANN 2012])	113

ABBILDUNG 47: ZUORDNUNG DER GEMEINDEN VON BADEN-WÜRTTEMBERG ZU EINEM FERNWASSER- ODER GRUPPENWASSERVERSORGUNGSSYSTEM. (AUSWERTUNG DES ZWECKVERBANDES LW AUF BASIS DER DATEN DES STATISTISCHEN LANDESAMTES [ZVLW 2004]).....	114
ABBILDUNG 48: GEGENWÄRTIG ANGESTREBTE UND TEILWEISE BEREITS ERREICHTE STRUKTUR DER WASSERVERSORGUNG IN BADEN-WÜRTTEMBERG (IN ANLEHNUNG AN [HOFMANN 2012]).....	115
ABBILDUNG 49: WASSERBEREITSTELLUNGSSTRUKTUR DER STÄDTE UND GEMEINDEN IN BADEN-WÜRTTEMBERG (AUSWERTUNG DES ZWECKVERBANDES LW AUF BASIS DER DATEN DES STATISTISCHEN LANDESAMTES [ZVLW 2004]) .....	116
ABBILDUNG 50: SCHEMA ZUR VERTIKALEN DURCHMISCHUNG [KLIWA 2007] .....	124
ABBILDUNG 51: EINZUGSGEBIET DES BODENSEES [IGKB 2013] .....	125
ABBILDUNG 52: ENTWICKLUNG DER MITTLEREN JÄHRLICHEN WASSERSTÄNDE AM PEGEL KONSTANZ (BODENSEE/OBERSEE) [ABGEÄNDERT NACH LUBW 2011].....	126
ABBILDUNG 53: REGIONEN MIT EINHEITLICHEN KLIMAÄNDERUNGSFAKTOREN $F_{T,K}$ UND TABELLE DER FAKTOREN $F_{T,K}$ [LUBW 2012B] .....	139
ABBILDUNG 54: STRATEGIEN ZUR VERMINDERUNG DER AUSWIRKUNGEN VON NIEDRIGWASSER [QUELLE: ABGEÄNDERT NACH LAWA 2007] .....	143

# Tabellenverzeichnis

---

TABELLE 1: QUERVERNETZUNGEN DES HANDLUNGSFELDES WASSERHAUSHALT ZU DEN ANDEREN HANDLUNGSFELDERN DER ANPASSUNGSSTRATEGIE BADEN-WÜRTTEMBERG .....	5
TABELLE 2: RELEVANTE KLIMAKENNZAHLEN FÜR DEN WASSERHAUSHALT (T: TEMPERATUR, N: NIEDERSCHLAG, STARKN: STARKNIEDERSCHLAG, GLOB.: GLOBALSTRAHLUNG, STABW: STANDARDABWEICHUNG ) .....	21
TABELLE 3: EXPOSITIONSBETRACHTUNG FÜR DAS SCHWERPUNKTTHEMA HOCHWASSER .....	45
TABELLE 4: EXPOSITIONSBETRACHTUNG FÜR DAS SCHWERPUNKTTHEMA NIEDRIGWASSER .....	54
TABELLE 5: EXPOSITIONSBETRACHTUNG FÜR DAS SCHWERPUNKTTHEMA GEWÄSSERÖKOLOGIE .....	66
TABELLE 6: EXPOSITIONSBETRACHTUNG FÜR DAS SCHWERPUNKTTHEMA SIEDLUNGSENTWÄSSERUNG .....	80
TABELLE 7: NACH DWA-A 118 EMPFOHLENE ÜBERSTAU- UND ÜBERFLUTUNGSHÄUFIGKEITEN NACH [DWA 2006B. ....	83
TABELLE 8: EXPOSITIONSBETRACHTUNG FÜR DAS SCHWERPUNKTTHEMA GRUNDWASSER .....	95
TABELLE 9: VERÄNDERUNGEN DER FÜR DIE GRUNDWASSERNEUBILDUNG RELEVANTEN FAKTOREN [QUELLE: KLIWA 2012B] .....	98
TABELLE 10: EXPOSITIONSBETRACHTUNG FÜR DAS SCHWERPUNKTTHEMA TRINKWASSER .....	106
TABELLE 11: BEURTEILUNG DER DRINGLICHKEIT FÜR DIE TEILBEREICHE DES SCHWERPUNKTTHEMAS TRINKWASSER .....	121
TABELLE 12: EXPOSITIONSBETRACHTUNG FÜR DAS SCHWERPUNKTTHEMA BODENSEE - ZIRKULATIONSVERHALTEN .....	123
TABELLE 13: BESTIMMUNG DER VULNERABILITÄT AUS SENSITIVITÄT, POTENZIELLEN AUSWIRKUNGEN UND ANPASSUNGSKAPAZITÄT BEI HOHER EXPOSITION .....	130
TABELLE 14: DARSTELLUNG DER VULNERABILITÄT DES WASSERHAUSHALTS ALS KOMBINIERTE BETRACHTUNG AUS EXPOSITION, SENSITIVITÄT UND ANPASSUNGSKAPAZITÄT .....	130
TABELLE 15: BESTIMMUNG DES HANDLUNGSDRUCKES AUS VULNERABILITÄT UND DRINGLICHKEIT BEI EINER VORHANDENEN BZW. TEILWEISE VORHANDENEN ANPASSUNGSSTRATEGIE .....	131
TABELLE 16: DARSTELLUNG DES HANDLUNGSDRUCKES IM BEREICH WASSERHAUSHALT ALS KOMBINIERTE BETRACHTUNG AUS VULNERABILITÄT, DRINGLICHKEIT UND ANPASSUNGSSTRATEGIE .....	131
TABELLE 17: PRIORISIERUNG DER VORGESCHLAGENEN MAßNAHMEN NACH EFFEKTIVITÄT, AUFWAND UND ZUORDNUNG ALS NO-REGRET-MAßNAHME .....	168

# 1 Einführung und Beschreibung des Handlungsfeldes

## Wasserhaushalt

Die Landesregierung Baden-Württemberg hat das Landesministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft (UM) beauftragt, zusammen mit den betroffenen Ressorts eine „Anpassungsstrategie an die unvermeidbaren Folgen des Klimawandels für Baden-Württemberg“ (kurz: Anpassungsstrategie Baden-Württemberg) zu erarbeiten. Dabei sollen für verschiedene Handlungsfelder die Vulnerabilität gegenüber Klimafolgen aufgezeigt und ein Handlungsrahmen mit Zielen und Umsetzungsstrukturen für Anpassungsmaßnahmen an die Folgen des Klimawandels geschaffen werden.

Mit Vertrag vom 26. September 2012 wurde das Wasserforschungszentrum Stuttgart (wFz) der Universität Stuttgart beauftragt, zur Vorbereitung der Anpassungsstrategie ein Fachgutachten zum Handlungsfeld „Wasserhaushalt“ zu erstellen. Auf der Grundlage der aktuellen Kenntnisse von Wissenschaft und Praxis sowie der von der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) zur Verfügung gestellten Auswertung regionaler Klimaprojektionen soll das Gutachten eine wissenschaftlich fundierte Abschätzung der Vulnerabilität sowie zu Anpassungserfordernissen zum Wasserhaushalt beinhalten sowie Vorschläge zu Anpassungsmaßnahmen und deren Umsetzung entwickeln. Folgende Mitglieder des Wasserforschungszentrums haben an der Bearbeitung des Fachgutachtens mitgewirkt:

- Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft (ISWA), Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Wasserrecycling (LSWW), Leitung: Prof. Dr.-Ing. Heidrun Steinmetz, Mitarbeit: Dipl.-Ing. David Bendel, Dr.-Ing. Ulrich Dittmer, Dipl.-Ing. Ralf Minke, Dr.-Ing. Birgit Schlichtig,
- Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung (IWS), Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft (LWW), Leitung: Prof. Dr.-Ing. Silke Wieprecht, Mitarbeit: Dipl.-Ing. Eva Fenrich, M.Sc., Dr. rer. nat. Karolin Weber,
- Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung (IWS), Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie (LHG), Leitung: Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. András Bárdossy, Mitarbeit: Dipl.-Ing. Dirk Schlabin, Dr. rer. nat. Jochen Seidel.

### 1.1 Das Handlungsfeld Wasserhaushalt

Wasser ist die grundlegende Voraussetzung für alles Leben auf der Erde sowie unverzichtbarer Bestandteil des Naturhaushaltes. Die Erdoberfläche ist zu etwa zwei Dritteln mit Wasser bedeckt. Der Wasserhaushalt umfasst den natürlichen Wasserkreislauf sowie die Wasserwirtschaft mit der Siedlungswasserwirtschaft.

Wichtige Bestandteile des globalen Wasserkreislaufs sind die Fließgewässer, die stehenden Gewässer, das Grundwasser, die Meere sowie der Transport und die Speicherung von Wasser. Zustandsänderungen des Wassers zwischen fester, flüssiger und gasförmiger Phase müssen bei der Betrachtung des Gesamtwasserhaushalts berücksichtigt werden. Die Wasserwirtschaft umfasst die Gesamtheit der Planungen, Maßnahmen und Tätigkeiten, die der Ordnung, Nutzung sowie dem Schutz des ober- und unterirdischen Wassers dienen.

Das Handlungsfeld Wasserhaushalt wird zunächst über den hydrologischen Wasserkreislauf betrachtet. Der in Abbildung 1 skizzierte globale Wasserkreislauf zeigt schematisch den Weg des Wassers von den Meeren über die Verdunstung, den atmosphärischen Wasserdampftransport und den Niederschlag zum Land sowie über die Flüsse zum Meer auf. Nur ein verhältnismäßig geringer Teil des Wassers wird zwischen Meeren und Landflächen ausgetauscht, der hauptsächliche Wasserumsatz erfolgt über Verdunstung und Niederschlag über den Meeren und dem Land.

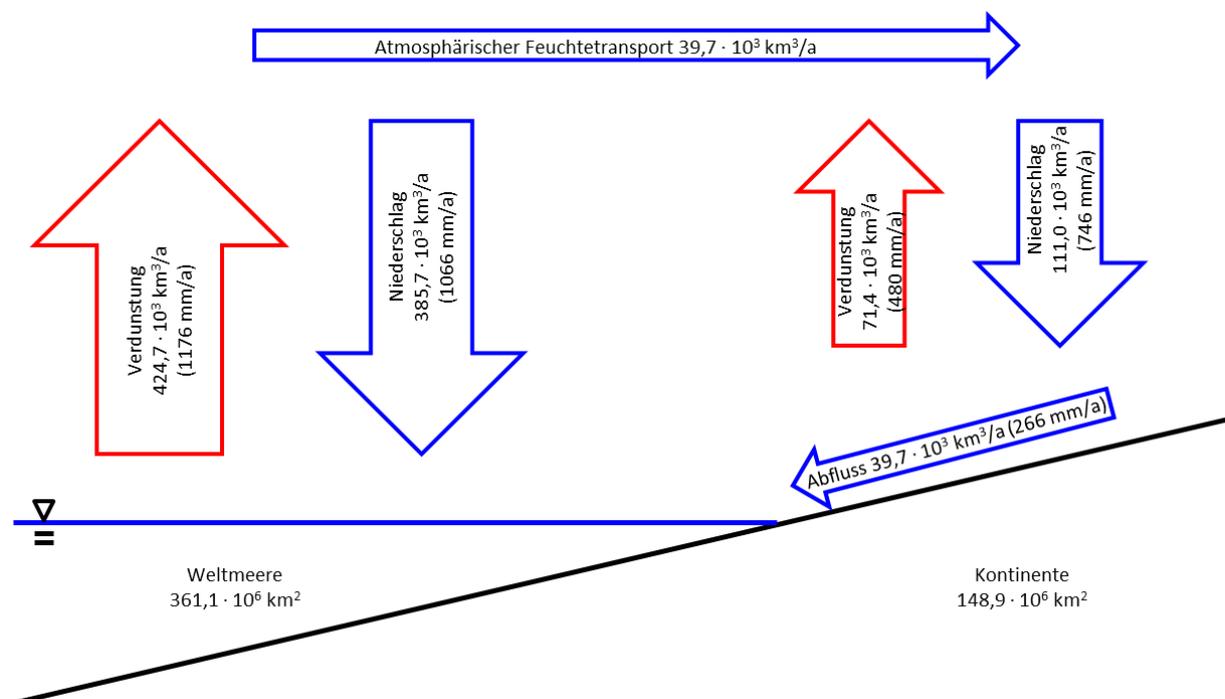


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Wasserkreislaufs der Erde [Zahlenangaben aus Baumgartner und Reichel 1974]

Der Wasserkreislauf über den Landflächen ist komplexer, er teilt sich in zeitlich und räumlich unterschiedliche Einzelkreisläufe auf und ist in Abbildung 2 skizziert. Wasser, das von der Erdoberfläche verdunstet, ist in der Atmosphäre als Wasserdampf vorhanden, es kondensiert und gelangt als Niederschlag wieder auf die Landflächen. Der Niederschlag fließt ab oder versickert im Boden und trägt so zur Grundwasserneubildung bei. Auch über Land verdunstet ein großer Teil des Wassers wieder und gelangt so zurück in die Atmosphäre. Je höher die Strahlungsintensität, Lufttemperatur, Bodentemperatur, das

Sättigungsdefizit der Luft oder die Windgeschwindigkeit sind, umso weniger kann Niederschlagswasser an Oberflächen beispielsweise von Pflanzen gespeichert werden und umso höher ist die Verdunstung. Auch an der Bodenoberfläche kommt es zu einer Verdunstung, die von der Wasserdurchlässigkeit der Böden und der Bepflanzung abhängt.

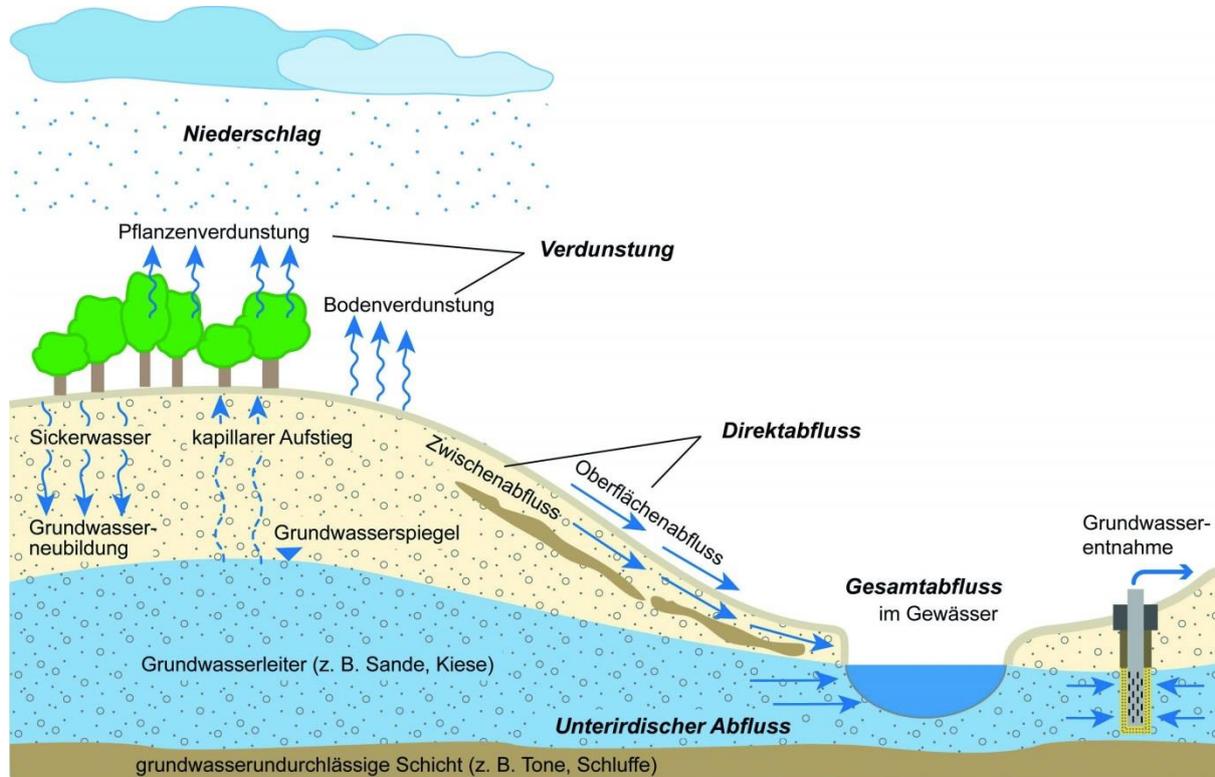


Abbildung 2: Der Kreislauf des Wassers [KLIWA 2012a]

Der Oberflächenabfluss ist insbesondere von der Niederschlagsintensität und –dauer abhängig. Da bei Vorsättigung oder gefrorenen Böden das Infiltrationsvermögen stark herabgesetzt ist, kann es nach Winterperioden in Verbindung mit Schneeschmelze und Regen zu großem Oberflächenabfluss und zu Hochwasserereignissen an Flüssen kommen. Infiltriertes Niederschlagswasser dagegen füllt zunächst die Bodenwasservorräte auf oder wird in tiefere Bereiche abgeleitet. Letztendlich führt die Infiltration zu einer Grundwasserneubildung oder an weniger durchlässigen Schichten zur Abflussbildung. Dem Grundwasserspiegel folgend gelangt das Wasser in die Vorfluter und schließlich in das Meer. Bezogen auf Baden-Württemberg beträgt das durchschnittliche jährliche Wasserdargebot über Grundwasser- und Oberflächengewässerzuflüsse aus den umgebenden Regionen und Niederschlägen, die als Grundwasserneubildung bzw. Oberflächenabfluss wirksam werden, ca. 49 Mrd. m<sup>3</sup> [Zweckverband Landeswasserversorgung 2009].

Der durch den Menschen verursachte Klimawandel verändert u.a. den Wasserkreislauf sowohl auf globaler als auch auf regionaler Ebene. Um Fragen zum Ausmaß und den Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt der Flussgebiete im Süden

Deutschlands beantworten zu können, bearbeiten die Länder Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz sowie der Deutsche Wetterdienst seit dem Jahr 1999 das Untersuchungsprogramm „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ (KLIWA). Zusätzlich wird die Wirkung des Klimawandels auf die Gewässerqualität mit dem Ziel untersucht, klimaempfindliche Systeme auf die Veränderungen vorzubereiten und Anpassungsmaßnahmen zu ermitteln. Anhand langjähriger Messreihen kann nachgewiesen werden, dass in den letzten Jahrzehnten bereits Veränderungen im regionalen Klima Süddeutschlands eingetreten sind [KLIWA 2011a]. Die bisher im Programm KLIWA erreichten wegweisenden Ergebnisse stellen eine wesentliche Datengrundlage für das hier vorgelegte Fachgutachten zum Handlungsfeld Wasserhaushalt in Baden-Württemberg dar.

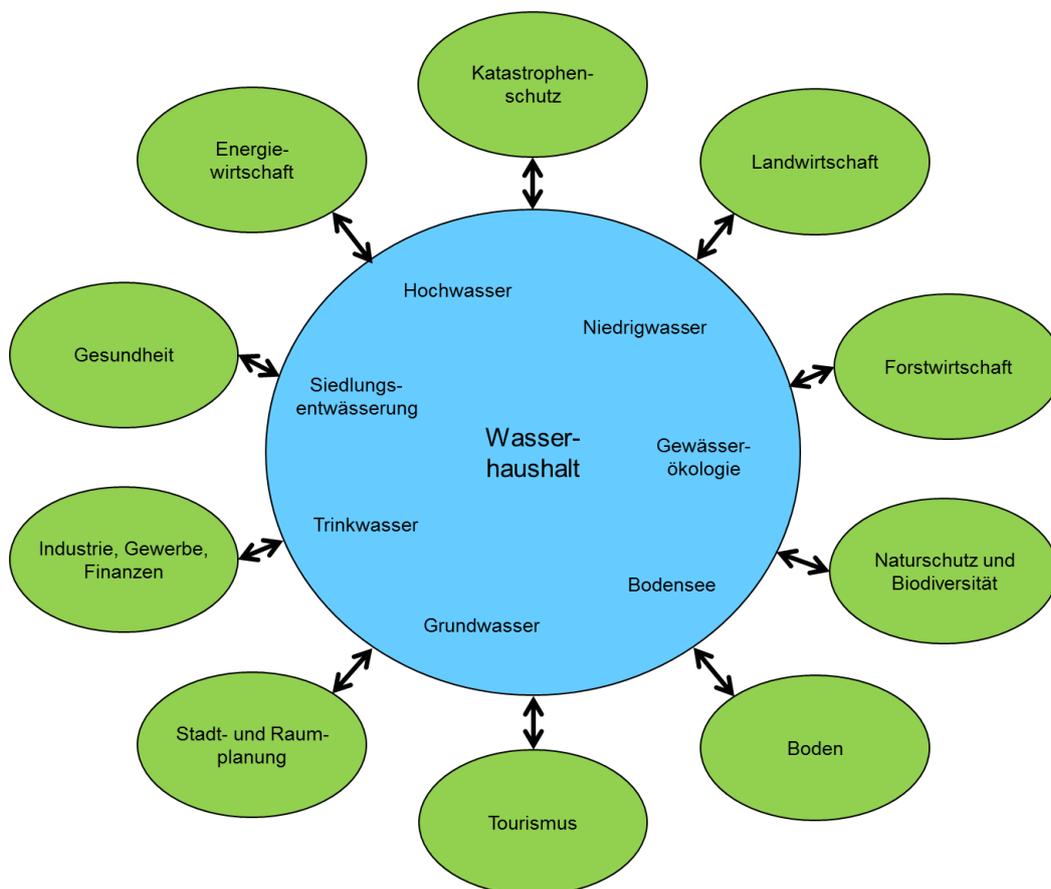


Abbildung 3: Das Handlungsfeld Wasserhaushalt und die Wechselwirkungen mit anderen Handlungsfeldern

## 1.2 Bezüge zu anderen Handlungsfeldern

Das Handlungsfeld Wasserhaushalt weist Quervernetzungen zu allen anderen für die Anpassungsstrategie Baden-Württemberg herangezogenen Handlungsfeldern auf. Abbildung 3 veranschaulicht diese Quervernetzungen und Tabelle 1 beschreibt einige der betroffenen Querschnittsbereiche.

*Tabelle 1: Quervernetzungen des Handlungsfeldes Wasserhaushalt zu den anderen Handlungsfeldern der Anpassungsstrategie Baden-Württemberg*

<b>Handlungsfeld</b>	<b>Quervernetzungen zum Handlungsfeld Wasserhaushalt</b>
Gesundheit	Trinkwasserversorgung, pathogene Organismen in Gewässern, Fischereiwirtschaft
Landwirtschaft	Diffuse und punktförmige Stoffeinträge in Gewässer, Anbau von Energiepflanzen, Gewässerunterhaltung, Stoffkreisläufe, Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen, Grundwasserschutz, Fischereiwirtschaft
Wald- und Forstwirtschaft	Grundwasserneubildung, Grundwasserschutz, Stoffkreisläufe
Naturschutz und Biodiversität	Ökologischer Zustand der Gewässer, Gewässerunterhaltung, fischereiwirtschaftliche Nutzung
Tourismus	Wasser als Erholungsraum, sportliche Aktivitäten
Boden	Grundwasserneubildung, Stoffeinträge in Gewässer (z.B. Bodenerosion), Stoffkreisläufe, Leistungsfähigkeit der Böden (Reinigungswirkung bei Bodenpassage, Infiltrationsvermögen)
Infrastruktur, Raum- und Regionalplanung	Wasserwirtschaftliche Rahmenplanung, Trinkwasserversorgung, Wasserschutzgebiete, Siedlungsentwässerung, Binnenschifffahrt, Hochwasserschutz
Bevölkerungs- und Katastrophenschutz	Hochwasserschutz, Überflutungsschutz
Energiewirtschaft	Einfluss der erneuerbaren Energien auf die Wasserwirtschaft (Wasserkraft, Geothermie, Windkraft, Biomasse), Reduzierung des Energieverbrauchs in der Wasserwirtschaft, Nutzung von Energiepotentialen in der Wasserwirtschaft
Wirtschaft	Kosten der Trinkwasserversorgung, der Abwasserableitung sowie der kommunalen und industriellen Abwasserbehandlung, Binnenschifffahrt, Nutzung von Wasser als Kühl- und Prozesswasser, Tourismus

### **1.3 Grunddaten zum Wasserhaushalt, zum Monitoring und zum Zustand der Gewässer in Baden-Württemberg**

Der grundsätzliche Zweck des Wasserhaushaltsgesetzes des Bundes sowie des Wassergesetzes Baden-Württemberg ist es, die Gewässer durch eine nachhaltige Bewirtschaftung als Bestandteil des Naturhaushalts, als Lebensgrundlage des Menschen, als Lebensraum für Tiere und Pflanzen sowie als nutzbares Gut zu schützen. Wesentliche Ziele des Gewässerschutzes sind die Erreichung des guten ökologischen und chemischen Zustands der Fließgewässer und Seen sowie des guten chemischen und mengenmäßigen Zustands des Grundwassers. Diese Ziele sind europaweit einheitlich in der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) vorgegeben. Um diese Ziele zu erreichen, müssen maßgebliche Defizite erkannt und beseitigt werden. Dazu ist eine dauerhafte Überwachung (Monitoring) und Dokumentation des Zustandes der Gewässer erforderlich. Ein gezielt ausgerichtetes Monitoring ist eine wichtige Grundlage, um möglichst frühzeitig und gezielt

auf Belastungen reagieren sowie die Wirksamkeit von Regelungen und Maßnahmen bewerten zu können. Neue Situationen -wie durch den Klimawandel verursachte Veränderungen der Gewässer- erfordern eine Weiterentwicklung des Monitorings und die Erarbeitung neuer Indikatoren. Im Folgenden werden Grundlagen und Grunddaten zum Wasserhaushalt, zum Monitoring und zum Zustand der Gewässer in Baden-Württemberg aufgezeigt.

### **1.3.1 Fließgewässer**

Die Gesamtfläche Baden-Württembergs beträgt 35.752 km<sup>2</sup>. Mit einer Gesamtlänge von rund 38.000 km durchziehen Fließgewässer das Land, davon weisen 13.800 km Bäche und Flüsse ein Einzugsgebiet von jeweils größer als 10 km<sup>2</sup> auf. Die bedeutendsten Fließgewässer sind Rhein, Neckar und Donau.

Fließgewässer lassen sich nach ihrer geologischen Ausgangslage und Ökoregion in Gruppen mit typischen Merkmalen einordnen. Diese werden nach der WRRL als biozönotisch relevante Fließgewässertypen bezeichnet und auf bundesweiten bzw. landesweiten Karten dargestellt. Charakteristische Fließgewässertypen Baden-Württembergs sind im Südosten die Typen der Alpen und des Alpenvorlandes (z.B. Iller, Fließgewässer des Jung- und Altmoränenlandes; etwa 15 % Anteil der Fließgewässertypen) sowie in den restlichen Landesteilen die Typen des Mittelgebirges (Rhein, Neckar, Main, Enz, Kocher oder kleinere Gewässer im Gneis, Granit, Buntsandstein, Lössregionen, Keuper, Kreide, Muschelkalk; etwa 79 % Anteil der Fließgewässertypen). Auf dem Fließgewässertyp basierend kann ein potenziell natürlicher Zustand der Fließgewässer und damit einem Referenzzustand ohne anthropogene Einflüsse hergeleitet werden. Der tatsächliche ökologische Zustand der Fließgewässer wird als Abweichung von diesem typspezifischen Referenzzustand ermittelt.

Im Landesüberwachungsnetz Fließgewässer wurden mit der Umsetzung der EU-WRRL die bereits langjährig überwachten Parameter zur Bestimmung der biologischen Gewässergüte um neue Komponenten erweitert. Damit kann heute der chemische und gesamtökologische Zustand der im Überwachungsnetz Baden-Württemberg ausgewiesenen 159 Wasserkörper bewertet werden. Neben physikalisch-chemischen und chemischen Parametern werden die biologischen Parameter Makrozoobenthos (wirbellose Tiere am Gewässerboden), Phytoplankton (Planktonalgen), Phytobenthos (am Gewässerboden lebende Pflanzen), Makrophyten (Wasserpflanzen) und Fische untersucht. Weiterhin fließen hydromorphologische Qualitätsparameter wie die Durchgängigkeit von Wanderungshindernissen (Querbauwerke), die Parameter Laufentwicklung, Längsprofil, Querprofil, Sohlenstruktur und Gewässerumfeld sowie die Komponente Wasserhaushalt mit den Parametern Mindestabfluss in Ausleitungsstrecken und Brauchwasserentnahme in die

ökologische Zustandsbewertung ein. Für einen ökologisch guten Zustand muss jede Komponente ausreichend naturnahe Bedingungen aufweisen bzw. darf die Abweichung vom gewässertypspezifischen Referenzzustand nur gering sein. In erheblich veränderten Gewässern ist das gute ökologische Potenzial das Ziel.

Im Landesüberwachungsmessnetz werden Fließgewässer ab einer Einzugsgebietsgröße von mehr als 10 km<sup>2</sup> überwacht. Räumlich ist das Messnetz so ausgerichtet, dass eine repräsentative Bewertung der Wasserkörper als Planungseinheiten mit einer mittleren Einzugsgebietsgröße von etwa 200 km<sup>2</sup> möglich ist und dass gegebenenfalls ein Maßnahmenbedarf abgeleitet werden kann. Nicht regelmäßig bzw. nur über Sonderprogramme erfasst werden dagegen Fließgewässer mit einer kleineren Einzugsgebietsgröße. Kleinräumige Aussagen zum ökologischen Zustand dieser Fließgewässer sind damit nur in begrenztem Maße vorhanden.

Als Beispiel aus der ökologischen Zustandsbewertung erfasst die Untersuchung des Makrozoobenthos auf der Basis eines multimetrischen Ansatzes Auswirkungen von Belastungen der Fließgewässer mit leicht abbaubaren organischen Stoffen und die sich daraus ergebenden Sauerstoffverhältnisse (Modul Saprobie), gewässermorphologische Einflüsse (Modul Allgemeine Degradation) sowie versauerungsbedingte Belastungen. Im Jahr 2008 erreichten im Modul Saprobie etwa 90 % der Fließgewässer in Baden-Württemberg die Zustandsklasse 1 oder 2 (=sehr gut oder gut) in einem fünfstufigen Bewertungssystem. Dies kann als Ergebnis der landesweiten Abwasserreinigung und Regenwasserbehandlung verstanden werden. Saprobielle Belastungen stellen sich heute lediglich bei ungünstigen Mischungsverhältnissen von Frischwasser zu gereinigtem Abwasser und bei langsam strömenden Gewässern mit einer geringen Wiederbelüftungsrate ein. Solche Defizite bestehen in der nördlichen Oberrheinebene, im mittleren Neckargebiet sowie im oberen Donauegebiet um Tuttlingen.

Im Gegensatz zum guten saprobiellen Zustand ergaben sich bei der Untersuchung der hydromorphologischen Parameter in Baden-Württemberg für den Parameter allgemeine Degradation im Jahr 2009 deutliche Defizite: von 10.400 km der nach EU-WRRL kartierten Fließgewässer waren insbesondere infolge von Begradigungen etwa 41 % hydromorphologisch signifikant beeinträchtigt. Handlungsbedarf ergibt sich insbesondere in Bezug auf die Durchgängigkeit (87 %), Morphologie (62 %) sowie den Wasserhaushalt (55 %) der untersuchten Wasserkörper.

Die Wahrscheinlichkeit, den ökologisch guten Zustand in näherer Zukunft zu erreichen, hängt maßgeblich vom strukturellen Zustand der Gewässer sowie von der Herstellung der Durchgängigkeit für aquatische Lebewesen aber auch für Geschiebe und Schwebstoffe ab. Die longitudinale Vernetzung wird durch eine Vielzahl von größeren aber vor allem

tausenden kleineren Querbauwerken und Sohlstufen beeinträchtigt. Eine Herstellung der Durchgängigkeit ist an diesen Standorten meist nur auf lange Sicht erreichbar.

Zum Einfluss des Klimawandels auf die Gewässerbiozönose gibt es bis heute nur wenig belastbare Daten. Beispielsweise führen erhöhte Wassertemperaturen zu veränderten Entwicklungszeiten des Makrozoobenthos und zu Verschiebungen der Lebensgemeinschaften entlang des Fließgewässerlängsverlaufes. Dabei werden kleinere Gewässer in Regionen mit geringem Niederschlag als besonders gefährdet eingeschätzt [Senckenberg 2010]. Detaillierte Ausführungen hierzu enthält Abschnitt 3.3.

Von den chemischen Parametern stellt insbesondere in langsam fließenden und in stehenden Oberflächengewässern der Nährstoff Phosphor eine Eutrophierungsgefahr dar. Obwohl in den letzten Jahrzehnten insbesondere durch den Einsatz von Phosphatersatzstoffen und die Weiterentwicklung der Abwasserreinigung eine erhebliche Reduzierung der Phosphorkonzentrationen erfolgte, besteht weiterer Handlungsbedarf zur Reduzierung der Phosphoreinträge in baden-württembergische Oberflächengewässer. Dies gilt vor allem für durch Staustufen geregelte Gewässer sowie für die Reduzierung von Phosphoreinträgen aus der Landwirtschaft. [LUBW 2012a]. Ein weiteres Problem insbesondere in kleineren Gewässern stellt die Belastung durch die Stickstoffverbindung Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) dar. Abhängig von der Temperatur und dem pH-Wert im Gewässer steht Ammonium in einem Dissoziationsgleichgewicht mit dem stark fischtoxischen Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) und belastet zudem den Sauerstoffhaushalt. Beide Nährstoffe sind auch bei Betrachtungen zu Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt von Bedeutung. Kenntnisse zum Einfluss des Klimawandels auf den stofflichen Zustand der Gewässer enthalten z.B. die Abschnitte 3.4 und 3.7.

Zur Ermittlung der Kenngrößen Wasserstand und Abfluss betreibt das Land Baden-Württemberg ein hydrologisches Messnetz der Oberflächengewässer bestehend aus derzeit 249 Pegelanlagen und einer Dichte von 7,0 Pegeln pro 1.000 km<sup>2</sup>. Die Messdaten und daraus abgeleitete Daten werden benötigt für

- die Vorhersage von Hochwasser und den zeitlichen Verlauf von Hochwasserständen,
- die Vorhersage von Niedrigwasser und das Niedrigwassermanagement,
- eine Beurteilung der Auswirkungen von Hochwasser/Niedrigwasser auf das Ökosystem,
- Trenduntersuchungen im Zusammenhang mit dem Klimawandel,
- Wärme- und Stofffrachtberechnungen,
- die Steuerung von Hochwasserrückhaltebecken,
- die Erstellung von Hochwassergefahrenkarten und Ausweisung von Hochwasserschutzgebieten,

- als Entscheidungskriterium zur Einleitung lokaler Hochwasserschutzmaßnahmen,
- als Entscheidungskriterium für ökologisch verträgliche Wassernutzungen,
- die Erfüllung nationaler und europäischer Berichtspflichten.

Die vermehrte Nutzung der online verfügbaren Pegeldaten stellt hohe Anforderungen an die Messtechnik und den Betrieb der Pegel. Die vorhandenen kontinuierlichen Pegelaufzeichnungen gehen bis in den Beginn des 20. Jahrhunderts zurück. Heute ist der größte Teil der Daten digital als Stundenmittelwerte des Wasserstandes und des Durchflusses verfügbar [LUBW 2012a]. Einflüsse von Klimaveränderungen auf die Vulnerabilität des Wasserhaushalts für die Bereiche Hochwasser, Niedrigwasser und Gewässerökologie werden in den Abschnitten 3.1 bis 3.3 beschrieben.

### **1.3.2 Stehende Gewässer**

In Baden-Württemberg gibt es über 4.000 Stehgewässer mit einer Größe vom mindestens 2.000 m<sup>2</sup>, die zum Großteil natürlich entstanden sind und Lebensräume von großer ökologischer Qualität darstellen. Darüber hinaus dienen viele stehende Gewässer dem Menschen als Trink-, Lösch- und Brauchwasserspeicher, Hochwasserrückhaltebecken, Fischgewässer, Badeseen oder der Rohstoffgewinnung, woraus Spannungsfelder zwischen Nutzung und ökologischer Entwicklung entstehen können. Viele Seen sind durch Abwassereinleitungen oder intensive landwirtschaftliche Nutzung ihrer Einzugsgebiete Belastungen ausgesetzt. Zur Untersuchung der stehenden Gewässer in Baden-Württemberg führt die LUBW physikalisch-chemische und biologische Untersuchungen des Wassers und der Sedimente ausgewählter Seen durch.

#### **Bodensee**

Der bedeutendste See Baden-Württembergs ist der Bodensee, der seit über 160 Jahren wissenschaftlich untersucht und beschrieben wird. Bei mittleren Wasserständen besitzt er eine Uferlänge von 273 km, davon liegen 173 km in Deutschland, 28 km in Österreich und 72 km in der Schweiz. Mit einer Fläche von 536 km<sup>2</sup> ist der Bodensee flächenmäßig der drittgrößte und mit einem Volumen von 48 km<sup>3</sup> volumenmäßig der zweitgrößte See Mitteleuropas. Mit einem Einzugsgebiet von etwa 11.500 km<sup>2</sup> wird er von mehr als 200 Flüssen, Bächen und Gräben gespeist, die insgesamt durchschnittlich 360 m<sup>3</sup>/s liefern. Zusätzlich fallen 18 m<sup>3</sup>/s Niederschläge direkt auf die Seefläche. Das Bodenseebecken wurde im Verlauf der vergangenen Eiszeiten geprägt. Der See besteht aus dem größeren und tieferen Obersee und dem flachen Untersee. Die tiefste Stelle befindet sich 254 m unter der Oberfläche. Die beiden größten Zuflüsse Alpenrhein und Bregenzerach münden im östlichen Teil des Obersees und führen dem See etwa drei Viertel des gesamten Zuflusses zu. Der Abfluss liegt im Westen. Etwa 40 % der Fläche des gesamten Einzugsgebietes liegt

in einer Höhe von über 1.800 m ü. NN. Im Winter bleibt ein großer Teil des Niederschlags als Schnee gebunden und der Wasserspiegel des Bodensees sinkt; mit beginnender Schneeschmelze im Frühjahr steigt er wieder an. Somit wird im Mittel der höchste Wasserstand des Sees im Juni/Juli, das Minimum im Februar erreicht. Die jährlichen Wasserspiegelschwankungen sind geprägt durch das alpine Einzugsgebiet und betragen ca. 1,5 – 2 m. Die Sichttiefe kann in den Wintermonaten Werte von 10-15 m und während der Sommerstagnation 5 m erreichen. Aus dem Verhältnis von Volumen und Durchfluss ergibt sich eine theoretische Aufenthaltszeit von ungefähr 4 Jahren. Die tatsächliche Aufenthaltszeit des Wassers ist aufgrund der Strömungsverhältnisse nicht pauschal abzuschätzen. Je nach Schichtung fließt das einströmende Wasser durch die oberen Schichten wieder ab oder gelangt in größere Tiefen, wo es sich aufgrund der etwa einmal im Jahr stattfindenden Vollzirkulation länger aufhält. Aufgrund enormer Anstrengungen zur Phosphatreduzierung in der Vergangenheit sind die Nährstoffkonzentrationen im Bodensee heute wieder relativ niedrig. Die Jahresmittelwerte an Gesamtphosphor betragen etwa 6-7 µg/l, die aquatischen Lebensgemeinschaften entsprechen wieder weitgehend dem Typ nährstoffarmer tiefer Voralpenseen.

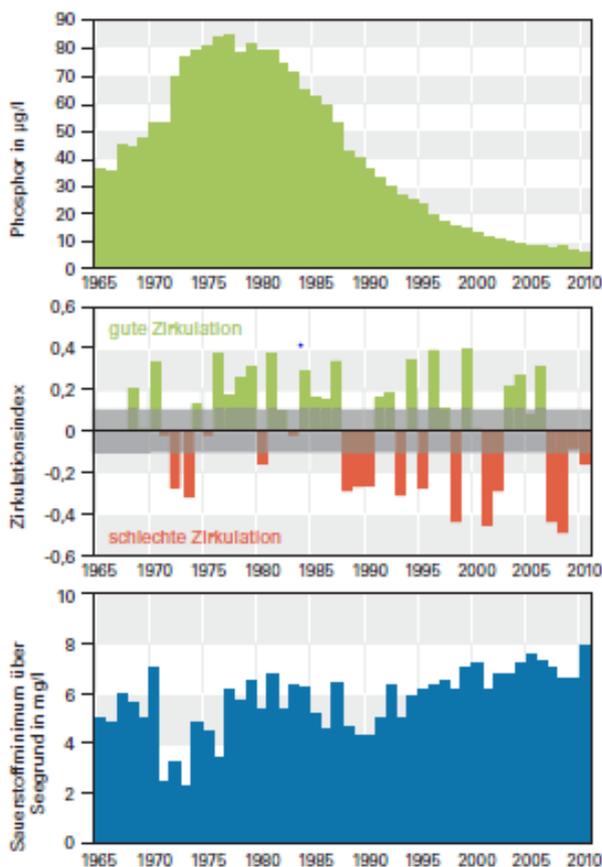


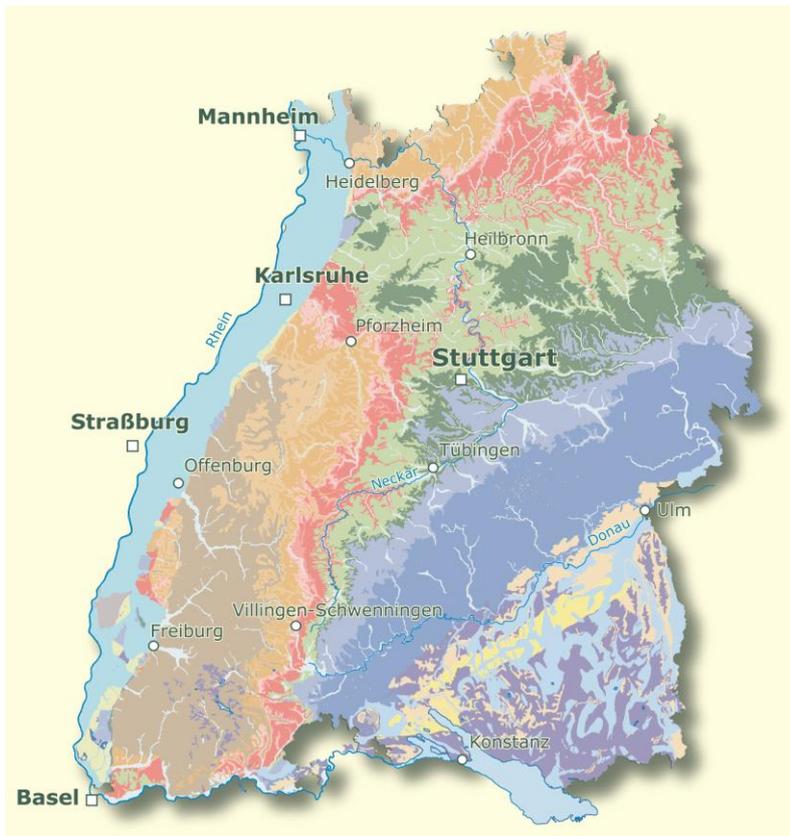
Abbildung 4: Jahresmittelwerte an Gesamtphosphor, Zirkulationsindex und Sauerstoffminimum 1 m über Grund im Bodensee (Obersee) [LUBW2012a]

Der Zusammenhang zwischen Sauerstoff und Zirkulation kann bei verschiedenen Phosphorkonzentrationen über den Zirkulationsindex bewertet werden. Dieser wird aus der vertikalen Durchmischung der Phosphorkonzentrationen abgeleitet und so skaliert, dass positive Werte eine gute Vertikalzirkulation und negative Werte eine unvollständige Durchmischung anzeigen. Eine schlechte Vertikalzirkulation führt bei hohen Phosphorkonzentrationen zu niedrigen Sauerstoffwerten am Seegrund. Abbildung 4 zeigt, dass insbesondere Phasen mit mehr als zwei aufeinanderfolgenden Jahren ohne vollständige Zirkulation für den Sauerstoffgehalt über dem Grund ungünstig sind. Anfang der 1970er Jahre erreichte der grundnahe Sauerstoffgehalt bei hohen Phosphorkonzentrationen nach zweijähriger schlechter Durchmischung sehr kritische Werte. In neuerer Zeit führten die Jahre unzureichender Tiefenwassererneuerung nur noch zu leicht erniedrigten Sauerstoffgehalten. Bezüglich der Sauerstoffversorgung im Tiefenwasser rüsten somit die niedrigen Nährstoffgehalte den Bodensee für die Zukunft [LUBW 2012a; KLIWA 2007].

Insgesamt 17 Wasserwerke und davon acht am baden-württembergischen Uferabschnitt entnehmen dem See jährlich ca. 170 Millionen m<sup>3</sup> Rohwasser zur Aufbereitung als Trinkwasser. Dies entspricht etwa 1,5 % des Wasserdurchflusses bzw. der Hälfte der natürlichen Verdunstung von ca. 9 m<sup>3</sup>/s. Als größter Wasserentnehmer versorgt der Zweckverband Bodensee-Wasserversorgung (BWV) etwa vier Millionen Einwohner mit Trinkwasser aus dem Bodensee und leistet damit einen wichtigen Beitrag zur Sicherung der Trinkwasserversorgung in Baden-Württemberg. Die Trinkwasserabgabe der BWV beläuft sich auf jährlich etwa 125 Millionen Kubikmeter.

### **1.3.3 Grundwasser**

Die hydrogeologische Übersichtskarte Baden-Württemberg (HÜK 350) weist insgesamt rund 20 verschiedene hydrogeologische Einheiten aus, die die komplexe geologische Struktur des Landes widerspiegeln (Abbildung 5). Diese hydrogeologischen Einheiten werden nach Hohlraumart (Klüfte, Poren, Karst), Verfestigung (Lockergestein, Festgestein) und Gesteinsart unterteilt, was eine hohe Bandbreite an hydraulischen Leitfähigkeiten ( $k_F$  Werten) und somit unterschiedlichen Charakteristiken und Ergiebigkeiten der Aquifere mit sich bringt. Wassermangelgebiete aufgrund der Hydrogeologie sind vorwiegend die Gebiete mit wenig ergiebigen Grundwasserleitern (z.B. Schwarzwald, Teile des oberschwäbischen Molassebeckens, Albvorland) sowie die Gebiete mit Kluft-Karstgrundwasserleitern (Abbildung 5, Abbildung 6). In Abbildung 7 sind Wasserüberschuss- und Wassermangelgebiete sowie wasserarme Gebiete in Baden-Württemberg dargestellt.



Kürzel, Farbe	Bezeichnung der hydrogeologischen Einheit	Klassifikation nach Gebirgsdurchlässigkeit
Hy 1	Quartäre und jungtertiäre Deckschichten <sup>1</sup>	GWG
Hy 2	Quartäre Beckensedimente, Moränensedimente und tiefgründig verwitterte Deckschotter	GWG
Hy 3	Quartäre / Pliozäne Kiese und Sande (Oberrheingraben)	GWL
Hy 4	Fluvioglaziale Kiese und Sande (Alpenvorland)	GWL
Hy 5	Jungquartäre Flusskiese und -sande	GWL
Hy 6	Junge Magmatite	GWG
Hy 7	Tertiär im Oberrheingraben	GWG
Hy 8	Obere Meeresmolasse	GWL / GWG
Hy 9	Übrige Molasse	GWG
Hy 10	Oberjura, schwäbische Fazies	GWL
Hy 11	Oberjura, rauracische Fazies	GWL
Hy 12	Oberjura, helvetische Fazies <sup>2</sup>	GWG
Hy 13	Mittel- und Unterjura	GWG
Hy 14	Oberkeuper und oberer Mittelkeuper	GWL / GWG
Hy 15	Gipskeuper und Unterkeuper	GWL / GWG
Hy 16	Oberer Muschelkalk	GWL
Hy 17	Mittlerer Muschelkalk	GWG
Hy 18	Unterer Muschelkalk	GWL
Hy 19	Oberer Buntsandstein	GWG / GWL
Hy 20	Mittlerer und Unterer Buntsandstein	GWL
Hy 21	Paläozoikum, Kristallin	GWG
Hy 22	Trias, ungegliedert	GWG / GWL

GWL Grundwasserleiter ( $k_f > 10^{-6}$  m/s); blau: Porengrundwasserleiter, dunkelgrün: Kluft-, Karstgrundwasserleiter  
 GWG Grundwassergeringleiter ( $k_f < 10^{-6}$  m/s); braun  
 GWL/GWG Wechsellagerung zwischen Grundwasserleitern und Grundwassergeringleitern oder Gebirgsdurchlässigkeit um  $10^{-5}$  m/s und nicht eindeutig zuzuordnen; hellgrün

<sup>1</sup> abgedeckte Karte: Deckschichten sind nicht dargestellt

<sup>2</sup> in Baden-Württemberg ausschließlich unter mächtiger Molasse-Überdeckung, Alpenvorland (vgl. auch Abbildung 4)

Abbildung 5: Karte der hydrogeologischen Einheiten in Baden-Württemberg, Stand 2008 [Karte des Landesamtes für Geologie, Rohstoffe und Bergbau im Regierungspräsidium Freiburg (<http://www.lgrb.uni-freiburg.de>; LGRB)]

## Ergiebigkeiten in Baden-Württemberg

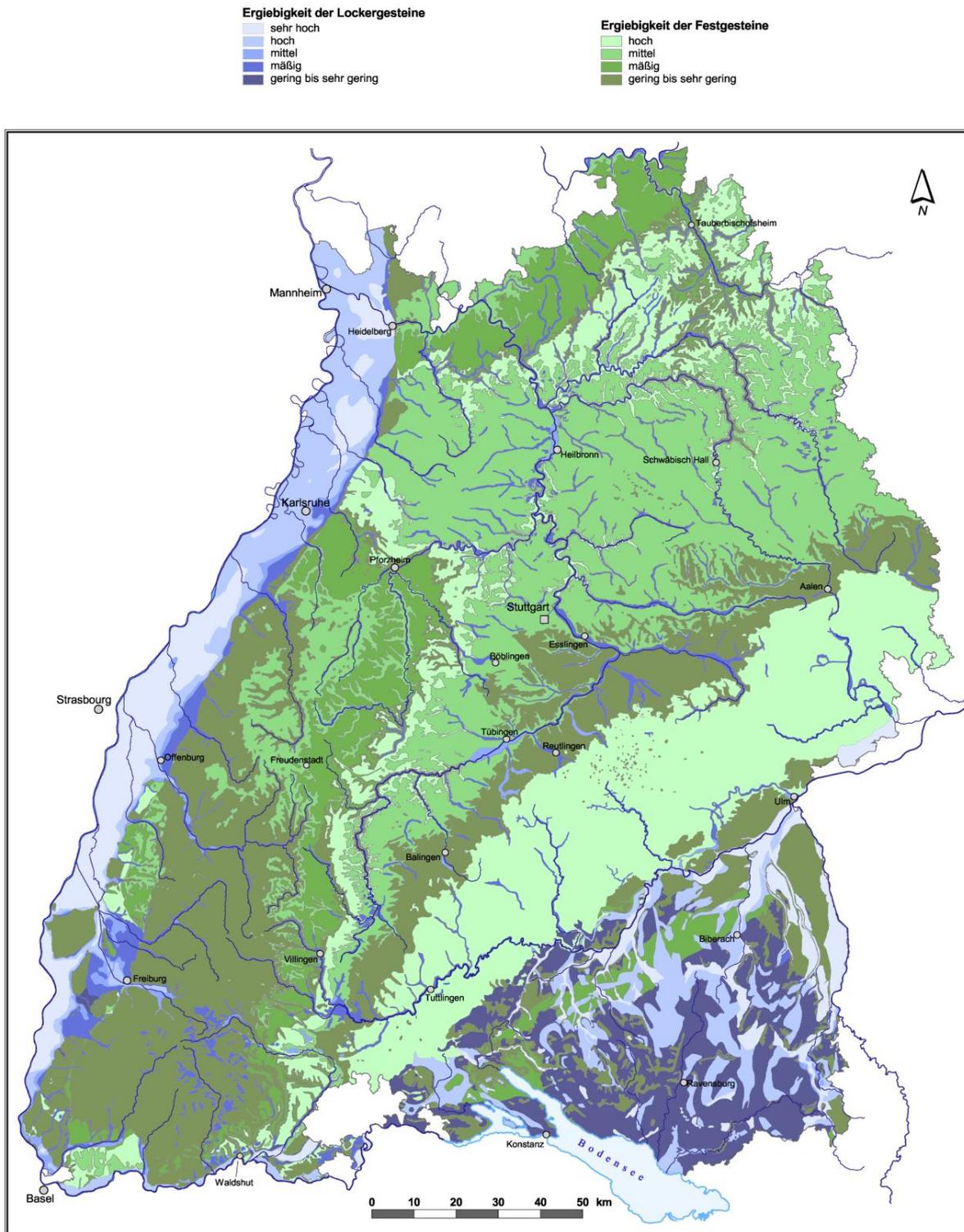


Abbildung 6: Karte der Grundwassereergiebigkeiten in Baden-Württemberg HÜK 350 [Karte des Landesamtes für Geologie, Rohstoffe und Bergbau im Regierungspräsidium Freiburg (<http://www.lgrb.uni-freiburg.de>), LGRB]

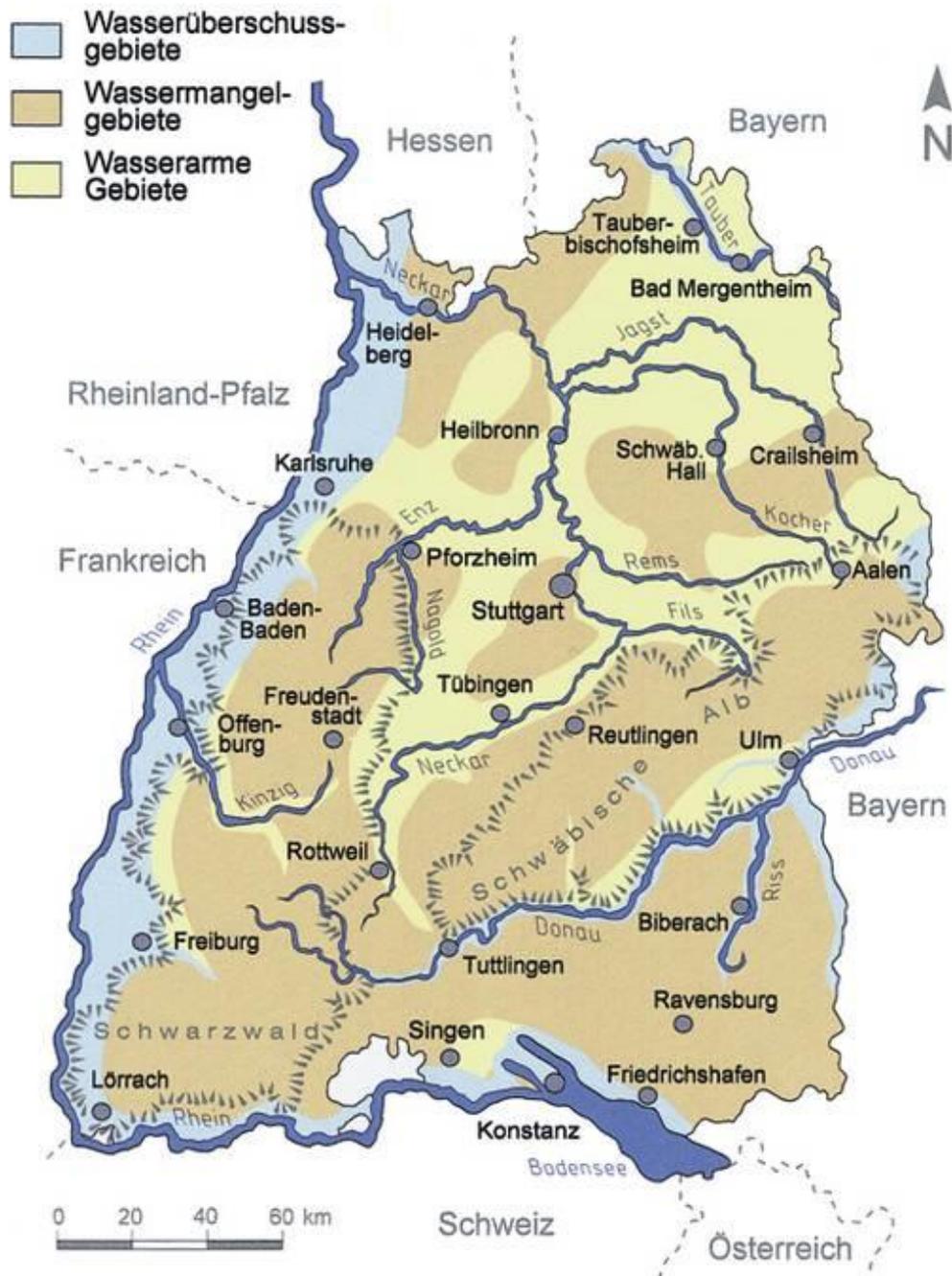


Abbildung 7: Wasserüberschuss- und Wassermangelgebiete in Baden-Württemberg [ZVLW 2009]

Über die LUBW betreibt das Land Baden-Württemberg ein umfangreiches quantitatives und qualitatives Messnetz zur Grundwassermenge und -beschaffenheit. Die Messstellendichte orientiert sich nach der Bedeutung des Grundwasservorkommens, so dass die größte Messstellendichte in den Lockergesteinsaquiferen mit hohen Grundwasservorkommen zu finden ist.

Je nach hydrogeologischer Region hat jedes Grundwasser eine von der Bodenbedeckung, den Untergrundverhältnissen sowie von hydrologischen und anthropogenen Einflüssen abhängige charakteristische Zusammensetzung. Gesetzlich geregelte Schwellenwerte bzgl. der Inhaltsstoffe des Grundwassers enthält die Grundwasserverordnung u.a. für Nitrat,

Pflanzenschutzmittel, verschiedene Schwermetalle und weitere Parameter. Da in Baden-Württemberg annähernd die Hälfte der Landesfläche landwirtschaftlich genutzt wird, ist das Grundwasser großflächig durch Nitrat aus stickstoffhaltigen Düngemitteln sowie kleinräumig durch Pflanzenschutzmittel belastet [LUBW 2012a].

Eine wichtige Komponente des Grundwasserhaushaltes stellt die Grundwasserneubildung aus Niederschlägen dar.

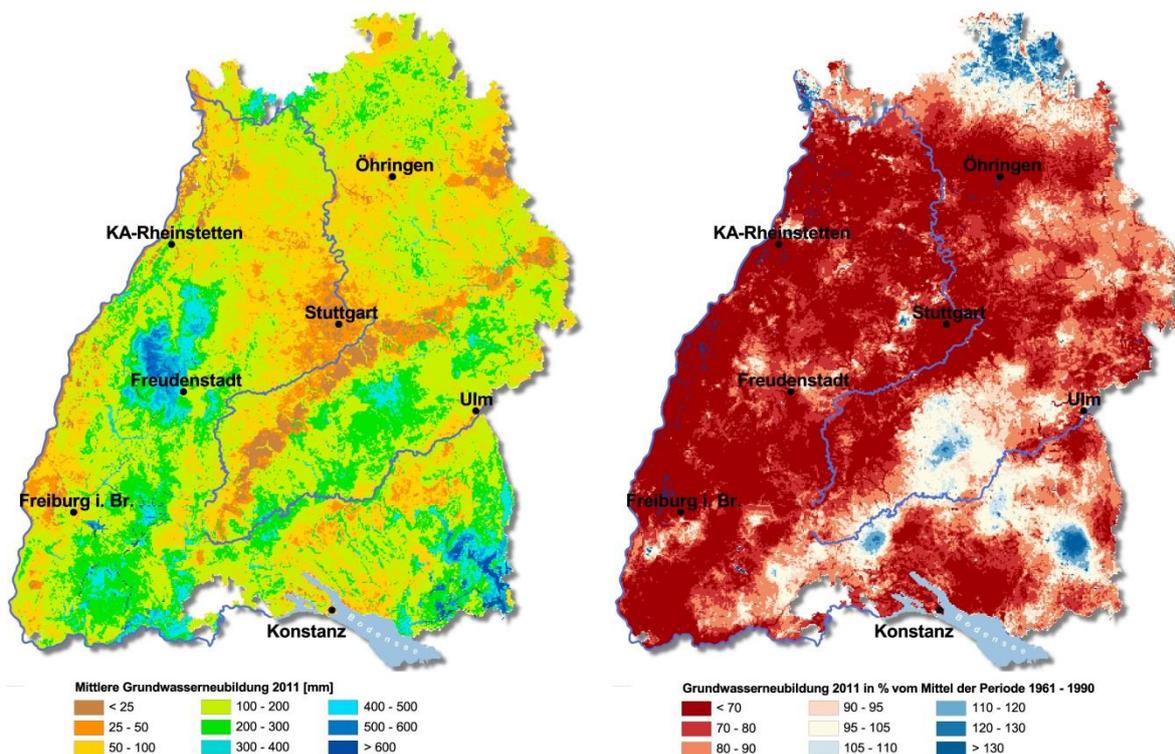


Abbildung 8: Verteilung der Grundwasserneubildung im Jahr 2011 in mm/Jahr (links) und in % vom Mittel der Periode 1961-1990 (rechts) [Quelle: LUBW 2012d]

Abbildung 8 zeigt die räumliche Verteilung der jährlichen Grundwasserneubildung aus Niederschlag in Baden-Württemberg im Jahr 2011. Im Landesmittel lag die Grundwasserneubildung bei etwa 150 mm und erreichte damit lediglich 75% der Mittelwerte der Periode 1961-1990 bei einer insgesamt uneinheitlichen Situation. Tendenziell weisen Festgesteinsbereiche insbesondere im Schwarzwald unterdurchschnittliche Grundwasservorräte und die Lockergesteinsaquifere meist mittlere Verhältnisse auf. Zusammenhänge zwischen dem Klimawandel und der Grundwasserneubildung werden in Abschnitt 3.5 behandelt.

### 1.3.4 Wassergewinnung, Wassernutzung und Trinkwasserversorgung

Die Wassergewinnung in Baden-Württemberg ist seit Ende der 1980er Jahre rückläufig. Sie ist bezogen auf alle Nutzer im Zeitraum von 1991 bis 2010 von 6.868 Mio m<sup>3</sup>/a auf

4.645 Mio m<sup>3</sup>/a gesunken. Die Wasserentnahme erfolgt aus Grund-, Quell- und Oberflächengewässern, wovon der Großteil für die Verwendung durch die Energiewirtschaft aus Oberflächengewässern stammt. Auch der Wasserbedarf der öffentlichen Trinkwasserversorgung ist von 759 Mio m<sup>3</sup>/a auf 652 Mio m<sup>3</sup>/a und damit auf einen Anteil von 14% der Wassergewinnung im Jahr 2010 bzw. auf einen Anteil von weniger als 1,4% des Wasserdargebots gesunken. Der Wasserbedarf der Bevölkerung (private Haushalte und Kleingewerbe) sowie der Industrie ist seit 1991 bis 2010 bei einer von 10 Mio. auf 10,75 Mio. Menschen gewachsenen Bevölkerung von 507 Mio. m<sup>3</sup>/a auf 451 Mio. m<sup>3</sup>/a gesunken, woraus sich ein einwohnerspezifischer Bedarf ergibt, der von durchschnittlich 140 l/E\*d auf 115 l/E\*d gesunken ist [Statistisches Landesamt 2010]. Der Wasserverbrauch der Bevölkerung und Industrie hat sich bei steigendem Lebensstandard und höheren Komfortexpectationen deutlich verringert. Steigendes Umweltbewusstsein, verbesserte Haustechnik wie beispielsweise die Wasserspartaste, Kosten für Brauch- und Prozesswasser und andere klimaunabhängige Faktoren haben dies bewirkt. Regionale und lokale Unterschiede im Wasserverbrauch und der Verbrauchscharakteristik resultieren aus demographischen Entwicklungen (Zu- oder Abnahme der Bevölkerungszahlen, Änderung der Alters- oder Erwerbsstruktur), dem Aus- oder Einpendeln der Einwohner oder der Nutzung von Liegenschaften als Zweitwohnsitz. So bewegte sich der einwohnerspezifische Bedarf pro Gemeinde im Jahr 2010 in einer Bandbreite von 77 bis 240 l/E\*d (Bandbreite laut Statistischem Landesamt, eigene Auswertung). Die Trinkwassergewinnung erfolgt zu ca. 73% flächendeckend aus Grund- und Quellwasser und zu 27% aus Oberflächenwasser. Das aus Oberflächengewässern gewonnene Trinkwasser stammt hauptsächlich aus dem Bodensee, der Donau unterhalb von Ulm und der Talsperre kleine Kinzig bei Freudenstadt. Der Anteil der öffentlichen Trinkwasserversorgung an der gesamten Grundwassergewinnung von 341 Mio. m<sup>3</sup>/a beträgt 72 %, der Anteil an der gesamten Quellwassergewinnung von 132 Mio. m<sup>3</sup>/a beträgt 91 % [Statistisches Landesamt 2010].



Abbildung 9: Verteilung des Wassers in Baden-Württemberg im Jahr 2010 [Quelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Stuttgart, 2012]

Abbildung 9 zeigt die Verwendungszwecke des Wassers im Jahr 2010 in Baden-Württemberg. Der größte Anteil des Wassers wird für Kühlzwecke thermischer Kraftwerke genutzt. Zwar sind die damit verbundenen Verdunstungsverluste für den lokalen Wasserhaushalt gering, das Kühlwasser wird den Gewässern jedoch erwärmt wieder zurückgegeben. Mit zunehmender Änderung der klimatischen Randbedingungen kann dies zur Verschärfung der Gewässererwärmung in den Sommermonaten führen. Derzeit von untergeordneter Bedeutung ist bei einer landesweiten Betrachtung die Nutzung für die Bewässerung mit einem Anteil von 0,3% des verteilten Wassers. Es zeigt sich jedoch, dass der Bedarf an Bewässerungswasser je nach zukünftiger klimatischer Entwicklung in landwirtschaftlich intensiv genutzten Regionen bei entsprechender Empfindlichkeit der angebauten Früchte langfristig ansteigen kann. Ausführungen zu Einflüssen des Klimawandels auf die Trinkwasserversorgung enthält Abschnitt 3.6.

### **1.3.5 Abwasser**

Die Leistungsdaten der kommunalen Kläranlagen in Baden-Württemberg werden durch die amtliche Überwachung und die Eigenkontrolle der Anlagenbetreiber ermittelt. Mit Stand 31.12.2012 wurden 959 kommunale Kläranlagen mit einer Gesamtausbaugröße von etwa 20,5 Mio. Einwohnergleichwerten betrieben und damit das Abwasser der etwa 10,7 Mio. angeschlossenen Einwohner und der angeschlossenen Indirekteinleiter gereinigt. Die gesamte den Kläranlagen zugeleitete Stickstofffracht wird um etwa 78 % und die Phosphorfracht um etwa 90 % reduziert [LUBW 2012a, UM 2013a].

Der Anschlussgrad an die Kanalisation beträgt in Baden-Württemberg etwa 99%; die Abwässer von etwa 75. 000 Einwohnern insbesondere von kleinen Weilern und Gehöften werden derzeit dezentral mit privaten Kleinkläranlagen oder geschlossenen Gruben entsorgt [LUBW 2012a]. Siedlungen werden in Baden-Württemberg überwiegend im Mischsystem entwässert. Von den rund 72 000 km öffentlichen Kanälen in Baden-Württemberg sind etwa 70% Mischwasserkanäle, in denen Schmutz- und Niederschlagswasser gemeinsam abgeleitet werden.

Über Undichtigkeiten in öffentlichen und privaten Kanälen sowie durch Anschlüsse von Gebäudedränagen stehen Kanalnetze grundsätzlich in Kontakt mit dem Boden- und Grundwasser. Diese unerwünschte Verbindung ist in der Praxis unvermeidbar. Abhängig von den jeweiligen Druckverhältnissen führt sie zu einer Exfiltration von Abwasser oder zu einer Infiltration von Grundwasser, das dann als verdünnende Abflusskomponente – sog. Fremdwasser – zur Kläranlage weitergeleitet wird. Bei etwa einem Drittel aller Kläranlagen in Baden-Württemberg ist im längerfristigen Mittel der Fremdwasseranfall größer als der Schmutzwasseranfall.

Kläranlagen sollten so ausgelegt sein, dass sie die 3- bis 9-fache des Schmutzwasserabflusses zuzüglich eines Zuschlags für den unvermeidbaren Fremdwasserabfluss behandeln können [ATV-DVWK-A 198, 2003]. Abflüsse bei Regenwetter überschreiten jedoch die Kapazität der Kläranlage oft um ein Vielfaches. Diese zusätzlichen Abflüsse werden zunächst in Regenüberlaufbecken (RÜB) zwischengespeichert und anschließend verzögert zur Kläranlage weitergeleitet. Erst wenn das Speichervolumen der Becken erschöpft ist, kommt es zu einer Entlastung, d.h. zu einer direkten Einleitung in ein Gewässer. Bei sehr intensiven Niederschlägen kommt es außerdem auch zu Entlastungen an Regenüberläufen (RÜ), die über kein Speichervermögen verfügen. Der Ausbau der RÜB nach den einschlägigen Richtlinien und landesspezifischen ist weitgehend abgeschlossen (Ausbaugrad etwa 95 %).

Das konventionelle Mischsystem hatte ursprünglich die Aufgabe, das Regenwasser zusammen mit dem Schmutzwasser möglichst rasch und vollständig aus den Siedlungen abzuleiten. Mittlerweile verfolgt das Land jedoch bei der Erschließung neuer Siedlungsgebiete eine andere Entwässerungsstrategie. Ziel ist es, den Eingriff in den natürlichen Wasserhaushalt möglichst gering zu halten. Durch die Minimierung der Versiegelung, dezentrale Versickerung, verzögerte Ableitung und den Einsatz von Gründächern wird die hydraulische Belastung von Kanalisation und Kläranlage sowie der von Einleitungen betroffenen Gewässer reduziert. Weitere positive Effekte sind die Erhöhung der Grundwasserneubildung und die Verbesserung des Stadtklimas durch den höheren Verdunstungsanteil. Nur stark verschmutztes Regenwasser soll weiterhin über die konventionelle Mischkanalisation abgeleitet werden. Dadurch entstehen sogenannte modifizierte Mischsysteme [LfU 2005a]. Die beschriebene „naturverträgliche Regenwasserbewirtschaftung“ entspricht dem nationalen wie internationalen fachlichen Konsens und steht im Einklang mit den Grundsätzen der Abwasserbeseitigung nach § 55 des Wasserhaushaltsgesetzes.

Ausführungen zum Einfluss des Klimawandels auf die Siedlungsentwässerung enthält Abschnitt 3.4.

#### **1.4 Sonstige regionale und globale Einflüsse**

Der Klimawandel ist nicht der alleinige Einflussfaktor, welcher auf das Handlungsfeld Wasserhaushalt einwirkt. Zu nennen sind außerdem der demographische Wandel, Änderungen der Landnutzung, der Wertewandel in der Gesellschaft, der technische und wissenschaftliche Fortschritt sowie die politischen Rahmenbedingungen in Baden-Württemberg, Deutschland, Europa und der Welt. Somit wirken sich sowohl regionale als auch globale Entwicklungen maßgeblich auf den Wasserhaushalt aus. Auswirkungen des Klimawandels können durch politische und gesellschaftliche Neupositionierungen im Bereich

der Umwelt und Weiterentwicklungen in der Umwelttechnik verschärft oder abgeschwächt werden. So wird die Erschließung eines neuen Wohngebietes lokal die Komponenten des Wasserhaushalts schneller und extremer beeinflussen als der Klimawandel. Als Beispiel zum Wertewandel wird die Weiterentwicklung der Abwasserreinigung im Hinblick auf die Entnahme von Spurenstoffen davon abhängen, wie sich Gesellschaft und Politik zum Schutz der Umwelt und der Daseinsvorsorge positionieren werden. Zu solchen regionalen und globalen Einflussfaktoren hat beispielsweise das Forschungsprogramm „Global Change and the Hydrological Cycle – Danube“ (GLOWA-Danube) die regionalen Auswirkungen des Klimawandels im Einzugsgebiet der Oberen Donau unter dem übergeordneten Ziel einer Forschung zum globalen Wasserkreislauf und unter den Bedingungen des globalen Wandels untersucht [GLOWA 2012].

Aussagen zum Klimawandel und seiner Auswirkungen auf das Handlungsfeld Wasserhaushalt sollten daher nicht isoliert betrachtet werden, sondern immer vor dem Hintergrund sonstiger regionaler und globaler Einflüsse.

## **2 Wirksame Klimafaktoren**

Für das Handlungsfeld Wasserhaushalt sind insbesondere die Klimafaktoren Lufttemperatur, Niederschlag, Globalstrahlung, relative Luftfeuchte, Luftdruck und Wind bedeutend. Im Zusammenhang mit der Anpassungsstrategie Klimawandel hat das Land Baden-Württemberg auf der Grundlage regionaler Klimaprojektionen Klimakennwerte in der Form sogenannter „klimatischer Leitplanken“ erstellt, die für die Bewertung der Vulnerabilität der verschiedenen Handlungsfelder herangezogen werden sollen (LUBW 2012b). Die als Grundlage für die Vulnerabilitätsanalysen in Abschnitt 3 herangezogenen Klimafaktoren und klimatischen Leitplanken sowie weitere wissenschaftliche Grundlagen werden im Folgenden beschrieben und diskutiert.

### **2.1 Klimatische Leitplanken für Baden-Württemberg**

Ausgangspunkt der klimatischen Leitplanken sind Annahmen zum weiteren Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration und weiterer Treibhausgasemissionen. Dazu wurde ein mittleres Emissionsszenarium A1B aus den Hauptgruppen der vom UNO-Weltklimarat Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) definierten SRES-Szenarien ausgewählt. Üblicherweise werden für Klimaberechnungen globale Zirkulationsmodelle eingesetzt, die allerdings in ihrer räumlichen Modellauflösung limitiert sind (z.B. Modellelemente mit 250 km x 250 km). Für Aussagen zum Klimawandel auf regionaler Ebene werden daher Regionalmodelle verwendet. Abbildung 10 zeigt schematisch, wie Regionalmodelle die Ergebnisse aus Globalmodellen für die gewünschten Klimainformationen nutzen und in Wirkmodellen weiterverwenden können.

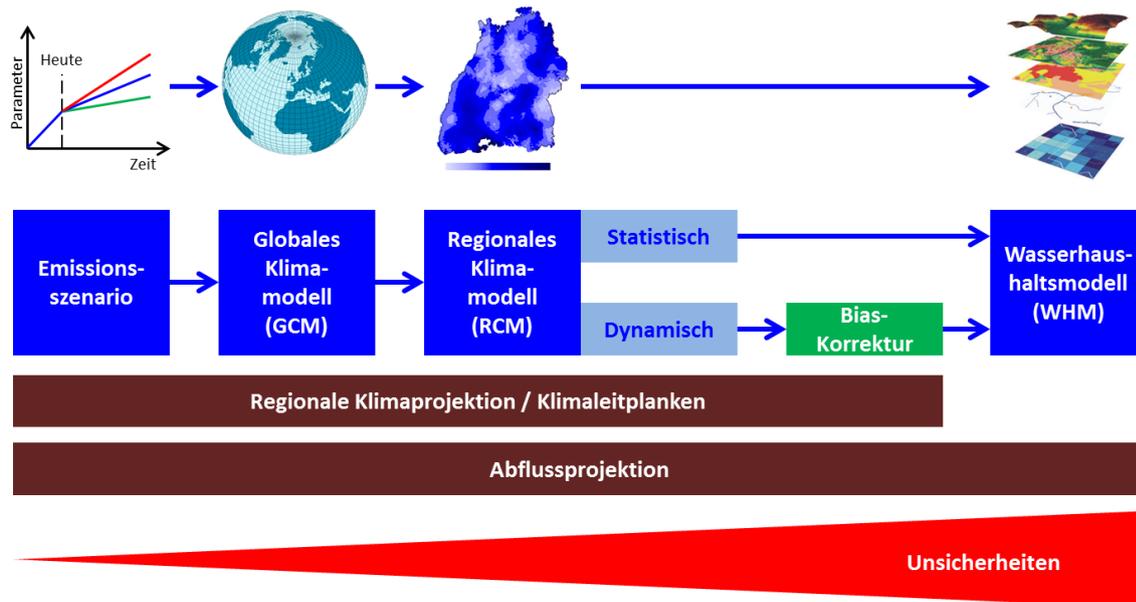


Abbildung 10: Modellkette für Untersuchungen zum regionalen Klimawandel [abgeändert nach KLIWA 2012b].

Die Ergebnisse der Global- und Folgemodelle innerhalb einer Modellkette werden als „Klimaprojektion“ bezeichnet [IPCC 2007]. Eine Klimaprojektion ist die durch Klimamodelle abgeleitete Abschätzung des zukünftigen Klimas unter der Annahme eines Emissionsszenarios. Da die Ergebnisse von Klimaprojektionen unter dem Vorbehalt der für die Szenarien getroffenen Annahmen stehen, erlauben sie keine Angaben zur Eintrittswahrscheinlichkeit, da beispielsweise die weitere Entwicklung der Treibhausgasemissionen nicht bekannt ist.

Da die Verwendung einzelner Modellketten bestehend aus einem Emissionsszenario, einem Globalmodell und einem Regionalmodell wiederum aufgrund verschiedener Unsicherheiten nicht ausreicht, um eine gewisse Ergebnisbandbreite darzustellen, in der eine Klimaentwicklung möglich ist, werden verschiedene Klimaprojektionen in einem Ensemble verwendet. Bei den vom Land Baden-Württemberg zur Verfügung gestellten klimatischen Leitplanken wurden 29 Klimaprojektionen in ein solches Ensemble aufgenommen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Unsicherheiten abhängig von der Komplexität der jeweiligen Zielgrößen und insbesondere für Aussagen zu Extremwerten oder für kleine räumliche Skalen im Zusammenhang mit dem Klimawandel noch teilweise hoch sind.

Tabelle 2: Relevante Klimakennzahlen für den Wasserhaushalt (T: Temperatur, N: Niederschlag, StarkN: Starkniederschlag, Glob.: Globalstrahlung, Stabw: Standardabweichung)

Kennzahl	Veränderung gegenüber Vergleichszeitraum (50. Perzentil)			Einschätzung zufriedenstellend
	Vergleichszeitraum (1971-2000)	Nahe Zukunft (2021-2050)	Ferne Zukunft (2071-2100)	
T Mittel [°C]	8,4	+1,1	+3,0	ja
Tropennacht [d]	3,8	+2,8	+5,4	eingeschränkt
Sommertag [d]	30,2	+10,1	+32,3	eingeschränkt
Frosttag [d]	97	-19,1	-47,2	eingeschränkt
Eistag [d]	23,4	-8,9	-17,9	eingeschränkt
N Jahr [mm]	949	+4,1%	1,3%	eingeschränkt
N-Hyd-Winter [mm]	443	+7,1 %	+15,9 %	eingeschränkt
N-Hyd-Sommer [mm]	512	-0,7 %	-9,4 %	eingeschränkt
N-Tage-Trocken [d]	138	-0,4	-6,3	nein
N-Tage-StarkN [d]	3,6	+0,7	+1,0	eingeschränkt
StarkN [mm]	40,7	+6,5 %	+12,8 %	eingeschränkt
Glob-Jahr [kWh/m <sup>2</sup> ]	1038	-1,2	+18,9	eingeschränkt
Glob-Stabw [W/m <sup>2</sup> ]	80,4	+1,7	+3,7	eingeschränkt
Glob-Min [W/m <sup>2</sup> ]	-	-0,2	-0,3	nein
Glob-Max [W/m <sup>2</sup> ]	315	-1,5	-1,8	nein
Wind-Jahr [m/s]	2,0	+0,0	+0,0	ja
Wind-Stabw [m/s]	1,5	+0,0	+0,0	ja
Wind-Max [m/s]	8,8	+0,1	+0,2	eingeschränkt
Wind-Tag > 8 m/s [d]	1,6	+0,5	+0,4	nein

Auf der Basis dieser klimatischen Leitplanken wurde den für die Anpassungsstrategie Klimawandel tätigen Gutachtern eine gemeinsame Informationsbasis für die Ableitung von Anpassungsmaßnahmen zur Verfügung gestellt. Wie in Abschnitt 2.2 erläutert werden wird, können die klimatischen Leitplanken im Gegensatz zu anderen Handlungsfeldern für den Bereich des Wasserhaushaltes mit seinen komplexen Zielgrößen jedoch nur eingeschränkt eingesetzt werden. Aus diesem Grund werden in dem vorliegenden Gutachten neben den klimatischen Leitplanken auch weitere Ergebnisse aus bisherigen KLIWA-Projekten und anderen Forschungsvorhaben berücksichtigt. Tabelle 2 führt einen Ausschnitt aus der Gesamtübersicht der Ergebnisse der Analyse der Kennzahlen auf Basis der Perzentilbetrachtung als Flächenmittel über Baden-Württemberg für die nahe und ferne Zukunft auf [LUBW 2012c]. Die Definitionen der Klimakennzahlen sowie die Erläuterungen der verwendeten Abkürzungen sind im Anhang 1 zu diesem Gutachten aufgeführt. Die letzte Spalte in Tabelle 2 beinhaltet eine Einordnung der Klimakennzahlen in die durch die LUBW vorgenommenen Bewertungsklassen „zufriedenstellend“, „bedingt zufriedenstellend“ und „nicht zufriedenstellend“.

## 2.2 Unsicherheiten

### 2.2.1 Klimamodelle und Unsicherheiten

In der Praxis werden die Daten der räumlich grob aufgelösten Klimamodelle (GCM) mittels Downscaling-Verfahren (statistisch oder dynamisch) auf kleinere räumliche Auflösungen

übertragen (RCM), um regionale Aussagen treffen zu können. Diesen RCM werden dann häufig Wirkmodelle nachgeschaltet. Abbildung 10 zeigt, dass sich aus dieser Modellkette ein nicht unerheblicher Unsicherheitsbereich ergibt, selbst wenn nur ein Emissionsszenario verwendet wird. Häufig wird das A1B Szenario verwendet, dem eine mittlere Entwicklung der Treibhausgasemissionen zu Grunde liegt. Allerdings bedeutet dies nicht, dass deswegen das A1B Szenario das wahrscheinlichste ist [IPCC 2001]. Zudem liegt die reale Entwicklung der Treibhausgasemissionen teilweise sogar über den bisher projizierten Verläufen [HLUG 2010]. Um die mögliche Bandbreite an Projektionen abzubilden, wäre es daher sinnvoll, möglichst alle zur Verfügung stehenden Emissionsszenarien zu betrachten.

Bezogen auf das Handlungsfeld Wasserhaushalt sind noch weitere grundsätzliche Sachverhalte hinsichtlich Klimamodellierungen und regionaler Aussagen zu beachten. Aufgrund von Unwägbarkeiten bei der Szenarienbildung sind - verbunden mit den Unsicherheiten sowohl in Klima- als auch Wasserhaushaltsmodellen - häufig keine einfachen bzw. eindeutigen Aussagen möglich. Dies gilt insbesondere für den Abfluss, da die Aussagen der Klimamodelle für Änderungen des Niederschlags wesentlich unsicherer sind als z.B. für die Temperatur. Gerade die für hydrologische Fragestellungen interessanten Parameter wie die Frequenz, Intensität und Verteilung von Extremniederschlägen werden von den Klimamodellen weniger gut repräsentiert [IPCC 2007].

Durch die grobe räumliche Auflösung können kleinskalige Prozesse wie Konvektion nicht abgebildet werden. Ferner muss die zeitliche Aggregation der Parameter beachtet werden. Bei Tageswerten, wie sie als Output aus den GCM vorliegen, ist eine zeitliche Disaggregation weder sinnvoll noch möglich. Dies ist beispielsweise für die kurzen intensiven Niederschlagsereignisse der Fall, die für das Handlungsfeld Wasserhaushalt von besonderer Relevanz sind (z.B. kleinräumige Hochwasser, Starkregen) [HLUG 2010]. Aussagen zu weiteren, von solchen Niederschlägen abhängigen Prozessen wie Sedimenttransport, Wasserqualität und Ökosystemfunktionen sind daher mit noch größerer Unsicherheit behaftet. Ferner nimmt die Aussageschärfe umso mehr ab, je kleiner das Gebiet ist, für das eine Aussage getroffen werden soll (siehe Abbildung 11) [LAWA 2010, ARL 2013]. Der Wasserhaushalt stellt also einen sehr komplexen Handlungsbereich dar, in dem häufig Extremereignisse sowie Abfolgen von Einzelereignissen von besonderer Bedeutung sind. Aufgrund der genannten hohen Unsicherheiten sind daher auf der Basis der vorgegebenen klimatischen Leitplanken im Zusammenhang mit dem Klimawandel für das Handlungsfeld Wasserhaushalt insbesondere Aussagen zu Einzelereignissen, Extremwerten sowie für kleine räumliche Skalen nur bedingt möglich.

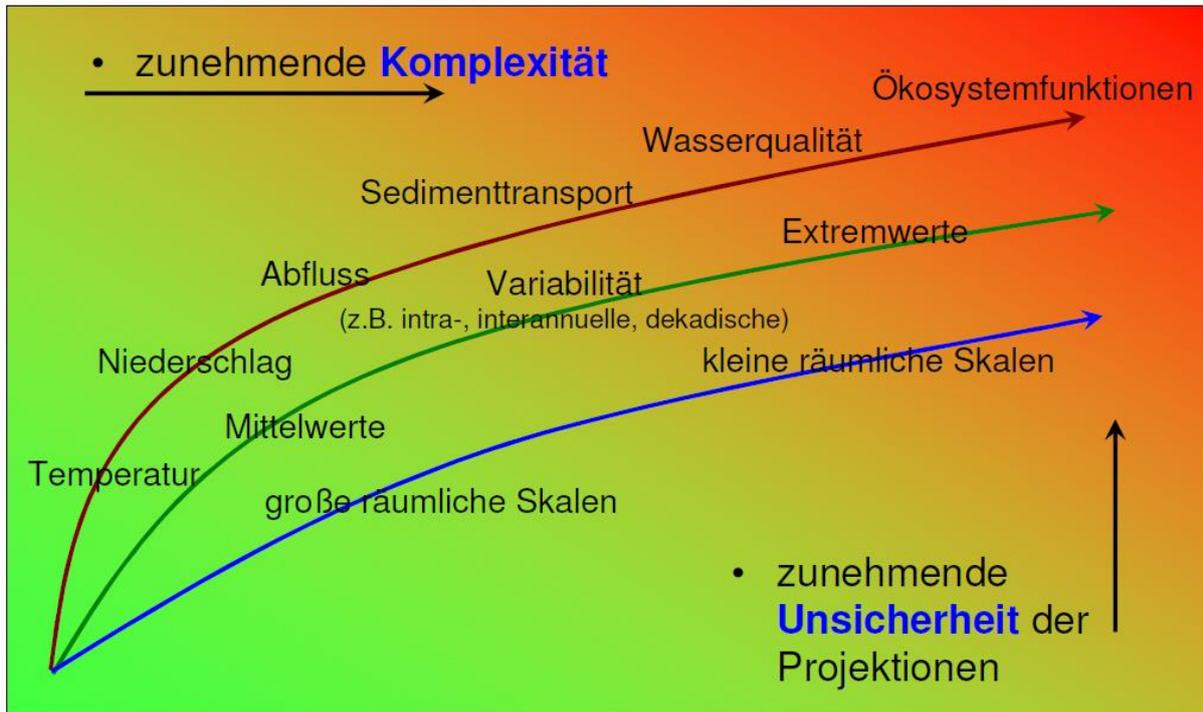


Abbildung 11: Zunahme der Komplexität und Unsicherheit mit der Vorhersagezielgröße [LAWA 2010]

### 2.2.2 Anmerkungen zu den Klimaleitplanken

Bei den vom Auftraggeber zur Verfügung gestellten Klimaleitplanken handelt es sich um Aggregationen aus einem Multi-Modell-Szenario Ensemble, in dem basierend auf dem A1B Emissionsszenario und verschiedenen Downscaling-Verfahren verschiedene Projektionen abgeleitet wurden. Die Klimaleitplanken werden dabei als Quantilwerte des Ensembles aller GCM-Downscaling-Kombinationen definiert. Diese Definition ist zumindest problematisch, da die Angabe von Quantilwerten die Interpretation des Ensembles als beobachtete Stichprobe einer zufälligen Verteilung impliziert, was aus wissenschaftlicher Sicht kritisch gesehen wird [Curry und Webster 2011].

Prinzipiell ist die Betrachtung der Entwicklung einer einzelnen Klimakenngröße wie z.B. der Temperatur im Rahmen der Klimaleitplanken möglich und die daraus abgeleitete Richtungssicherheit ein Szenario über künftige Entwicklungen. Sobald aber Aussagen über Klimakennwerte getroffen werden sollen, in die mehrere oder kombinierte Parameter aus dem Ensemble mit eingehen (beispielsweise ist die Grundwasserneubildung abhängig von Niederschlag, Verdunstung, Temperatur und Wind), besteht mit dem Ansatz der 15./85.Perzentilen die Gefahr physikalisch inkonsistenter Lösungen, da die Perzentile des Multi-Modell-Szenario Ensembles diese Konsistenz nicht garantieren können. Ein Modell, das einen starken Anstieg des Niederschlags voraussagt, wird beispielsweise einen eher moderaten Temperaturanstieg simulieren (und umgekehrt), da der zusätzliche Energieeintrag durch den Treibhauseffekt entweder in freie oder latente Wärme umgesetzt werden kann. Als Beispiel sei das Modell E3\_REGCM3 genannt, das den geringsten Anstieg

der Jahresmitteltemperatur und gleichzeitig die größte Zunahme an jährlichem Niederschlag liefert. Die Annahme, dass beides unabhängig voneinander stark ansteigt, ist physikalisch jedoch nicht begründbar.

Damit können die klimatischen Leitplanken nur grobe Tendenzen vorgeben, mit Hilfe derer für das Handlungsfeld Wasserhaushalt allenfalls auch nur grobe qualitative Aussagen gemacht werden können. Für quantitative Aussagen im Rahmen der Klimaleitplanken müssten diese Daten als Antrieb für entsprechende Wirkmodelle (z.B.

Bodenwasserhaushaltsmodelle) verwendet werden; zudem verschlechtert die Abwesenheit von Wirkmodellen die Richtungssicherheit der Aussagen über die Auswirkungen für das betrachtete System. Weiterführende Ausführungen dazu enthält Teil B des Fachgutachtens.

Im Folgenden wird das vorhandene Wissen zum Einfluss des Klimawandels auf die Klimafaktoren Temperatur, Niederschlag, Globalstrahlung und Wind für Baden-Württemberg aufgearbeitet. Dabei werden sowohl die in Tabelle 2 aufgeführten Klimakennzahlen als auch weitere Kenndaten aus der aktuellen Literatur in die Betrachtung mit einbezogen. Die daraus resultierenden Veränderungen für den Wasserhaushalt werden in Abschnitt 3 beschrieben.

### **2.3 Lufttemperatur**

Untersuchungen des Langzeitverhaltens der Lufttemperatur zeigen, dass im 20. Jahrhundert in Süddeutschland die Jahresmitteltemperaturen zwischen 0,5°C und 1,2°C gestiegen sind [UM und LUBW 2012]. Die stärkste Temperaturzunahme in Baden-Württemberg erfolgte erst in den letzten 30 Jahren (Abbildung 12). Dabei stellte das erste Jahrzehnt im neuen Jahrtausend die wärmste Dekade dar.

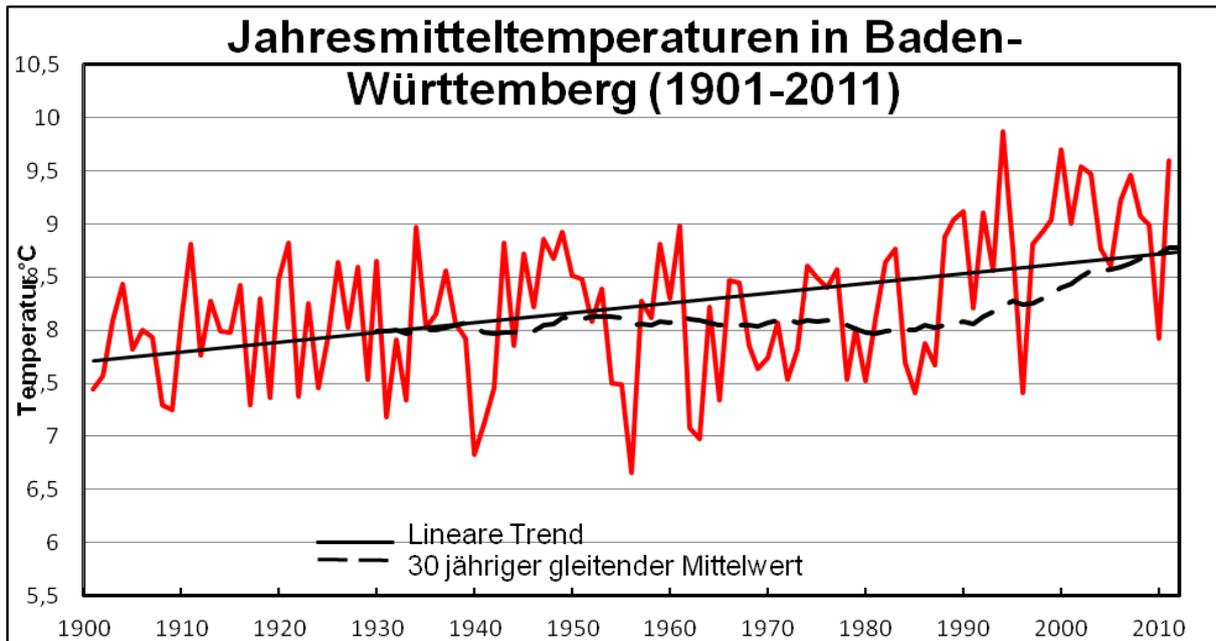


Abbildung 12: Jahresmitteltemperaturen in Baden-Württemberg 1901-2011 [Quelle: UM und LUBW 2012]

Nach den Klimaprojektionen beträgt die Jahresmitteltemperatur in Baden-Württemberg für den Ist-Zustand  $8,4^{\circ}\text{C}$ . Die Zunahme der Jahresmitteltemperatur des 20. Jahrhunderts wird sich in der Zukunft fortsetzen und könnte zu einer Zunahme des 50. Perzentils bis 2050 um  $1,1^{\circ}\text{C}$  und bis 2100 um  $3,1^{\circ}\text{C}$  führen. Die Spannweite der Abweichungen (zwischen den 15. und 85. Perzentilen) betragen  $0,9^{\circ}\text{C}$  sowohl für die nahe als auch für die ferne Zukunft. Die stärksten Zunahmen für den Median dürften für die nahe Zukunft im Schwarzwald und auf der schwäbischen Alb zu erwarten sein. (Abbildung 14). Diese Ergebnisse werden von der LUBW als zufriedenstellend eingeschätzt. Bei einer Betrachtung der Veränderung des Jahresgangs (siehe Abbildung 13) ist zu erkennen, dass die Temperatur in allen Monaten zunehmen wird, wobei diese Zunahme besonders stark in den Sommer- und Wintermonaten ausfällt.

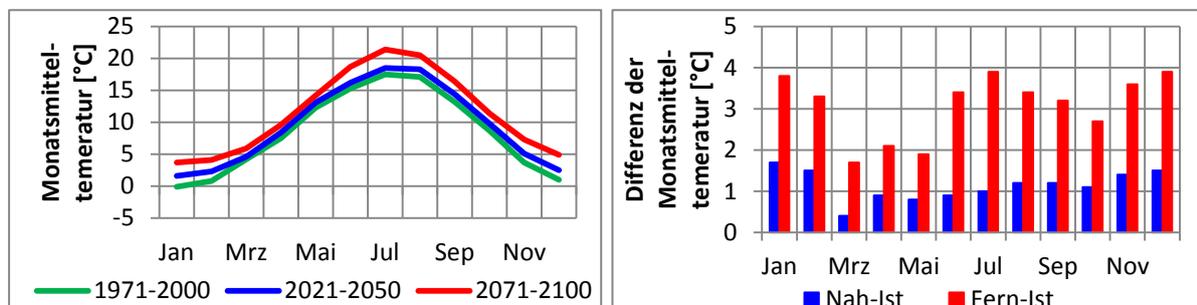


Abbildung 13: Monatsmitteltemperatur für die Zeiträume 1971-2000, 2021-2050 und 2071-2100 (links) sowie die Veränderung in der Zukunft gegenüber dem Bezugszeitraum (rechts); eigene Darstellung

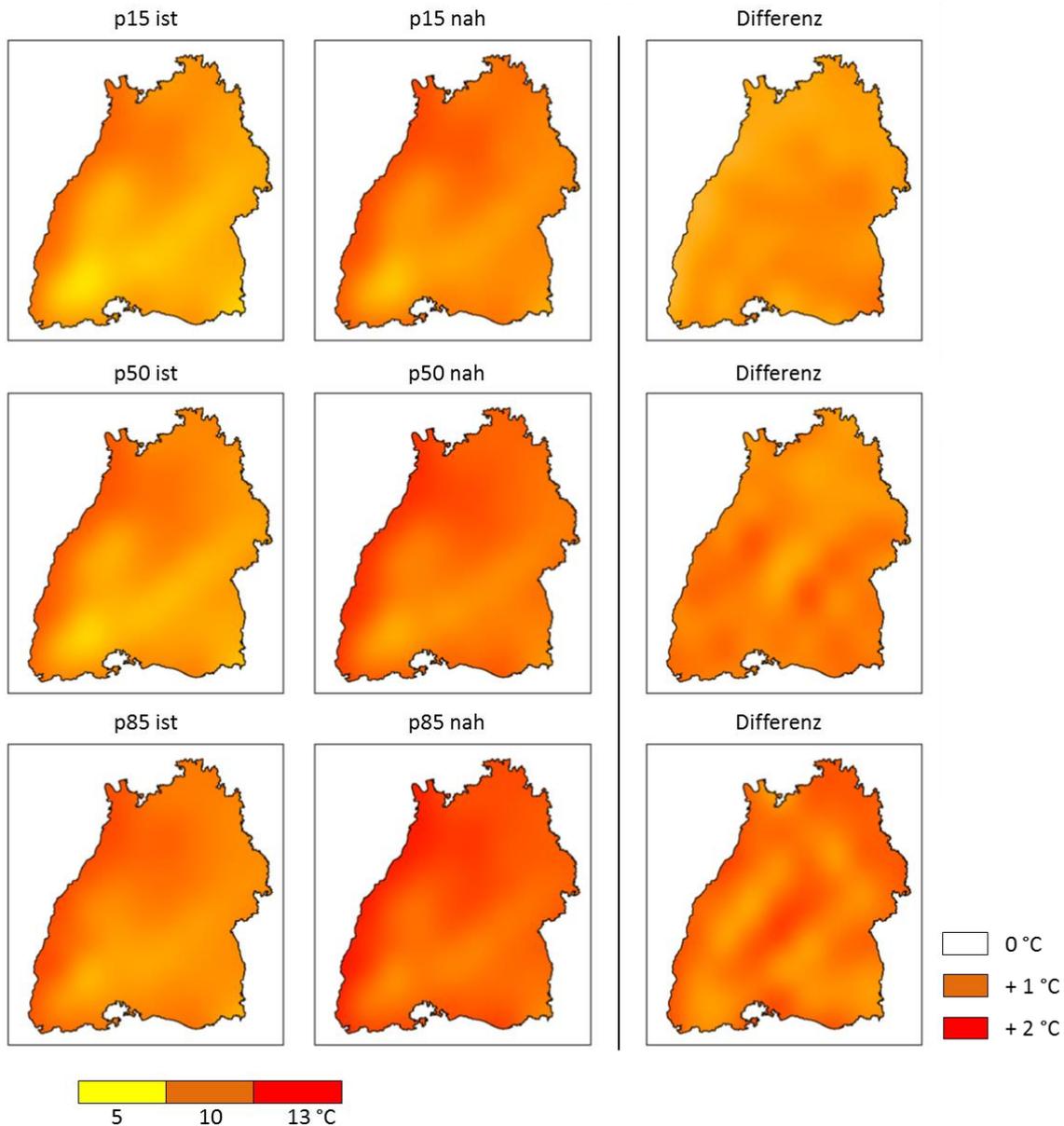


Abbildung 14: Jahresmitteltemperatur (°C) für das 15., 50. und 85. Perzentil für den Ist-Zustand (1971-2000) und die nahe Zukunft (2021-2050) sowie deren Differenz; eigene Darstellung auf der Grundlage der von der LUBW zur Verfügung gestellten Klimakennzahlen in der Auflösung 25 x 25 km<sup>2</sup>

Sommertage und Tropennächte werden um ca. 50 % für die nahe Zukunft und um ca. 100 % für die ferne Zukunft zunehmen [LUBW 2012b], wobei die Streuung wesentlich höher ausfällt als bei der Jahresmitteltemperatur, weshalb die LUBW hier die Ergebnisse der Projektionen nur als eingeschränkt zufriedenstellend einschätzt. Die höheren Temperaturen im Sommer sowohl am Tag als auch in der Nacht haben direkte Auswirkungen auf die Verdunstung, welche den Wasserkreislauf maßgebend beeinflusst. Die zu erwartete Temperaturzunahme im Winter hat großen Einfluss auf die Zwischenspeicherung von Niederschlag als Schnee und ist somit entscheidend für die zukünftig zu erwartenden Abflussverhältnisse. Den Berechnungen regionaler Klimamodelle zufolge wird die Lufttemperatur im Winter bis 2050 um ca. 2°C steigen [Hennegriff, Reich 2007], was ca. doppelt so hoch ist wie die

Veränderung des Jahresdurchschnitts. Damit ist eine Abnahme an Frost- (von den im mittel beobachteten 97 d/a um 32,7 bis 55,2 d/a) und Eistagen (von den im mittel beobachteten 23,4 d/a um 6,2 bis 27,4 d/a) bis 2100 zu erwarten.

## **2.4 Niederschlag**

### **2.4.1 Jahresmittel und Jahresgang**

Für das Jahresmittel des Niederschlags ergibt sich anhand der klimatischen Leitplanken aus Beobachtungsdaten eine mittlere Jahresniederschlagssumme von 949 mm/a für Baden-Württemberg mit einer Spannweite von 31 % [LUBW 2012b]. Für die nahe Zukunft wird eine Zunahme des 50. Perzentils von 4,1 % und für die ferne Zukunft von 1,3 % gegenüber dem Bezugszeitraum angenommen. Die Streuung ist hoch und die Stärke und die Richtungssicherheit des Klimasignals sind gering. Daher schätzt die LUBW die Ergebnisse der Berechnungen für die Niederschlagssumme im Jahr sowie den Niederschlag im hydrologischen Winter- und Sommerhalbjahr nur als bedingt zufriedenstellend ein. In der groben regionalen Darstellung lässt Abbildung 15 für die nahe Zukunft eine allgemeine Zunahme für die Summe des Niederschlags im hydrologischen Winterhalbjahr erkennen. Die stärksten Zunahmen für den Median dürften in der nahen Zukunft im Nord- und Südschwarzwald sowie im Alpenvorland zu erwarten sein. Dagegen sind die Änderungen im hydrologischen Sommerhalbjahr weniger ausgeprägt (Abbildung 16). Die stärksten Abnahmen der Sommerniederschläge im Median dürften im Südosten Baden-Württembergs sowie im mittleren Schwarzwald und der Offenburger Rheinebene zu erwarten sein.

Diese Entwicklung wird auch durch weitere Untersuchungen bestätigt, nach denen die Richtung der jahreszeitlichen Veränderungen für ganz Baden-Württemberg in etwa gleich ist. Die deutlichsten Zunahmen werden für den Schwarzwald an höher gelegenen Stationen (z.B. Freudenstadt, Höchenschwand, Bad Rippoldsau) angenommen. Hier steigt die Anzahl der Nasstage (Tage mit mehr als 25 mm Niederschlag) von 8 auf 14 Tage [Hennegriff, Reich 2007].

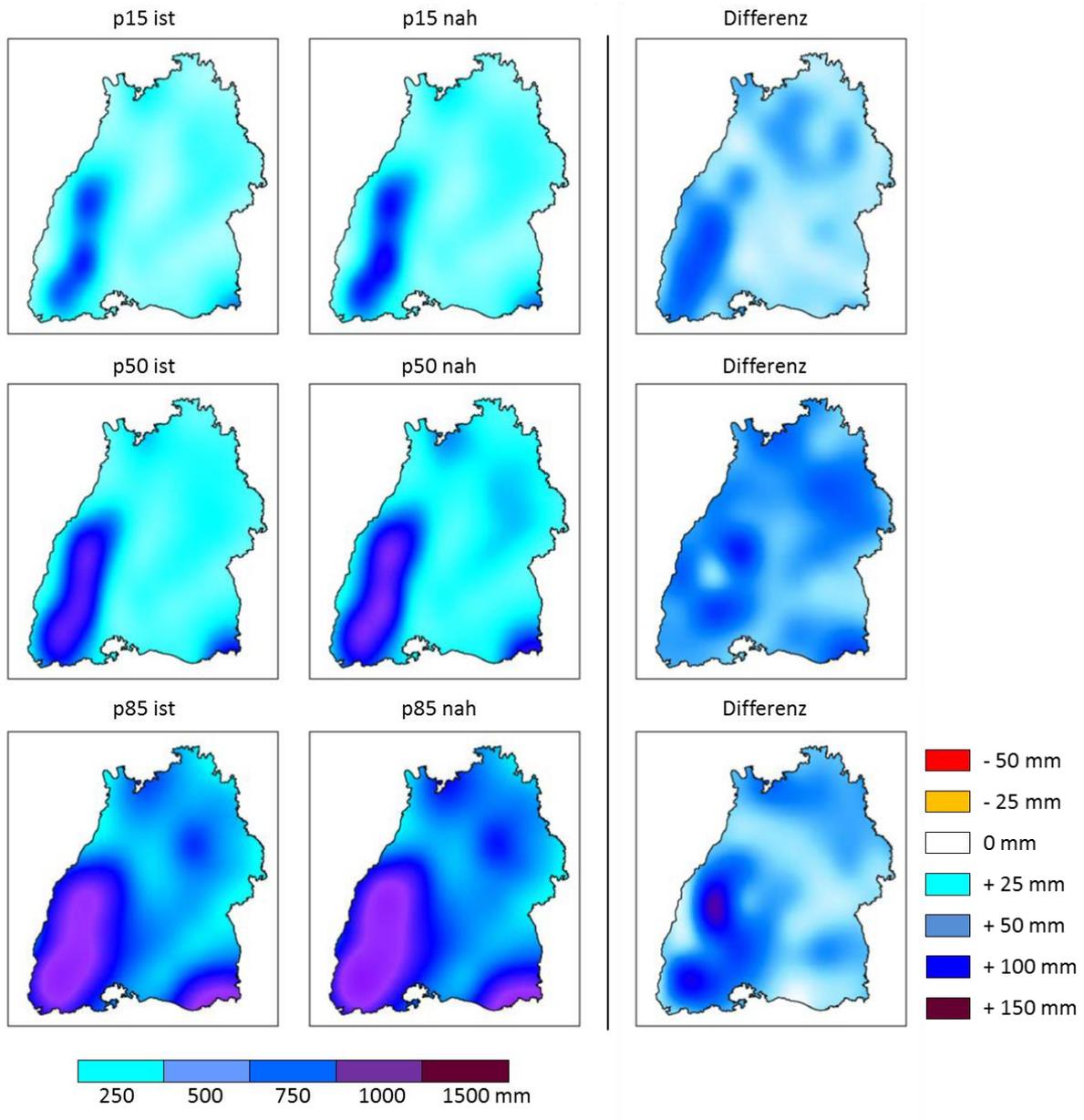


Abbildung 15: Niederschlagssummen (mm) im hydrologischen Winterhalbjahr (November bis April) für das 15., 50. und 85. Perzentil für den Ist-Zustand (1971-2000) und die nahe Zukunft (2021-2050) sowie deren Differenz; eigene Darstellung auf der Grundlage der von der LUBW zur Verfügung gestellten Klimakennzahlen in der Auflösung 25 x 25 km<sup>2</sup>

Untersuchungen zum Niederschlag im Rahmen von KLIWA haben für den Zeitraum zwischen 1931 und 1997 nur für sehr wenige Gebiete signifikante Zunahmen der Jahressumme um 0,1 % bis 0,2 % ergeben. In den meisten Gebieten war keine Veränderung erkennbar. Dagegen konnte an vielen Stationen nachgewiesen werden, dass sowohl trockene Tage (Tage ohne oder mit sehr geringem Niederschlag) als auch Tage mit überdurchschnittlich viel Niederschlag (jedoch keine Extremereignisse) zunahmen. Weiter wurde festgestellt, dass sehr starke Gebietsniederschläge (> 15 mm/d) im Allgemeinen zunahmen und nur in zwei Gebieten signifikant zurück gegangen sind [KLIWA 2005].

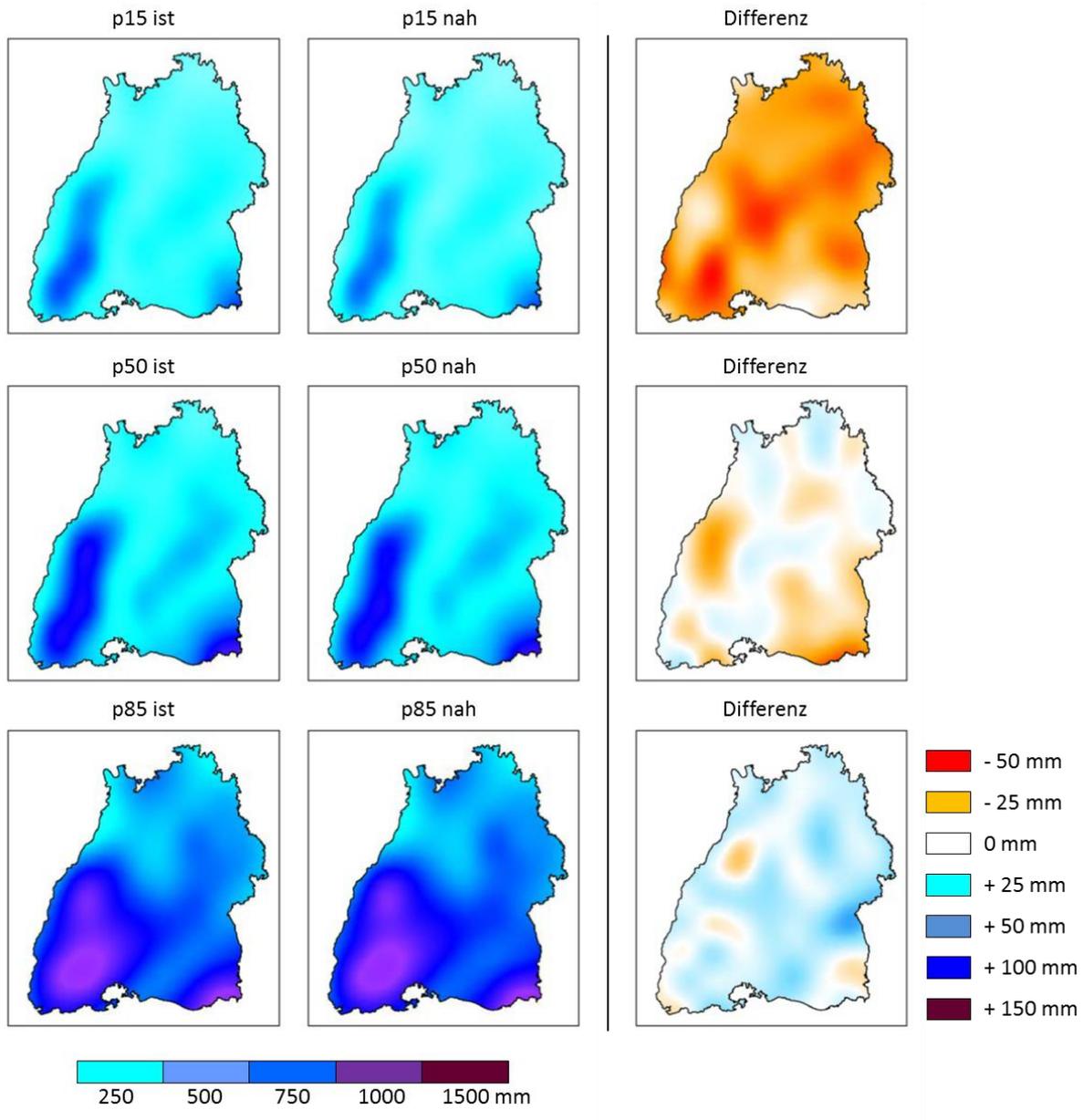


Abbildung 16: Niederschlagssummen (mm) im hydrologischen Sommerhalbjahr (April bis September) für das 15., 50. und 85. Perzentil für den Ist-Zustand (1971-2000) und die nahe Zukunft (2021-2050) sowie deren Differenz; eigene Darstellung auf der Grundlage der von der LUBW zur Verfügung gestellten Klimakennzahlen in der Auflösung 25 x 25 km<sup>2</sup>

Der Jahresgang des Niederschlags in Baden-Württemberg ist durch ein Maximum im Sommer und eines im Winter gekennzeichnet. In den Übergangsjahreszeiten finden sich die niedrigsten Werte. Während das sommerliche Maximum vor allem im Einflussbereich der Alpen dominiert, ist im Schwarzwald das winterliche Maximum stärker ausgeprägt. Aus den Klimaleitplanken ist auch zu erkennen, dass die Monatsniederschlagssummen in den Sommermonaten zurückgehen und in den Wintermonaten zunehmen werden (siehe Abbildung 17) [KLIWA 2011a, LUBW 2012b].

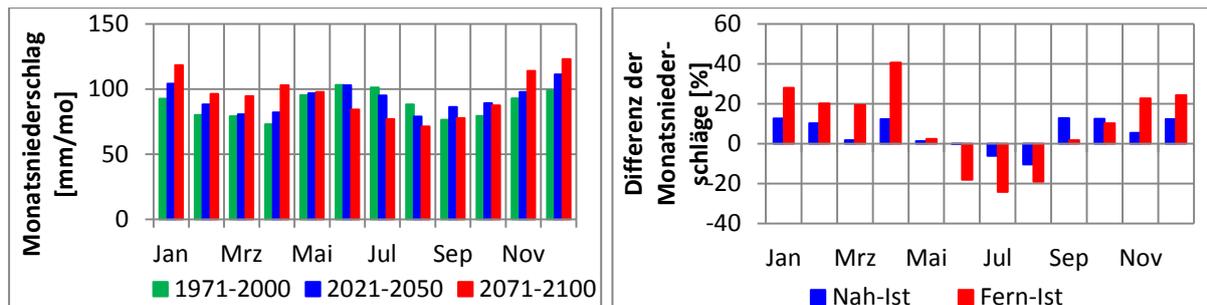


Abbildung 17: Mittlerer Monatsniederschlag für die Zeiträume 1971-2000, 2021-2050 und 2071-2100 (links) sowie die projizierte Veränderung in der Zukunft gegenüber dem Bezugszeitraum (rechts); eigene Darstellung

Ebenfalls wird ersichtlich, dass das winterliche Maximum in der Zukunft überwiegen und das sommerliche Maximum im Allgemeinen früher im Jahr auftreten wird. Der Winterniederschlag wird von 443 mm (50. Perzentil) um 7,1 % bis 2050 und um 16 % bis 2100 steigen. Damit ergibt sich zwar ein qualitativ klares Signal hinsichtlich der absoluten Niederschlagsänderung, dies jedoch mit einer hohen Streuung.

#### 2.4.2 Starkniederschlag

Für zahlreiche Belange in der Wasserwirtschaft sind nicht nur langfristige Kenngrößen des Niederschlags entscheidend. Vielmehr spielen kurze, intensive Niederschlagsereignisse eine maßgebliche Rolle (z. B. Extremniederschläge, die zu Hochwassersituationen oder Überflutungen im urbanen Bereich führen). Ergebnisse verschiedener Forschungsprojekte zeigen auf, dass das Potenzial für Gewitter und Hagel sowie insbesondere für schwere Gewitter in der Zukunft durch eine Zunahme der zyklonalen Westwetterlagen zunehmen wird [Trenberth 1999, Lenderink et al. 2008, Beck 2013]. Auch für einige Großwetterlagen, die im Zusammenhang mit meteorologischen Ereignissen mit großem Schadenspotenzial stehen, zeigen sich signifikante Veränderungen seit Anfang der 1970er Jahre. So ist die beobachtete Zunahme der Andauer der "Westlage zyklonal" im Winter sowohl für schwere Winterstürme (z.B. Sturm Lothar) als auch für Hochwasserereignisse als sehr kritisch anzusehen [KLARA 2005].

Nach den Klimaleitplanken steigt die Starkniederschlagshöhe (maximaler Tagesniederschlags in einem Kalenderjahr) bis zum Jahr 2050 um 6,5 % und bis zum Jahr 2100 um 12,8 % bis 2100 (50. Perzentil) [LUBW 2012b]. Auch hier zeigt die grobe regionale Darstellung für den Median die stärkste Zunahme der Starkniederschlagshöhe in der nahen Zukunft im Bereich des Schwarzwaldes auf (Abbildung 18). Im Median ergibt sich eine Zunahme der Anzahl der Tage mit Starkniederschlag (> 25 mm/d) um 0,7 d/a bis 2050 und 1,0 d/a bis 2100. Die regionale Darstellung zeigt für den Median der nahen Zukunft die stärkste Zunahme für das Voralpengebiet, das Hochrheingebiet und den südlichen Hochflächenschwarzwald auf (Abbildung 19). Da die Streuung wie auch die Stärke und die

Richtungssicherheit des Klimasignals meist mäßig bis hoch sind, schätzt die LUBW die Kennzahl der Starkniederschlagstage als bedingt zufriedenstellend ein.

Vor allem in den Mittelgebirgen stellen durch Starkregen verursachtes Hochwasser, Hangrutsche oder Erosionen eine Gefahr dar.

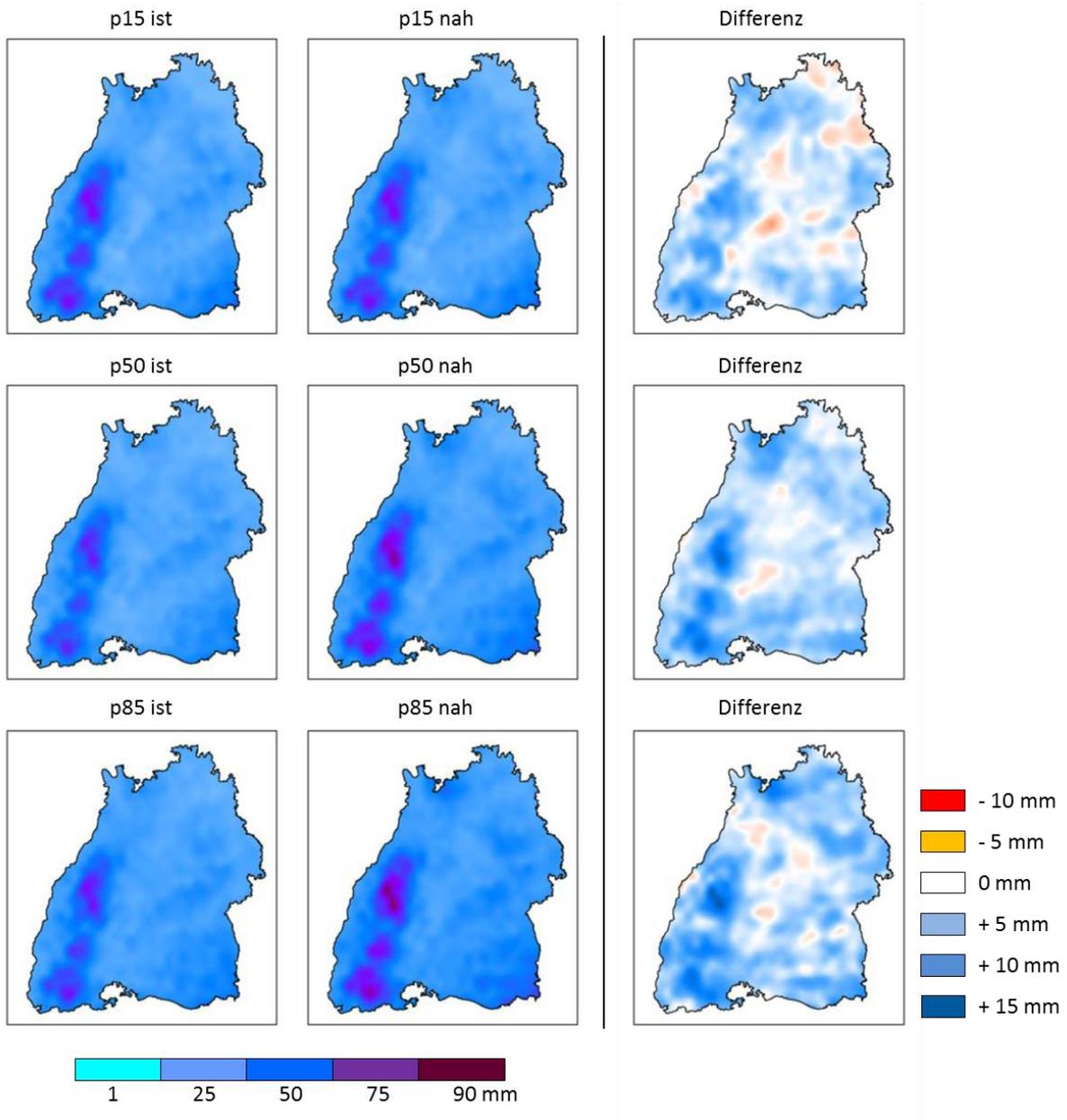


Abbildung 18: Starkniederschlagshöhen (mm) für das 15., 50. und 85. Perzentil für den Ist-Zustand (1971-2000) und die nahe Zukunft (2021-2050) sowie deren Differenz; eigene Darstellung auf der Grundlage der von der LUBW zur Verfügung gestellten Klimakennzahlen in der Auflösung 25 x 25 km<sup>2</sup>

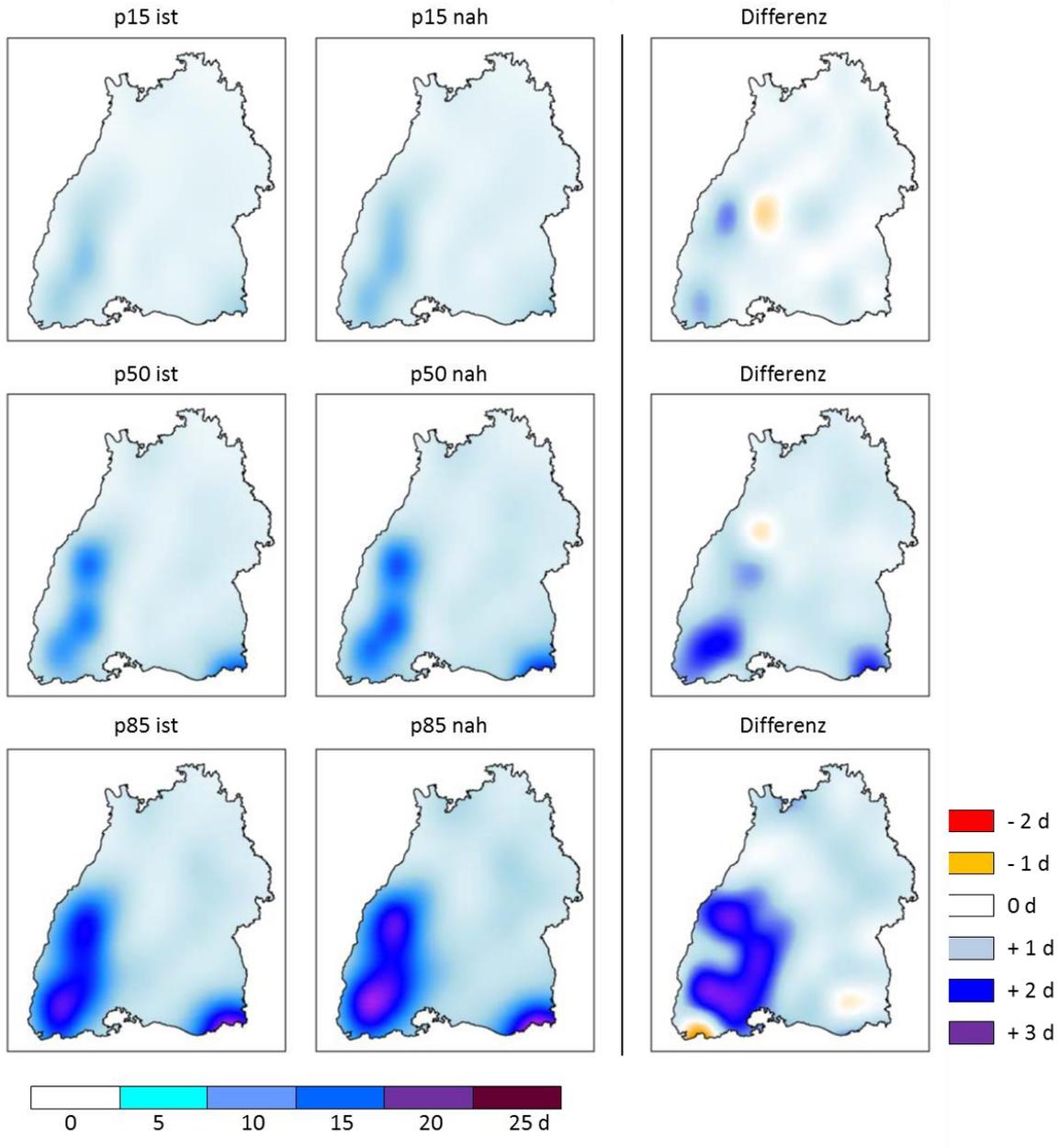


Abbildung 19: Anzahl der Tage mit Starkniederschlag für das 15., 50. und 85. Perzentil für den Ist-Zustand (1971-2000) und die nahe Zukunft (2021-2050) sowie deren Differenz; eigene Darstellung auf der Grundlage der von der LUBW zur Verfügung gestellten Klimakennzahlen in der Auflösung 25 x 25 km<sup>2</sup>

### 2.4.3 Kurzfristige Extreme und Niederschlagskontinuum

Die Kennzahlen zum Starkniederschlag aus den Klimaleitplanken werden pro Tag berechnet. Wegen der schnellen Reaktion der Systeme sind jedoch insbesondere in der Siedlungsentwässerung deutlich kurzfristigere Extreme relevant. Für die Kanalnetzberechnung sind beispielsweise Dauern im Bereich von 10 min bis 1 h maßgebend. Das Entlastungsverhalten von RÜB wird dagegen nicht von Extremereignissen bestimmt, sondern ergibt sich aus der zeitlichen Abfolge aller Regenereignisse. Die dafür

relevanten Kenngrößen und deren Veränderung lassen sich aus den Klimaleitplanken (KLP) nicht ableiten.

Ersatzweise werden daher im Folgenden zeitlich hochaufgelöste Niederschlagszeitreihen (5 min Werte) verwendet, die im Rahmen früherer Studien mit dem Programm NiedSim-Klima (NSK) erzeugt wurden. NiedSim-Klima beruht auf dem stochastischen Zeitreihengenerator NiedSim, mit dem für beliebige Standorte in Baden-Württemberg eine zeitlich hochaufgelöste Niederschlagszeitreihe (5 min Werte) für die Jahre von 1958 bis 2003 erzeugt werden kann [Bárdossy 1998, Bárdossy et al. 2000]. Dieser wurde so modifiziert, dass der Klimawandel in der Generierung berücksichtigt wird.

NiedSim-Klima stützt sich auf Prognosen von Bodenluftdruck und der mittleren Lufttemperatur des Modells ECHAM5 (Emissionsszenarios A1B). Auf Basis der Luftdruckfelder wird eine Wetterlagenklassifikation vorgenommen. Die Niederschlagsverteilung jeder dieser Wetterlagen kann aus Beobachtungen der Vergangenheit bestimmt werden. Nimmt man die Wetterlagen als konstant an, kann aus der Zeitreihe der prognostizierten Luftdruckfelder die zukünftige Regenwahrscheinlichkeit und die Wahrscheinlichkeit intensiver Niederschläge von über 1 mm/h bestimmt werden. Die Temperaturprognosen werden verwendet, da das Niederschlagsverhalten gegebener Wetterlagen mit der Temperatur variiert. Eine weitergehende Erläuterung und Diskussion von NiedSim-Klima erfolgt in Teil B (wissenschaftlicher Hintergrund).

Ein wesentlicher Trend im Niederschlagsgeschehen der letzten Jahrzehnte ist die Konzentration von intensiveren Niederschlägen auf kurze Zeitintervalle. An der Messstation Wüstenrot in Baden-Württemberg sind beispielsweise im Mittel über den Zeitraum 1978-1984 30 % des höchsten jährlichen Tagesniederschlags innerhalb von 60 min gefallen. Im Zeitraum 1985-1991 waren es bereits ca. 35 % [Bendel et al. 2012]. Diese Verschiebung zeigt sich auch an anderen Messstellen [Beck und Bárdossy 2005] und wurde daher in der Skalierung des Niederschlags in NiedSim-Klima fortgeschrieben.

In einem Forschungsprojekt [Bendel et al. 2012, 2013] wurden mit dem Niederschlagsgenerator NiedSim-Klima Niederschlagsreihen für sieben repräsentative Standorte in Baden-Württemberg für die Zeiträume 1961-1990 (NSK1990) und 2041-2050 (NSK2050) generiert und analysiert. Die folgenden Auswirkungen des Klimawandels auf die Niederschlagsverteilung von Starkregen lassen sich für den Zeitraum bis NSK 2050 festhalten:

1. Leichte Zunahme der höchsten jährlichen Niederschlagssumme über sehr kurze Zeitintervalle (15 min) (siehe Abbildung 20 links),
2. geringe Veränderungen der höchsten jährlichen Niederschlagssumme über kurze Zeitintervalle (60 min) (siehe Abbildung 20, Mitte),

3. Abnahme der höchsten jährlichen Niederschlagssumme über einen Tag (= Starkregen entsprechend den Klimaleitplanken) um im Mittel ca. 14 mm (siehe Abbildung 20, rechts),
4. Abnahme der Anzahl an Tagen mit mehr als 25 mm Niederschlag (= Anzahl Starkniederschlagstage entsprechend Klimaleitplanken) um ca. 5 d/a (siehe Abbildung 21)

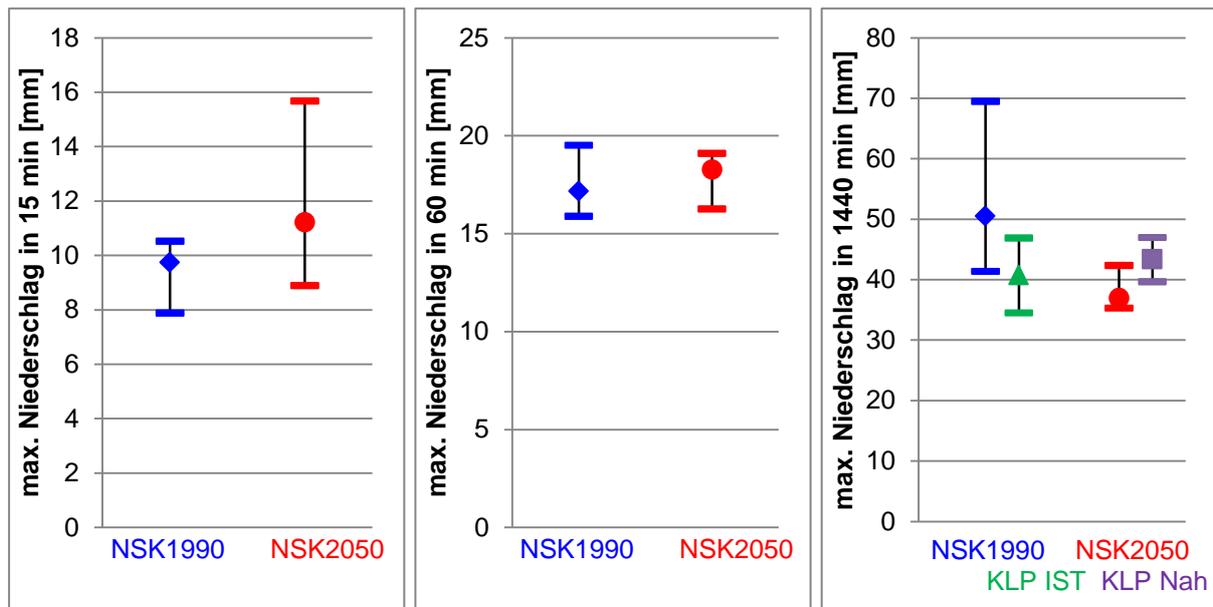


Abbildung 20: Minimum, Median und Maximum der mittleren jährlichen Maximalwerte des Niederschlags in 15 min (links), 60 min (Mitte) und 1440 min (rechts) für die Zeiträume NSK1990 (blau) und NSK2050 (rot) über alle sieben untersuchten Standorte in Baden-Württemberg sowie für die Zeiträume KLP IST (grün) und KLP Nah (violett)

Zur Orientierung sind in Abbildung 20 und Abbildung 21 auch die Daten aus den Klimaleitplanken dargestellt. Bezogen auf die Starkniederschlagshöhe wie auch auf die Anzahl der Tage mit Starkniederschlag zeigen die Daten aus NiedSim und aus den Klimaleitplanken einen gegenläufigen Trend.

Die Daten sind jedoch nicht direkt vergleichbar, da sieben analysierte Stationen kein vollständiges Bild von ganz Baden-Württemberg liefern können und beim Vergleich von NiedSim-Klima Daten und den Klimaleitplanken Punkt- mit Flächeninformationen verglichen werden. Außerdem beruht NiedSim-Klima im Gegensatz zu den Klimaleitplanken auf nur einem globalen Zirkulationsmodell. Grundsätzlich stellt NiedSim-Klima eine mögliche Zukunft dar, die genauso wahrscheinlich ist wie jedes Ensemblemitglied aus den Klimaleitplanken.

Der Vergleich verdeutlicht die großen Unsicherheiten mit denen Aussagen zur Entwicklung von Starkniederschlägen behaftet sind. Die Klimakennwerte zum Starkniederschlag werden

auch seitens der LUBW nur als eingeschränkt zufriedenstellend bewertet, da die Streuung mäßig bis hoch und die Richtungssicherheit des Klimasignals nur mäßig ist.

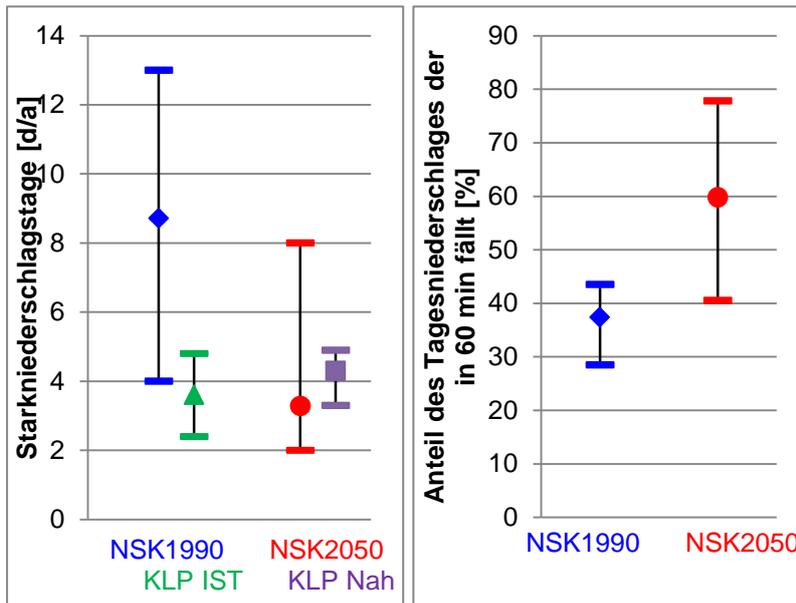


Abbildung 21: Minimum, Median und Maximum der mittleren Anzahl der Starkniederschlagstage pro Jahr (links) und des mittleren Anteils des in 60 min fallenden Tagesniederschlages der ersten 24 Maxima pro Jahr (rechts) für die Zeiträume NSK1990 (blau) und NSK2050 (rot) über alle sieben untersuchten Standorte in Baden-Württemberg sowie für die Zeiträume KLP IST (grün) und KLP Nah (violett)

Entscheidend für die Emissionen aus Entlastungsanlagen ist nicht die Niederschlagshöhe von Extremereignissen, sondern die zeitliche Abfolge häufigerer, weniger intensiver Ereignisse, die den größten Teil des Regenabflusses ausmachen. Veränderungen in diesem Bereich lassen sich nicht umfassend in einzelnen Kenngrößen aus den Klimaleitplanken zusammenfassen. Deutlich ist in den mit NiedSim-Klima generierten Daten vor allem der Trend zu kürzeren Ereignissen mit höherer Intensität. Als Indikator wurde aus den oben beschriebenen Zeitreihen für die jeweils 24 niederschlagsreichsten Tage jedes Jahres der Niederschlagsanteil ermittelt, der innerhalb einer Stunde fällt. Dieser Anteil steigt von 37 % für NSK 1990 auf 60 % für NSK 2050 (siehe Abbildung 21, rechts).

#### 2.4.4 Trockenperioden

Neben den kurzen, intensiven Niederschlagsereignissen können lange Trockenperioden große Auswirkungen auf Teilbereiche des Wasserhaushalts haben. In den Sommern der vergangenen Jahre wurden wiederholt extreme Trockenperioden beobachtet, die z.B. an zahlreichen Gewässern zu Niedrigwassersituationen geführt haben. Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten solcher Verhältnisse ist im Vergleich zum Zeitraum vor 1985 deutlich angestiegen [UM und LUBW 2010, KLIWA 2012b]. Langzeituntersuchungen der Gebietsniederschläge in Baden-Württemberg im Zeitraum 1931 bis 2005 im Rahmen des

Kooperationsvorhabens KLIWA belegen, dass in den meteorologischen Sommermonaten (Juni bis August) die Häufigkeit von Tagen ohne Niederschlag deutlich zugenommen hat und die Niederschlagssummen abgenommen haben [KLIWA 2005]. Eine Untersuchung von Caspary [2007] hat gezeigt, dass die Häufigkeiten von Großwetterlagen, d.h. Kombinationen, die kritische, extreme Trockenperioden und Hitzewellen auslösen, sowohl im Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) als auch in der gesamten Vegetationsperiode (April bis September) im Beobachtungszeitraum 1881 bis 2006 hochsignifikant ansteigende Trends und Bruchpunkte aufweisen. Das Risiko eines trockenen, heißen Sommers hat im Vergleich zum Zeitraum vor den siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts um ein Vielfaches zugenommen. Die kombinierte Auswertung der Trockenperioden und der Großwetterlagen für die Zeitreihe 1881 bis 2006 zeigt, dass die Großwetterlage „Hochdruckbrücke Mitteleuropa“ (BM) durch lang andauernde, zusammenhängende BM-Perioden an allen Trockenperioden der Sommer (Juni bis August) bzw. der Vegetationsperioden (April bis September) maßgeblich beteiligt ist. Dies wird auch aus Abbildung 16 ersichtlich, die die Veränderung des Niederschlags im Sommerhalbjahr für die Zukunft im Vergleich zum Ist-Zustand aufzeigt.

In LUBW [2012b] wird für die nahe und ferne Zukunft eine Reduzierung der Trockentage pro Jahr (Anzahl der Tage ohne Niederschlag, d.h.  $< 1$  mm/Tag) angegeben. Diese nimmt bis 2050 im Mittel um 0,4 d und bis 2100 um 6,3 d ab, ausgehend von 138 d für den Vergleichszeitraum. Die LUBW beurteilt diese Einschätzung als nicht zufriedenstellend, da die Streuung der Ergebnisse hoch ist und die Stärke und die Richtungssicherheit des Klimasignals nur niedrig bis mäßig.

Unter der Kennzahl Trockenperioden-Vegetation wird die durchschnittliche Dauer von Trockenperioden in der Vegetationsperiode (Mai bis September) definiert. Als Trockenperioden werden zusammenhängende Zeiträume bezeichnet, bei denen pro Tag unter 1 mm Niederschlag fällt. Hier wird die längste Trockenperiode in der Vegetationsperiode ausgewertet und die Anzahl der Tage angegeben. Die grobe regionale Abschätzung zeigt für weite Teile Baden-Württembergs für den Median der nahen Zukunft eine Zunahme der Trockenperioden (Abbildung 22).

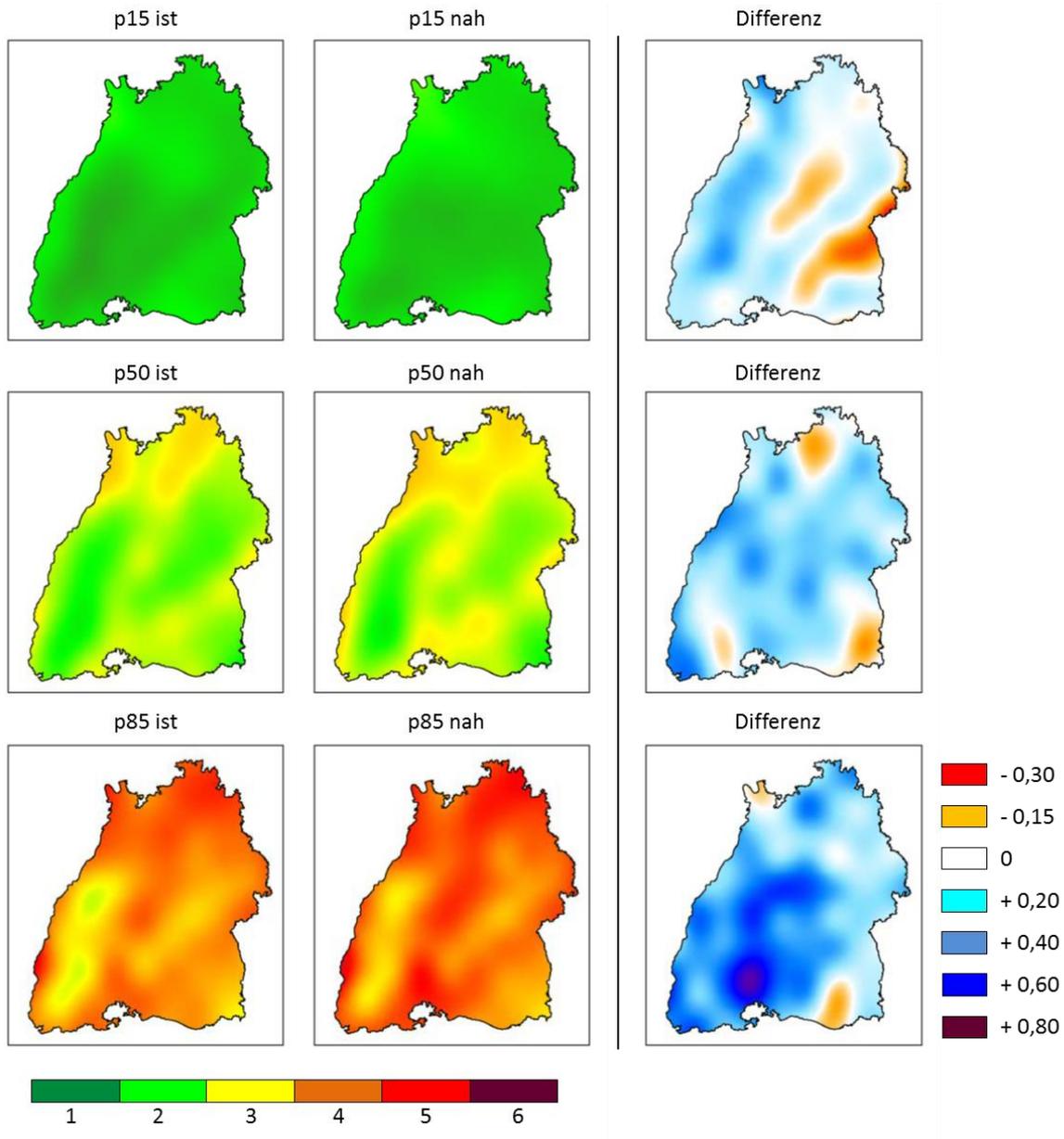


Abbildung 22: Anzahl der Trockenperioden pro Jahr (Anzahl Tage) für das 15., 50. und 85. Perzentil für den Ist-Zustand (1971-2000) und die nahe Zukunft (2021-2050) sowie deren Differenz; eigene Darstellung auf der Grundlage der von der LUBW zur Verfügung gestellten Klimakennzahlen in der Auflösung 25 x 25 km<sup>2</sup>

## 2.5 Globalstrahlung

Aus Untersuchungen im Rahmen von KLIWA wurde das Langzeitverhalten der Globalstrahlung im Zeitraum von 1951 bis 2000 auf Grundlage der Sonnenscheindauer untersucht [KLIWA 2008]. In diesem Zeitraum liegen signifikante negative Trends vor, wobei der Norden Baden-Württembergs mit 7 bis 13 % die größten Rückgänge zu verzeichnen hat. In den Monaten März und Juni ist der Rückgang der Sonnenscheindauer am stärksten. Positive Trends sind nur in den Monaten Januar, Februar und August in Baden-Württemberg zu verzeichnen.

Für den Bezugszeitraum wird die Jahressumme der Globalstrahlung mit  $1038 \text{ kWh/m}^2$  angenommen [LUBW 2012b]. Für die nahe Zukunft beträgt die mittlere Änderung  $-1,2 \%$  und für die ferne Zukunft  $+18,9 \%$ . Es besteht eine geringe Sicherheit über die Richtung der Änderung der Jahressummen wie auch über die Standardabweichung der Globalstrahlung sowie der minimalen mittleren und maximalen mittleren Globalstrahlung. Die Streuung dieser Werte ist hoch und die Stärke des Klimasignals gering. Dadurch kommt die LUBW zu dem Schluss, dass die Ergebnisse eingeschränkt oder nicht zufriedenstellend sind.

## 2.6 Wind

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor auf den Wasserhaushalt ist der Wind, da er zum einen die Verdunstung beeinflusst, zum anderen aber auch für die Durchmischung von stehenden Oberflächengewässern maßgeblich verantwortlich ist. In Baden-Württemberg ist der Klimafaktor Wind von besonderer Bedeutung für die Durchmischung des Bodensees.

Anhand der klimatischen Leitplanken wird für die nahe und ferne Zukunft simuliert, dass die Änderung des Mittelwertes und der Standardabweichung der Windgeschwindigkeit gering ausfallen wird [LUBW 2012b]. Dies wird auch aus der groben regionalen Verteilung der mittleren Windgeschwindigkeit eines Jahres ersichtlich (Abbildung 23). Die Qualität dieser Ergebnisse wird als zufriedenstellend angesehen. Die maximale mittlere Windgeschwindigkeit wird sich ebenfalls kaum ändern. Da die Streuung innerhalb des Ensembles etwas höher liegt, wird diese Aussage als eingeschränkt zufriedenstellend bezeichnet. Die Anzahl der Tage mit einer Windgeschwindigkeit von mehr als  $8 \text{ m/s}$  könnte sich leicht erhöhen. Allerdings ist die Streuung zwischen den Klimamodellen so hoch, dass die LUBW diese Ergebnisse als nicht zufriedenstellend einschätzt [LUBW 2012b].

Neben dem Einfluss auf den Wasserhaushalt hat eine Veränderung der Windverhältnisse Auswirkungen auf den an Wasserbauwerken zu erwartenden Windstau und Wellenaufbau. Dies wirkt sich ggf. auf den zu berücksichtigenden Freibord an Sperrbauwerken (insbesondere Talsperren) und Hochwasserschutzdeichen aus. Da die Bemessung des Windstaus immer auf Basis der größten Einwirklänge (Fetch) unabhängig von der am Standort vorherrschenden bevorzugten Windrichtung, erfolgt, hat eine ggf. klimatisch bedingte Änderung der Hauptwindrichtung keinen Einfluss auf die Freibordbemessung. Eine Erhöhung der Windgeschwindigkeiten führt jedoch sehr wohl ggf. zu einem größeren erforderlichen Freibord. Konkrete quantitative Aussagen zu zukünftigen bemessungsrelevanten Veränderungen sind derzeit jedoch nicht möglich.

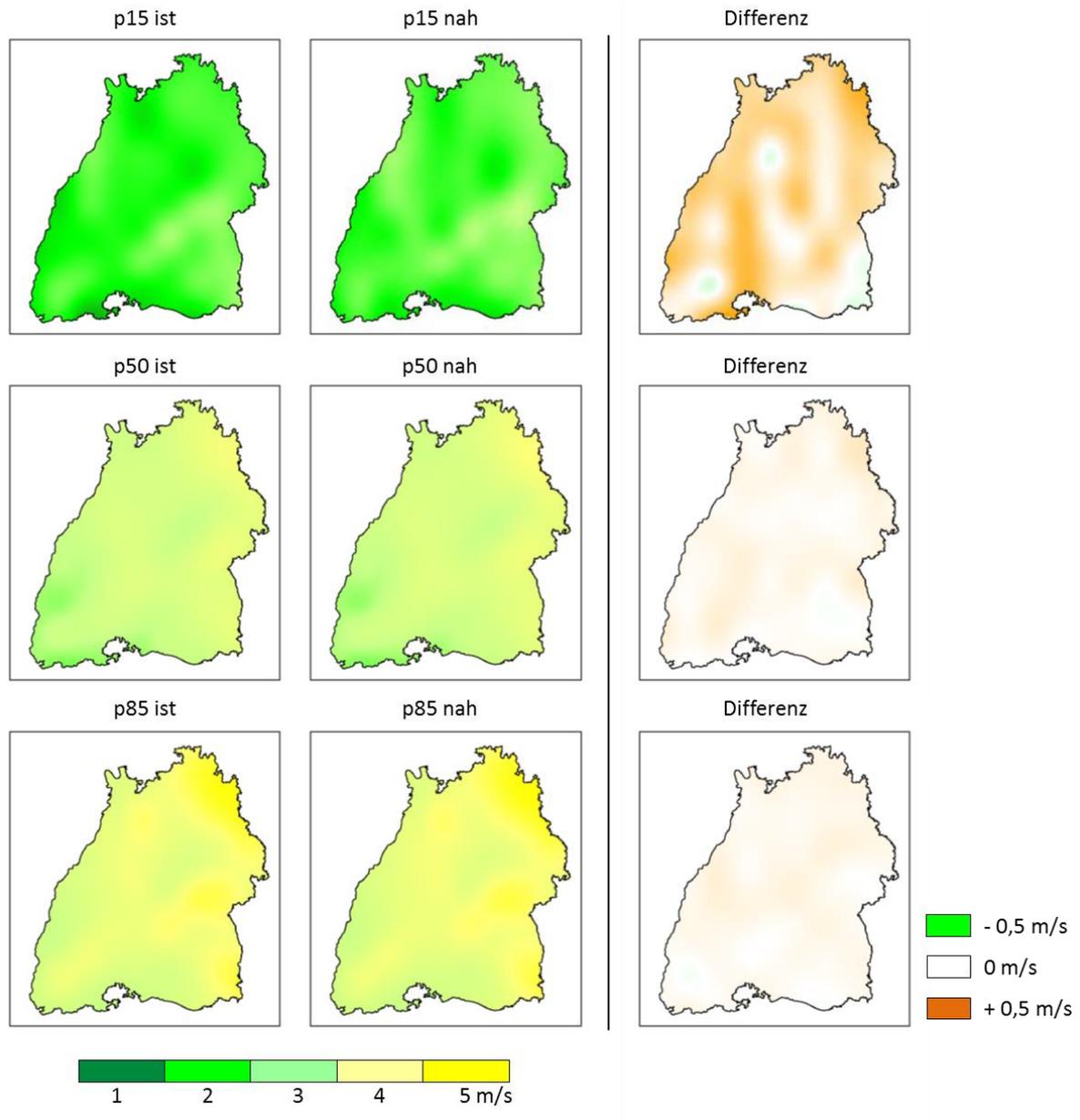


Abbildung 23: Mittlere Windgeschwindigkeiten (m/s) für das 15., 50. und 85. Perzentil für den Ist-Zustand (1971-2000) und die nahe Zukunft (2021-2050) sowie deren Differenz; eigene Darstellung auf der Grundlage der von der LUBW zur Verfügung gestellten Klimakennzahlen in der Auflösung 25 x 25 km<sup>2</sup>

### **Kernaussagen zu den Klimafaktoren**

#### **zufriedenstellende Aussage:**

- *Zunahme der Lufttemperatur*

#### **bedingt zufriedenstellende Aussagen:**

- *Geringe Zunahme der Jahresniederschlagssumme*
- *Zunahme der Winterniederschläge*
- *Abnahme der Sommerniederschläge*
- *Windgeschwindigkeitsverteilung bleibt etwa gleich*
- *Insgesamt werden die Extreme (z.B. Starkniederschlag, Trockenperioden) in Baden-Württemberg zunehmen*
- *Zunahme der Sommer- und Tropentage (weniger befriedigende bzw. unbefriedigende Aussage)*

#### **nicht zufriedenstellende Aussagen:**

- *Zunahme kurzer, intensiver Niederschläge*
- *Zunahme der Dauer von Trockenperioden*
- *Zunahme der Globalstrahlung*
- *Leichte Zunahme der Windgeschwindigkeiten > 8 m/s*

## **3 Vulnerabilität**

Für die Anpassungsstrategie Klimawandel soll eine wissenschaftlich begründete Abschätzung der Vulnerabilität (Verwundbarkeit) der betroffenen Handlungsfelder sowie zu den sich daraus ergebenden Anpassungserfordernissen erstellt werden. Dazu zeigt Abbildung 24 das Schema einer Vulnerabilitätsanalyse für den Klimawandel auf. Ob ein System für Auswirkungen des Klimawandels anfällig ist, hängt von der Exposition sowie der Sensitivität und daraus resultierenden potenziellen Auswirkungen des betroffenen Mensch-Umwelt-Systems sowie von der Fähigkeit ab, sich an veränderte Bedingungen anzupassen.

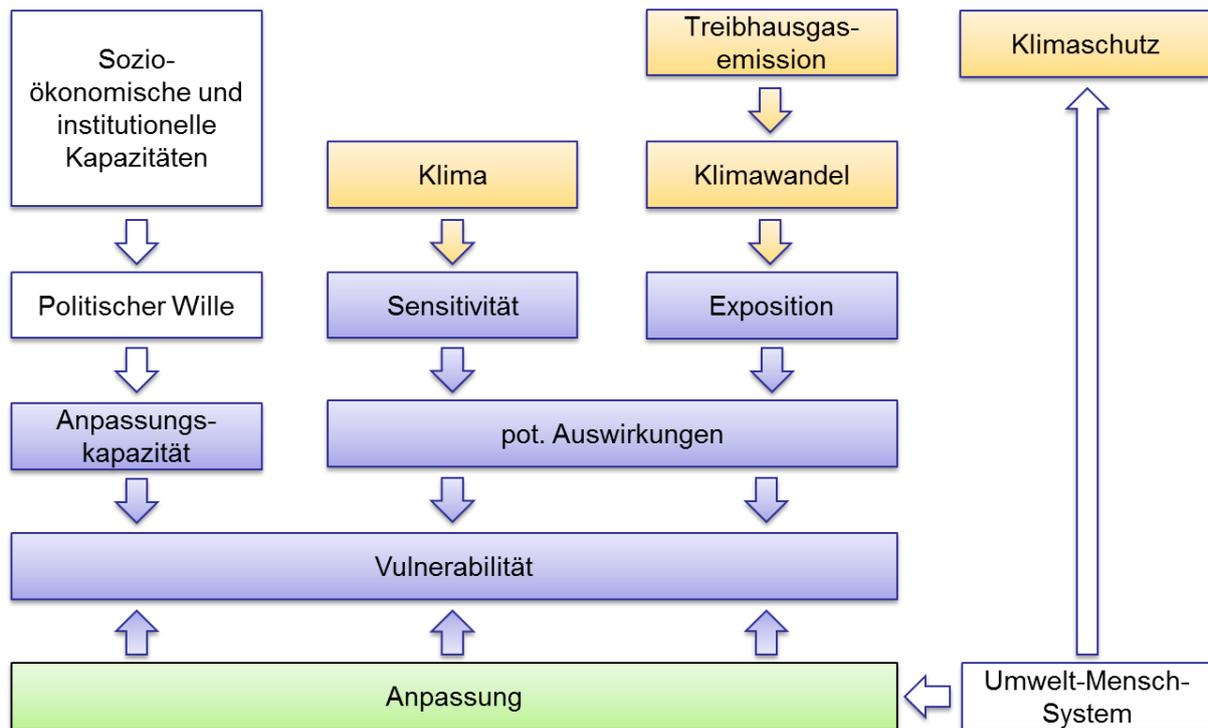


Abbildung 24: Schema Vulnerabilitätsanalyse [nach IPCC]

Auf dem noch neuen Arbeitsgebiet der Vulnerabilitätsanalyse führen die Bundesoberbehörden im Rahmen eines Netzwerkes derzeit eine Wirkanalyse zwischen Klimasignal und Klimawirkungen durch.

Da Vulnerabilitätsanalysen in der wissenschaftlichen Aufarbeitung des Klimawandels ein methodisches und inhaltliches Neuland sind, werden zunächst einige Begriffe der Vulnerabilitätsanalyse definiert, bevor sie auf das Handlungsfeld Wasserhaushalt angewendet werden. Dazu werden für die Anpassungsstrategie Baden-Württemberg die folgenden vom IPCC aufgestellten bzw. daraus abgeleitete Definitionen herangezogen [IPCC 2007; Schuchardt et al, 2011]:

„**Vulnerabilität** ist das Maß, zu dem ein System gegenüber nachteiligen Auswirkungen der Klimaänderung, einschließlich Klimavariabilität und Extremwerten, anfällig ist und nicht damit umgehen kann. Vulnerabilität ist eine Funktion der Art, des Ausmaßes und der Geschwindigkeit der Klimaänderung und –schwankung, der ein System ausgesetzt ist, seiner Sensitivität und seiner Anpassungskapazität“.

Anhand dieser Definition und den vom Auftraggeber zur Verfügung gestellten Unterlagen werden für dieses Gutachten folgende Begriffe verwendet [LUBW 2012c]:

- Die **Exposition** beschreibt die Veränderungen der auf einen Sektor oder Handlungsbereich einwirkenden klimatischen Parameter (z.B. Temperatur,

Niederschlag) sowie daraus resultierende unmittelbar nachgelagerte Effekte (z.B. Veränderung der Abflussregime oder der klimatischen Wasserbilanz).

- Die **Sensitivität** beschreibt die heutige Empfindlichkeit eines Sektors oder Handlungsbereichs gegenüber den aktuellen Klimabedingungen. Sensitivität ist der Grad, zu dem ein System durch Klimavariabilität oder Klimaveränderung beeinflusst wird, sei es negativ oder positiv. Die Wirkung kann direkter oder indirekter Art sein.
- **Potenzielle Auswirkungen** ergeben sich aus der Kombination von Exposition und Sensitivität ohne Berücksichtigung zusätzlicher, als Reaktion auf den Klimawandel unternommener Anpassungsmaßnahmen.
- Die **Anpassungskapazität** berücksichtigt neben der natürlichen Anpassungsfähigkeit das Wissen über Anpassungsstrategien und –maßnahmen, die technische, institutionelle oder organisatorische Fähigkeit eines Sektors oder Handlungsbereichs zur Planung, Vorbereitung, Unterstützung und Umsetzung von Handlungsmaßnahmen zur Anpassung sowie die Anpassungsbereitschaft.
- Die **Vulnerabilität** eines Handlungsbereichs ergibt sich aus der kombinierten Betrachtung von Exposition, Sensitivität und Anpassungskapazität.

Anhand dieser Betrachtungsfolge kann in einem ersten Schritt die Vulnerabilität des Handlungsfeldes Wasserhaushalt gegenüber Klimaänderungen beschrieben werden. Um daraus den erforderlichen Handlungsdruck ableiten zu können, muss in einem zweiten Schritt die Dringlichkeit für Anpassungsmaßnahmen für jeden Teilbereich ermittelt werden. Hierbei werden folgende Begriffe verwendet:

- Die **Dringlichkeit** für Anpassungsmaßnahmen ist ein Ausdruck der Geschwindigkeit der bisherigen und zukünftigen Klimaänderungen, des Handlungsdruckes und weiterer Faktoren wie aktuelle bzw. zu erwartende ökonomische Belastungen.
- Der **Handlungsdruck** ist die Notwendigkeit, eine wichtige Handlung mit einer definierten zeitlichen Priorität –z.B. kurzfristig, mittelfristig oder langfristig– durchzuführen.

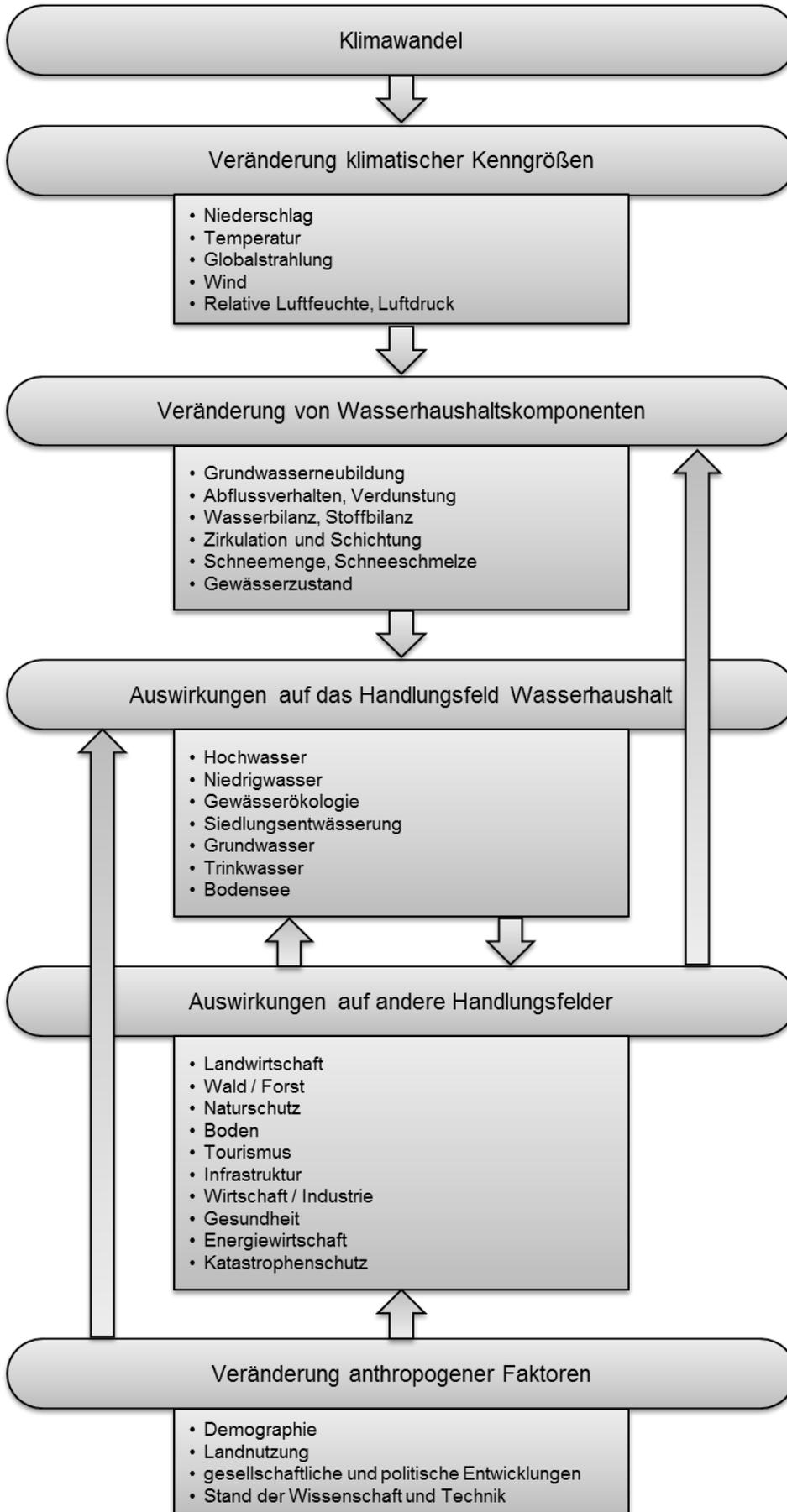


Abbildung 25: Wirkungskette des Handlungsfeldes Wasserhaushalt

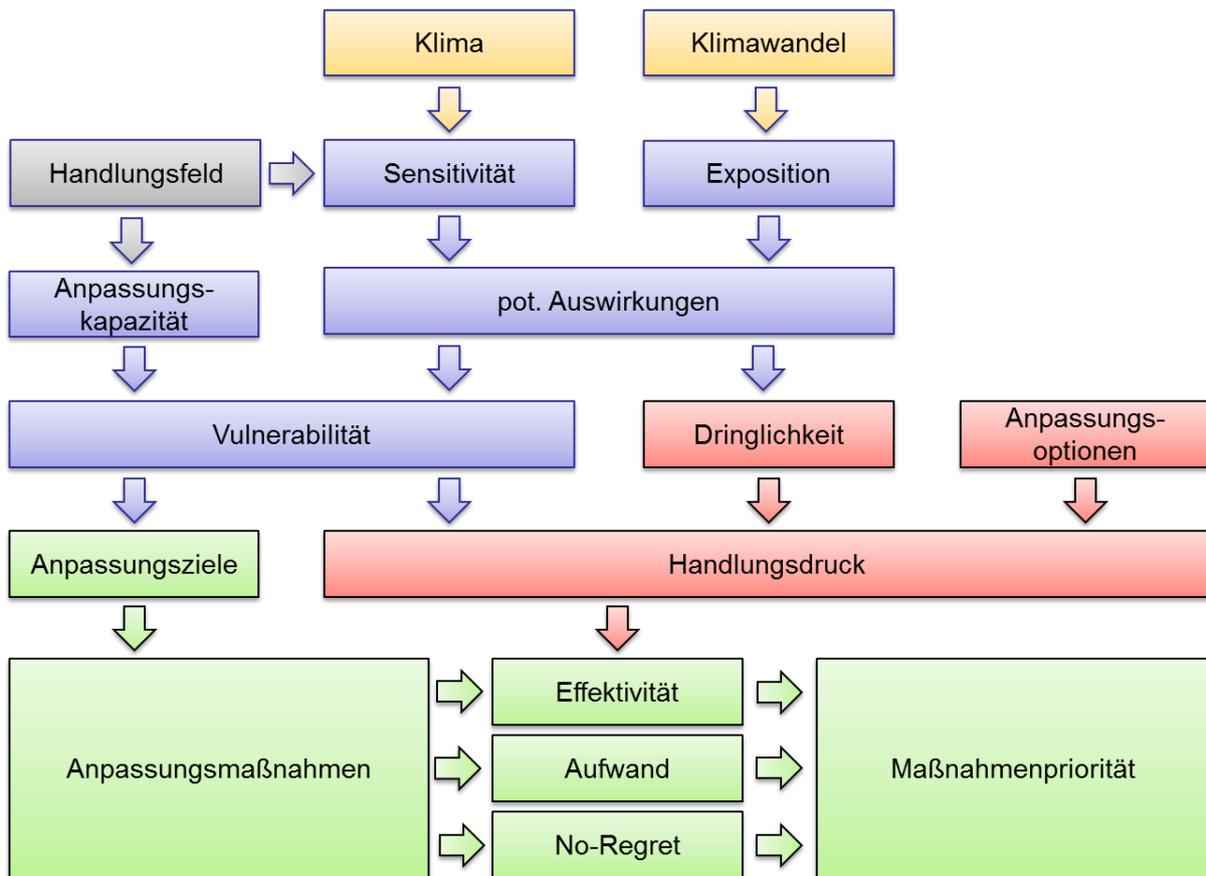


Abbildung 26: Vorgehensweise zur Analyse der Vulnerabilität sowie zur Ableitung und Priorisierung von Anpassungsmaßnahmen

Im Folgenden wird die Vulnerabilität des Handlungsfeldes Wasserhaushalt mit seinen komplexen Wechselwirkungen gegenüber Klimaänderungen für Baden-Württemberg untersucht. Dazu zeigt Abbildung 25 eine für das Land Baden-Württemberg aufgestellte Wirkungskette des Handlungsfeldes Wasserhaushalt mit den mit dem Auftraggeber abgestimmten zu bearbeitenden Schwerpunktthemen Hochwasser, Niedrigwasser, Gewässerökologie, Siedlungsentwässerung, Grundwasser, Trinkwasser sowie dem Bodensee als wichtigstem baden-württembergischen See. Dabei werden die Wechselwirkungen zu anderen Handlungsfeldern sowie zu weiteren anthropogenen Einflussfaktoren wie dem demografischen Wandel oder zu technisch-wissenschaftlichen Fortschritten ebenfalls deutlich. Sofern aufgrund der vorhandenen Datengrundlage die Bereiche Sensitivität und potenzielle Auswirkungen nicht differenziert werden konnten, werden diese in den folgenden Auswertungen gemeinsam betrachtet. Vulnerabilität, der Handlungsdruck und die Anpassungsmaßnahmen wurden anhand der in Abbildung 26 dargestellten Vorgehensweise abgeleitet.

### 3.1 Hochwasser

#### 3.1.1 Exposition

Für das Schwerpunktthema Hochwasser sind insbesondere die Zunahme der Starkniederschläge, die Zunahme der Winterniederschläge und die Temperaturzunahme im Winter relevant. Veränderungen der Windintensität können in geringem Ausmaß lokal einen Einfluss auf die benötigte Freibordhöhe bei Hochwasserschutzdeichen und Stauanlagen haben.

Die Veränderungen der klimatischen Kenngrößen wie sie in Kapitel 2 beschrieben sind und die daraus resultierenden Auswirkungen sind in Tabelle 3 dargestellt.

*Tabelle 3: Expositions Betrachtung für das Schwerpunktthema Hochwasser*

KK	Veränderung KK	unmittelbar nachgelagerte Effekte (Exposition)
N	Zunahme Starkniederschläge	häufiger auftretende Starkniederschläge im Sommerhalbjahr erhöhen das Risiko für Hochwasser in kleinen Flusseinzugsgebieten.
N	Zunahme Winterniederschläge	zunehmende Winterniederschläge fördern das Hochwassergeschehen im Winter.
T	Temperaturzunahme im Winter	höhere Temperatur verringert oder verkürzt die Zwischenspeicherung von Niederschlag als Schnee.
W	Veränderung Windrichtung und Zunahme Windintensität	Evtl. Auswirkung auf Windstau und Wellen bei Stauanlagen und Hochwasserschutzdeichen, Änderung der Windrichtung aufgrund der Berechnungsgrundlage nicht von Relevanz; erhöhte Windintensität führt ggf. lokal zu größerem erforderlichem Freibord

• KK: Klimatische Kenngröße (N: Niederschlag, T: Temperatur, GS: Globalstrahlung, W: Wind)

#### 3.1.2 Sensitivität und potenzielle Auswirkungen

Betrachtet man die letzten 30 Jahre, zeigen sich bei den Höchstabflüssen bei vielen Pegeln von nival geprägten Gewässern zunehmende Trends. Bei einer Vielzahl von Einzugsgebieten hat die Häufigkeit von Winterhochwässern seit den 1970er-Jahren zugenommen und die monatlichen Hochwasserabflüsse im hydrologischen Winterhalbjahr waren ab den 1970er-Jahren höher als in der Zeit davor. Diese Verschärfung der Hochwasserlagen wird einerseits mit der Erhöhung der durchschnittlichen Lufttemperatur, andererseits mit der Zunahme der zyklonalen Westwetterlagen in Verbindung gebracht [Hennegriff, Reich 2007].

Die Bewertung des Hochwasserrisikos auf der Grundlage der Auswirkungen von Klimaveränderungen wird mit Hilfe von Klimaprojektionen, welche vor allem die nahe Zukunft bis 2050 abbilden, durchgeführt [KLIWA 2012a]. Eine Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Hochwasserentwicklung darüber hinaus ist aufgrund der damit verbundenen Unsicherheiten der Klimaprojektionen zunehmend schwieriger. Aufgrund dieser Unsicherheiten sind seriöse Aussagen weder bezüglich zu erwartender Tendenzen noch konkrete Angaben zu Entwicklungen in der fernen Zukunft (2070-2100) möglich.

Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen lassen trotz der Unsicherheiten in der Modellkette in den betreffenden Einzugsgebieten eine Zunahme der mittleren Hochwasser, aber auch der extremen Abflüsse erwarten. Eine Hochwasserverschärfung durch die Klimaveränderung erscheint für das Zieljahr 2050 somit sehr wahrscheinlich [KLIWA 2012b]. Es ist zu erwarten, dass die saisonale Niederschlagsverteilung sowie die Änderung der Niederschlagsart zur Zunahme von Höhe, Dauer und Häufigkeit von Hochwässern führen können und die Hochwassergefahr verschärfen. Dadurch können der technische Hochwasserschutz und die Hochwasservorsorge besonders betroffen sein [Bartels et al. 2005].

Für einige ausgesuchte Gewässer Baden-Württembergs sind in Abbildung 27 die Veränderungen der Jahreshöchstwerte der mittleren Hochwässer (MHQ) gegenüber dem Ist-Zustand dargestellt. Es ist zu erkennen, dass an einigen Gewässern gleichbleibende mittlere Jahreshöchstwerte zu erwarten sind, teilweise jedoch mit Veränderungen bis zum 1,75fachen zu rechnen ist.

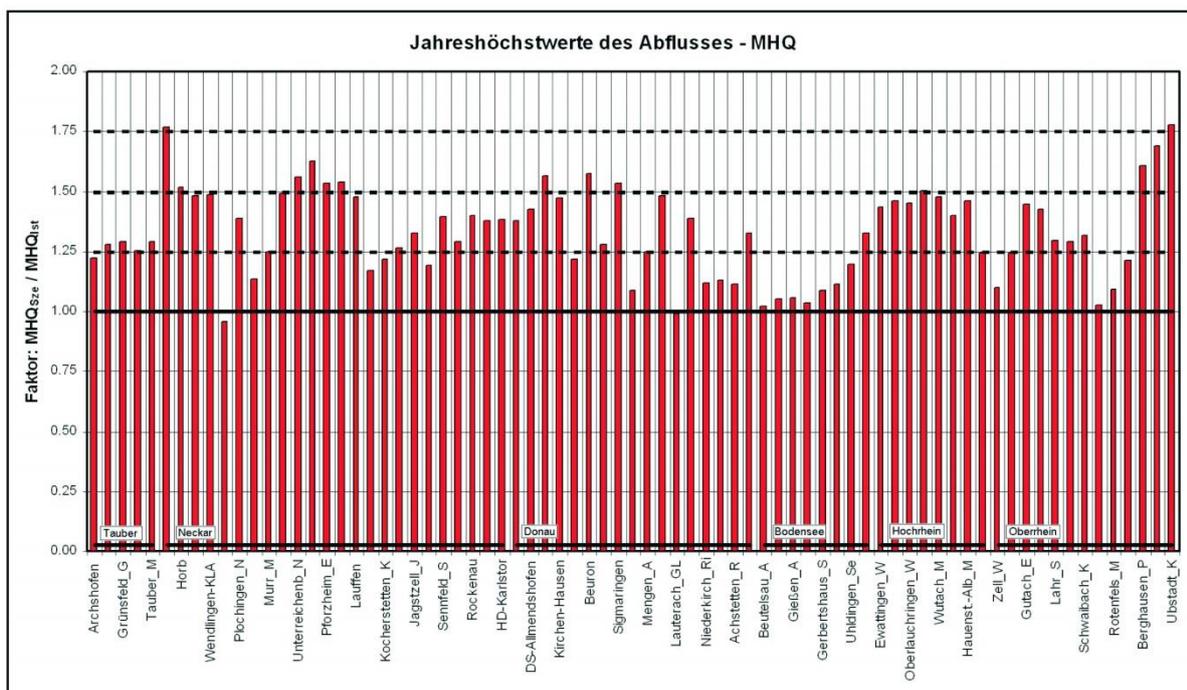


Abbildung 27: Zukünftige Veränderung der mittleren Hochwasserabflüsse infolge des Klimawandels an beispielhaft ausgewählten Gewässern [Hennegriff, Reich 2007]

Erste Analysen von KLIWA zwischen der nahen Zukunft (2021-2050) und dem Ist-Zustand (1971-2000) für die Rheinpegel bis Worms zeigen, dass für die mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse (MoMHQ) im Mittel keine wesentlichen Änderungen zu erwarten sind [Katzenberger 2013]. Im hydrologischen Sommerhalbjahr, das bisher im Jahrgang der mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse die höchsten Werte hat, ergeben sich Abnahmen der mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse, im Winterhalbjahr werden Zunahmen von

weniger als 10 % simuliert. Dies bedeutet, dass an den Pegeln mit nivalem Regime beim Zukunftsszenario die Unterschiede der MoMHQ-Regimekurve zwischen Winter- und Sommerhalbjahr geringer werden. Bei hohen Abflüssen (z. B. HQ<sub>100</sub>) zeigen sich an den Pegeln mit nivalem Regime kaum Veränderungen; sie fallen deutlich geringer aus als an den Pegeln mit pluvialem Regime. Die Ergebnisse werden durch weitere vorgesehene Untersuchungen noch verifiziert [Katzenberger 2013].

Die Zusammenhänge der Hochwasserentstehung am Oberrhein sind infolge des alpinen Einflusses und des voralpinen Bereichs, des Oberrheinausbaus sowie der verschiedenen Stauhaltungen und weiterer Einflussfaktoren sehr komplex. Das Abflussregime des Hoch- und Oberrheins ist nival geprägt. Gegenüber pluvial geprägten Gewässern, wie z.B. dem Neckar zeigt sich eine unterschiedliche Reaktion auf den Klimawandel. Im Rahmen von KLIWA werden als belastbar bewertete Klimaprojektionen für das gesamte Rheineinzugsgebiet – also auch für das Schweizerische Einzugsgebiet – und geeignete Wasserhaushaltsmodelle für Abflusssimulationen bis zum Pegel Worms verwendet. Das Abflussregime des Rheins bis zum Pegel Maxau ist insbesondere durch die Abflussbildung im alpinen und voralpinen Einzugsgebiet, also durch den jahreszeitlichen Verlauf von Schneeaufbau und Schneeschmelze, beeinflusst. Treten im hydrologischen Winterhalbjahr extreme Hochwasserereignisse am Oberrhein auf, ist dies zumeist durch extreme Regenfälle verbunden mit einer Schneeschmelze bedingt [KLIWA 2012].

Die Abbildung 28 und Abbildung 29 zeigen beispielhaft für die pluvial geprägten Regime der Kinzig und des Neckars eine zu erwartende deutliche Erhöhung der mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse im Winterhalbjahr um 35 % bzw. 39 %. Die Veränderungen der mittleren Monatshochwasserabflüsse im hydrologischen Sommerhalbjahr werden dagegen mit -7 % bzw. +1 % als relativ gering eingeschätzt.

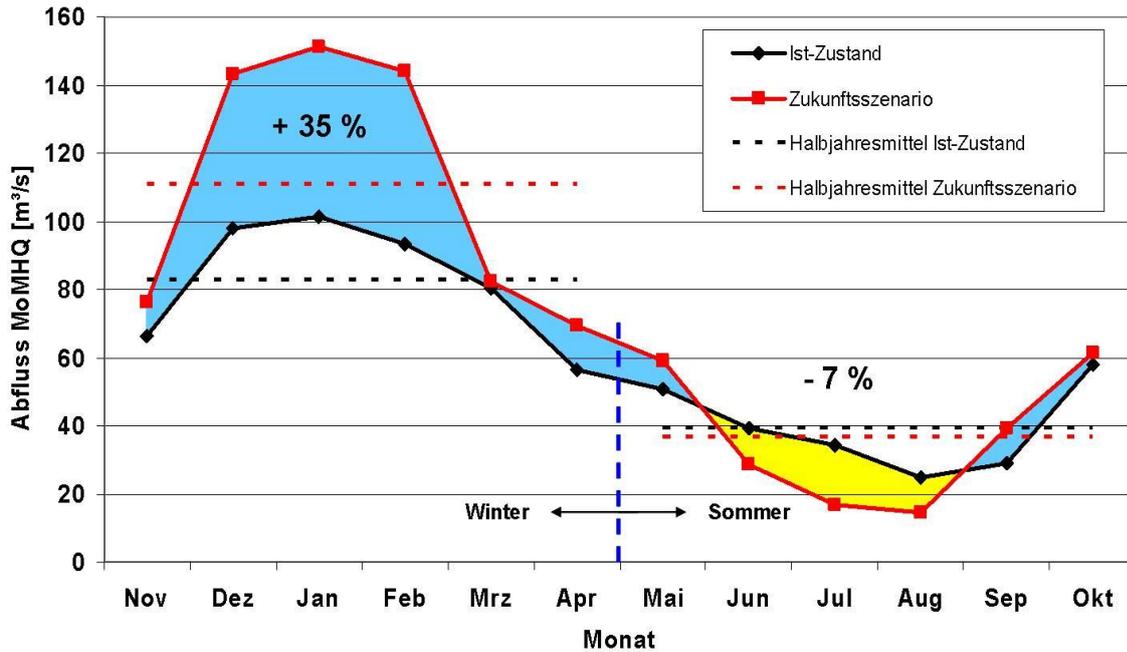


Abbildung 28: Jahrgang der mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse der Kinzig/Schwarzwald am Pegel Schwaibach: Zunahme der Halbjahresmittel im Winter um 35 %, im Januar sogar um 50 %, dagegen Abnahme im Sommer um 7 %, im Juli sogar um 50 %. Damit verändert sich der Jahrgang der Kinzig deutlich [Hennegriff, Reich 2007].

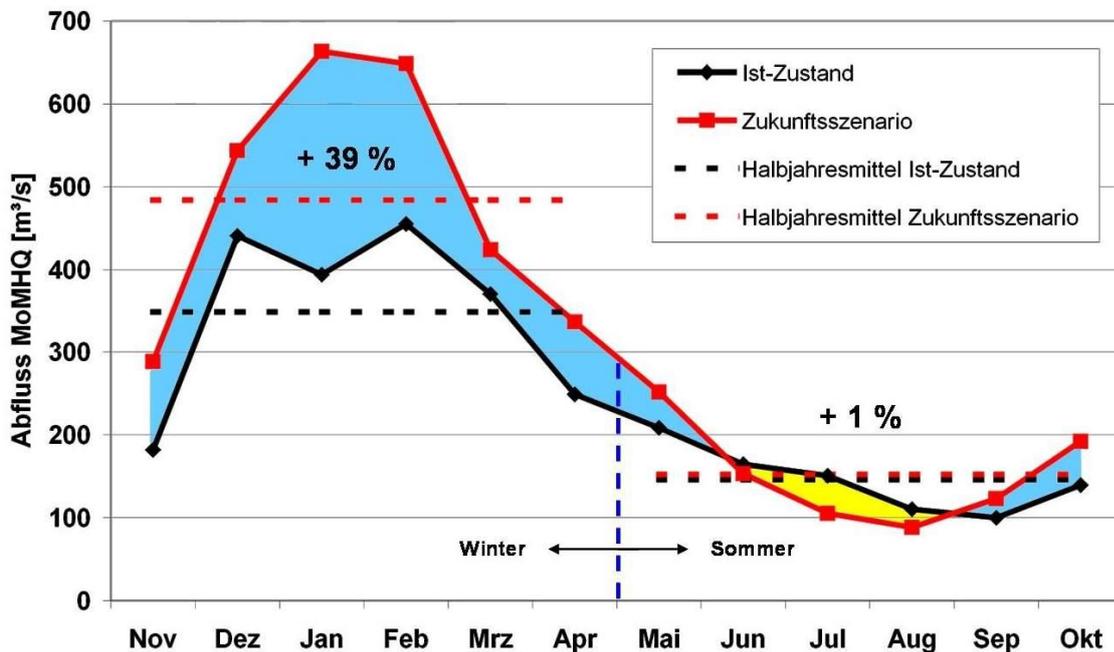


Abbildung 29: Jahrgang der mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse des Neckars am Pegel Rockenau: Zunahme der Halbjahresmittel im Winter um 39 %, im Januar sogar um 50 %. Dagegen ist das Halbjahresmittel im Sommer nahezu unverändert, im Juli jedoch Abnahme um 33 %. Damit verändert sich der Jahrgang des Neckars am Pegel Rockenau deutlich [Hennegriff, Reich 2007].

### **3.1.2.1 Auswirkungen auf Siedlungen und Infrastruktur**

Bei einer Zunahme von extremen kleinräumigen Starkregenereignissen ist auch mit einer steigenden Gefahr von lokal begrenzten Überschwemmungen in Siedlungsgebieten zu rechnen. Diese Ereignisse können durch kleinere Gewässer verursacht werden, deren (kleines) Einzugsgebiet bei einem Starkregenereignis komplett überregnet wird und dadurch innerhalb kürzester Zeit ein erheblicher Anstieg des Abflusses auftritt. Vermehrt treten aber auch Überflutungen durch reinen Oberflächenabfluss in Siedlungsgebieten aufgrund einer Überlastung der Siedlungsentwässerung auf (siehe auch Kapitel 3.4 Siedlungsentwässerung). Durch eine Verschärfung der Hochwassergefahr und Zunahme von Starkniederschlägen sind Infrastrukturen mit regionaler und überregionaler Bedeutung (kritische Infrastrukturen) betroffen, z.B. Verkehrsverbindungen, Wasser- und Energieversorgungseinrichtungen sowie Abwasserentsorgungsinfrastrukturen. In privaten Haushalten sowie Industriebetrieben können bei mangelnder Vorsorge – wenn beispielsweise Öltanks oder andere Lager nicht ausreichend gegen eindringendes Wasser sowie gegen Auftrieb gesichert sind – erhebliche Hochwasserschäden entstehen sowie umweltgefährdende Stoffe freigesetzt werden. Somit können die „Schutzgüter“ der Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (HWRM-RL) – die Gesundheit der Menschen, die Wirtschaft, die Umwelt und unser kulturelles Erbe – durch eine Verschärfung der Hochwassergefahr stärker als bisher beeinträchtigt werden. Untersuchungen, die im Auftrag des Gesamtverbands der deutschen Versicherungswirtschaft durchgeführt wurden [GDV 2011] gehen im Mittel von einer Verdopplung der Schäden aufgrund von Hochwasser bis zum Jahr 2100 gegenüber einem dort gewählten Referenzzeitraum von 1961 bis 2000 aus.

### **3.1.2.2 Auswirkungen auf wasserwirtschaftliche Anlagen**

Je nach Bauart und davon ausgehendem Risiko werden wasserwirtschaftliche Anlagen, wie z.B. Dämme, überwiegend so ausgelegt, dass sie einem Hochwasser bis zu einer definierten Wiederkehrzeit (z.B.  $HQ_{100}$ ) Stand halten. Auch der infrastrukturelle Hochwasserschutz ist meist auf ein Hochwasserereignis mit entsprechender Wiederkehrwahrscheinlichkeit ausgelegt. Durch die Veränderung der Niederschlagscharakteristik kann diese Hochwassersicherheit zukünftig ggf. unterschritten werden, da ein Hochwasser mit einer bisherigen statistischen Wiederkehrzeit von 100 Jahren in der Zukunft deutlich häufiger auftreten kann.

Eine durch die Überlastung von Abwasseranlagen und das Versagen wasserwirtschaftlicher Anlagen eintretende Überschwemmung wird zwar im Rahmen der HWRM-RL nicht betrachtet, kann aber die Funktionstüchtigkeit der infrastrukturellen Anlagen beeinflussen.

Überflutungen durch Grundwasser können in Baden-Württemberg in signifikantem Umfang nur in den Auen bzw. ehemaligen Auen von Oberrhein und Donau auftreten. Hierbei handelt

es sich in der Regel nicht um zu Tage tretendes Grundwasser im eigentlichen Sinn, sondern um Stauwasser aus Niederschlag, das auf Grund geringer Flurabstände nicht versickert [UM 2011].

### **3.1.2.3 Auswirkungen auf die Nutzung der Gewässer**

Durch Hochwasser kann es auch zu einer Nutzungseinschränkung der Gewässer kommen. Die Schifffahrt muss ab einem bestimmten Pegel eingestellt werden und es ergeben sich finanzielle Einbußen für die betroffenen Binnenschifffahrtsbetriebe. Bei langanhaltenden Hochwasserperioden kann ggf. kurzfristig die Versorgung mit Massengütern (z.B. Kohle für thermische Anlagen) gefährdet sein.

Die Stromproduktion an Laufwasserkraftanlagen ist bei Hochwasser meist eingeschränkt. Jegliche Abflüsse über dem Ausbauabfluss (meist zwischen  $Q_{50}$  und  $Q_{100}$  – Abfluss der an nicht mehr als 50 bzw. 100 Tagen überschritten wird) führen durch den im Unterwasser ansteigenden Wasserspiegel zu einer Verringerung der Fallhöhe. Im Hochwasserfall führt außerdem die Ansammlung von Schwemmgut zu schlechten hydraulischen Zulaufbedingungen an den Kraftwerkseinläufen und damit zu einer reduzierten Stromproduktion.

### **3.1.2.4 Auswirkungen auf die Gewässerökologie**

Erhöhter, bzw. langanhaltender Niederschlag (als Voraussetzung für Hochwasser) verursacht je nach Jahreszeit einen erhöhten Bodenabtrag. Dies bedingt einerseits einen Verlust an fruchtbarem Oberboden, ist aber auch für dann vermehrt in die Gewässer eingetragene Stofffrachten aus der Landwirtschaft verantwortlich.

Wenn Schutzeinrichtungen versagen, kann es bei Hochwasser zu Schadstoffeinträgen aufgrund von Überflutungen von Industrieanlagen, Kläranlagen etc. kommen.

Abgelagerte feinere Sedimente, die sich in bisher strömungsberuhigten Zonen abgelagert haben, werden je nach Strömungsintensität ggf. inklusiver anhaftender Schadstoffe remobilisiert und können – zumindest temporär – zu einer Gewässerbelastung führen, die für die Biozönose schädlich sein kann. Bei sehr hohen Schwebstoffkonzentrationen kann es z.B. zu einem „Verkleben“ der Fischkiemen kommen, schadstoffbelastete Schwebstoffpartikel werden von Fischen teilweise aufgenommen und können so in die menschliche Nahrungskette gelangen. Weiterhin können belastete Altsedimente offengelegt werden und dadurch bioverfügbar werden.

Nach Ablaufen der Hochwasserwelle lagern sich feine Sedimentpartikel wieder an der Gewässersohle ab und führen je nach Menge zu (lokalen) Kolmationsprozessen. Dieses „Verbacken“ der Sohle behindert die vertikale Konnektivität und somit die

Austauschprozesse zwischen Grundwasser und Oberflächenwasser. Die Lebensraumqualität von im Interstitial lebenden Kleinlebewesen (Makrozoobenthos) wird durch diese Prozesse beeinträchtigt und auch Laichplätze für im Kies laichende Fische gehen verloren.

Andererseits ist die morphologische Dynamik eines Hochwassers unabdingbar für eine langfristig gesunde Mischung und Zusammensetzung verschiedener Arten. Ohne jegliche Störeinflüsse (wie Hochwasserereignisse) würde ein Gewässerabschnitt auf Dauer morphologisch verarmen und sich die Zusammensetzung der Biozönose einseitig in Richtung derjenigen Arten verschieben, die an die überwiegend herrschenden Bedingungen am besten adaptiert sind und somit andere Arten verdrängen. Ein Hochwasser schafft neue reichhaltige Strukturen, durchmischt die Kornstruktur der Sohle, verdriftet ggf. zu groß gewordene Populationen, spült neue Arten in einen Gewässerabschnitt und sorgt so natürlicherweise für eine dynamische Erneuerung der Artenzusammensetzung.

### 3.1.3 Anpassungskapazität

Durch die integrale Hochwasserschutzstrategie des Landes ist eine Basis für die Anpassung an eine klimawandelbedingte Verschärfung von Hochwassergefahren gegeben. Die Umsetzung der EU-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie, die alle Akteure in den Prozess mit einbindet, trägt ebenfalls dazu bei, die Diskussion über Anpassungsmaßnahmen auf einer breiten Basis führen zu können.

Strukturen wie Hochwasserpartnerschaften stärken das Gefahrenbewusstsein und fördern die Akzeptanz notwendiger Anpassungsmaßnahmen. Hochwasserpartnerschaften sind ein Zusammenschluss von Kommunen, Fachverwaltungen und Institutionen innerhalb eines Einzugsgebietes. Ziel ist neben der Stärkung des Hochwassergefahrenbewusstseins und der Weitergabe von Erfahrungen in der Vorsorge der Aufbau und die Etablierung von Netzwerken verantwortlicher Institutionen entlang der Gewässer [UM 2013c]. Eine wichtige Aufgabe der Hochwasserpartnerschaften ist die Plausibilisierung der Gefahren- und der Risikokarten sowie die Beteiligung der interessierten Stellen bei der Maßnahmenplanung im Rahmen des Hochwasserrisikomanagements.

Für ein effektives Hochwassermanagement wurde in Baden-Württemberg das internetbasierte Informations- und Kommunikationssystem zum Hochwasser- und Katastrophenschutz **FLIWAS** (**FL**ut-**I**nformations- und **WA**rn**S**ystem) entwickelt, das im Hochwasserfall alle Informationen zeitnah allen an den wesentlichen Entscheidungen Beteiligten aus Wasserwirtschaft, Gefahrenabwehr und Katastrophenschutz zur Verfügung stellt. Nach [UM 2013d] werden hierzu „bestehende Daten und Informationsdienste in FLIWAS eingebunden sowie neue Möglichkeiten des Informationsaustausches verwirklicht. Ein wesentliches Element von FLIWAS ist ein leistungsfähiges Web-GIS, welches die

Anwender beim Zugriff auf aktuelle Umwelt- und Wasserstandsdaten, bei der vorsorgenden Erstellung von Hochwasseralarm- und Einsatzplänen und anschließend bei deren Abarbeitung im Hochwasserfall sowie bei der Koordination und Durchführung von Maßnahmen zur Abwehr von Gefahren unterstützt. Das System wird seit 2010 landesweit als Teil des Umweltinformationssystems Baden-Württemberg eingesetzt und bereits von verschiedenen Landkreisen und Kommunen genutzt.“

#### **3.1.4 Dringlichkeit**

Die bisherigen Untersuchungen des Gemeinschaftsvorhabens KLIWA haben gezeigt, dass Hochwasserereignisse in den letzten 30 Jahren häufiger auftreten, und dass zukünftig aufgrund der Klimaänderung von einer Erhöhung der Spitzenabflüsse auszugehen ist [Ihringer 2004]. Dies wird auch durch neuere Untersuchungen bestätigt [KLIWA 2011 a, KLIWA 2012b]. Die Untersuchungen geben trotz der noch bestehenden Unsicherheiten der Klimamodelle Anlass, den bisherigen Weg bei der Festlegung von Bemessungsabflüssen zu modifizieren und aufgrund des Klimawandels einen „Lastfall Klimaänderung“ zu berücksichtigen. Die langen Zeitreihen ab 1932 zeigen in Baden-Württemberg überwiegend (ca. 90 %) eine Tendenz zu steigenden Hochwasserabflüssen. Diese Tendenz ist bei den Scheitelwerten des hydrologischen Jahres und des Winterhalbjahres am stärksten ausgeprägt. Ab etwa Mitte der 1970er Jahre ist deutlich zu erkennen, dass in Baden-Württemberg im Winterhalbjahr häufiger Hochwasser auftreten als in der Zeit davor. Die Trendsteigungen zeigen aber auch, dass die bis zum Jahr 2000 vorhandenen Hochwassertrends danach einen schwächeren Anstieg aufweisen.

Gemäß der KLIWA-Untersuchungen ist mit einer weiteren Erhöhung der Hochwasserabflüsse zu rechnen; Für das Jahresmittel des Niederschlags wird für die nahe Zukunft bis 2050 mit einer Zunahme von 4,1 % gerechnet. Aufgrund langfristiger Auswirkungen, der langen Lebensdauer der wasserwirtschaftlichen Anlagen (Lebensdauer > 50 Jahre zuzüglich Planung > 5 Jahre) und den damit verbundenen hohen Investitionskosten sollten zügig Anpassungsmaßnahmen entwickelt und umgesetzt werden. Bisher vorhandene Anpassungsstrategien sollten zeitnah weiter implementiert werden (siehe dazu Kapitel 4).

Hinsichtlich möglicher Effekte für eine ferne Zukunft (2050 bis 2100) liegen für Baden-Württemberg noch keine konkreten Angaben vor, jedoch ist aufgrund des Anstiegs der Winterniederschläge von einer weiteren Verschärfung des Hochwasserrisikos im Winterhalbjahr auszugehen.

### 3.1.5 Gesamtbetrachtung der Vulnerabilität

Insgesamt wird die Vulnerabilität des Schwerpunktthemas Hochwasser aufgrund der bereits zu beobachtenden Veränderungen, der beschriebenen Sensitivität und unter Abwägung der teilweise vorhandenen Anpassungskapazitäten als hoch eingestuft.

#### **Kernaussagen zum Schwerpunktthema Hochwasser**

- *Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen lassen trotz der Unsicherheiten in der Modellkette in den betreffenden Einzugsgebieten eine Zunahme der mittleren Hochwasser, aber auch der extremen Hochwasserabflüsse erwarten. Eine Hochwasserverschärfung durch die Klimaveränderung erscheint für das Zieljahr 2050 somit sehr wahrscheinlich [KLIWA 2012b].*
- *Durch eine Verschärfung der Hochwassergefahr und Zunahme von Starkniederschlägen sind Siedlungsgebiete und Infrastrukturen mit regionaler und überregionaler Bedeutung (kritische Infrastrukturen) betroffen, z.B. Verkehrsverbindungen, Wasser- und Energieversorgungseinrichtungen sowie Abwasserentsorgungsinfrastrukturen.*
- *Bei einer Zunahme von kleinräumigen extremen Starkregenereignissen ist auch mit einer steigenden Gefahr von lokal begrenzten Überschwemmungen in Siedlungsgebieten zu rechnen.*
- *Durch Hochwasser kann es auch zu einer Nutzungseinschränkung (z.B. Schifffahrt, Wasserkraft) der Gewässer kommen.*
- *Extreme Hochwasserereignisse können ökologische Auswirkungen durch Veränderungen der Morphologie, sowie durch Schadstoffeinträge haben.*
- *Durch die integrale Hochwasserschutzstrategie des Landes ist eine Basis für eine weitere Anpassung an eine klimawandelbedingte Verschärfung von Hochwassergefahren gegeben.*

## 3.2 Niedrigwasser

### 3.2.1 Exposition

Die klimatischen Bedingungen in Baden-Württemberg haben sich im ausgehenden 20. und beginnenden 21. Jahrhundert nachweisbar verändert. In den Sommern der vergangenen Jahre wurden wiederholt extreme Trockenperioden beobachtet, die an zahlreichen Gewässern zu Niedrigwassersituationen geführt haben. Die Auftretenswahrscheinlichkeit von extrem trockenen Vegetationsperioden und ausgeprägten Niedrigwasserverhältnissen ist im Vergleich zum Zeitraum vor 1985 deutlich angestiegen [KLIWA2009b].

Tabelle 4: Expositions Betrachtung für das Schwerpunktthema Niedrigwasser

KK	Veränderung KK	unmittelbar nachgelagerte Effekte (Exposition)
N	Abnahme der Sommerniederschläge	Durch geringere Niederschläge kommt es zu einer Verringerung des MNQ
N	Zunahme der Anzahl der Trockentage	Zunahme der Länge und Anzahl der Trockenperioden
T	Temperaturzunahme im Sommer	Zunahme der Verdunstung Zunahme der Wassertemperatur

KK: Klimatische Kenngröße (N: Niederschlag, T: Temperatur, GS: Globalstrahlung, W: Wind)

### 3.2.2 Sensitivität und potenzielle Auswirkungen

Die Auswertungen der Veränderungen der Niedrigwasserabflüsse in Baden-Württemberg für die nahe Zukunft (ca. bis zum Jahr 2050) zeigen sehr eindeutige Tendenzen:

Die deutlichsten Veränderungen zeigen die statistischen Auswertungen des Verlaufs der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse MNQ(m). Diese zeigen ein sehr einheitliches Bild über die Entwicklung der Niedrigwasserabflüsse in Baden-Württemberg. Dabei wird die jährliche Niedrigwasserabflussperiode infolge des künftigen Klimawandels ca. einen Monat früher auftreten als heute. Erwartungsgemäß werden die kleinsten monatlichen Abflüsse im hydrologischen Winterhalbjahr bedingt durch die höheren Niederschläge in dieser Jahreszeit flächendeckend zunehmen [Hennegriff, Reich 2007].

Der mittlere jährliche Niedrigwasserabfluss zeigt in Baden-Württemberg eine Bandbreite von schwachen (kleiner 10 %) bis starken (größer 20 %) Abnahmen. Die starken Abnahmen ergeben sich im Südwesten. Deutliche Abnahmen von 10 % - 20 % ergeben sich in dem Streifen, der im Südwesten Baden-Württembergs beginnt und bis in den Nordosten reicht. In diesem Streifen liegen vor allem der Oberlauf des Neckars und die östlichen Neckarzuflüsse. Außerhalb davon sind meist schwache Abnahmen zu erwarten. Mit zunehmender Jährlichkeit gehen die Abnahmen allmählich zurück.

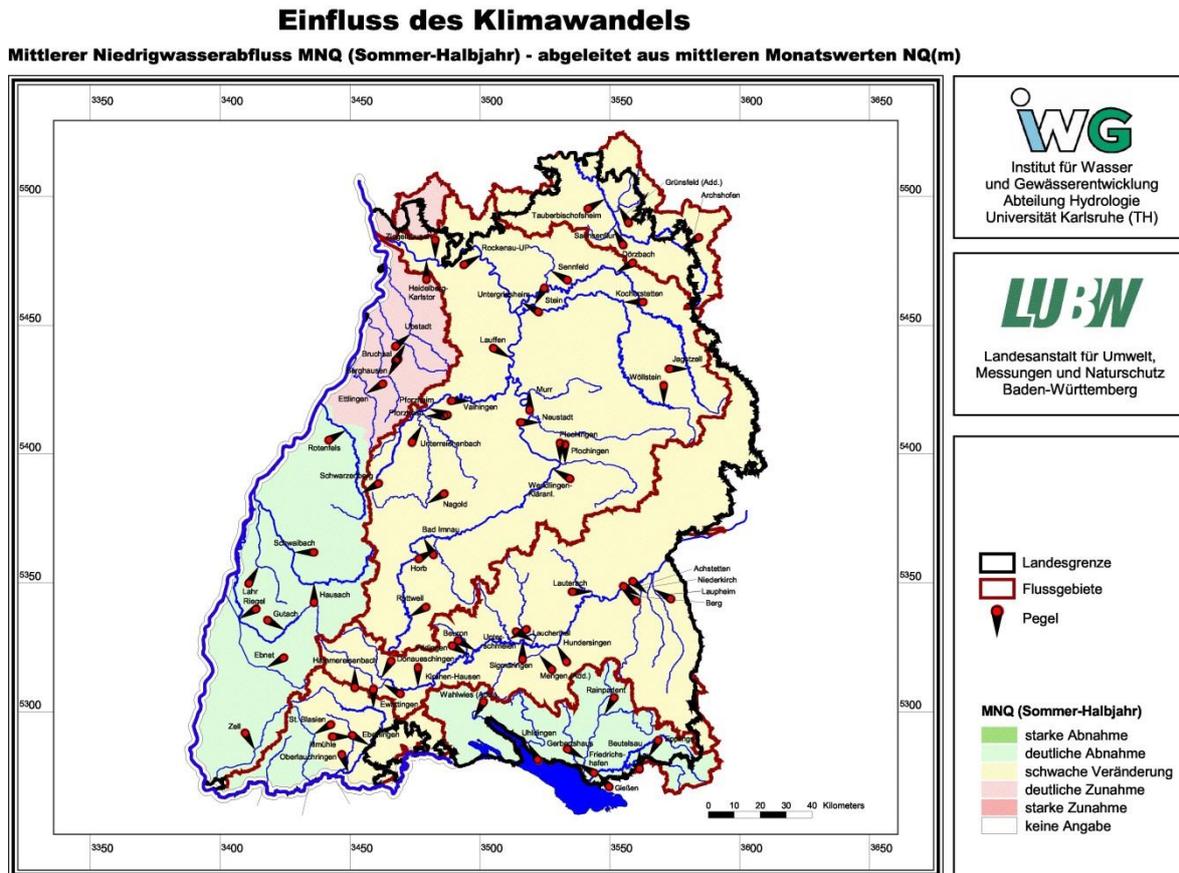


Abbildung 30: Räumliche Verteilung der zu erwartenden Veränderungen des mittleren Niedrigwasserabflusses MNQ des Sommerhalbjahres, abgeleitet aus den mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüssen MNQ(m), infolge Klimaänderung [Hennegriff et al. 2008].

Die mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse zeigen im Sommerhalbjahr in Baden-Württemberg überwiegend deutliche Abnahmen (10 % - 20 %) (Abbildung 30). Dabei treten die größten Abnahmen im Monat September im Südwesten und Südosten von Baden-Württemberg auf und betragen im Mittel rund 20%. In den betroffenen Gebieten variieren sie insgesamt zwischen 13 % und 44 %.

Abbildung 31 zeigt den Jahrgang der Veränderungen der monatlichen mittleren Niedrigwasserabflüsse zwischen dem simuliertem Ist-Zustand und dem Zustand für die nahe Zukunft.

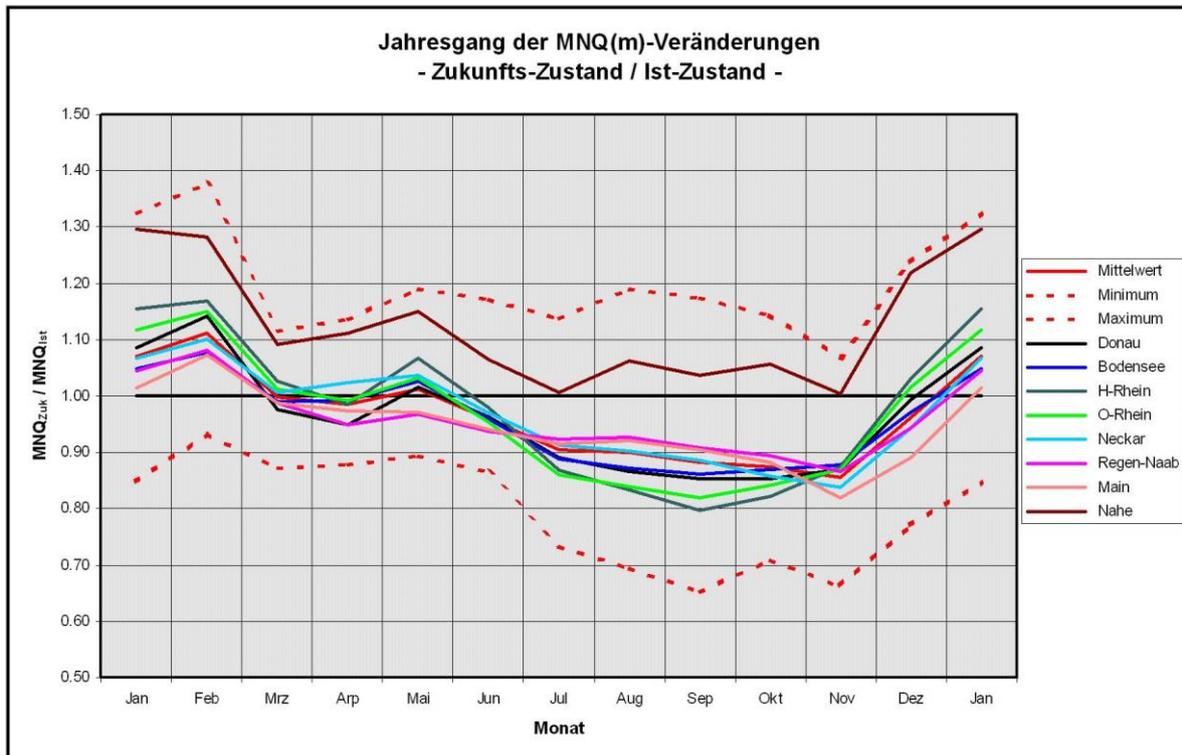


Abbildung 31: Jahresgang der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse als Verhältnis zukünftig zu erwartender zu derzeitigen Niedrigwasserabflüssen für die bisher untersuchten Flussgebiete (Werte <1 bedeuten eine Abnahme der Niedrigwasserabflüsse) (Ergebnisse der Klimaprojektion WETTREG-2006/A1B, Wasserhaushaltsmodell LARSIM, Simulationszeiträume 2021-2050 im Vergleich mit Daten von 1971-2000) [KLIWA 2009c].

Nach [KLIWA 2011b] sind die Hochrheinzuflüsse, der Oberlauf des Neckars und der nördliche Zuflussbereich zur Donau von den größten Abnahmen im Oktober, die restlichen Gebiete in Baden-Württemberg im November betroffen. Die Abnahmen betragen im Mittel zwischen rd. 15 % bis 20 %. Für die nahe Zukunft ist zu erwarten, dass die Dauer der Niedrigwasserperioden bei häufig auftretenden Niedrigwasserperioden deutlich (25 % - 50 %) bzw. großräumig stark (größer 50 %) zunehmen werden. Mit steigender Jährlichkeit bzw. abnehmender Auftretenswahrscheinlichkeit schwächen sich die Zunahmen kontinuierlich ab [KLIWA 2011b].

Bei den mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüssen des Hoch- und Oberrheins zeigt sich bei den bislang in KLIWA durchgeführten Simulationen bis 2050 die Tendenz einer Abnahme im hydrologischen Sommerhalbjahr und einer Zunahme im Winterhalbjahr [Katzengerger 2013].

Aus Abbildung 32 ist zu erkennen, dass es an fast allen im KLIWA-Gebiet betrachteten Pegel zu einer Abnahme der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse MNQ im Sommerhalbjahr um mehr als 10 % kommt. An einigen Pegeln wie beispielsweise Lahr und Ebnet ist mit weit mehr als 20 % Abnahme zu rechnen.

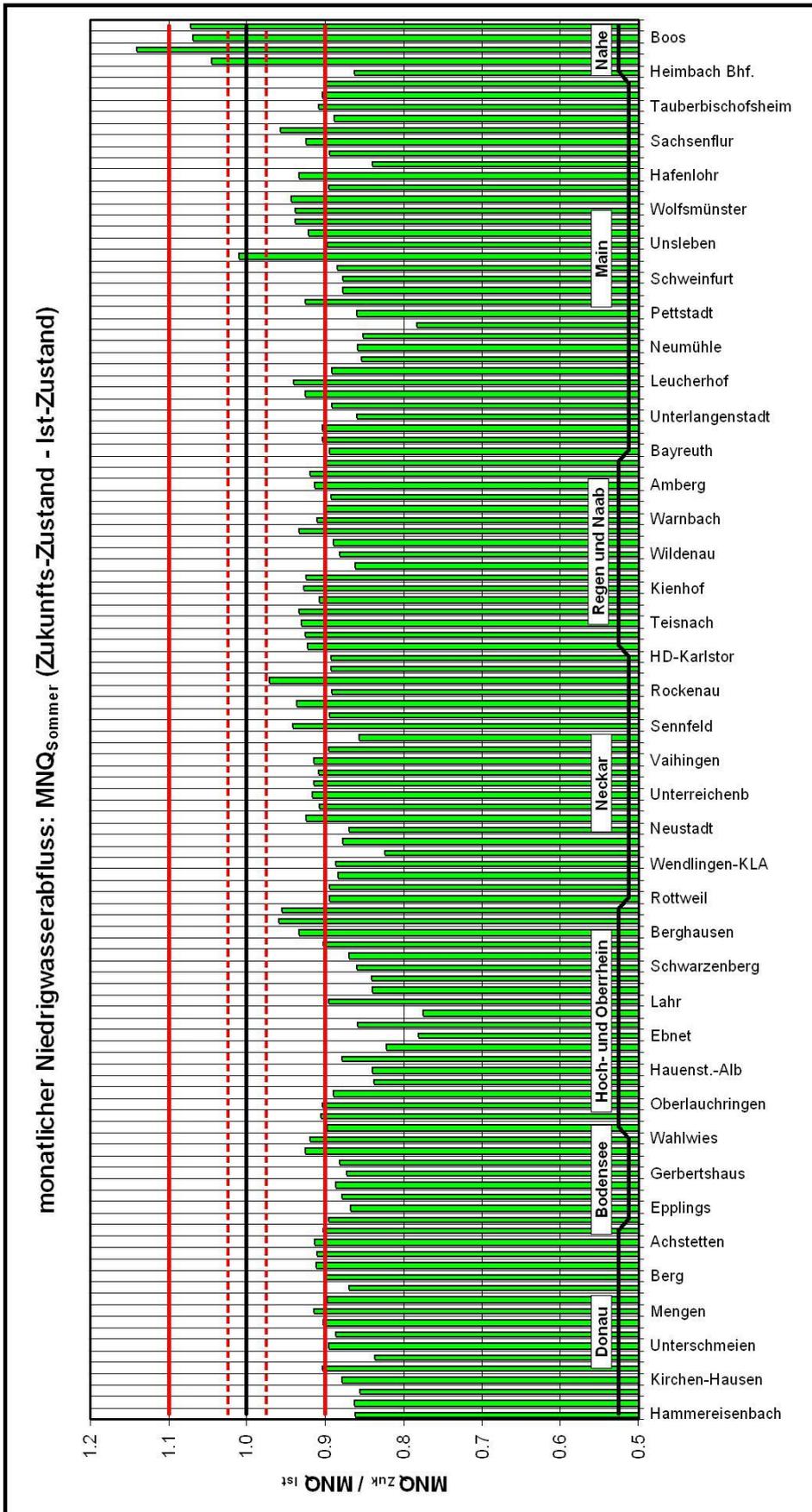


Abbildung 32: Verhältnis der mittleren Niedrigwasserabflüsse  $MNQ$  im Sommerhalbjahr zwischen Zukunfts-Zustand (2021-2050) und Ist-Zustand (1971-2000) [KLIWA2009a].

Für die Niedrigwasserabflüsse des Rheins zeigt sich die Tendenz, dass die mittleren Jahreswerte in Zukunft höher sind. Aus heutiger Sicht ist also an den Rheinpegeln keine Verschärfung der Jahresmittelwerte der Niedrigwasserabflüsse in der nahen Zukunft bis zum Jahr 2050 zu erwarten [Katzenberger 2013].

Der Rhein entspringt in den Gletscherregionen der Alpen. Hier sind deutliche Zeichen einer Klimaveränderung erkennbar. Auf kurze Sicht können vermehrte Niedrigwasserperioden ggf. durch das Abschmelzen der Gletscher und das Auftauen des Permafrosts ausgeglichen werden. Auf lange Sicht jedoch besteht Grund zur Sorge, was den Fortbestand dieses gigantischen Wasserspeichers betrifft. Seit 1980 haben die Gletscher 20 % bis 30 % ihrer Eismasse verloren; allein den Spitzentemperaturen des Sommers 2003 ist der Verlust von 10 % der restlichen Eismasse zuzuschreiben [CIPRA 2011]. Nach Aussage von Haeberli kann sich die verbleibende Gletscherfläche bis 2050 um weitere 50 % bis 75 % verringern [Haeberli 2009]. Dies kann vor allem in der ferneren Zukunft zu einer weiteren Verschärfung sommerlicher Niedrigwassersituationen führen.

Konkrete Angaben zum Abflussgeschehen für eine ferne Zukunft bis 2100 liegen aufgrund der Unsicherheiten der vorhandenen Klimaprognosen derzeit nicht vor.

Die Auswirkungen von Niedrigwasserereignissen hängen stark von der Interaktion verschiedener Nutzungsarten sowie von der Größe der Gewässer ab. Wird während einer Niedrigwasserperiode zusätzlich Wasser an Gewässern zur Nutzung als Brauchwasser z.B. zur Kühlung oder Bewässerung sowie zur Wasserkraftnutzung entnommen, so verschärft sich die Situation möglicherweise erheblich [LfU 2004]. Im Gegensatz dazu werden z.B. im Neckareinzugsgebiet ab dem Großraum Stuttgart die Abflüsse durch die Fernwasserversorgungen beeinflusst, die Wasser aus dem Bodensee und dem Donaueinzugsgebiet in das Neckargebiet leiten. Daher gab es in den 1950'er bis in die 1970'er Jahren, als diese Trinkwasserüberleitungen noch geringer waren, z.T. noch niedrigere Abflüsse [LfU 2004].

Veränderungen von Niedrigwasserabflüssen und Niedrigwasserperioden haben wesentliche Auswirkungen auf die Energiewirtschaft, die Wasserversorgung, die Wassergüte- und Wassermengenwirtschaft, die Binnenschifffahrt sowie auf die Gewässerökologie und die Fischerei, die im Folgenden näher beschrieben werden. Die Veränderung der Niedrigwasserverhältnisse hat somit auch eine volkswirtschaftliche Bedeutung.

An einigen Gewässern steht bei sommerlichen Niedrigwasserperioden insbesondere die Erwärmung als Auswirkung im Vordergrund. An vielen Flüssen sind aber auch die erheblich reduzierten Wassertiefen und sehr geringen Fließgeschwindigkeiten bis hin zu teilweise sogar einer nahezu kompletten Austrocknung des Flussbetts und damit entscheidenden Auswirkungen auf die Biozönose von besonderer Bedeutung. So kommt es beispielsweise

in der oberen Donau bei niedrigen Abflüssen immer wieder zu einer Vollversinkung [LfU 2004].

### **3.2.2.1 Auswirkungen auf die Energiewirtschaft**

Neben der geringen Wasserführung hat beispielsweise im Jahr 2003 insbesondere die bis auf ca. 28° C angestiegene Wassertemperatur dazu geführt, dass es am Neckar und selbst am Rhein aufgrund der Temperaturgrenzwerte der wasserrechtlichen Erlaubnisse (die zum Schutz der aquatischen Lebewesen festgelegt wurden) zu Einschränkungen bei der Kühlwasserversorgung der Kohle- und Kernkraftwerke kam. Bei Einschränkungen der Schifffahrt kann es in Einzelfällen zu Lieferengpässen von Brennstoffen für Kohlekraftwerke kommen [Scholten 2012]. Niedrige Abflüsse führen auch zu Einschränkungen bei der Wasserkraftnutzung. Laufwasserkraftanlagen werden mit Abflüssen deutlich unter dem Ausbauabfluss beschickt und arbeiten deshalb bei relativ schlechten Wirkungsgraden. Dies bewirkt zusammen mit der geringen Wassermenge eine nur geringe Stromausbeute. Bei Ausleitungskraftwerken werden ggf. die Mindestwasserabflüsse, die für das Mutterbett definiert sind, unterschritten, weshalb kein Wasser für die Kraftwerke mehr ausgeleitet werden darf. Da sowohl die Wasserkraftanlagen als auch die thermischen Kraftwerke von Einschränkungen betroffen sind, kann es in Extremfällen zu Engpässen in der Energieversorgung kommen.

### **3.2.2.2 Auswirkungen auf die Binnenschifffahrt**

Durch niedrige Wasserstände kommt es zu Einschränkungen im Schiffsverkehr. Das Unterschreiten kritischer Wasserstände betrifft nicht nur die Binnenschifffahrt selbst, sondern auch diejenigen Wirtschaftszweige, die auf den kostengünstigen und vor allem zuverlässigen Transport von Massengütern angewiesen sind [Scholten 2012].

Im staugeregelten Neckar ist auch bei geringen Abflüssen, die Schifffahrt relativ unbeeinflusst möglich. Dagegen ist der Rhein unterhalb der Staustufe Iffezheim ein frei fließendes Gewässer und der Wasserstand ist direkt abhängig vom Abfluss. Bei Niedrigwasser ist die Schifffahrt am Rhein direkt betroffen bzw. muss bei entsprechend kleinen Wassertiefen sogar eingestellt werden.

Hierbei ist zu beachten, dass auch niedrigwasserbedingte Einschränkungen der Schifffahrt außerhalb von Baden-Württemberg Auswirkungen auf die Wirtschaft in Baden-Württemberg haben können. Der Neckar kann hierbei nicht unabhängig von Rhein betrachtet werden, da ein Großteil der Transporte in und aus dem Neckar über den Rhein transportiert wird. Im Jahr 2003 wurden, überwiegend wegen lang anhaltendem Niedrigwasser, in der Binnenschifffahrt 5,1 % weniger Güter befördert als 2002, nämlich nur knapp 220 Mill. t.

Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes entspricht dies einem Rückgang von fast 12 Mill. t.

Bei niedrigen Wasserständen muss die Abladetiefe, d.h. die Beladung der Schiffe reduziert werden. Damit steigen die Stückkosten aufgrund sinkender Auslastung und Geschwindigkeit und dies bei großen Schiffen stärker als bei kleineren Schiffen. Bei weiter sinkenden Wasserständen kommen größere Schiffe eher in den Bereich, in dem ein Einsatz gar nicht mehr möglich ist; die Stückkosten können dann zeitweise höher als bei kleineren Schiffen sein [KLIWAS 2011].

### **3.2.2.3 Auswirkungen auf die Bewässerung**

Derzeit wird nur ein geringer Anteil des Wasserdargebots für Bewässerung genutzt, jedoch ist durch die Kultur höherwertiger landwirtschaftlicher Produkte sowie durch längere Trockenzeiten in der Vegetationsperiode von einem erhöhten Bewässerungswasserbedarf auszugehen.

In trockenen, heißen Sommern ist damit zu rechnen, dass genau dann der größte Bewässerungswasserbedarf auftritt, wenn in den Gewässern der geringste Niedrigwasserabfluss herrscht. Da in Baden-Württemberg die Wasserentnahmen für die Bewässerung dezentral organisiert sind, sind die Gesamtentnahme sowie deren regionale Verteilung derzeit schwierig abzuschätzen. Nach Angaben des statistischen Landesamtes betrug der Wassereinsatz zur Bewässerung im Jahr 2002 etwa 9 Mio. m<sup>3</sup> [Statistisches Landesamt 2012]. Auch über die zukünftige Entwicklung des Bewässerungslandbaus sind keine zuverlässigen Einschätzungen vorhanden. Ein Beispiel für eine Konkurrenzsituation zwischen Anforderung aus der Bewässerung, Flussökologie und Wasserkraft stellt die Wasserentnahme an der Unteren Argen dar [Marx 2005, Fenrich 2009]. Hier wird Bewässerungswasser direkt aus der Argen und dem Ausleitungskanal einer Wasserkraftanlage entnommen. Im Niedrigwasserjahr 2003 kam es hier zu Engpässen in der Verfügbarkeit von Bewässerungswasser aufgrund der Mindestwasserregelung in der Ausleitungsstrecke und dem Wasserbedarf einer bestehenden Kleinwasserkraftanlage. Solche Situationen werden in Zukunft verstärkt auftreten.

Bewässerungswasser wird in Baden-Württemberg zu ca. einem Drittel aus Oberflächengewässern entnommen, der restliche Bedarf wird aus Grundwasservorkommen gedeckt [Statistisches Landesamt, 2012]. Aufgrund der geringen Datenlage ist jedoch nicht genau einzuschätzen, in welchen Gebieten zukünftig damit zu rechnen ist, dass es zu Bewässerungswasserengpässen bei Niedrigwasser kommen wird. Der genaue Bedarf ist zudem sehr stark von der Zusammensetzung des landwirtschaftlichen Anbaus abhängig, die sich je nach Marktentwicklung ggf. sehr kurzfristig ändert.

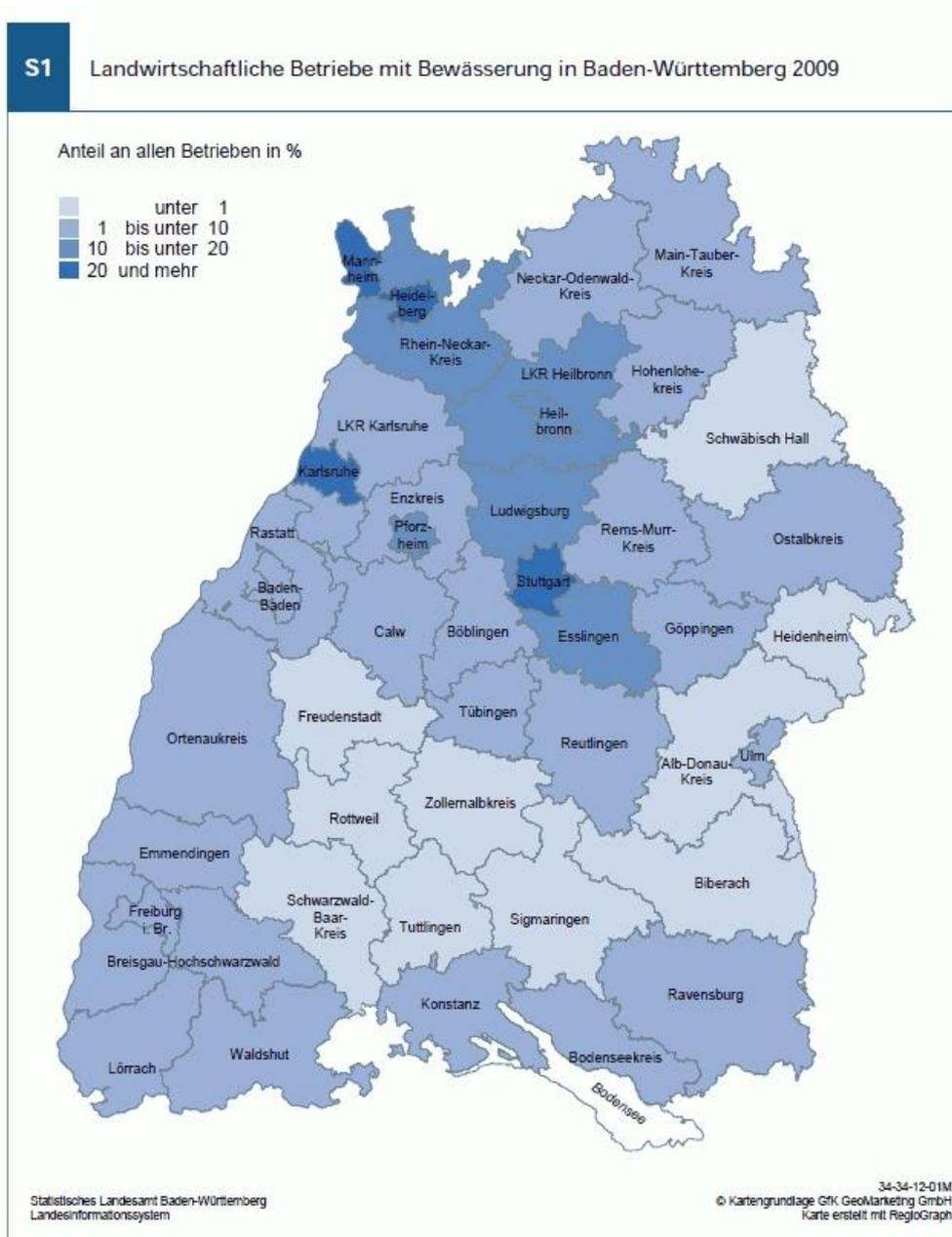


Abbildung 33: Anteil der Landwirtschaftsbetriebe mit Bewässerung [Quelle: Statistisches Landesamt 2012]

Abbildung 33 zeigt die aktuelle Verteilung der Bewässerungslandwirtschaft in Baden-Württemberg. Die Darstellung gibt aber nur Auskunft über die Anzahl der Bewässerungsbetriebe und nicht über deren Gesamtwasserentnahme. Stellt man dem die Wassermangelgebiete (siehe Abbildung 7) gegenüber, so kann man erkennen, dass entlang des Rheins von Wasserüberschuss und damit mit deutlich geringeren Auswirkungen durch Bewässerungslandwirtschaft, als im gesamten restlichen Gebiet Baden-Württembergs auszugehen ist.

Besonders hoch ist der Anteil von Betrieben mit Bewässerung in den Stadtkreisen, wobei zu beachten ist, dass hier einerseits die Anzahl der landwirtschaftlichen Betriebe geringer ist,

andererseits erzeugen hier vielfach Gartenbaubetriebe ihre Produkte konsumentennah [Schaber 2012]. Diese Verteilung kann jedoch zukünftig stark variieren, da mit steigenden Sommertemperaturen und geringeren Niederschlägen der Anteil der Bewässerungslandwirtschaft zunimmt und sich Anbaukulturen verändern. Es ist anzunehmen, dass sich in Trockenwetterperioden an einigen Gewässern die Konkurrenzsituation zwischen Gewässerökologie, Bewässerungswasserentnahme und anderen Nutzern verschärft.

Von Seiten der Landwirtschaft wäre hier zu klären, welche Anbaukulturen grundsätzlich einen besonders hohen Bewässerungsbedarf haben, in welchen Monaten des Jahres dieses Wasser überwiegend benötigt wird und wie sich die Marktsituation, die direkten Einfluss auf den Anbau nimmt, auch unter der Berücksichtigung der vermehrt angebauten Pflanzen für die Nutzung in Biomassekraftwerken, sich künftig voraussichtlich weiter entwickeln wird. Da die Verschärfung der Niedrigwassersituation in Baden-Württemberg räumlich unterschiedlich verteilt sein wird, sollten hier auch regionale Unterschiede in der landwirtschaftlichen Nutzung (sofern dies Einfluss auf den Bedarf an Bewässerungswasser hat) aufgezeigt werden.

#### **3.2.2.4 Auswirkungen auf die Wasserqualität**

Sommerliche Niedrigwasser- und Hitzeperioden führen auch zu Problemen bei der Wasserqualität. Niedrige Wasserstände sowie steigende Lufttemperaturen und ggf. eine auf längere Sicht zu erwartende Zunahme der Globalstrahlung erhöhen den natürlichen Wärmeeintrag in die Gewässer und bewirken, dass die Konzentration von gelöstem Sauerstoff im Wasser sinkt. Tiere und Pflanzen sind bei Niedrigwasser bereits durch das geringe Wasservolumen und die hohen Temperaturen gestresst. Die Reduktion des lebenswichtigen Sauerstoffs bedeutet dann eine erhebliche zusätzliche Belastung.

In Niedrigwasserphasen mit geringen Abflüssen, wie in der zweiten Jahreshälfte 2003, kommt es zu einer „Aufkonzentration“ von schlecht abbaubaren und gut wasserlöslichen Abwasserinhaltsstoffen in den Gewässern. Andererseits gelangen üblicherweise aufgrund des geringen Niederschlags keine ungeklärten Abwässer über die Regenüberläufe ins Gewässer. Das Gleiche gilt auch für Stoffe, die zu einem erheblichen Teil aus der Fläche (diffus) in die Gewässer eingetragen werden (z.B. Nitrat) [LfU 2004]. Kommt es in einer Niedrigwasserphase jedoch kurzfristig zu einem Niederschlagsereignis, bei dem ein Spülstoß im Kanalnetz verursacht wird, kann dies wiederum zu einem großen Anteil an verunreinigtem Abwasser im Verhältnis zum geringen natürlichen Abfluss des Gewässers führen. Geringe Sauerstoffgehalte und höhere Wassertemperaturen begünstigen während Niedrigwasserperioden außerdem Rücklösungen (z.B. Eisen, Mangan, Phosphor) aus Sedimenten und können so einen Stoffeintrag ins Gewässer nach sich ziehen und die

Eutrophierungsgefahr steigern. Durch höhere Wassertemperaturen kann umgekehrt auch der Abbau von Nähr- und Schadstoffen beschleunigt werden, was zu einer Verringerung der Verschmutzung führt. Dies geht jedoch einher mit einer starken Sauerstoffzehrung, die sich wiederum negativ auswirkt.

### **3.2.2.5 Auswirkungen auf die Gewässerökologie und wasserabhängige Ökosysteme**

Die Auswirkungen auf die Gewässerökologie hängen stark von der Jahreszeit und der Größe der Gewässer ab. Während in größeren Gewässern (zumeist Gewässer 1. Ordnung, Wasser- und Schifffahrtstraßen) aus ökologischer Sicht hauptsächlich die Temperaturänderung und damit einhergehende geringe Sauerstoffgehalte sowie zukünftig ggf. eine Aufkonzentration von Nähr- und Schadstoffen (siehe Abschnitt 3.2.2.4) relevant ist, kommt es bei kleineren Gewässern zusätzlich noch zu Problemen der Durchgängigkeit für Fische sowie in Extremfällen sogar zum Trockenfallen der Gewässer. Die zukünftigen Veränderungen in Bezug auf die Gewässerbeschaffenheit sind auch wichtige Verknüpfungen bei der Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie. Häufigeres Auftreten von Trockenperioden in den Sommermonaten lassen ebenfalls Feuchtgebiete und Moore verstärkt austrocknen, was sich wiederum auf deren Fähigkeit auswirkt, Starkregenereignisse zu puffern. Detaillierte Ausführungen zu weiteren Auswirkungen auf die Gewässerökologie werden in Abschnitt 3.2.1 beschrieben.

### **3.2.3 Anpassungskapazität**

Bei den Niedrigwasserkennwerten muss grundsätzlich beachtet werden, dass die Abflüsse im Niedrigwasserbereich sehr sensibel auf wasserwirtschaftliche Nutzungen am Gewässer reagieren (z. B. Einleitungen von Kläranlagen oder Entnahmen). Kurzfristige Reaktionen auf Niedrigwasserperioden sind meist nicht möglich, jedoch kann durch die Gestaltung der Nutzung so in das System eingegriffen werden, dass negative Auswirkungen verringert werden. Niedrigwasservorhersage- und Temperaturmodelle helfen rechtzeitig Nutzungseinschränkungen, wie beispielsweise Einschränkungen der Kühlwasserentnahme, einzuleiten, wenn kritische Werte erreicht werden.

Durch die vorhandenen Frühwarnsysteme sowie das Temperaturmanagement für Neckar und Rhein ist eine gute Basis vorhanden, um geeignete Anpassungsmaßnahmen für durch den Klimawandel veränderte Niedrigwasserverhältnisse zu schaffen.

### **3.2.4 Dringlichkeit**

Da die Pegelmessstellen in Baden-Württemberg nicht speziell für Niedrigwasser ausgelegt sind, ist zu beachten, dass die Messunsicherheit bei niedrigen Abflüssen und geringen Wassertiefen hoch sein kann. Die Überlagerung der Messunsicherheit mit den Effekten

anthropogener Einflüsse lässt nicht immer eine eindeutige Zuordnung der Auswirkungen zum Klimawandel zu. So ergibt die an zehn Pegel in Baden-Württemberg durchgeführte Auswertung der bisher gemessenen Datenreihen gegenläufige Ergebnisse zu den Prognosen aus den Klimaprojektionen.

Wie oben beschrieben kommt es durch Niedrigwasserperioden zu deutlichen Auswirkungen auf die Ökonomie, im Sinne von betriebs- (Wasserkraft, Binnenschifffahrt, Bewässerung) und volkswirtschaftlichen (Kühlwasserentnahme, Kohleversorgung) Einbußen der Nutzer sowie auf die Ökologie des Gewässers. Einige der Nutzungseinschränkungen können erhebliche Auswirkungen haben, wenn nicht im Voraus Anpassungsmaßnahmen und Managementstrategien geschaffen werden.

Somit besteht ein entsprechender Handlungsdruck für eine zeitnahe Entwicklung und Umsetzung von großräumigen und langfristigen Anpassungsmaßnahmen.

### **3.2.5 Gesamtbetrachtung der Vulnerabilität**

Aufgrund der Tatsache, dass Eingriffsmöglichkeiten bei Niedrigwasser kurzfristig eher gering sind, wird die Vulnerabilität bei einer hohen Exposition sowie hoher Sensitivität und potenziellen Auswirkungen als hoch eingestuft.

#### **Kernaussagen zum Schwerpunktthema Niedrigwasser**

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

- *Die Niedrigwasserabflüsse im Sommerhalbjahr werden auf der Grundlage der einbezogenen Klimaprojektion für den Zeitraum 2021 - 2050 in Baden-Württemberg flächendeckend weiter abnehmen (siehe Abbildung 32). Mit zunehmender Jährlichkeit bzw. abnehmender Auftretenswahrscheinlichkeit ist das Ausmaß der Abnahmen abgeschwächt.*
- *Infolge der Abnahme der Niedrigwasserabflüsse steigt auch die Dauer von Niedrigwasserperioden bezogen auf den heutigen Klimazustand erheblich an. Diese Tendenz ist bei mittleren Jährlichkeiten am stärksten ausgeprägt. Mit steigender Jährlichkeit zeigen die Simulationen weniger stark ausgeprägte Veränderungen.*

*Die bisherigen Auswertungen der vorhandenen Messdaten zeigen, dass*

- *bei den langen Zeitreihen von 1951 bis 2010 an ca. 70% der untersuchten Pegel in Baden-Württemberg eine Tendenz zu steigenden Niedrigwasserabflüssen vorhanden ist. Diese Tendenz ist in der Niedrigwasserperiode Juni bis November, d. h. in den Monaten mit den niedrigsten Abflüssen, weniger ausgeprägt.*

- *alle zehn untersuchten Pegel in Baden-Württemberg bei der Dauer der Niedrigwasserperioden bei den langen Zeitreihen ab 1951 abnehmende Trends aufweisen, die aber nicht signifikant sind [KLIWA 2011a].*

*Ferner ist zu beachten, dass*

- *Niedrigwasserperioden nicht zu vermeiden sind und dass sie stets großräumig auftreten. Somit stellen sie ein hohes volkswirtschaftliches Schadenspotenzial dar.*
- *kurzfristig kaum Reaktionen auf Niedrigwassersituationen möglich sind, d. h. es müssen langfristige Vorsorgekonzepte sowie nutzer- und regionaldifferenzierte Anpassungsmaßnahmen entwickelt werden [KLIWA 2009c].*

### **3.3 Gewässerökologie**

Klimaänderungen werden sich nicht nur auf die Wassermenge, sondern auch auf die Gewässerqualität auswirken. Im Rahmen von KLIWA wurden mit einer Literaturstudie Grundlagen für Untersuchungen über Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die Gewässerökologie geschaffen [Senckenberg 2010].

#### **3.3.1 Exposition**

Hoch- und Niedrigwassersituationen, Temperaturänderungen sowie Einwirkungen, die in der Wirkungskette weiter hinten eingereiht sind, haben einen großen Einfluss auf die Gewässerökologie. Bei der Betrachtung von Auswirkungen des Klimawandels ist jedoch zu beachten, dass Aussagen der Klimamodelle für Änderungen des Niederschlags und in Folge des Abflusses wesentlich unsicherer sind als z.B. für die Temperatur. Weitere davon abhängige Prozesse wie Sedimenttransport, Wasserqualität und Ökosystemfunktionen sind daher mit noch größerer Unsicherheit behaftet [LAWA 2010].

Klimatische Einflussgrößen, die das Abflussregime (Hoch- und Niedrigwasser) beeinflussen (siehe Abschnitte 3.1 und 3.2) wirken sich direkt auf die Gewässerökologie aus. Geringe Abflüsse in Folge von Trockenperioden haben einen entscheidenden Einfluss auf die Gewässerökologie. Hochwasserereignisse beeinflussen längerfristig die Morphologie sowie auch kurzfristig während eines Ereignisses die Habitateigenschaften. Neben den direkt das Abflussgeschehen beeinflussenden Veränderungen der Niederschläge ist die Änderung der Temperatur und der Globalstrahlung direkt für die Wassertemperatur relevant, indirekt besteht ein weiterer Einfluss auf die Gewässerökologie über eine Veränderung des Abflussregimes durch den Einfluss auf die Verdunstung.

Tabelle 5: Expositions Betrachtung für das Schwerpunktthema Gewässerökologie

KK	Veränderung KK	unmittelbar nachgelagerte Effekte (Exposition)
N	Abnahme der Sommerniederschläge	Verringerung der Abflüsse
	Zunahme der Anzahl der Trockentage	Zunahme der Länge und Anzahl der Trockenperioden
T	Temperaturzunahme im Sommer	Zunahme der Wassertemperatur
GS	Erhöhung	Zunahme der Wassertemperatur, Eutrophierungsaspekt

KK: Klimatische Kenngröße (N: Niederschlag, T: Temperatur, GS: Globalstrahlung, W: Wind)

### 3.3.2 Sensitivität und potenzielle Auswirkungen

Grundsätzlich kann der Abflussvorgang in einem Fließgewässer als eine Gewässerhauptfunktion angesehen werden [Benndorf 1986]. Die „Komplexität des Nahrungsnetzes“ und damit auch die Besiedlungsstruktur von Fließgewässern können je nach den vorhandenen Randbedingungen positiv oder negativ mit Abflussereignissen gekoppelt sein [Benndorf 1986]. In kleinen Fließgewässern wurde der Einfluss von Niedrigwasser auf die Besiedlung bereits intensiv untersucht. Diese Untersuchungen haben gezeigt, dass Störungen, auch anscheinend „katastrophale“ Ereignisse wie Hochwasser oder extreme Niedrigwasserlagen, ein charakteristischer und wichtiger Bestandteil von Fließgewässerökosystemen sind. Sie nehmen Einfluss auf die Populationsstruktur und Artenzahl (Biodiversität) und öffnen immer wieder neue Besiedlungslücken in der Lebensgemeinschaft. Veränderungen in der Abflussdynamik können daher einen erheblichen Einfluss auf die Lebensgemeinschaft der Makroinvertebraten haben [Koop et al. 2005].

Die Wassertemperatur ist neben der Strömung der ökologisch wirksamste Faktor, der die Fließgewässerlebensgemeinschaft maßgeblich bestimmt. So werden Wachstum, Entwicklungszeiten, Nahrungszusammensetzung und –angebot und vieles mehr von der Wassertemperatur mitbestimmt. Das Temperaturregime eines Fließgewässers ist ein komplexes Geschehen, das nicht nur eine tages- und jahreszeitliche Periodik, sondern auch eine Änderung im Längsverlauf aufweist [LfU 2004]. So nimmt die Löslichkeit von Sauerstoff im Wasser mit steigender Temperatur ab, der Sättigungswert sinkt. Bereits aus physikalischen Gründen ist daher bei höheren Temperaturen weniger Sauerstoff im Gewässer verfügbar. Darüber hinaus nimmt gleichzeitig die Sauerstoffzehrung durch Mikroorganismen mit steigender Temperatur zu. Extreme sommerliche Niedrigwasser führen, wenn gleichzeitig deutlich erhöhte Temperaturen auftreten, zu einer Intensivierung des Stoffwechsels von Organismen und daher auch des Stoffhaushaltes in Gewässern. Für die aquatische Lebensgemeinschaft ist neben den Spitzentemperaturen an sich die Einwirkdauer hoher Temperaturen ein besonderer Stressfaktor [Koop et al. 2005].

Die Bewertung, welche Klimaveränderungen welche ökologischen Auswirkungen hervorrufen, gestaltet sich aufgrund der komplexen Wirkungsketten sehr schwierig. Zu den einzelnen Wirkfaktoren wie Änderungen im Hoch- oder Niedrigwassergeschehen und der Temperatur werden Abschätzungen gegeben. Durch die gegenseitige Beeinflussung und ggf. auch noch zeitliche Verschiebung der Einwirkungsgrößen ist eine gesamthafte Beurteilung der Änderungen in der ökologischen Situation sehr schwierig und mit großen Unsicherheiten behaftet.

Die Konkretisierung dieses Wissens ist jedoch auch im Zusammenhang mit der Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) von Bedeutung, da derzeit Maßnahmenpläne entwickelt und in den nächsten Jahren umgesetzt werden. Es ist davon auszugehen, dass insbesondere Gewässer, die bereits jetzt eine nicht ausreichende Gewässerqualität aufweisen, durch die zu erwartenden klimatischen Veränderungen am meisten zusätzlich gestresst werden. Vor allem Gewässer mit angespannten Sauerstoffverhältnissen (Gewässer der Niederungen mit hohem Belastungsdruck, stärker eutrophierte Gewässer, morphologisch verarmte Gewässer etc.) sind davon besonders betroffen.

Grundsätzlich ist festzustellen, je mehr eine Maßnahme dazu beiträgt ein Gewässer in seiner Struktur und Dynamik (Abfluss, Morphologie) dem natürlichen Zustand nahe zu bringen, umso mehr ist zu erwarten, dass das Gewässer Auswirkungen aus klimatischen Veränderungen besser ausgleichen kann.

Beispielsweise bietet eine reichhaltige morphologische Struktur immer auch bei niedrigeren Abflüssen Bereiche in denen ausreichend Wassertiefe vorhanden ist und lokale Fließgeschwindigkeitsunterschiede vorherrschen, um aquatischen Lebewesen zumindest temporär ein Überleben zu sichern. Ausreichend Beschattung durch Ufervegetation wirkt sich positiv auf die Temperaturentwicklung aus und bietet gleichzeitig Schutz vor Räubern, für die z.B. gestresste Fische ggf. eine leichte Beute sind. Eine genaue Einschätzung der Puffermöglichkeit eines Gewässers in Abhängigkeit von der Verlängerung der Niedrigwasserdauer und der Ausgestaltung der jeweiligen Maßnahme ist mit den vorhandenen Information nicht möglich sollte aber im Rahmen von Forschungsprojekten näher untersucht werden.

Bei der Maßnahmenplanung sollten deswegen die einzelnen Maßnahmen immer im Zusammenhang mit der spezifischen lokalen Situation, die Robustheit gegenüber einer zukünftigen Klimaänderung abgeschätzt werden.

Der Schwerpunkt bei der Bewertung des ökologischen Zustands der Gewässer liegt auf der Untersuchung der aquatischen Lebensgemeinschaften. Eine Bewertung klimawandelbedingter Veränderungen kann auf Grundlage des Vergleiches des Status quo mit einem gewässertypspezifischen Referenzzustand erfolgen.

Im Rahmen des KLIWA-Teilbereiches "Klimawandel und Gewässerqualität" wurden auf der Grundlage einer Literaturrecherche großmaßstäbliche Wirkungszusammenhänge zwischen Klimawandel und Fließgewässerqualität rationalisiert und konkretisiert. Für den Untersuchungsraum relevante Ergänzungen auf Seiten der abiotischen Parameter betreffen die Punkte Abflussregime, Schneeschmelze / -decke und Verdunstung. Es ist zu kurz gegriffen, Auswirkungen des Klimawandels nur auf einzelne Arten zu beziehen; vielmehr müssten biotische Interaktionen wie z.B. Nahrungsnetze, Verschiebungen in den Nahrungsnetzen oder Match-Mismatch-Phänomene berücksichtigt werden. Die Relevanz dieser Punkte ist unstrittig, doch da sie in der Literatur kaum angesprochen sind, wurden sie noch nicht in die Wirkungsketten mit aufgenommen. Die Ergebnisse der Literaturstudie zeigen, dass die Gewässerqualität als wasserwirtschaftliche Größe durch die prognostizierten Temperatur- und Niederschlagsveränderungen unmittelbar und mittelbar beeinflusst wird. Jedoch erlaubt die ausgewertete Literatur nicht die Ableitung von Szenarien, nach denen die Veränderungen konkret abgeschätzt werden können [Senckenberg 2010]. Bestimmte Lebensgemeinschaften sind durch klimatische Veränderungen besonders gefährdet, z.B. Biozönosen mit einem hohen Anteil von Taxa mit kleinräumiger Verbreitung, Kaltstenothermie oder Lebewesen mit einer Präferenz für Quellregionen, wie z.B. die Quellschnecke oder der Lachs und die Bachforelle [Hering et al. 2007]. Es ist erkennbar, dass klimatische Veränderungen Auswirkungen auf den ökologischen Zustand von Fließgewässern haben, jedoch ist eine genaue Quantifizierung, z.B. der Änderung der Artenzusammensetzung und –dichte oder auch deren räumlichen Verteilung noch nicht untersucht [Senckenberg 2010].

### **3.3.2.1 Verschiebung aquatischer Lebensräume**

Einige aquatische Lebensräume werden sich infolge des Klimawandels in ihrer räumlichen Ausdehnung verschieben oder verkleinern. Bereits kurzzeitige Extremtemperaturen, die zu physiologischem Stress und erhöhten Stoffwechselraten führen, können sich negativ auf Fischpopulationen auswirken. Dabei zeigen sowohl die erhöhte Wassertemperatur an sich, als auch die durch steigende Temperaturen verringerte Konzentration an gelöstem Sauerstoff Auswirkungen. Aber nicht nur Fische sind betroffen, auch Phytoplankton, Makrozoobenthos etc. reagieren auf steigende Temperaturen. Weitere direkte Reaktionen auf ansteigende Wassertemperaturen und deren Folgen können die Verschiebung von Wander- und Laichzeiten, Abwanderung von gewässerspezifischen Arten oder Störungen in der Nahrungskette sein [LAWA 2010]. Als Folge ist eine Verschiebung der Lebensgemeinschaften entlang des Fließgewässersverlaufes zu erwarten, mit der Gefahr der „Gipfelfalle“ für kaltstenotherme Organismen [Cordellier 2009, Lorenz & Graf 2008].

Fischarten sowie andere aquatische Organismen zeigen natürlicherweise unterschiedliche Verbreitungsschwerpunkte im Längsverlauf der Fließgewässer. Diese werden im Allgemeinen durch Fischregionen charakterisiert. Die mittlere Präferenz einer Art für eine bestimmte Fließgewässerregion wird z.B. durch den artspezifischen Fischregionsindex (FRI) beschrieben [Schmutz et al. 2004]. Bei einer Zunahme der jahresdurchschnittlichen Temperatur um  $0,8^{\circ}\text{C}$  (bis 2050) würde sich der  $\text{FRI}_{\text{ges}}$  im Mittel um  $+0,5$  Regionen verschieben, bei einer Zunahme um  $2,3^{\circ}\text{C}$  (bis 2100) um  $+1,4$  Regionen. Bei diesem Ansatz zur Abschätzung der Vulnerabilität bezüglich der Fische ist zu beachten, dass hier nur die Veränderung der Wassertemperatur betrachtet wird. Andere Faktoren wie Abfluss, Strömungsverhältnisse, Physikochemie und Morphologie werden außer Acht gelassen. In Hinblick auf eine Projektion der Ergebnisse auf die realen Gegebenheiten muss demnach bedacht werden, dass komplexe Beziehungen zwischen der Fischgemeinschaft und der Vielzahl an Umweltparametern bestehen, und dass der  $\text{FRI}_{\text{ges}}$  nicht nur monokausal auf die Wassertemperatur bezogen werden kann [Senckenberg 2010]. Abbildung 34 zeigt schematisch, wie sich die Fischregionen temperaturbedingt in Richtung Quelle verschieben. Durch diese Verschiebung kommt es zu einer Verdrängung von Arten, die quellnähere Habitate bevorzugen. Insbesondere für Arten der oberen Forellenregion dürfte es hier zu einem Verlust von Lebensraum kommen. Da wie oben beschrieben die Fischzonierung nicht monokausal von der Temperatur abhängt, kann es auch in allen Gewässerabschnitten zu einem Verlust an Lebensraum kommen, da die geeignete Kombination von Habitatparametern für die jeweiligen Arten nicht mehr vorhanden ist.

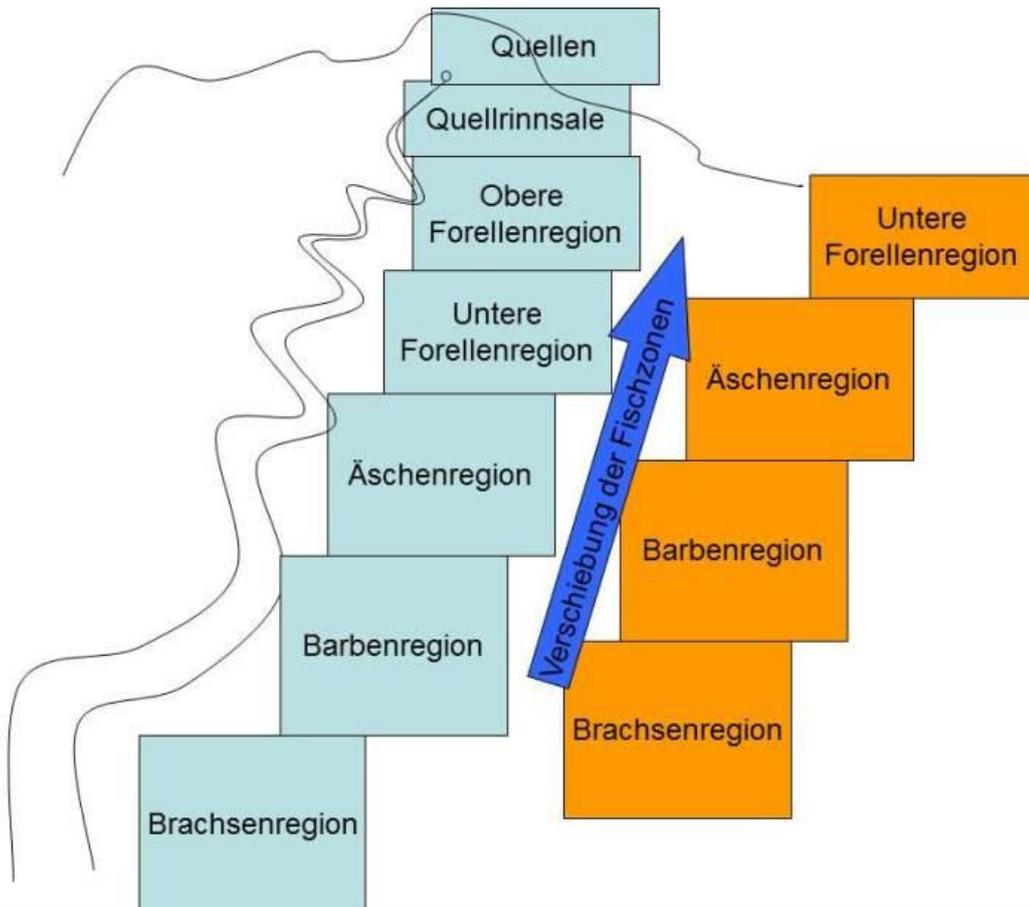


Abbildung 34: Schematische Darstellung der klimawandelbedingten Verschiebung von Fischregionen innerhalb eines Fließgewässers in Richtung Quelle

### 3.3.2.2 Wirkungsketten in verschiedenen Gewässertypen und -zonen

Aus der Literatur lassen sich keine fließgewässertypspezifischen Wirkungsketten extrahieren. Es lassen sich jedoch für Gruppen von Fließgewässertypen bestimmte Faktorengruppen beschreiben, die eine Erarbeitung von Wirkungsketten in Bezug auf die längszonale Lage (Ober-, Mittel-, Unterlauf) zulässt [Senckenberg 2010]. In den Oberläufen der Gewässer (z.B. Fließgewässertyp 5: Grobmaterialreiche, silikatische Mittelgebirgsbäche oder Fließgewässertyp 5.1: Bäche der Kalkalpen) haben die mit der Lufttemperatur verbundenen Verdunstungsprozesse sowie saisonale Veränderungen des Temperatur- und Wasserhaushaltes einen großen Einfluss. Der prognostizierte Anstieg der Wassertemperatur wirkt sich durch die relativ hohen Fließgeschwindigkeiten nur gering auf den Sauerstoffhaushalt aus. In den Oberläufen stellt das Abflussregime (nival oder pluvial) eine entscheidende Steuergröße dar. Insbesondere für nival geprägte Abflussregime ist die zeitliche Verschiebung der Schneeschmelze bedeutsam, da Schneelagen das Abflussgeschehen puffern. Tritt die Schneeschmelze früher ein oder bildet sich im Winter keine Schneedecke, so kann eine frühzeitige, längere Erwärmung des Gewässers die Folge sein. Negative Auswirkungen auf Mikrohabitate, Interstitial und Sedimenteintrag sind bei regional veränderten Niederschlags- und Abflussbedingungen möglich [Senckenberg 2010].

Zu den Mittelläufen (z.B. Fließgewässertyp 9: Silikatische, fein- bis grobmaterialreiche Mittelgebirgsflüsse) sind die wenigsten Informationen in der Literatur verfügbar. Aufgrund häufig intensiver Landnutzung im Einzugsgebiet spielt die Gewässereutrophierung eine Rolle, die sich auf Grund des Klimawandels durch vermehrte Extremereignisse (Niederschlag, Abfluss) und nachfolgende Erosions- und Abschwemmungsprozesse noch weiter verstärken dürfte. Gewässer im Alpenvorland werden vom veränderten Abflussregime (nival → pluvial) betroffen sein, verbunden mit höheren Winterabflüssen, höheren Sedimenttransportraten und geringeren Abflüssen im Sommer sowie höheren Temperaturen. Höhere Temperaturen könnten auch die Etablierung von Neozoen weiter begünstigen, die bisher eher in den mündungsnahen Bereichen vorkommen. Außerdem können sie sich zu einer thermischen Barriere für wandernde Fischarten (z.B. Lachs, Meerforelle, Maifisch) entwickeln. Der Klimawandel dürfte im Mittellauf bei den Fischen besonders deutliche Auswirkungen zeigen, indem in den Bereichen des Hyporhithrals / Epipotamals (sommerkühl / leicht sommerwarm) die Lebensräume für kaltstenotherme Arten verschwinden und nur noch Bedingungen für eurytherme Arten verbleiben. Bzgl. der faunistischen Artenzusammensetzung profitieren von der zunehmenden Eutrophierung vor allem die Makrophyten (bis hin zu starker Verkrautung), wobei hiermit häufig eine Abnahme der ökologischen Gewässerqualität verbunden ist [Senckenberg 2010].

Bedingt durch die vielfältig wirkenden Faktoren und Nutzungen in großen Einzugsgebieten stellen sich die Wirkungsbeziehungen in den Unterläufen der Fließgewässer komplexer dar als in den Ober- und Mittelläufen. Eindeutige Reaktionen in eine Richtung (Verstärkung/Abschwächung) können oft nicht abgeleitet werden, da bei Untersuchungen häufig gegensätzliche Phänomene beobachtet werden. Häufig treten nutzungsbedingte Effekte in den Vordergrund. Direkte Effekte des Klimawandels, wie z. B. Temperaturerhöhungen treten in ihrer Bedeutung hinter komplexe Phänomene zurück, die durch aktuelle „Startbedingungen“ (z.B. Stoffkonzentration) und deren Saisonalitäten, eine stärkere Vernetzung im Fluss-Auen-Gefüge oder anthropogene Nutzung gesteuert werden. Im Gegensatz zu den Ober- und Mittelläufen ist vor allem in staugeregelten Abschnitten der mögliche Sauerstoffmangel ein wichtiger Faktor. In den Unterläufen sind in größerem Maße die pflanzlichen Biokomponenten durch klimatische Veränderungen betroffen, z.B. durch intensivere Strahlungseinwirkung und Stoffeinträge. Die Verschiebung des Zeitpunktes von Hochwasserabflüssen hat erheblichen Einfluss auf das Makrophytenwachstum [Senckenberg 2010].

### **3.3.2.3 Fische**

In der verfügbaren Literatur wird überwiegend über zu erwartende negative Effekte des Klimawandels bzw. indirekter Einflüsse auf die Biokomponente Fische berichtet. Es wird ein

vermehrtes Fischsterben als Folge von höheren Wassertemperaturen [Reinartz et al. 2007] und Trockenperioden sowie ein vermehrtes Auftreten von Krankheiten (z.B. proliferative Nierenkrankheit bei Bachforellen [Burkhardt-Holm 2009] und die Rotaalseuche [IKSR 2004]) beschrieben. Gut belegt ist die generelle Reduktion von kaltstenothermen Arten [Buisson et al. 2008, Mehlig und Rosenbaum-Mertens 2008], wohingegen Warmwasserarten und tolerante Arten die Fähigkeit neue geeignete Abschnitte kolonisieren zu können zugesprochen wird, d.h. südliche, thermophile Fischarten könnten vom Klimawandel profitieren. Auf Basis der in Kapitel 2 beschriebenen Veränderungen der Klimafaktoren wird es auch zukünftig bis zum Jahr 2100 mit einer längszonalen Verschiebung der Fischregionen in Quellrichtung zu rechnen sein. Dies führt zu Konkurrenz mit dort vorhandenen Kaltwasserarten [Senckenberg 2010].

In Niedrigwasserperioden sind teilweise die Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten für einige Fischarten zu gering. Ein niedriger Sauerstoffgehalt infolge höherer Temperaturen kann ebenso wie die Wassertemperatur an sich, als primärer Faktor für Fischsterben betrachtet werden. Teilweise kann hier direkt der physiologische Stress als Ursache gesehen werden, teilweise auch indirekt die hierdurch verursachte erhöhte Anfälligkeit gegen Krankheiten.

Durch Extremereignisse eingetragene Feinsedimente wirken sich negativ auf Fischhabitate aus. Insbesondere die Ausbildung von Deckschichten sowie die Kolmation der Gewässersohle beeinträchtigen die Reproduktion von kieslaichenden Fischarten in dem betroffenen Gewässerabschnitt [Noack et al. 2008].

#### **3.3.2.4 Makrozoobenthos**

Die Zusammensetzung der Makrozoobenthos-Arten wird entscheidend von der Wassertemperatur, der Nährstoffverfügbarkeit, Sauerstoffgehalt sowie der Fließgeschwindigkeit beeinflusst. Entscheidend für die Auswirkungen ist insbesondere auch die jahreszeitliche Temperatur- und Abflussverteilung. Es ist jedoch zu beachten, dass die Gewässerbettmorphologie teilweise einen größeren Einfluss auf die Habitateignung hat, als der Abfluss [Giesecke et al. 1999]. Hinsichtlich der Klimaauswirkungen auf das Makrozoobenthos werden kleinere Gewässer als besonders gefährdet eingeschätzt, besonders in Regionen mit geringem Niederschlag, wenn Austrocknungsgefahr besteht [Senckenberg 2010]. Wenn hier zusätzlich eine Nutzung durch Ausleitungskraftwerke vorliegt, ist die Gefährdung noch deutlich größer.

Veränderungen der Längsausbreitung von Makrozoobenthosarten im Fließgewässerverlauf infolge der Aufwärtswanderung von eher wärmeliebenden Arten aus den Abschnitten der Gewässermittelläufe sind wahrscheinlich. Tatsächlich nimmt in den untersuchten Referenzbächen der Anteil der kälteliebenden Bacharten zugunsten wärmeliebender

Flussarten ab. Die auch mittels Zonierungsabfolge im Fließgewässerlängsverlauf und den Temperaturpräferenzen der Gewässerorganismen aufgezeigten biologischen Veränderungen korrespondieren vergleichsweise gut mit den Veränderungen der Lufttemperatur in Baden-Württemberg, weniger mit den sehr unterschiedlichen regionalen Verteilungen der Änderungen der Wassertemperatur in Fließgewässern. [Marten 2011]

### **3.3.2.5 Phytoplankton und Makrophyten**

Bei einer Trockenperiode, wie z.B. im Sommer 2003 und einer damit einhergehenden Zunahme der Wassertemperatur wurde eine starke Zunahme sowohl des Phytoplanktons als auch der Makrophyten beobachtet [BfG 2006]. Vor allem Diatomeen vermehrten sich stark. Weitere Nebeneffekte waren eine „biogene Entkalkung“ und Schaumbildung durch den sich stark ändernden Sauerstoffhaushalt im Gewässer. Neben der Verkrautung der Gewässer muss auch von einer starken Zunahme von Blaualgen ausgegangen werden [IKSR 2004]. Für die Biokomponente Makrophyten / Phytobenthos haben weniger der direkte Einfluss sich ändernder Wassertemperaturen, als vielmehr indirekte Einflüsse wie Morphologie, Hydrologie und Landnutzung (Nährstoffeinträge) einen hohen Erklärungsanteil an einer sich verändernden Gemeinschaft. Als weitere, stark strukturierende Faktoren werden das Abflussgeschehen und der damit verbundene Geschiebetransport angesehen. Vor allem bei Hochwasser wird in erhöhtem Maße Sediment bewegt, was sich sowohl auf das Phytobenthos als auch auf Makrophyten negativ auswirkt [Ibisch 2004, Sailer 2005]. Generell kann jedoch unter verschiedenen Szenarien von unterschiedlichen Reaktionen der Makrophyten und des Phytobenthos auf den Klimawandel ausgegangen werden, wobei sich positive und negative Auswirkungen in etwa die Waage halten dürften [Senckenberg 2010].

### **3.3.2.6 Neobiota und Krankheiten**

Indirekte Wirkungen ergeben sich aus einer höheren Anfälligkeit bestimmter Arten gegenüber Krankheiten und Parasiten sowie der Einwanderung und Förderung von nicht heimischen Tieren (Neozoen) und Pflanzen (Neophyten) [LAWA 2010].

Als Neobiota werden Arten bezeichnet, die nachweislich nach 1492 (Entdeckung der „Neuen Welt“) unter direkter oder indirekter Mitwirkung des Menschen in ein bestimmtes Gebiet gelangt sind, in dem sie vorher nicht heimisch waren, und dort neue Populationen aufgebaut haben. Vor allem in den letzten zwei Jahrzehnten wanderten viele Arten ein. Dies ist vor allem auf die Vernetzung verschiedener Flusssysteme und den zunehmenden Schiffsverkehr, global und bundesweit, zurückzuführen [Senckenberg 2010].

Eine Zusammenstellung bereits eingewanderter Neozoen und Neophyten sowie „Anwärter“, die mit dem Klimawandel in Zusammenhang stehen, wurde von der Senckenberg Gesellschaft [2010] im Rahmen einer Studie für KLIWA erstellt. Viele invasive Neobiota

zeichnen sich durch eine schnelle Reproduktionszeit und große Toleranz gegenüber Temperatur, Eutrophierung und Versalzung aus, was sie besonders konkurrenzstark gegenüber indigenen Arten macht. Daraus lässt sich schließen, dass diese Arten gegenüber direkten und indirekten Einflüssen des Klimawandels resistenter sein könnten. Auch indigene (einheimisch) euryöke (vertragen relativ weite Schwankungen der für sie wichtigen Umweltfaktoren) Arten würden in diesem Fall von den Auswirkungen des Klimawandels profitieren, wohingegen sich die Zahl stenöker (vertragen nur geringe Schwankungen der für sie relevanten Umweltfaktoren) Arten (wie z.B. viele aquatische Insekten) verringern würde [Senckenberg 2010].

### **3.3.2.7 Auswaschungen und Sedimenteintrag in Gewässer**

Bei künftig vermehrten Starkregenereignissen werden besonders die erosionsanfälligen Böden verstärkt zu einem Eintrag von Bodenmaterial sowie Nähr- und Schadstoffen in Gewässer und andere Ökosysteme beitragen. Hier sind diejenigen Gebiete betroffen, die schon jetzt erosionsanfällig sind. Dazu gehören insbesondere Teile Nordbadens wie der Kraichgau oder das mittlere und südöstliche Oberrhein-Tiefland [Gündra et al. 1995]. Im Kraichgau wurden bei früheren Untersuchungen Bodenverluste von über 80 Tonnen pro Hektar und Jahr gemessen. Ob dort künftig vermehrt Starkniederschläge auftreten und damit die Erosionsgefahr weiter zunimmt, ist Gegenstand laufender Forschungsarbeiten [UM und LUBW 2012]. Die durchschnittlichen Anteile von Nährstoffeinträgen in die Gewässer über Auswaschungen und Sedimenteinträge in Baden-Württemberg betragen im Jahr 2002 [LUBW 2008]:

- 2,6 % des Stickstoffeintrags durch Erosion,
- 5 % des Stickstoffeintrags durch Abschwemmungen,
- 15,3 % der Phosphoreintrags durch Erosion,
- 23,9 % des Phosphoreintrags durch Abschwemmungen.

Dies zeigt, dass Erosion und Auswaschungen einen deutlichen Anteil am Gesamteintrag an Nährstoffen in Gewässern haben. Wie aus Abbildung 35 und Abbildung 36 zu erkennen ist, ist die Vulnerabilität des Bodens gegenüber Auswaschungen und Bodenerosion in den verschiedenen landschaftsökologischen Regionen unterschiedlich hoch (Farbe rot = hoch, Farbe orange = mittel, Farbe gelb = gering) [Bodengut, Institut für Bodenkunde und Standortslehre der Universität Hohenheim 2013]. Da eine starke Abhängigkeit von der jeweiligen Landnutzung besteht, sollten Anpassungsmaßnahmen auf der Fläche in den Bereichen Land- und Forstwirtschaft durchgeführt werden. Insbesondere für kieslaichende Fischarten und benthische Organismen sind Feinsedimenteinträge von Bedeutung, da durch Kolmation das Laichhabitatangebot und der interstitiale Lebensraum stark verringert werden kann.

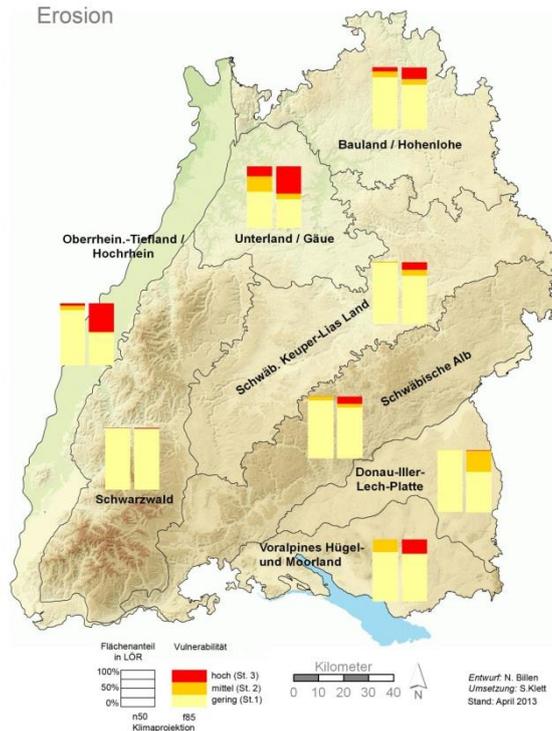


Abbildung 35: Vulnerabilität von Böden durch Erosion bei aktueller Landnutzung gegenüber Klimawandel in den landschaftsökologischen Regionen Baden-Württembergs und größermaßstäbiger Landschaftsausschnitt (Geobasisdaten © LUBW, LGL, [www.lgl-bw.de](http://www.lgl-bw.de), Az: 2851.9-1/19) [Quelle: Bodengut, Institut für Bodenkunde und Standortslehre der Universität Hohenheim 2013].

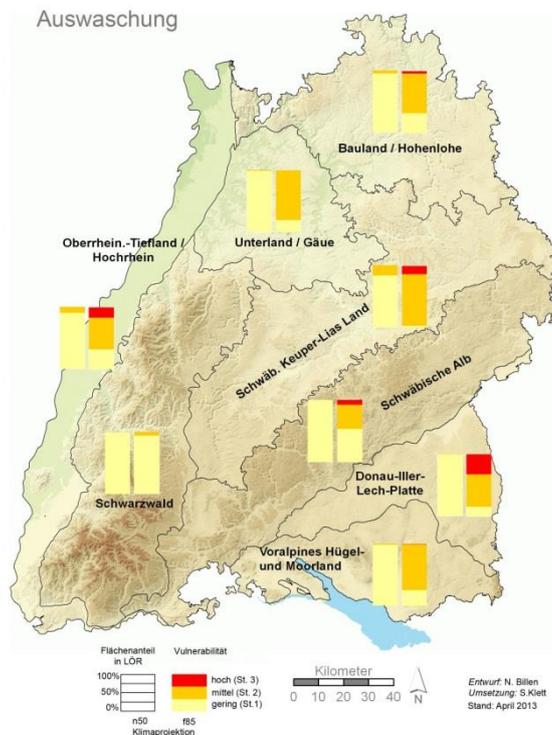


Abbildung 36: Vulnerabilität von Böden durch Auswaschung bei aktueller Landnutzung gegenüber Klimawandel in den landschaftsökologischen Regionen Baden-Württembergs, n85 ist mit Ausnahme von Schwäbische Alb/Baar vergleichbar, (Geobasisdaten © LUBW, LGL, [www.lgl-bw.de](http://www.lgl-bw.de), Az: 2851.9-1/19) [Quelle: Bodengut, Institut für Bodenkunde und Standortslehre der Universität Hohenheim 2013].

### **3.3.2.8 Stehende Gewässer**

Bei stehenden Gewässern und größeren Wasserflächen sind die Auswirkungen der aufgrund des Klimawandels steigenden Temperaturen und der dadurch intensivierten Verdunstung ebenfalls groß, was z.B. zur Verlandung bzw. Austrocknung von kleinen Gewässern führen kann [LAWA 2010].

### **3.3.3 Anpassungskapazität**

Intakte Ökosysteme verfügen über ein gewisses natürliches Potential, sich an ändernde Verhältnisse anzupassen. Dabei entstehen neue Gleichgewichte und somit ein neues System, das an die neuen Bedingungen adaptiert ist. Dieses entstehende neue Gleichgewicht muss aber nicht zwangsläufig dem ursprünglich natürlichen System entsprechen. Kommt es zu großen Veränderungen wird die Anpassungskapazität eines Gewässers überschritten und es entsteht ein komplett anderes System, das zumeist als weniger guter ökologischer Zustand einzustufen ist. Das Ziel der Erreichung eines guten ökologischen Zustands aus der EU-WRRL beruht auf dem Vergleich mit einem sehr guten Zustand (des ursprünglich vorhandenen natürlichen Systems).

Aktuell werden Maßnahmen zur Wiederherstellung eines guten ökologischen Zustandes geplant und durchgeführt. Dies kann die Anpassungskapazität der Gewässer an Auswirkungen des Klimawandels verbessern. Insbesondere Maßnahmen zur Verbesserung der Sauerstoffverhältnisse (inkl. Sekundärbelastung durch Eutrophierung) als auch Maßnahmen zur Verbesserung der Gewässerstruktur tragen zur Verbesserung der Resilienz bei.

Die Anpassungskapazität sowie die Resilienz gegenüber Extremereignissen sind umso größer, je besser der ökologische Zustand eines Gewässersystems und dessen Habitate sind. Betrachtet man jedoch nur einzelne Arten oder bestimmte Populationssysteme, ist die Möglichkeit zu einer Anpassung eher als gering einzustufen, da jede Art oft sehr spezifische Habitatbedingungen benötigt. Bei einer Änderung der Habitatbedingungen können einige Arten evtl. in andere Gebiete (beispielsweise weiter oberstrom) ausweichen, andere Arten werden verdrängt oder können sich nicht an die neuen Bedingungen anpassen.

### **3.3.4 Dringlichkeit**

Durch WHG, WG und OGewV wurden die Umweltziele der EU-Wasserrahmenrichtlinie für Oberflächengewässer und das Grundwasser in nationales Recht übernommen. Ziele sind der Schutz der Gewässer, die Vermeidung einer Verschlechterung sowie der Schutz und die Verbesserung des Zustands der direkt von den Gewässern abhängenden Landökosysteme und Feuchtgebiete im Hinblick auf deren Wasserhaushalt. Bis zum Jahr 2015 (bzw. mit

Verlängerung bis spätestens 2027) müssen die Umweltziele der WRRL erreicht sein. Nach § 27 WHG müssen Oberflächengewässer dementsprechend bewirtschaftet werden.

Der gute Zustand ist definiert als ein Zustand, der von einem "sehr guten" (d. h. weitgehend anthropogen unbeeinflussten) Zustand nur geringfügig abweicht. Der "gute ökologische Zustand" der Oberflächengewässer ist in erster Linie auf die Vielfaltigkeit vorhandener Pflanzen- und Tierarten ausgerichtet. Für den zweiten und dritten Bewirtschaftungszyklus nach der WRRL wird eine Abschätzung der Folgen des Klimawandels und ihrer Auswirkungen auf Maßnahmenebene gefordert (Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive).

Weiterhin ist zu beachten, dass auch schon der bisher stattgefundene Klimawandel Auswirkungen auf die Gewässerökologie zeigt und dass von einer Verschärfung der Problematik auszugehen ist. Die oben beschriebenen Auswirkungen zeigen deutlich, dass für die Erhaltung und Wiederherstellung eines guten ökologischen Zustands der Gewässer im Rahmen der Anpassung an den Klimawandel ein dringender Handlungsdruck besteht.

### **3.3.5 Gesamtbetrachtung der Vulnerabilität**

Die Anpassungskapazität der Gewässerökologie ist stark von dem aktuell vorhandenen ökologischen Zustand eines Gewässers abhängig. Je naturnäher ein Gewässer ist, umso besser ist es in der Lage Einflüsse aus klimatischen Änderungen zu „puffern“. Dies betrifft insbesondere Auswirkungen, die durch Gewässerstrukturen oder dynamische Prozesse ausgeglichen werden können. Da einige Einflussfaktoren, wie z.B. Temperatur, Sauerstoffgehalt sich sowohl direkt (Veränderung der physikalischen und chemischen Eigenschaften) als auch indirekt (Verschiebung der Artengemeinschaft, Veränderung der Nahrungsgrundlage) auf die Habitatbedingungen auswirken, ist die Vulnerabilität der Gewässerökologie gegenüber Klimaveränderungen als hoch einzustufen.

### **Kernaussagen zum Schwerpunktthema Gewässerökologie**

- *Hoch- und Niedrigwassersituationen, Temperaturänderungen sowie Einwirkungen, die in der Wirkungskette weiter hinten eingereicht sind, haben einen großen Einfluss auf die Gewässerökologie.*
- *Die Bewertung, welche Klimaveränderungen welche ökologischen Auswirkungen hervorrufen, gestaltet sich aufgrund der komplexen Wirkungsketten sehr schwierig*
- *Die Wassertemperatur ist neben der Strömung der ökologisch wirksamste Faktor, der die Fließgewässerlebensgemeinschaft maßgeblich bestimmt.*
- *Je näher ein Gewässer in seiner Struktur und Dynamik (Abfluss, Morphologie) dem natürlichen Zustand ist oder kommt umso mehr ist zu erwarten, dass das Gewässer Auswirkungen aus klimatischen Veränderungen besser ausgleichen kann.*
- *Die Anpassungskapazität sowie die Resilienz gegenüber Extremereignissen sind umso größer, je besser der ökologische Zustand eines Gewässersystems und dessen Habitate sind.*
- *Einige aquatische Lebensräume werden sich infolge des Klimawandels in ihrer räumlichen Ausdehnung verschieben oder verkleinern.*
- *In der verfügbaren Literatur wird überwiegend über zu erwartende negative Effekte des Klimawandels bzw. indirekter Einflüsse auf die Biokomponente Fische berichtet.*
- *Hinsichtlich der Klimaauswirkungen auf das Makrozoobenthos werden kleinere Gewässer als besonders gefährdet eingeschätzt, besonders in Regionen mit geringem Niederschlag, wenn Austrocknungsgefahr besteht [Senckenberg 2010]. Wenn hier zusätzlich eine Nutzung durch Ausleitungskraftwerke vorliegt, ist die Gefährdung noch deutlich größer.*
- *Bei Makrophyten und des Phytobenthos kann von unterschiedlichen Reaktionen auf den Klimawandel ausgegangen werden, wobei sich positive und negative Auswirkungen in etwa die Waage halten dürften [Senckenberg 2010].*
- *Indirekte Wirkungen ergeben sich aus einer höheren Anfälligkeit bestimmter Arten gegenüber Krankheiten und Parasiten sowie der Einwanderung und Förderung von nicht heimischen Tieren (Neozoen) und Pflanzen (Neophyten) [LAWA 2010].*
- *Bei künftig vermehrten Starkregenereignissen werden besonders die erosionsanfälligen Böden verstärkt zu einem Eintrag von Bodenmaterial sowie Nähr- und Schadstoffen in Gewässer und andere Ökosysteme beitragen.*

### 3.4 Siedlungsentwässerung

Unter dem Begriff „Siedlungsentwässerung“ werden im Rahmen dieses Gutachtens Sammlung, Transport, Behandlung und Einleitung von Schmutz- und Niederschlagswasser zusammengefasst (siehe Abbildung 37).

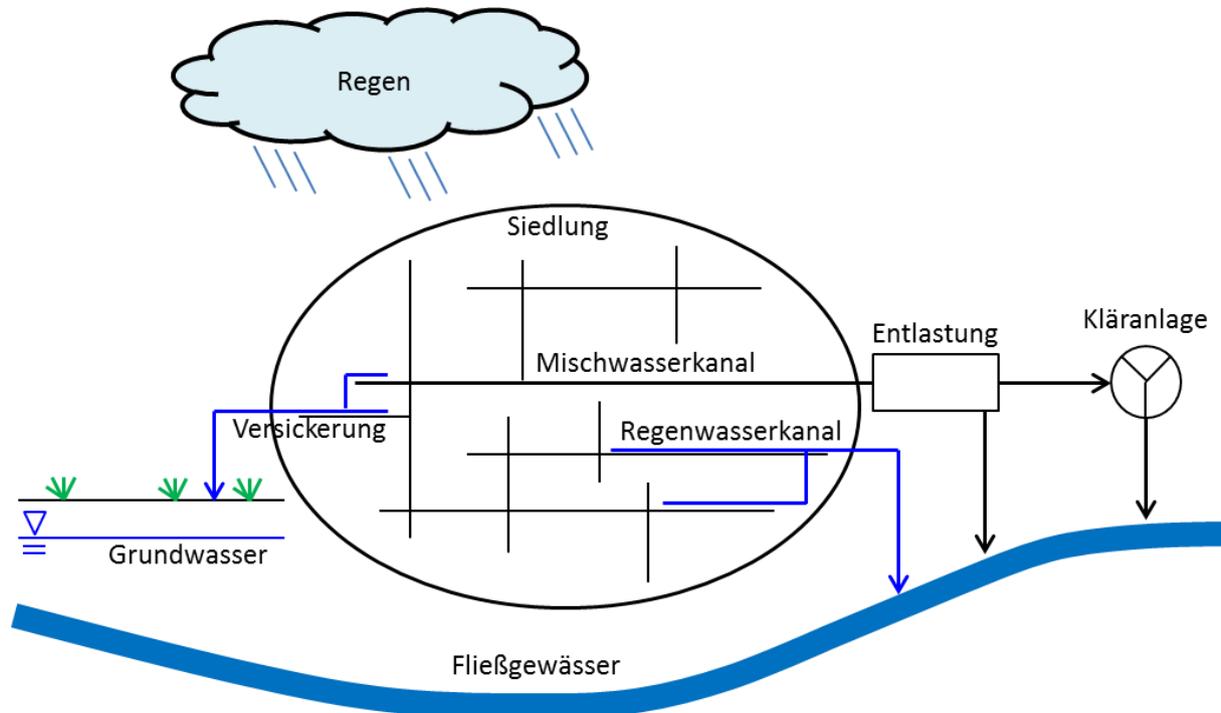


Abbildung 37: Siedlungsentwässerung als Bestandteil der Siedlungswasserwirtschaft

#### 3.4.1 Exposition

Die Systeme der Abwasserentsorgung bestehen im Wesentlichen aus Elementen zur Sammlung, zum Transport, zur Speicherung und zur Behandlung von Schmutz- und Niederschlagswasser. Veränderungen klimatischer Parameter wirken sich sehr unterschiedlich auf die einzelnen Systemelemente aus.

Auf die Abwasserbehandlung in Kläranlagen wirkt sich vor allem die Veränderung der mittleren Lufttemperaturen aus. Für Sammlung, Transport und Speicherung – im Folgenden zusammenfassend als Abwasserableitung bezeichnet - sind in erster Linie Veränderungen des Niederschlagsgeschehens relevant. Hier sind wiederum für die einzelnen Elemente unterschiedliche Kenngrößen des Niederschlagsgeschehens maßgebend.

Die erwartete Veränderung der klimatischen Parameter und die unmittelbar nachgelagerten Effekte in der Siedlungsentwässerung sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Auf eine regional differenzierte Darstellung der Exposition wird verzichtet, da die räumliche Variation der Klimakennzahlen und der aus NiedSim-Klima generierten Daten nicht hinreichend abgesichert ist.

Für das Überflutungsrisiko durch eine hydraulische Überlastung der Kanalisation sind Starkregenereignisse maßgebend, die seltener als einmal pro Jahr für kurze Zeit auftreten. Hier wird, basierend auf den Ergebnissen von NiedSim-Klima, von einem höheren Risiko ausgegangen.

Tabelle 6: Expositionsbetrachtung für das Schwerpunktthema Siedlungsentwässerung

KK	Veränderung KK	Unmittelbar nachgelagerter Effekt
N	Zunahme der Intensität und Häufigkeit von Starkniederschlägen kurzer Dauer <sup>1)</sup>	Erhöhtes Risiko von pluvialen Überflutungen durch Überlastung von Einläufen und Kanälen
	Zunahme der Intensität und Häufigkeit von Starkniederschlägen längerer Dauer	Erhöhtes Risiko einer Überlastung von Regenrückhalteanlagen sowie von Anlagen zur kombinierten Speicherung und Versickerung
	Verschiebung der Regencharakteristik zu Ereignissen mit höherer Intensität und geringerer Ergiebigkeit <sup>1)</sup>	Verringerung der Emissionen aus Entlastungsanlagen im Mischsystem
		Häufigere Stoßbelastung der Gewässer durch Regenwassereinleitungen aus Trennsystemen
	Abnahme der Sommerniederschläge	Abnahme des Fremdwasseranfalls und erhöhtes Risiko von Exfiltration durch niedrigeren Grundwasserstand
Zunahme der Winterniederschläge	Zunahme des Fremdwasseranfalls und geringeres Risiko von Exfiltration durch höheren Grundwasserstand	
N, T	Zunahme der Dauer von Trockenperioden insbesondere im Sommer	Zunahme des Risikos und der Schädigung von Entlastungen während Niedrigwasserphasen
		Zunahme von Ablagerungen im Kanal
T	Zunahme der mittleren Lufttemperaturen	Erhöhung der Reinigungsleistung von Kläranlagen

KK: Klimatische Kenngrößen (N: Niederschlag, T: Temperatur)

<sup>1)</sup> Ergebnis der Niederschlagsgenerierung mit NiedSim-Klima

Regenrückhalteanlagen und kombinierte Speicher- und Versickerungsanlagen werden ebenfalls so bemessen, dass sie nur bei seltenen Starkniederschlägen überlastet werden. Da kurzfristige Intensitätsspitzen durch die Speicherung abgefangen werden, sind hier aber Ereignisse längerer Dauer entscheidend. Hier widersprechen sich die Daten der Klimaleitplanken und von NiedSim-Klima. Den weiteren Überlegungen werden die Klimaleitplanken zugrunde gelegt. Es sei aber nochmals auf die im Bereich Extremniederschläge besonders großen Unsicherheiten hingewiesen.

Im Gegensatz zu den zuvor genannten Anlagen haben Regenüberlaufbecken (RÜB) neben der Speicherung auch die Funktion der Abflussaufteilung. Sie sind so bemessen, dass sie auch bei häufigeren, weniger ergiebigen Ereignissen überlaufen, die den größten Teil des Niederschlagsvolumens ausmachen. Die bislang vorliegenden Ergebnisse aus NiedSim-

Klima deuten darauf hin, dass sich der Anteil der kleineren Ereignisse, die vollständig in RÜB abgefangen werden können, erhöht. Die Emissionen aus diesen Entlastungsanlagen würden sich somit verringern.

Gleichzeitig würden diese Ereignisse aber mit einer größeren Intensität in kürzerer Dauer auftreten. Regen- und Mischwassereinleitungen, die ohne einen Speicher direkt in ein Gewässer gelangen, werden daher häufiger ausgeprägte Abflussspitzen aufweisen. In Kombination mit der Zunahme längerer Trockenperioden erhöht sich somit das Risiko eines Zusammentreffens von Niedrigwasserabfluss im Gewässer und Abflussspitze aus dem Siedlungsgebiet.

Auf der saisonalen Zeitskala kann eine Verschiebung der Niederschläge vom Sommer- in das Winterhalbjahr zu stärker ausgeprägten Schwankungen des Grundwasserstandes führen. Dies beeinflusst die Intensität und die Richtung des Wasserflusses zwischen Kanalisation und Bodenkörper (In- und Exfiltration). Tendenziell ist mit einem niedrigeren Fremdwasserabfluss in den Sommermonaten zu rechnen. Dieser verringerte Abfluss würde bei gleichzeitig längeren Trockenperioden zu einem vermehrten Auftreten von Kanalablagerungen führen.

Eine Zunahme der mittleren Lufttemperatur wird sich voraussichtlich auch in der Abwassertemperatur niederschlagen. Dadurch würde die mikrobielle Aktivität erhöht und der biologische Umsatz in Kläranlagen begünstigt.

### **3.4.2 Sensitivität und potenzielle Auswirkungen**

Die primären Aufgaben der Siedlungsentwässerung sind die Sicherstellung der Entsorgungssicherheit und der Gewässerschutz. Die Entsorgungssicherheit umfasst sowohl die sichere Entsorgung des Schmutzwassers zur Aufrechterhaltung hygienischer Verhältnisse in den Siedlungen als auch den Schutz des Menschen vor Überflutungen und gegen Vernässung von Gebäuden. Die Aufgabe des Gewässerschutzes umfasst alle Maßnahmen zur Begrenzung der durch Abwassereinleitung hervorgerufenen Auswirkungen auf oberirdische Gewässer sowie auf das Grundwasser. Eng mit dem Gewässerschutz verbunden ist die Aufgabe der Nutzungssicherung von Gewässern (z.B. zur Trinkwassergewinnung, Naherholung, Fischerei). Weitere Schutzziele der Siedlungsentwässerung sind Natur-, Boden- und Anlagenschutz sowie die Sicherung der Wohn- und Standortqualität [DWA 2006a].

Die Sensitivität der Siedlungsentwässerung gegenüber veränderten klimatischen Bedingungen ist somit ein Maß dafür, in welchem Umfang die Erfüllung dieser Aufgaben verhindert und die Erreichung der entsprechenden Ziele gefährdet wird. Dabei müssen die unterschiedlichen Aufgaben und Ziele differenziert betrachtet werden.

Die Sensitivität gegenüber Veränderungen der klimatischen Bedingungen sowie deren potenzielle Auswirkungen hängen im Bereich der Siedlungsentwässerung überwiegend von den Eigenschaften der technischen Anlagen und anderen anthropogenen Einflüssen ab (z.B. städtebauliche Struktur), die für jedes System spezifisch sind. Mit Ausnahme des Gefälles sind topografische und naturräumliche Bedingungen, die ganze Regionen kennzeichnen, weniger bedeutsam. Eine regional differenzierte Darstellung der Sensitivität ist daher nicht möglich.

Die nachfolgende Darstellung konzentriert sich auf die im Zusammenhang mit dem Klimawandel relevantesten Problempunkte.

#### **3.4.2.1 Überflutungsrisiko**

Es ist wirtschaftlich nicht sinnvoll Kanäle so auszulegen, dass sie jedes denkbare Regenereignis vollständig ableiten können. Entwässerungssysteme werden daher grundsätzlich mit dem Ziel dimensioniert, das Überflutungsrisiko auf ein vertretbares Maß zu begrenzen. Abhängig von der Nutzung des betroffenen Gebietes gibt DIN EN 752 [2008] die in Tabelle 7 angegebenen Überflutungshäufigkeiten vor. In der deutschen Entwässerungspraxis ist der Begriff Überflutung an das Auftreten von Schäden oder von Funktionsstörungen wichtiger Infrastruktureinrichtungen (z.B. Unterführungen) geknüpft [DWA 2006b]. Das Austreten von Regen- und Mischwasser aus dem Kanal (Überstau) führt nicht zwangsläufig zu einer Überflutung. Folglich sind in der Planung größere Überstauhäufigkeit zulässig (siehe Tabelle 7).

Tabelle 7: Nach DWA-A 118 empfohlene Überstau- und Überflutungshäufigkeiten nach DWA 2006b.

Häufigkeit der Bemessungsregen (1-mal in „n“ Jahren)	Ort	Überflutungshäufigkeit (1-mal in „n“ Jahren)	Überstauhäufigkeiten bei Neuplanung bzw. nach Sanierung (1-mal in „n“ Jahren)
1 in 1	Ländliche Gebiete	1 in 10	1 in 2
1 in 2	Wohngebiete	1 in 20	1 in 3
1 in 2 1 in 5	Stadtzentren, Industrie- und Gewerbegebiete: - mit Überflutungsprüfung - ohne Überflutungsprüfung	1 in 30 -	seltener als 1 in 5
1 in 10	Unterirdische Verkehrsanlagen, Unterführungen	1 in 50	seltener als 1 in 10

Die erwartete Zunahme kurzer Starkniederschläge würde in der Zukunft dazu führen, dass die der Kanalnetz Bemessung zugrunde liegenden Ereignisse häufiger auftreten und somit häufiger mit Überstau und Überflutungen zu rechnen ist.

Grundsätzlich sind konventionelle Kanalsysteme sehr empfindlich gegenüber dem Anstieg kurzfristiger Extremniederschläge. Dies gilt umso mehr, je größer der Anteil vollständig versiegelter Flächen und je steiler das Gelände im Einzugsgebiet ist. Der Oberflächenabfluss gelangt kaum verzögert in die Kanalisation, so dass kurzfristige Intensitätsspitzen sich unmittelbar in Abflussspitzen im Kanal niederschlagen.

Andererseits weist ein Großteil der Kanalnetze in Baden-Württemberg erhebliche Reserven auf. Erfahrungen aus der messtechnischen Überprüfung von Bemessungsannahmen zeigen, dass die Abflusswirksamkeit versiegelter Flächen in der Planung häufig deutlich überschätzt wurde. Flachere Kanalnetze verfügen außerdem über ein großes Volumen, das bei Starkniederschlag als Speicher wirkt und somit kurzfristige Extremniederschläge teilweise abfangen kann. Bei der üblichen Bemessung nach Fließzeitverfahren sind solche Reserven nicht berücksichtigt. Oftmals weisen Kanalnetze aber, bedingt durch die historische Entstehung, einzelne kritische Engstellen auf, obwohl die Mehrzahl der Kanäle ausreichend bemessen oder gar überdimensioniert ist.

Unterschätzt wurde bei der Bemessung in der Vergangenheit oftmals der Einfluss von Außengebieten. Dies sind nicht befestigte Flächen in der Umgebung, von denen Abflüsse aufgrund der Gefälleverhältnisse in das Siedlungsgebiet gelangen. Diese Abflüsse werden häufig über Gräben gefasst und gezielt in die Kanalisation eingeleitet. Abhängig von der Flächennutzung und dem Gefälle können auf diesem Weg bei Starkregen sehr große Abflüsse in die Kanalnetze gelangen und eine Überlastung verursachen. Bei

Extremereignissen kann außerdem wild abfließendes Wasser aus Außengebieten, d.h. Oberflächenabfluss, der nicht in einem Graben oder Gewässerbett gefasst ist, zu Schäden in den Ortslagen führen.

Ob es bei einem Überstau des Kanalnetzes zu Überflutungen kommt, hängt von der örtlichen Topographie und den städtebaulichen Bedingungen im unmittelbaren Umfeld ab. Wie hoch die entstehenden Schäden sind, hängt in hohem Maße davon ab, wie weit der Überflutungsschutz bei der baulichen Gestaltung der betroffenen Gebäude berücksichtigt wurde. So kann z.B. eine hohe Bordsteinkante dafür sorgen, dass Überstauereignisse keinen Schaden anrichten, da das Wasser gefahrlos abfließen oder auf der Straße zwischengespeichert werden kann. Befinden sich aber tiefliegende Öffnungen (z.B. Kellereingänge, Lichtschächte, Garageneinfahrt) im überstauten Gebiet, so wird das überstaute Wasser dorthin fließen und Schaden am Gebäude verursachen.

Die Höhe der entstehenden Schäden wird durch die Nutzung der betroffenen Gebäudeteile bestimmt. Tendenziell sind in den vergangenen Jahrzehnten in privaten Haushalten wie in Gewerbebetrieben die in gefährdeten Räumen (Keller, Souterrain) gelagerten Werte deutlich gestiegen. Nach Schätzungen der Versicherungswirtschaft erreicht der mittlere jährliche Gesamtschaden aus der Summe räumlich begrenzter kurzzeitiger Extremereignisse das Niveau der seltenen spektakulären Hochwasserereignisse an großen Flüssen. Entsprechend hoch wäre die Zunahme der Schäden bei einer höheren Häufigkeit von Überflutungsereignissen als Folge eines veränderten Niederschlagsgeschehens.

#### **3.4.2.2 Emissionen aus Regen- und Mischwassereinleitungen**

Bei dem in Baden-Württemberg vorherrschenden Mischsystem tragen die Emissionen aus den Entlastungsanlagen in erheblichem Umfang zu den Gesamtemissionen aus Abwasseranlagen bei. Abhängig vom jeweils betrachteten Stoff gelangen dabei nach Schätzungen des Umweltministeriums 30 bis 60 % der jährlich emittierten Fracht über die Entlastungsanlagen in die Gewässer [UM 2007a]. Einige problematische Spurenstoffe, wie z.B. die Gruppe der Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK), werden fast ausschließlich über die Entlastungen emittiert [Steinmetz und Dittmer 2011].

Wie beim Problem des Überflutungsrisikos, gilt auch für die Einleitungen von Regen- und Mischwasser, dass Entwässerungssysteme sehr sensitiv auf Veränderungen des Niederschlagsgeschehens reagieren.

Langzeitsimulationen des Niederschlags-Abfluss-Prozesses auf Basis der mit NiedSim-Klima generierten Zeitreihen deuten darauf hin, dass das an Regenüberlaufbecken entlastete Volumen in der Zukunft deutlich zurückgeht, ebenso wie die Dauer der Entlastungsereignisse. Im späten Winterhalbjahr könnten jedoch ein höherer

Grundwasserstand und der damit einhergehende höhere Fremdwasseranfall vorübergehend einen gegenteiligen Effekt bewirken (siehe auch Abschnitt 3.4.2.3 „Wechselwirkung zwischen Entwässerungsnetz und Grundwasserleiter“).

An Regenüberläufen, die über keinen Zwischenspeicher verfügen, würde die Häufung kleinerer intensiver Ereignisse zu einem häufigeren Überlaufen und zu einem größeren Entlastungsvolumen führen. Aufgrund der in Baden-Württemberg geltenden Bemessungsvorgaben ( $r_{krit} > 15 \text{ l/(s * ha)}$ ) machen Regenüberläufe jedoch nur wenige Prozent des gesamten Entlastungsvolumens aus.

Die durch Entlastungsereignisse ausgetragenen Stofffrachten sind allerdings nicht direkt proportional zum Überlaufvolumen. Entscheidenden Einfluss hat hier das Transportverhalten in Mischwasserkanälen, insbesondere die Sedimentation, Konsolidierung und Remobilisierung von Feststoffen. Es ist zu erwarten, dass diese Prozesse durch veränderte Regenintensitäten, längere Trockenzeiten im Sommer und steigende Temperaturen deutlich beeinflusst werden. In welcher Richtung sich das wiederum auf die emittierten Frachten auswirkt, lässt sich bislang nicht abschätzen (siehe auch Abschnitt 3.4.2.4 „Kanalablagerungen“).

Im Trennsystem werden Regenabflüsse oftmals ohne nennenswerte Speicherung direkt in das jeweilige Gewässer eingeleitet. Die Ergebnisse aus bisherigen Studien [Bendel et al. 2012, 2013] lassen vermuten, dass sich das Gesamtvolumen der Regeneinleitungen nicht signifikant ändern wird. Signifikante Veränderungen der Frachtemissionen sind ebenfalls nicht zu erwarten. Allerdings sind aufgrund des veränderten Niederschlagsgeschehens häufigere kurzfristige Abflussspitzen zu erwarten, die einen vermehrten hydraulischen Stress zur Folge haben.

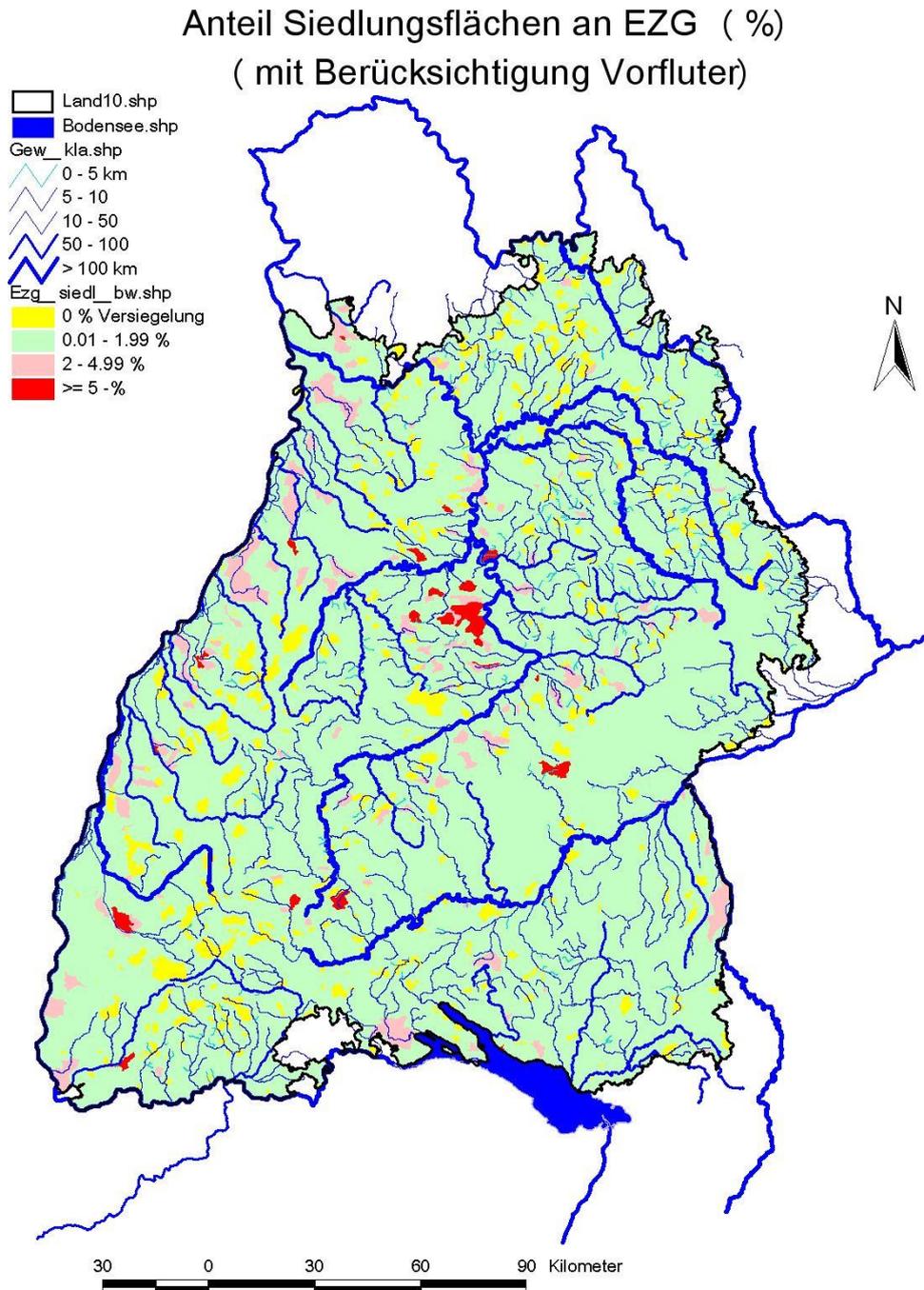


Abbildung 38: Verhältnis von versiegelter Fläche zur Fläche des hydrologischen Einzugsgebietes (b-Wert) [LGL 2013]

Die unmittelbaren ökologischen Folgen einer veränderten Charakteristik von Regen- und Mischwassereinleitungen hängen sehr stark von den Randbedingungen im jeweils betroffenen Gewässer ab. Dies gilt vor allem für die räumlich begrenzten Effekte wie z.B. Ammoniaktoxizität und Sauerstoffzehrung. Neben der Wirkung emittierter Stoffe sind bei kleineren Gewässern die hydraulische Belastung (hydraulischer Stress durch Stoßbelastung) und die Folgen für die Gewässermorphologie (Sohlbewegung, Verschlammung) entscheidend.

Es ist davon auszugehen, dass die Sensitivität der Ökosysteme in den aufnehmenden Gewässern durch häufigere und extremere Niedrigwassersituationen sowie durch steigende Temperaturen zunimmt (siehe auch Abschnitte 3.2 „Niedrigwasser“ und Abschnitt 3.3 „Gewässerökologie“). Die ökologische Schädigung von Regen- und Mischwassereinleitungen würde durch negative Synergien (z.B. geringere Verdünnung, Verschiebung des Ammonium/Ammoniak-Gleichgewichts) zusätzlich verstärkt. Es wird erwartet, dass diese höhere Empfindlichkeit bei Gewässern, in denen Regen- und Mischwassereinleitungen entscheidend für die ökologische Qualität sind, deutlich stärker wirkt als ein möglicher Rückgang der Emissionen.

Es liegen keine flächendeckenden Daten vor, aus denen sich die heutige oder künftige Beeinträchtigung der Gewässerqualität durch niederschlagsbedingte Einleitungen ableiten ließe. Einen groben Anhaltspunkt für die Erkennung hydraulisch kritischer Situationen im regionalen Maßstab bietet der Anteil der versiegelten Fläche am Einzugsgebiet [ATV, 1997]. Dieses als b-Wert bezeichnete Verhältnis wurde von der ATV-Arbeitsgruppe „Beeinflussung der Gewässergüte durch Mischwassereinleitungen“ zur Vorprüfung empfohlen.

Untersuchungen haben ergeben, dass b-Werte bis 2 % unkritisch sind, Werte von 2 bis 5 % kritisch sein können und Werte über 5 % zu signifikanten biozönotischen Veränderungen im Gewässer führen. Bei Werten über 2 % sollte eine detailliertere Erhebung durchgeführt werden. Der b-Wert hat keinen direkten Bezug zum Klimawandel. Es ist aber davon auszugehen, dass Gewässer, an denen die Situation bereits heute kritisch ist, von negativen Auswirkungen besonders stark betroffen sein werden. In Abbildung 38 ist der b-Wert für Baden-Württemberg dargestellt. Bei der Berechnung wurde ein mittlerer Versiegelungsgrad der Siedlungsflächen von 40 % angenommen. Der größte Teil befindet sich in einem unkritischen Zustand. Man kann aber erkennen, dass in einigen Gebieten (z.B. Großraum Stuttgart, Freiburg, Rottweil) die Werte bereits über 5 % liegen und damit kritisch sind und in anderen (z.B. Rheintal) zwischen 2 und 5 % liegen und daher potenziell kritisch sind.

#### **3.4.2.3 Wechselwirkung zwischen Entwässerungsnetz und Grundwasserleiter**

In vielen Entwässerungsnetzen unterliegt der Fremdwasseranfall einem stark ausgeprägten Jahresgang mit einem Maximum am Übergang von Winter zu Frühjahr und einem Minimum im Spätsommer. Dies ist durch die Variationen des Grundwasserstandes bedingt. Die erwartete Verschiebung des Niederschlags vom Sommer in den Winter würde diese saisonalen Schwankungen weiter verstärken. Ein höherer Grundwasserstand im späten Winter würde zu einer vermehrten Infiltration in den Kanal führen. Damit ginge der Wirkungsgrad der Abwasserreinigung zurück, die emittierten Frachten nähmen zu. Der durch das Fremdwasser erhöhte Basisabfluss würde auch dazu führen, dass Regenüberlaufbecken sich schneller füllen, langsamer entleeren und damit deutlich häufiger

anspringen würden. Damit würden auch die über Entlastungsanlagen emittierten Frachten zunehmen. Umgekehrt würde ein Absinken des sommerlichen Grundwasserstandes das Risiko der Exfiltration erhöhen.

Da es sich um eine indirekte Auswirkung des veränderten Niederschlagsgeschehens handelt, lässt sich deren Ausmaß nicht abschätzen. Grundsätzlich sind beide Effekte, Infiltration wie Exfiltration unerwünscht.

Grundwasserleiter und Kanalisation stehen auch über Gebäudedrängen miteinander in Verbindung, die ebenfalls deutlich zum Fremdwasserabfluss beitragen. Aus Sicht der Abwassertechnik ist diese Verbindung unerwünscht. Ein vorübergehend steigender Grundwasserstand kann allerdings zu Gebäudeschäden führen, wenn das Dränagewasser nicht abgeleitet werden kann. Derartige Fälle könnten sich unter dem Einfluss höherer Winterniederschläge häufen.

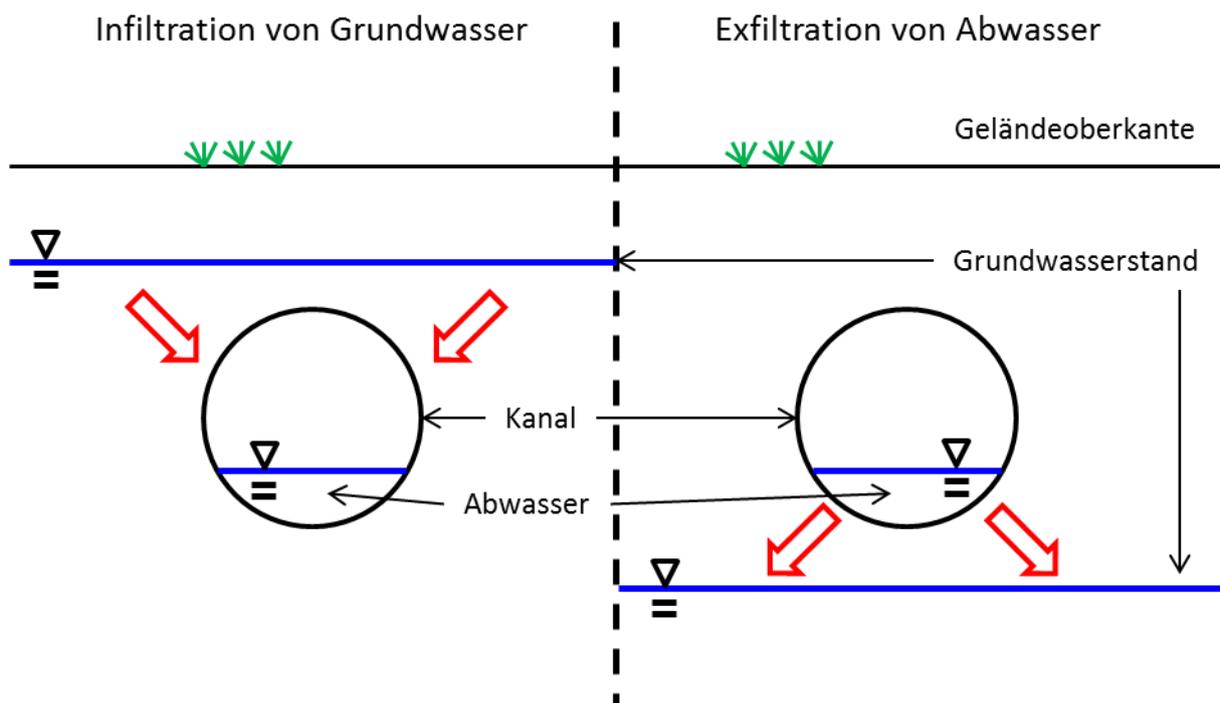


Abbildung 39: Schematische Darstellung der Infiltration von Grundwasser in den Kanal (links) und der Exfiltration von Abwasser aus dem Kanal ins Grundwasser (rechts)

#### 3.4.2.4 Kanalablagerungen

Mischwasserkanäle werden auf Abflüsse bei Starkregen bemessen. Im Trockenwetterfall beträgt der Basisabfluss meist weniger als ein Prozent des Bemessungsabflusses. Diese große Spanne zwischen seltenem Maximalabfluss und häufigem Basisabfluss begünstigt die Entstehung von Ablagerungen. Durch den Rückgang des Fremdwasseranfalls in den Sommermonaten würde der Basisabfluss zusätzlich reduziert.

Die Prozesse des Feststofftransportes im Kanal sind bislang nicht hinreichend verstanden, um abzuschätzen wie sich eine Veränderung im Niederschlagsgeschehen auf die Stoffströme auswirkt. Es lässt sich nicht abschätzen, ob es bei Regen zu einem vermehrten Stoffaustrag über die Entlastungen kommt oder zu einer Zunahme verhärteter Sedimente, die auch bei Regenereignissen nicht remobilisiert werden.

Im Zusammenwirken mit längeren sommerlichen Trockenphasen und höheren Lufttemperaturen ist aber mit einer erhöhten Methanentwicklung und Schwefelwasserstoffproduktion durch Fäulnisvorgänge in den Sedimenten zu rechnen (bis 7 % mehr  $H_2S$  pro °C Temperaturanstieg [Bohatsch 2012]). Dies ist sicherheitstechnisch (Explosionsgefahr, Vergiftungsgefahr) kritisch und kann zudem zu Geruchsbelästigungen führen.

Eine höhere Schwefelwasserstoffproduktion führt außerdem zu einer vermehrten Korrosion am Kanal durch Schwefelsäure. Dadurch wird die Lebensdauer der Kanäle reduziert. Diese Auswirkungen können durch einen sinkenden Wasserverbrauch verstärkt werden. Bei rückläufigem Wasserverbrauch aber gleichbleibenden Schmutzfrachten werden die Inhaltsstoffe des Abwassers immer aggressiver, da sie höher konzentriert sind [Bohatsch 2012]. Ein Bevölkerungsrückgang wird die Problematik in vielen vor allem ländlichen Regionen zusätzlich verschärfen.

Die genannten Probleme sind letztlich auf die Zersetzung der organischen Anteile im Mischwasserabfluss zurückzuführen. Im Trennsystem sind diese Anteile deutlich geringer. Hier sind daher keine signifikanten Veränderungen zu erwarten.

#### **3.4.2.5 Abwasserbehandlung**

Durch Drosselorgane an den Regenbecken wird der Zufluss zu Kläranlagen jeweils auf einen festen Wert begrenzt, bis zu dem ein sicherer Anlagenbetrieb gewährleistet ist. Die aufgrund des Klimawandels erwarteten Veränderungen im Niederschlagsgeschehen wirken sich somit nicht signifikant auf die Abwasserreinigung aus.

Es ist jedoch zu erwarten, dass der Anstieg der mittleren Lufttemperatur auch zu höheren Abwassertemperaturen führt, die sich wiederum positiv auf die biologischen Vorgänge im Reinigungsprozess auswirken. Relevant ist dies vor allem für den Stickstoffumsatz durch die Nitrifikation. Für die Nitrifikation ist mit zunehmender Temperatur mit einer höheren Stoffumsatzrate zu rechnen, so dass bei ausreichender Belüftung niedrigere Ablaufkonzentrationen für Ammonium erzielt werden können. Damit würde die Sauerstoffzehrung im aufnehmenden Gewässer reduziert. Das Risiko ökologisch kritischer Situationen bei Niedrigwasser würde durch die bessere Reinigungsleistung der Kläranlagen zumindest teilweise kompensiert. Auch im Winter ist bei erhöhten Abwassertemperaturen mit

einer stabileren Nitrifikation zu rechnen. Zu beachten ist im Betrieb jedoch, dass sich bei höheren Temperaturen die Sauerstofflöslichkeit verringert. Dies führt zu höheren Stromkosten für den Sauerstoffeintrag. Ist ein größerer Eintrag erforderlich als geplant, müsste dies durch größere Belüftungsaggregate ausgeglichen werden. Bei der Denitrifikation wirkt in der Regel die Verfügbarkeit leicht abbaubaren Kohlenstoffs begrenzend, so dass die Wirkung höherer Temperaturen nicht zum Tragen kommt. Möglicherweise könnte aber das Verhältnis Kohlenstoff/Stickstoff bei einem erhöhten Vorabbau und Sedimentation im Kanalnetz beeinflusst und damit die Denitrifikation verschlechtert werden.

Inwieweit sich klimabedingte Veränderungen insbesondere der Temperatur im Stoffwechselgeschehen der Mikroorganismen auf andere Emissionen auswirken können, ist bislang wenig untersucht. Diskutiert wird die Entstehung von klimaschädigendem  $N_2O$  Gas [Pinnekamp et al. 2008]. Auch kann die Produktion anderer Gase (z.B.  $CH_4$ ) begünstigt werden, welche zu ungewollter Geruchsentwicklung führen oder ebenfalls klimaschädigend wirken.

#### **3.4.2.6 Hochwasserschutz**

Abwassertechnische Anlagen wie Entlastungsbauwerke, Anlagen zur Regenwasserbehandlung oder Kläranlagen stehen oft in hochwassergefährdeten Gebieten. In der Regel wird der Hochwasserschutz dieser Anlagen auf ein  $HQ_{100}$  ausgelegt. Wenn es infolge veränderter Niederschlagscharakteristiken zu häufigeren oder extremeren Hochwassersituationen kommt, besteht ein höheres Risiko für Überflutungen dieser Bauwerke [Pinnekamp et al. 2008].

#### **3.4.3 Anpassungskapazität**

Entwässerungssysteme wurden über viele Jahrzehnte mit dem Ziel angelegt, Schmutz- und Niederschlagswasser möglichst rasch und vollständig in unterirdischen Kanälen aus den Siedlungen abzuleiten. Sie werden statisch betrieben, d.h. ohne steuernde Eingriffe in das Abflussgeschehen bei Regen. Derartige konventionelle Entwässerungssysteme haben sich in der Vergangenheit zwar grundsätzlich bewährt. Wie oben dargestellt, sind sie allerdings in hohem Maße empfindlich gegenüber möglichen Veränderungen klimatischer Einflüsse, insbesondere des Niederschlagsgeschehens.

Die durch den Klimawandel zu erwartenden Veränderungen im Niederschlagsgeschehen sind mit großen Unsicherheiten behaftet und teilweise nicht einmal in ihrer Richtung eindeutig. Hinzu kommt, dass in der Siedlungsentwässerung verschiedene Prozesse beeinflusst werden, die teilweise gegenläufig wirken. Die Gesamtwirkung der einzelnen sich überlagernden Einflüsse ist in den meisten Fällen unklar. Die Berücksichtigung des Klimawandels ist daher in der Siedlungsentwässerung vor allem ein Management von

Unsicherheiten. Ein Wandel der klimatischen Randbedingungen erfordert robustere und flexiblere Systeme.

Bereits seit vielen Jahren verfolgt das Land die Strategie einer naturverträglichen Regenwasserbewirtschaftung. Die von der LfU herausgegebenen „Arbeitshilfen für den Umgang mit Regenwasser in Siedlungen“ [LfU 2005a] unterstützen Gemeinden, Planer und Aufsichtsbehörden bei deren Umsetzung. Bei sachgerechter Planung und Bauausführung bewirken entsprechende Systeme, die sich am natürlichen Wasserhaushalt orientieren, eine Reduzierung von Abflussspitzen und wirken damit möglichen negativen Veränderungen entgegen.

Die Anpassungsfähigkeit der Siedlungsentwässerung wird jedoch durch die lange Nutzungsdauer der Kanalnetze stark eingeschränkt. Hinzu kommt ihre weite Verzweigung und ihre enge Verknüpfung mit anderen Bereichen der Infrastruktur (v.a. Verkehr). Der Umbau von Entwässerungssystemen im Bestand ist daher nur in Ausnahmefällen sinnvoll. Die Umorientierung zu naturverträglichen Systemen beschränkt sich im Wesentlichen auf Neuerschließungen.

Beim Schutz vor Überflutungen durch urbane Sturzfluten findet in den letzten Jahren ebenfalls eine Neuorientierung statt. Im Vordergrund steht dabei der Umgang mit extremen Niederschlagsereignissen, bei denen eine Überlastung der Kanalisation (Überstau) unvermeidbar ist. Für diese Fälle sollen Gefährdungsanalysen durchgeführt werden, auf deren Basis Vorsorgemaßnahmen für die gefährdeten Bereiche erarbeitet werden. Eine weitgehende Überflutungssicherheit soll durch die Nutzung von Verkehrs- und Freiflächen zur oberirdischen Speicherung und Ableitung erreicht werden. Darüber hinaus sollen Maßnahmen zum Objektschutz umgesetzt werden. Kommunikation und Aufklärung sollen die Risikowahrnehmung in der Bevölkerung fördern und zur eigenverantwortlichen Gefahrenabwehr motivieren. Grundlagen für die Umsetzung dieser Strategien in Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz wurden von der TU Kaiserslautern im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz und der Fortbildungsgesellschaft des Wasserwirtschaftsverband Baden-Württemberg e.V. erarbeitet [Schmitt und Worreschk 2011].

Die Überflutungsvorsorge wird damit als Gemeinschaftsaufgabe aller kommunalen Akteure, einschließlich der Bevölkerung, verstanden. Bei Problemen mit Abflüssen aus Außengebieten kommen noch die Vertreter der Land- und Forstwirtschaft dazu. Der Zusammenarbeit aller Beteiligten und Betroffenen stehen jedoch die bisherigen institutionellen Strukturen sowie die organisatorischen und planerischen Abläufe im Wege. Wie auch bei der oben beschriebenen naturverträglichen Regenwasserbewirtschaftung wirken sich diese Strategien auf die Flächennutzung in Siedlungen aus. Dies führt

insbesondere in dicht bebauten Innenstädten zwangsläufig zu Konflikten mit anderen kommunalen Anliegen. Diesem Problem könnte mit dem Konzept einer wassersensitiven Stadtentwicklung (aus dem Englischen: Water Sensitive Urban Design) begegnet werden. Dabei werden hydrologische Gegebenheiten und Prozesse schon sehr frühzeitig in die Stadtplanung und die innerstädtische Freiraumplanung einbezogen.

Regenwasserbewirtschaftung und Überflutungsschutz bestimmen so städtische Strukturen mit. Dieser Ansatz erfordert jedoch weitreichende Anpassungen in den institutionellen Strukturen und den organisatorischen Prozessen im Bereich der Kommunen und Aufsichtsbehörden.

Der Betrieb konventioneller Mischsysteme kann durch die Implementierung von Steuerungsstrategien flexibler gestaltet und an Veränderungen der Belastungsbedingungen angepasst werden. Dies ist im Bestand von Bedeutung, wo umfassende Umbauten meist nicht umsetzbar sind. Im Rahmen einer Verbundsteuerung können Messeinrichtungen und Steuerungsaggregaten der einzelnen Bauwerke innerhalb eines Entwässerungssystems miteinander vernetzt werden. Häufigste Ziele einer solchen Steuerung sind:

- verbesserte Ausnutzung des Speichervolumens zur Verringerung des Überlaufvolumens in Gewässer,
- gezielte Reduzierung der Belastung empfindlicher Gewässerabschnitte,
- Kanalspülung zur Vermeidung dauerhafter Ablagerungen.

Das Risiko von Überstau und Überflutung lässt sich durch eine solche Steuerung nicht wesentlich reduzieren. Das steuerbare Volumen im Kanalnetz ist zu gering im Verhältnis zum Abflussvolumen bei Extremereignissen.

Die Grundlagen der Verbundsteuerung von Entwässerungsnetzen wurden im Wesentlichen in den 1990er Jahren entwickelt. Seither wurden Steuerungen in verschiedenen Pilotprojekten erprobt. Trotz der überwiegend positiven Ergebnisse haben sich Verbundsteuerungen in Baden-Württemberg bislang nicht durchgesetzt. Einem weitergehenden Einsatz stehen vor allem Bedenken der Aufsichtsbehörden und der Betreiber entgegen. Im Vordergrund stehen dabei die Skepsis gegenüber der Verlässlichkeit der Mess- und Steuerungseinrichtungen sowie die Befürchtung, dass aufgrund der Komplexität der Systeme das Betriebspersonal überfordert sein könnte.

Die Planungspraxis in der Siedlungsentwässerung stützt sich zu einem erheblichen Umfang auf Erfahrungswerte. Gezielte Beobachtungen und Messungen des realen Verhaltens eines Entwässerungssystems finden in Baden-Württemberg nur in seltenen Fällen Eingang in planerische Entscheidungen. Um die Auswirkungen veränderter klimatischer Randbedingungen abzuschätzen, ist jedoch ein deutlich verbessertes Prozess- und Systemverständnis erforderlich. Hierzu sind gezielte Messungen von Niederschlag, Abfluss

und Entlastungsverhalten unerlässlich. Neben kompetentem Personal für die Planung und Durchführung der Messungen werden technische und institutionelle Strukturen für die Datenverwaltung benötigt. Auch der effektive Umgang mit Messdaten in der Planung erfordert Erfahrung. Erfahrungen aus Pilotprojekten und technische Richtlinien zu diesem Bereich liegen in ausreichendem Umfang vor [Schmitt et al. 2008]. Die Kompetenz und die Strukturen sind jedoch in der Praxis noch nicht hinreichend ausgebildet. Dies gilt analog auch für die Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Planung.

Die Anpassungskapazität muss differenziert nach den einzelnen Aspekten bewertet werden: Das Wissen um die Anpassungsstrategien und –maßnahmen ist grundsätzlich recht hoch. Allerdings hat sich dieses Wissen noch nicht hinreichend bei den Praktikern verbreitet oder wird von diesen nicht hinreichend angenommen. Außerdem stehen der Umsetzung in der Praxis vielfach noch institutionelle und organisatorische Hemmnisse entgegen. Die technischen Fähigkeiten der Siedlungsentwässerung sollten dagegen ausreichen, um negativen Klimafolgen zu begegnen.

Transformationsprozesse sind aufgrund der langen Nutzungsdauern der Anlagen sehr träge. Erschwerend wirken außerdem die flächige Ausdehnung der Entwässerungsstrukturen und ihre Verknüpfung mit anderen Infrastruktursektoren und städtebaulichen Strukturen.

Eine Sonderstellung nimmt die Abwasserreinigung ein. Hier überwiegt voraussichtlich der positive Effekt steigender Temperaturen. Durch Eingriffe in den Anlagenbetrieb oder den Austausch einzelner Ausrüstungselemente kann die Reinigungsleistung kurz- bis mittelfristig erhöht werden. Die Anpassungskapazität ist also deutlich höher.

#### **3.4.4 Dringlichkeit**

Der Klimawandel bringt voraussichtlich keine grundsätzlich neuen Probleme mit sich, sondern verstärkt lediglich extreme Phänomene in Intensität und Häufigkeit. Maßnahmen und Strategien, die bereits ergriffen werden, um Extremereignissen zu begegnen, erfahren durch den Klimawandel eine zunehmende Bedeutung. Aus den bislang vorliegenden Erkenntnissen lässt sich keine zusätzliche Dringlichkeit für konkrete technisch/bauliche Maßnahmen ableiten.

Die Erfahrung zeigt aber, dass die Etablierung neuer Strategien und Planungsmethoden ein sehr langfristiger Prozess ist. Um für mögliche Klimaeinflüsse gewappnet zu sein, müssen die bereits angelaufenen Veränderungen mit Nachdruck weiter verfolgt werden. Dringlichkeit besteht auch im Bereich der Messdatenerhebung. Zuverlässige Planungen erfordern in einigen Bereichen mehrjährige Datenreihen. Die Identifikation von Veränderungen durch den Klimawandel erfordert Messungen über mehrere Jahrzehnte.

### 3.4.5 Gesamtbetrachtung der Vulnerabilität

Insgesamt wird die Vulnerabilität für das Überflutungsrisiko und die Emissionen als hoch eingestuft, da die Exposition und Sensitivität als hoch und Anpassungskapazitäten als mittel eingestuft werden. Für die Abwasserreinigung wird die Vulnerabilität als gering eingestuft, da hier die Sensitivität und die potenziellen Auswirkungen als mittel eingestuft werden bei einer hohen Exposition und Anpassungskapazität.

#### **Kernaussagen zum Schwerpunktthema Siedlungsentwässerung**

- *Die Zunahme kurzer intensiver Starkniederschläge kann zu häufigeren Entlastungen sowie Überstau/Überflutung führen*
- *Es wird erwartet, dass das mittlere ereignisspezifische Entlastungsvolumen an Speicherbauwerken zurückgehen wird.*
- *Durch (häufigere) Entlastung und höhere Temperaturen ist eine Zunahme der Schadwirkung auf die Ökosysteme der aufnehmenden Gewässer besonders während Niedrigwasserphasen zu erwarten, auch bei zurückgehendem Entlastungsvolumen.*
- *Ein Anstieg der Temperaturen dürfte sich positiv auf die biologischen Vorgänge der Abwasserreinigung auswirken.*
- *Auswirkungen des Klimawandels auf den Stofftransport und –umsatz (z.B. Sedimentation, Remobilisierung) im Kanalnetz sind zu erwarten. Dies kann z.Zt. noch nicht richtungssicher modelliert werden und damit auch nicht die möglichen Folgen für die Infrastruktur und die betroffenen Ökosysteme.*

## 3.5 Grundwasser

### 3.5.1 Exposition

Für das Grundwasser spielen die Veränderung des Niederschlags und der Temperatur eine entscheidende Rolle. Sie beeinflussen die Verdunstung, Schneedecke und –schmelze, den klimatischen Wasserhaushalt sowie die Grundwasserneubildung. Die Veränderungen der klimatischen Kenngrößen und die daraus resultierenden Effekte auf das Grundwasser sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Expositionsbeurteilung für das Schwerpunktthema Grundwasser

KK	Veränderung KK	unmittelbar nachgelagerte Effekte (Exposition)
N	Zunahme Dauer von Trockenperioden	Geringere Grundwasserneubildung im Sommerhalbjahr, Zunahme des Trockenheitsindex
N	Verschiebung der Niederschläge in das Winterhalbjahr	Regional steigende Grundwasserstände im Winterhalbjahr, Zunahme der Vernässungsgefahr

• KK: Klimatische Kenngrößen (N: Niederschlag, T: Temperatur, GS: Globalstrahlung, W: Wind)

### 3.5.1.1 Klimatische Wasserbilanz

Die klimatische Wasserbilanz ist eine Schlüsselgröße aller Prozesse des Wasserhaushaltes, sie berechnet sich aus der Differenz von Niederschlag und potenzieller Verdunstung. Untersuchungen im Rahmen von KLIWA [KLIWA 2008] haben ergeben, dass für den Untersuchungszeitraum 1931 bis 1997 ein flächendeckender Rückgang der potenziellen Verdunstung zu verzeichnen war. In der südlichen Landeshälfte von Baden-Württemberg lag der Rückgang bei 4 bis 6 %. Der Jahresgang der potenziellen Verdunstung folgt in seiner Form dem Jahresgang der Temperatur. In Kombination mit dem Niederschlagsgeschehen, welches eine wesentlich höhere Variabilität ausweist, lässt sich die klimatische Wasserbilanz berechnen.

Die Auswertungen der Klimaszenarien anhand der klimatischen Leitplanken haben ergeben, dass für den Bezugszeitraum der Median der klimatischen Wasserbilanz bei 596,6 mm liegt [LUBW 2012b]. Für die nahe Zukunft ergaben die Simulationen, dass dieser Wert auf 572,1 mm zurückgeht und für die ferne Zukunft auf 601,4 mm steigt. Für Juli und August wird die klimatische Wasserbilanz bis 2100 leicht negativ sein (siehe Abbildung 40). Dies lässt sich durch höhere Verdunstungsraten und einem niedrigeren Niederschlagsaufkommen in diesen Monaten erklären. In den Monaten November bis Mai nimmt die klimatische Wasserbilanz hingegen zu, was der Zunahme der winterlichen Niederschläge bei geringen Verdunstungsraten zu verdanken ist.

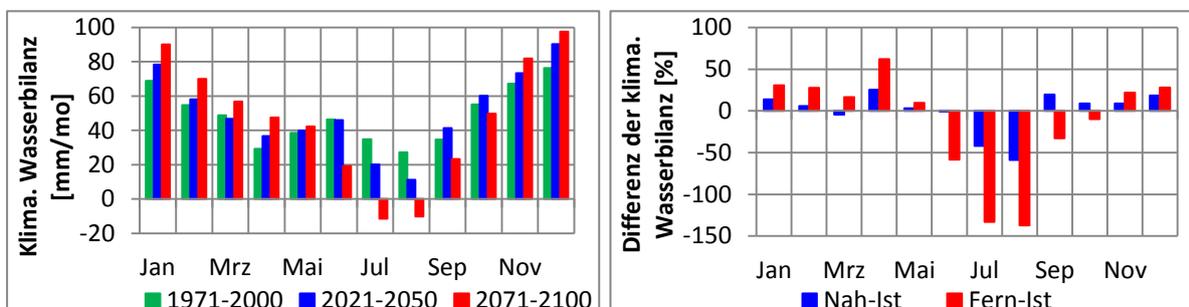


Abbildung 40: Klimatische Wasserbilanz für die Zeiträume 1971-2000, 2021-2050 und 2071-2100 (links) sowie die Veränderung in der Zukunft gegenüber dem Bezugszeitraum (rechts); eigene Darstellung

In der regionalen Darstellung der klimatischen Wasserbilanz (siehe Abbildung 41) erkennt man im Mittel nur sehr geringe Veränderungen in Baden-Württemberg bis auf die Regionen Nordschwarzwald und Rhein-Neckar mit einer Zunahme um 50 bis 100 mm (der 15., 50. und 85. Perzentile) für die nahe Zukunft.

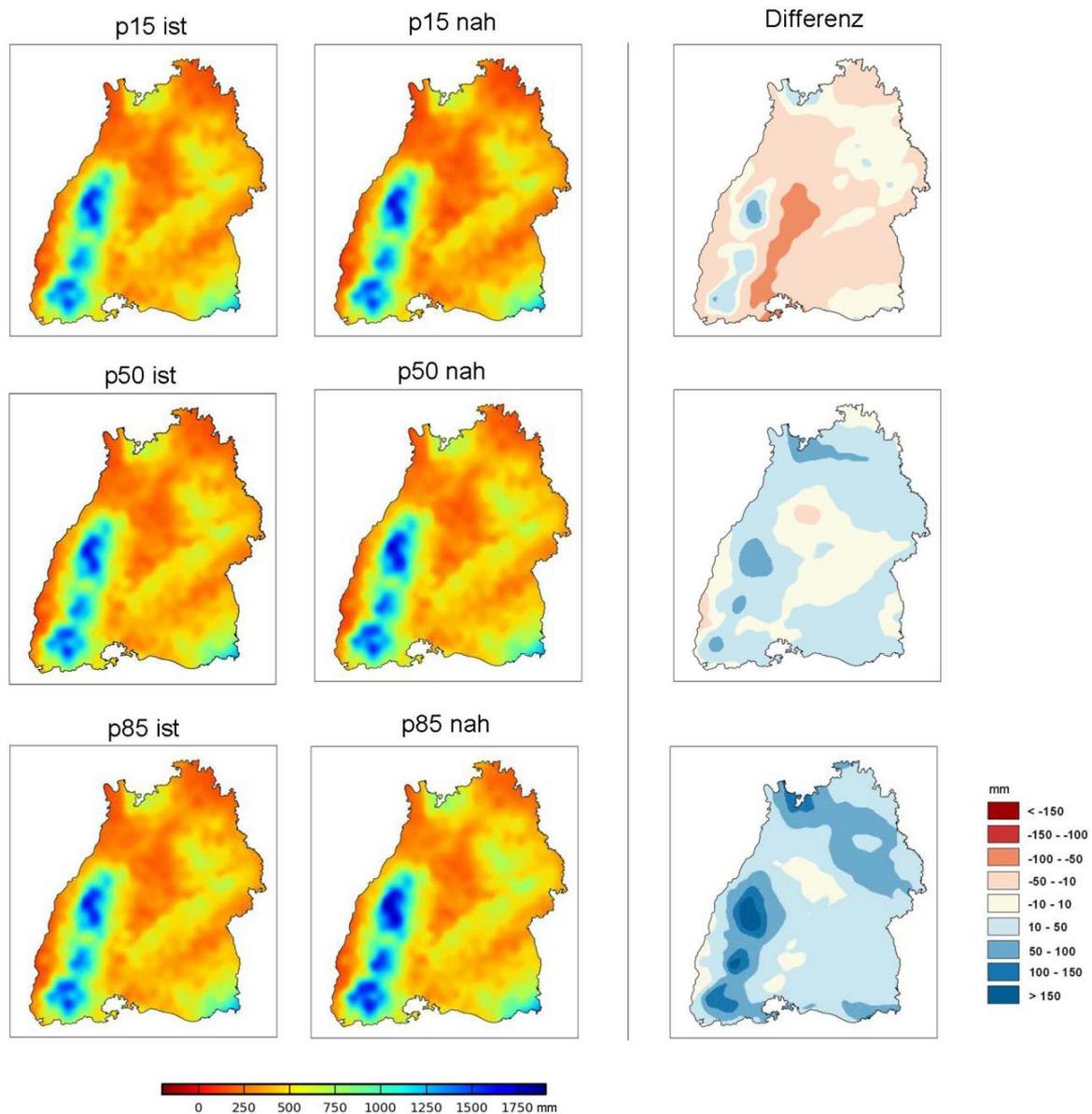


Abbildung 41: Klimatische Wasserbilanz (mm) für das 15., 50. und 85. Perzentil für den Ist-Zustand (1971-2000) und die nahe Zukunft (2021-2050) sowie deren Differenz; eigene Darstellung auf der Grundlage der von der LUBW zur Verfügung gestellten Klimakennzahlen in der Auflösung 25 x 25 km<sup>2</sup>

### 3.5.1.2 Grundwasserneubildung

Die Grundwasserneubildung wird gemäß DIN 4049-3 [1994] als „Zugang von infiltriertem Wasser zum Grundwasser“ definiert und ist ein wichtiges Maß für die „natürliche Regenerationsfähigkeit“ der Grundwasserressourcen [LfU 2013]. Zur Grundwasserneubildung trägt großräumig vor allem aus Niederschlag gebildetes

Sickerwasser bei. Als residuale Komponente der Wasserbilanz stellt die Grundwasserneubildung aus Niederschlag den um die tatsächliche Verdunstung und schnelle laterale Abflusskomponenten reduzierten Anteil der Niederschlagshöhe dar. Die Verdunstung als wichtige Steuergröße macht ca. 62% aus und ist nicht nur vom Klima, sondern auch von Landnutzungsänderungen abhängig. Die Grundwasserneubildung als Restglied der Wasserbilanz beträgt in Deutschland nur ca. 16% [DWA 2011]. Die Grundwasserneubildung und der –abfluss werden nicht allein von den lokalen klimatischen Bedingungen bestimmt. Prägend für das Schwankungsverhalten des Grundwassers und der Quellschüttungen sind insbesondere die lokal und regional sehr unterschiedlichen hydrogeologischen Eigenschaften des Grundwasserkörpers, wie Speichervolumen und hydraulische Kennwerte sowie die räumliche Ausdehnung des Aquifers. Vor diesem Hintergrund ist es auf der Grundlage der klimatischen Leitplanken weder möglich noch sinnvoll, kleinräumig differenzierte Aussagen zu Auswirkungen eines Klimawandels auf die Grundwasserverhältnisse in den verschiedenen Aquiferen des Landes zu machen.

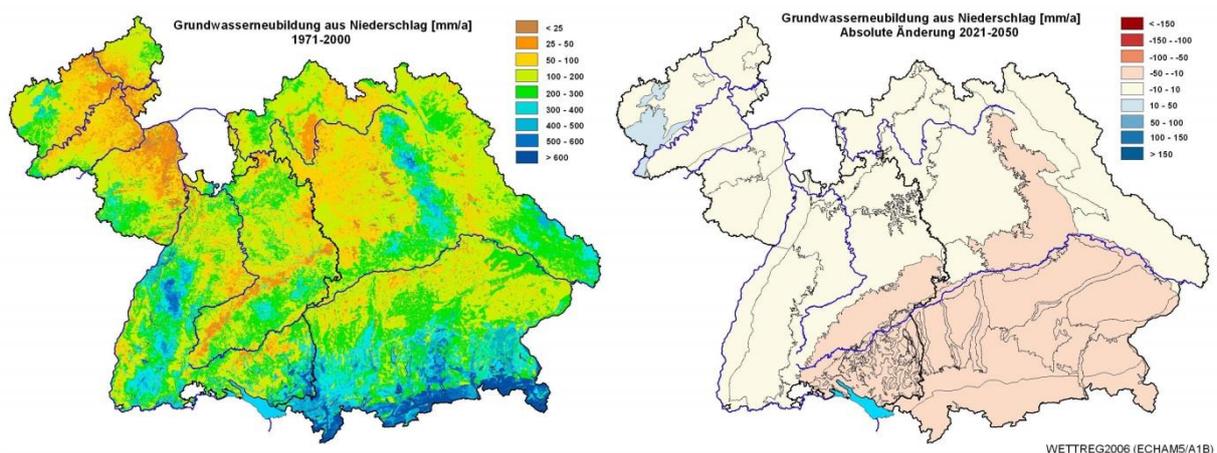


Abbildung 42: Darstellung der mittleren Grundwasserneubildung aus Niederschlag für das KLIWA-Gebiet auf Basis von WETTREG2006 Angaben zwischen 1971 und 2000 (links) und für den Zeitraum 2021-2050 (rechts) [Quelle: KLIWA 2012b]

Der wichtigste Faktor für die Grundwasserneubildung ist der Niederschlag. Der Jahresgang des Niederschlags in Baden-Württemberg ist durch ein Maximum im Sommer und eines im Winter gekennzeichnet. In den Übergangsjahreszeiten finden sich die niedrigen Werte. Das sommerliche Maximum dominiert, speziell im Einflussbereich der Alpen. Im Schwarzwald ist hingegen das winterliche Maximum stärker ausgeprägt [LUBW 2013].

Die statistische Auswertung bisheriger Beobachtungen von Grundwasserständen und Quellschüttungen zeigt, dass der jährliche Höchstwert im Jahresgang vielfach früher eintritt als zu Beginn der Beobachtungen. Daneben ist vielfach eine Verstärkung der Amplitude zwischen Minimum und Maximum des Jahresgangs erkennbar [KLIWA 2012b].

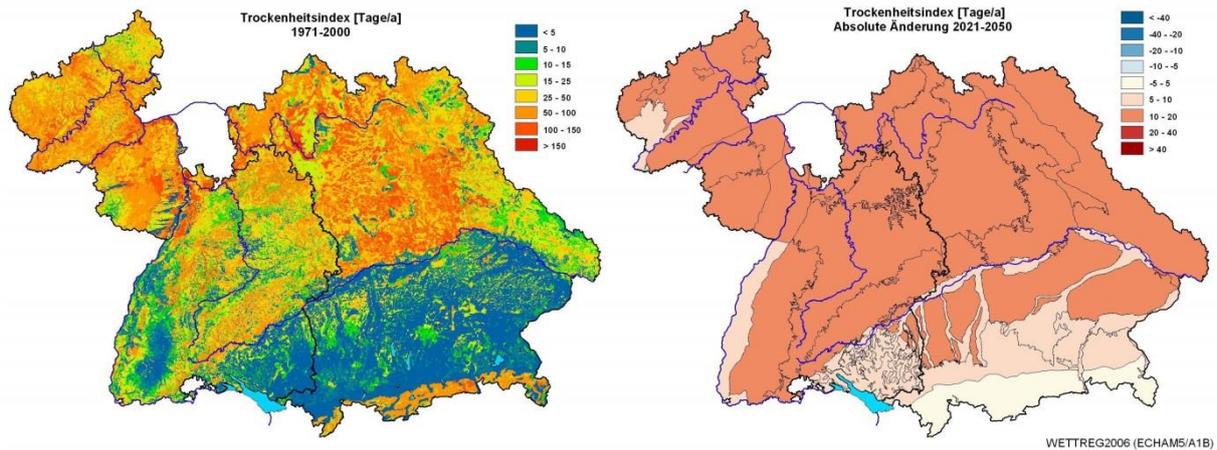


Abbildung 43: Trockenheitsindex in Tage/Jahr für das KLIWA Gebiet auf Basis von WETTREG2006 Angaben für 1971 bis 2000 (links) und für den Zeitraum 2021-2050 (rechts) [Quelle: KLIWA 2012]

Detaillierte Abschätzungen zur Grundwasserneubildung für die nahe (2021-2050) und ferne (2071-2100) Zukunft auf Basis der Klimaleitplanken sind nur bedingt möglich, da neben den klimatologischen Größen auch andere Faktoren eine maßgebliche Rolle spielen. Im Rahmen eines KLIWA-Projekts wurde eine Bodenwasserhaushaltsmodellierung mit den WETTREG2006 (ECHAM5/A1B) Datensätzen durchgeführt [KLIWA 2012b]. Die daraus resultierenden Veränderungen der klimawirksamen Parameter aus dieser Studie sind in Tabelle 9 aufgeführt.

Tabelle 9: Veränderungen der für die Grundwasserneubildung relevanten Faktoren [Quelle: KLIWA 2012b]

Kennzahl	Vergleichszeitraum (1971-2000)	Nahe Zukunft (2020-2051)	Absolute Veränderung
Temperatur	8.3 °C	9.2 °C	+ 0.9 °C
Niederschlag	966 mm	957 mm	- 9 mm
Tatsächliche Verdunstung	541 mm	551 mm	+ 10 mm
Gesamtabflussbildung	424 mm	407 mm	- 17 mm
Sickerung	393 mm	377 mm	- 16 mm
Trockenheitsindex	29 Tage	43 Tage	14 Tage

Aus diesen Daten ist ersichtlich, dass bei den Jahreswerten insgesamt keine dramatischen Veränderungen für die nahe Zukunft zu erwarten sind. Die interannuellen Veränderungen bei einzelnen Parametern fallen zum Teil größer aus, so sind beispielsweise beim Niederschlag im Winter eine Zunahme und im Sommer eine Abnahme zu erwarten.

Anhand der über die WETTREG2006 erhaltenen und in Abbildung 42 dargestellten Ergebnisse für die räumliche Verteilung der Grundwasserneubildung in Süddeutschland im Ist-Zustand (1971-2000, links) und für die nahe Zukunft(2021-2050, rechts) wird ebenfalls deutlich, dass für Baden-Württemberg nur sehr geringe Abnahmen bzw. kein eindeutiges Änderungssignal ersichtlich ist.

Die räumliche Verteilung des Trockenheitsindex ist in Abbildung 43 dargestellt. Der Trockenheitsindex beschreibt die Zahl der Tage, die eine 30%ige Füllung des

Bodenwasserspeichers unterschreiten. Unter diesen Verhältnissen findet in der Regel keine Sickerung in Richtung Grundwasser statt, d.h. die Grundwasserneubildung bleibt aus und zugleich werden die Grundwasserspeicher entleert. Zudem steht die Vegetation unter Trockenstress, was im Allgemeinen zu einem erhöhten anthropogenen Wasserverbrauch durch die Landwirtschaft und die öffentliche Wasserversorgung führt. Im Vergleich zum Ist-Zustand (1971-2000, links) ergibt sich für die Nahe Zukunft (2021-2050, rechts) eine Zunahme des Trockenheitsindex in allen drei Bundesländern [KLIWA 2012b].

In Abbildung 44 sind die interannuellen Veränderungen in der Gesamtabflussbildung (Niederschlag-Verdunstung) als maßgebliche Größe für die Grundwasserneubildung dargestellt.

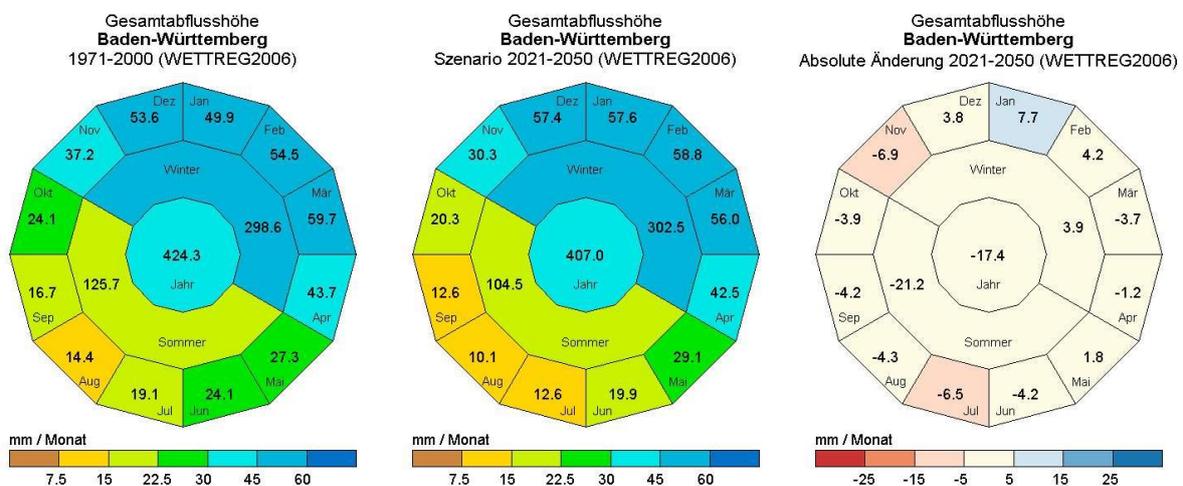


Abbildung 44: Interannuelle Veränderungen in der Gesamtabflusshöhe (Niederschlag-Verdunstung) als maßgebliche Größe für die Grundwasserneubildung [KLIWA 2012b]

Diese Ergebnisse basieren auf einem Ensemble-Mitglied aus den Klimaleitplanken. Um die Ergebnisse dieser Studie in die Klimaleitplanken einordnen zu können und somit belastbarere Aussagen v.a. in Hinblick auf die Richtungssicherheit treffen zu können wären Bodenwasserhaushaltsmodellierungen mit allen Ensemble-Mitgliedern der Klimaleitplanken erforderlich.

### 3.5.1.3 Ökosystem Grundwasser

Der Untergrund ist nicht nur ein wichtiger, für uns nutzbarer Wasserspeicher, sondern auch ein Lebensraum, den eine vielfältige Organismengemeinschaft besiedelt. Das wohl größte limnische, also von Süßwasser bestimmte Ökosystem erstreckt sich weltweit im Grundwasser und übernimmt wichtige Mittlerfunktionen im globalen Wasser- und Naturkreislauf [BMU 2008]. Im Grundwasser selbst herrschen vergleichsweise stabile, konstante und vorhersagbare physikalisch-chemische Bedingungen, die die abiotischen Faktoren des Ökosystems, also die Umweltfaktoren an denen Lebewesen nicht erkennbar

beteiligt sind, bestimmen. Hydrologische, physikalische und geochemische Einflüsse steuern das sensible Gleichgewicht der Biosphäre im Grundwasser.

Die Temperatur oberflächennaher Grundwasserleiter entspricht mehr oder weniger der Jahresdurchschnittstemperatur der Oberfläche, somit wirkt sich eine Temperaturerhöhung unmittelbar auf die Habitatbedingungen im Grundwasser aus. Ebenso kommt es zu einer direkten Auswirkung auf die Austauschzone zwischen Grundwasser, Boden und Oberflächengewässer, dem hyporheischen Interstitial. Temperaturgradienten in grundnahem Wasser und dem hyporheischen Interstitial sind ökologisch von Bedeutung [LFU 2007]. Temperaturen im Kiesbett beeinflussen z. B. die Laichhabitateignung für rheophile Fischarten wie die Salmoniden.

#### **3.5.1.4 Grundwasserabhängige Landökosysteme**

Landökosysteme werden als grundwasserabhängig oder „grundwasserbeeinflusste Ökosysteme“ bezeichnet, wenn der Abstand vom Boden bis zur Oberfläche des Grundwassers weniger als drei Meter beträgt. Dies entspricht etwa der Tiefe, bis zu der Pflanzen ihr Wasser noch direkt aus dem Grundwasser entnehmen können. Liegt der Grundwasserspiegel tiefer, steht den Pflanzen lediglich das Wasser zur Verfügung, das als so genanntes Haftwasser im Boden und Untergrund gebunden ist.

Die EG-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) definiert den Zustand des Grundwassers auch im Zusammenhang mit seinen Einflüssen auf Landökosysteme. Danach ist eine Voraussetzung für das Erreichen eines guten Grundwasserzustands, dass vom Grundwasser keine signifikanten Schäden für angeschlossene terrestrische Ökosysteme ausgehen. Terrestrische Ökosysteme können zum Beispiel Auengebiete, Feuchtwiesen oder Moore sein [BMU 2008].

Niedrigere Grundwasserstände oder eine jahreszeitliche Veränderung der Grundwasserschwankungen können zu negativen Auswirkungen durch Trockenschäden führen.

#### **3.5.2 Sensitivität und potenzielle Auswirkungen**

Anhand der in Abschnitt 3.5.1 dargestellten Zusammenhänge lassen sich zusammenfassend folgende Punkte für das Schwerpunktthema Grundwasser festhalten:

- Verschiebung der Niederschläge zum Winter und dadurch potenziell höhere Grundwasserneubildung.
- Zunehmende sommerliche Trockenperioden und Hitzewellen verringern die Sickerwasserbildung und somit die Speisung des Grundwasserkörpers im Sommerhalbjahr [KLIWA 2009a].

- Durch vermehrte Trockenzeiten, bei denen der Wassergehalt im Boden unter einen kritischen Wert von 30% der nutzbaren Feldkapazität sinkt, ist für die Zukunft zu erwarten, dass es im Sommerhalbjahr zu einer verstärkten Beanspruchung der Grundwasservorräte z. B. durch Trinkwasserversorgung (Spitzenbedarfsdeckung) und ggf. durch die Deckung des landwirtschaftlichen Beregnungsbedarfs kommt [KLIWA 2011b].
- Es ist zu erwarten, dass der Klimawandel auch die Grundwasserbeschaffenheit beeinflussen wird. Dies betrifft insbesondere den Stickstoffkreislauf im Gewässerökosystem, der von der Bodenbeschaffenheit, der Bodentemperatur und dem Bodenwasserhaushalt abhängig ist. Bei erhöhten Temperaturen ist mit einer verstärkten Stickstoffmineralisation zu rechnen. Ob dies mit einer Veränderung der Nitratwerte im Grundwasser verbunden sein wird, kann derzeit noch nicht sicher abgeschätzt werden, da die positiven Effekte der durch eine ordnungsgemäße Landwirtschaft reduzierten Nitratwerte durch Effekte der Klimaänderung überlagert werden.
- Aus der sich abzeichnenden innerjährlichen Umverteilung des Niederschlags - Zunahme im Winter und Abnahme im Sommer- ergibt sich auch eine Umverteilung bei den nachfolgenden Komponenten des Wasserhaushalts, z. B. bei der Grundwasserneubildung aus Niederschlag [KLIWA 2006b, 2009a, 2011b]. Daraus kann für die Zukunft ein veränderter innerjährlicher Gang der Grundwasserstände sowie eine größere Schwankungsbreite resultieren, was zu einer steigenden Vernässungsgefahr und zu Setzungsschäden führen kann.

Belastbare Angaben für den Zeitraum 2071-2100 liegen derzeit nicht vor.

### **3.5.3 Anpassungskapazität**

Für das Grundwasser sind keine abrupten Veränderungen im Zuge der prognostizierten Klimaveränderungen zu erwarten. Die für die Grundwasserneubildung relevanten Klimafaktoren sind in erster Linie Niederschlag, Lufttemperatur und Verdunstung. Neben diesen Klimafaktoren hat die Landnutzung einen wesentlichen Einfluss auf die Sickerwasserrate und somit die Grundwasserneubildung. Bei einer wesentlichen Änderung der Grundwasserverhältnisse ist je nach Region eine Anpassung schwierig. Maßnahmen zur Grundwasseranreicherung wie grüne Infrastruktur, Erhalt/Ausweitung von Feuchtgebieten oder gezielte Versickerung sind zwar prinzipiell möglich, stehen aber potentiell in Konflikt mit anderen Handlungsfeldern, weshalb eine Umsetzung nicht immer ohne Probleme möglich sein wird.

### **3.5.4 Dringlichkeit**

Die Grundwasserneubildung findet überwiegend im Winterhalbjahr statt (ca. 75%), auf das Sommerhalbjahr entfallen etwa 25%. Aus den langjährigen Beobachtungen in Süddeutschland (BW, BY, RP) geht hervor, dass viele Grundwassermessstellen im mittleren Verhalten eine Tendenz zu niedrigeren Werten zeigen, in den letzten Dekaden hat sich dieser Trend jedoch abgeschwächt oder umgedreht, so dass sich kein einheitliches Bild zum Klimasignal ergibt [KLIWA 2011b]. Jedoch lässt sich feststellen, dass eine Tendenz zu einem immer früheren Auftreten des Maximums (im Mittel etwa 0,6 Tage/Jahr, also einer Verschiebung von 4 bis 6 Wochen seit 1950) vorliegt. Ebenso ist eine Tendenz zur Verstärkung der Amplitude zwischen dem Minimum und dem Maximum des Jahresgangs bzw. hin zu einer insgesamt höheren zeitlichen Variabilität zu erkennen [KLIWA 2011b]. Für den Projektionszeitraum der nahen Zukunft (2021-2050) mit einer simulierten Erwärmung von 1,6°C bis 1,8°C ergibt sich für Baden-Württemberg eine vorläufige Bandbreite für die Änderung der mittleren jährlichen Grundwasserneubildung von -4% bis +14% [KLIWA 2006b, 2009a], wobei in den Regionen Oberschwaben und Schwäbische Alb mit einem leichten Rückgang der Grundwasserneubildung gerechnet werden muss. Gleichzeitig steigt die zeitliche und räumliche Variabilität der Grundwasserneubildung und damit auch die Variabilität der Grundwasserstände. Insgesamt überträgt sich der Klimawandel aber nur langsam auf den Grundwasserbereich.

### **3.5.5 Gesamtbetrachtung der Vulnerabilität**

Bei einer hohen Exposition, mittleren Bewertung von Sensitivität und potenziellen Auswirkungen und einer mittleren Anpassungskapazität wird die Vulnerabilität des Schwerpunktes Grundwasser insgesamt als mittel eingestuft.

### Kernaussagen zum Schwerpunktthema Grundwasser

- *Im Bereich Grundwasser sind keine abrupten Veränderungen zu erwarten, da das System langsam reagiert und mehrere Faktoren für die Grundwasserneubildung verantwortlich sind.*
- *Bisherige Trenduntersuchungen zeigen kein einheitliches Verhalten hinsichtlich einer allgemeinen signifikanten Zu- bzw. Abnahme der Grundwasserstände.*
- *Die Daten aus den Klimaleitplanken weisen darauf hin, dass die klimatische Wasserbilanz auf das Jahr bezogen sich nicht wesentlich ändern wird. Es ist aber davon auszugehen, dass die interannuellen Schwankungen zunehmen werden, d.h. mehr Grundwasserneubildung in den Wintermonaten und geringer Grundwasserneubildung in den Sommermonaten.*
- *Der zu erwartenden Temperaturanstieg wird sich in erster Linie auf geringmächtige, oberflächennahe Aquifere auswirken.*
- *Aussagen zu Änderung der Grundwasserqualität sind schwierig, da hier v.a. die nicht klimatischen Faktoren wie bspw. Landnutzung und Landnutzungsänderungen sowie die Agrarpolitik eine wesentliche Rolle spielen*

### 3.6 Trinkwasser

Das Schwerpunktthema Trinkwasserversorgung wird zur Analyse der Vulnerabilität entsprechend Abbildung 45 in die 3 Unterteilbereiche Wasserdargebot, Infrastruktur und Wasserabgabe untergliedert.



Abbildung 45: Schematische Untergliederung und Zusammenwirken der klimabeeinflussten Unterteilbereiche des Teilbereichs Trinkwasser; eigene Darstellung

Für die fundierte Beurteilung der Vulnerabilität der Wasserversorgung ist die detaillierte Einzelbetrachtung jedes einzelnen Wasserversorgungsunternehmens (WVU) hinsichtlich dieser drei Teilbereiche erforderlich. Hierzu ist die Kenntnis und Bewertung mindestens folgender Daten notwendig:

a) zum verfügbaren Wasserdargebot des WVU:

- Art, Anzahl und Ergiebigkeit der jeweils verfügbaren und erschlossenen Ressourcen in [l/s] (unterschiedliche Grundwasserhorizonte sind gegebenenfalls als getrennte Ressource zu betrachten),
- Entnahmerechte aus eigenen ortsnahen Ressourcen bzw. Bezugsrechte aus Gruppen- oder Fernwasserressourcen in [l/s]
- Verhältnis der Bezugsrechte zu den tatsächlichen Kapazitäten bzw. Ergiebigkeiten der Gruppen- oder Fernwasserressourcen

b) zur vorhandenen technischen Infrastruktur des WVU:

- Ausbaugrad von Fassungen, Aufbereitung, Transport in [l/s] sowie in Relation zum Tagesspitzenverbrauch  $Q_{dmax}$  in [%] sowie Speicherung in Relation zum Tagesspitzenverbrauch  $Q_{dmax}$  in [%]
- Anzahl der Versorgungs- bzw. Druckzonen mit Zuordnung zu den einzelnen Ressourcen
- Ausbaugrad der Verteilung in Relation zum Stundenspitzenverbrauch  $Q_{hmax}$  in [%]
- Technische Details bezüglich der Transport- und Speicherbauwerke zur Herstellung eines Verbundes mit Gruppen- oder Fernwasserversorgungen für jede einzelne Versorgungs- bzw. Druckzone (Schemaplan zur hydraulischen Verschaltung des WVU intern und im Verbund)

c) zur konkreten Wasserabgabe, Eigenverbrauch und Wasserverlusten des WVU:

- Spitzenwasserabgabe  $Q_{dmax}$  und durchschnittliche Tagesabgabe  $Q_{dm}$  in [m<sup>3</sup>/d] und Spitzenstundenabgabe  $Q_{hmax}$  in [m<sup>3</sup>/h] pro Versorgungs- bzw. Druckzone
- Eigenverbrauch und Wasserverluste in [%] der Jahresabgabe  $Q_a$ .

Die genannten Daten liegen bisher auf verschiedenen Ebenen bei verschiedenen Akteuren der Wasserversorgung vor. Die aufwändige Zusammenführung, Überprüfung, Ergänzung und Bewertung dieser Daten war im Rahmen dieses Gutachtens nicht möglich. Daher wird im Folgenden versucht, zunächst aufgrund landesweiter Erkenntnisse für Baden-Württemberg und zusätzlich -falls vorhanden- lokaler oder regionaler Erkenntnisse eine Beurteilung vorzunehmen.

Bereits in der Vergangenheit traten Extremwetterlagen auf, anhand derer Exposition, Sensitivität, potenzielle Auswirkungen und Anpassungskapazität der Trinkwasserversorgung analysiert werden können. Für alle Aspekte der Trinkwasserversorgung kann hierfür die

Situation im heißen und durch eine besonders lange Trockenperiode charakterisierten Sommer 2003 herangezogen werden.

### **3.6.1 Exposition**

Das Wasserdargebot wird flächendeckend und lokal durch die Veränderung der klimatischen Kenngrößen beeinflusst. Aufgrund der in Baden-Württemberg vorhandenen Strukturen in der Trinkwasserversorgung einerseits und der für dieses Gutachten gewählten Untergliederung der Teilbereiche andererseits wird dieser Teilbereich landesweit in den Schwerpunktthemen Grundwasser, Bodensee und Hochwasser bzw. Niedrigwasser mitbehandelt. Liegen lokale Erkenntnisse vor, so werden diese im Rahmen des Schwerpunktthemas Trinkwasser behandelt.

Die beiden Teilbereiche Infrastruktur und Wasserabgabe werden durch Änderung der klimatischen Parameter wie in Tabelle 10 zusammengefasst, beeinflusst.

Deutlich wird, dass sowohl Infrastruktur als auch Wasserabgabe im Wesentlichen durch die quantitativen Auswirkungen der Veränderungen der Klimakenngrößen betroffen sind. Zusätzlich kommt es im Bereich Infrastruktur zu einer qualitativen Exposition, da eine signifikante und langanhaltende Zunahme der Lufttemperatur im Zusammenspiel mit sinkenden Wasserabgaben zu einer Erhöhung der Trinkwassertemperatur insbesondere in Verteilnetzen führen kann, was wiederum das Wachstum hygienisch relevanter Bakterien begünstigen kann.

Tabelle 10: Expositions Betrachtung für das Schwerpunktthema Trinkwasser

KK	Veränderung KK	Beschreibung der Veränderungen (Exposition)
N	Zunahme Dauer von Trockenperioden	<b>Wasserabgabe:</b> Anstieg der Wasserabgabe aufgrund Änderung des Bedarfsverhaltens: Zunahme private Gartenbewässerung, Zunahme öffentliche Grünanlagenbewässerung, Zunahme landwirtschaftliche und gartenbauliche Bewässerung
		<b>Infrastruktur:</b> Störfall: Trockenfallen von Fassungsanlagen für Oberflächenwasser durch Niedrigwasser
	Zunahme Starkniederschläge	<b>Infrastruktur:</b> Störfall: Überflutung von Fassungsanlagen für Oberflächenwasser durch Hochwasser
T	Zunahme Sommertage	<b>Wasserabgabe:</b> Anstieg der Wasserabgabe aufgrund Änderung des Bedarfsverhaltens: Zunahme private Gartenbewässerung, Zunahme öffentliche Grünanlagenbewässerung Zunahme landwirtschaftliche und gartenbauliche Bewässerung Zunahme privater Verbrauch (häufigeres Duschen) Zunahme öffentlicher Verbrauch in Schwimmbädern wg. höherer Besucherzahl und längerer Verweildauer
	Zunahme Tropentage	<b>Wasserabgabe:</b> Verschärfter Anstieg der Wasserabgabe aufgrund Änderung des Bedarfsverhaltens: Zunahme private Gartenbewässerung, Zunahme öffentliche Grünanlagenbewässerung Zunahme landwirtschaftliche und gartenbauliche Bewässerung Zunahme privater Verbrauch (häufigeres Duschen) Zunahme öffentlicher Verbrauch in Schwimmbädern wg. höherer Besucherzahl und längerer Verweildauer
N, T	Zunahme Dauer von Trockenperioden	<b>Infrastruktur:</b> Bemessung und Betrieb der Infrastrukturteile wegen Änderungen des Bedarfsverhaltens: Größere notwendige Fassungs-, Aufbereitungs-, Transport und Speicherkapazitäten
	Zunahme Sommertage	ODER Längere notwendige Betriebszeiten mit vorhandenen Fassungs-, Aufbereitungs- und Transportkapazitäten und größere Speicherkapazitäten
	Zunahme Tropentage	Betrieb des Infrastrukturteiles Verteilung wegen Gefahr der stärkeren Erwärmung des Trinkwassers bei langen Verweilzeiten
W	Zunahme Extremereignisse	<b>Infrastruktur:</b> Störfall: Unterbrechung der Energieversorgung führt zu Unterbrechung der Aufbereitung und in der Regel –wenn zum Transport Pumpenergie eingesetzt werden muss- zur Unterbrechung des Wassertransports

• KK: Klimatische Kenngrößen (N: Niederschlag, T: Temperatur, GS: Globalstrahlung, W: Wind)

### 3.6.2 Sensitivität und potenzielle Auswirkungen

#### 3.6.2.1 Nutzung des Dargebots

Landesweit für Baden-Württemberg betrachtet hat die öffentliche Wasserversorgung an der Nutzung des natürlichen Wasserdargebots einen Anteil von ca. 1,4 % des Wasserdargebots. Möglicherweise signifikante Anteile sind nur lokal bei Grundwasser-, Quellwasser- und

„großen“ Oberflächenwasserentnahmen wie etwa der Donauwasserfassung des Zweckverbandes Landeswasserversorgung (LW) bei Ulm, der Entnahme durch den Zweckverband Kleine Kinzig (WKK) aus der Talsperre Kleine Kinzig bei Freudenstadt oder der Bodenseewasserentnahme des Zweckverbandes Bodenseewasserversorgung (BWV) zu erwarten.

Der quantitative „Druck“ auf die Wasserressourcen ist von 1991 bis 2010 kontinuierlich um über 32 % zurückgegangen. Der Verbrauch von Bevölkerung und Industrie hat sich trotz steigendem Lebensstandard und höheren Komfortexpectationen deutlich verringert. Steigendes Umweltbewusstsein, verbesserte Haustechnik –Stichwort Wasserspartaste-, Kosten für Brauch- und Prozesswasser und andere klimaunabhängige Faktoren haben dies bewirkt.

Als kritisch hinsichtlich Sensitivität und potenziellen Auswirkungen ist ein trockener und heißer Sommer anzusehen. Das verfügbare und nutzbare Wasserdargebot wird hier durch fallende Grundwasserspiegel, zurückgehende Quellschüttungen insbesondere in den Mittelgebirgsregionen und Niedrigwasser der Donau bei Ulm eingeschränkt. Größte denkbare potenzielle Auswirkung wäre eine Einschränkung des Dargebots bis hin zum Trockenfallen von Fassungen.

Als wenig kritisch sind hierbei der Bodensee und die Talsperre Kleine Kinzig anzusehen, da sie einerseits als große Jahres- bzw. Mehrjahresausgleichsspeicher wirken und somit auch mehrjährige Extreme des Wasserdargebots ausgleichen können und andererseits die Wasserentnahme in so großer Seetiefe erfolgt, dass Entnahmeeinrichtungen nicht trockenfallen können. Die lokal und regional durchgeführten Analysen der Auswirkungen des trockenen und heißen Sommers 2003 auf das verfügbare Wasserdargebot erbrachten keine derartigen kritischen Auswirkungen für die Trinkwasserversorgung (Abfrage bei LW, BWV, NOW, WKK, DVGW) in Baden-Württemberg.

Im Fall der Grundwasserstände und Quellschüttungen sind zusätzlich Analysen von Szenarien erforderlich, die extrem niedrige Grundwasserstände zum Ende des Winterhalbjahres mit einem nachfolgend besonders trockenen und heißen Sommerhalbjahr koppeln. Entsprechende Modellierungen wurde beim Zweckverband LW intern durch Koppelung des Dargebots des Jahres 1998 mit einem extrem niedrigen Ausgangsgrundwasserstand am Ende des Winterhalbjahres mit den Verbrauchsdaten des trockenen und heißen Jahres 2003 durchgeführt. Auch diese Kopplung von Extremszenarien führte im Fall der LW zu keiner kritischen Situation des Grundwasserdargebots (persönliche Mitteilung durch Dr. Emmert am 27.03.2013).

Im Fall der Talsperre Kleine Kinzig und des Bodensees sind zusätzlich Analysen von Langzeitszenarien erforderlich, die das Zusammenwirken mehrerer Trocken-Heiß-Jahre mit

entsprechend geringerem Wasserdargebot und höherer Wasserabgabe koppeln. Dies wird im Falle des Bodensees unter anderem im Rahmen des laufenden Vorhabens KLIMBO untersucht [Schick und Meggeneder, 2013]. Ein umfassender Abschlussbericht liegt gegenwärtig noch nicht vor.

### 3.6.2.2 Wasserabgabe

Die technische Struktur einer Wasserversorgungsanlage, die Bemessung und der Betrieb der einzelnen technischen Elemente der Wasserversorgungsinfrastruktur hängen direkt von der Entwicklung der Wasserabgabe ab. Maßgebend für die Infrastrukturteile Fassungen, Aufbereitung, Transport und Speicherung ist hierbei der maximale Tagesbedarf eines Versorgungsgebietes  $Q_{dmax}$  sowie das Verhältnis des maximalen Tagesbedarf  $Q_{dmax}$  zum durchschnittlichen Tagesbedarf  $Q_{dm}$ . Maßgebend für das Infrastrukturteil Verteilung ist hierbei der maximale Stundenbedarf eines Versorgungsgebietes  $Q_{hmax}$  sowie das Verhältnis des maximalen Stundenbedarf  $Q_{hmax}$  zum durchschnittlichen Stundenbedarf  $Q_{hm}$ .

Die Entwicklung von  $Q_{dmax}$ ,  $Q_{hmax}$ ,  $Q_{dm}$  und  $Q_{hm}$  wird von anthropogenen Veränderungen der Bedarfsstruktur und des Bedarfsverhaltens ständig, bedeutsam und rasch –z.B. Änderungen von Einwohnerzahlen oder des spezifischen Wasserverbrauchs – zur Erinnerung: die Bandbreite in den Kommunen Baden-Württemberg variierte 2010 zwischen 77 und 240 l/E\*d -, sowie der industriellen, landwirtschaftlichen und gartenbaulichen Wassernutzung- beeinflusst.

Einen weiteren signifikanten Einflussfaktor auf die Wasserabgabe stellt die private dezentrale Regenwassernutzung dar. Hier kann bei einem hohen Nutzungsgrad und günstigen Randbedingungen –hohes Verhältnis von angeschlossener Dachfläche zu Einwohnerzahl des Gebäudes, günstige Dachgestaltung, groß dimensionierte Zisternen- eine signifikante Abnahme der Jahresabgabe und somit auch der durchschnittlichen Tagesabgabe  $Q_{dm}$  erwartet werden. Allerdings ist nur beim Zusammentreffen besonders günstiger Voraussetzungen –sehr hohes Verhältnis von angeschlossener Dachfläche zu Einwohnerzahl, günstige Dachgestaltung, sehr groß dimensionierte Zisternen, hoher Anteil der Gartenbewässerung an der Regenwassernutzung- auch ein signifikanter Einfluss auf die hier relevante und kritische Spitzentagesabgabe  $Q_{dmax}$  zu erwarten. Im Allgemeinen muss bei dezentraler Regenwassernutzung daher eher mit einer ungünstigen Spreizung von  $Q_{dmax}/Q_{dm}$  gerechnet werden.

Ein nicht zu vernachlässigender Anteil an der Wasserabgabe rührt darüber hinaus aus Eigenverbrauch der WVU und Wasserverlusten aufgrund von Undichtigkeiten insbesondere der Verteilnetze. Die Statistik gibt als mittleren Wert für Baden-Württemberg im Jahr 2010 hierfür einen Wert von 13,23 % der entnommenen und aufbereiteten Wassermenge an. Eine eigene stichprobenartige Auswertung von 30 WVU von A wie Aalen bis Z wie Zwingenberg

ergab für den Anteil der Verluste und des Eigenverbrauchs Werte zwischen 7,14 und 42,84 %, wobei mehrfach Werte von über 30 % auch bei WVU größerer Städte auftraten [Statistisches Landesamt, 2010].

Klimatische Kenngrößen beeinflussen die Entwicklung des Bedarfsverhaltens zusätzlich. Somit ist die Wasserabgabe allein landesweit nicht als signifikant sensitiv für Klimafolgen zu bewerten.

Flächendeckende Untersuchungen zum bisherigen Einfluss klimarelevanter Kenngrößen auf die lokale Wasserabgabe der einzelnen WVU liegen noch nicht vor. Allerdings wurden verschiedene regionale und lokale Untersuchungen durchgeführt. So hat der Zweckverband Landeswasserversorgung (LW) intern den Einfluss des demografischen Wandels und des Klimawandels auf Basis des trockenen und heißen Sommers 2003 auf seine technische Infrastruktur untersucht [ZVLW, 2012]. Da der Zweckverband LW als Fernwasserversorgungsunternehmen keine eigene Wasserverteilungsinfrastruktur betreibt, wurden Einflüsse auf  $Q_{hmax}$  und  $Q_{hm}$  nicht untersucht.

Wesentliche Ergebnisse sind:

- Der Einfluss des Klimawandels kann nur zusammen mit dem Einfluss des demografischen Wandels betrachtet und bewertet werden.
- Nimmt die Zahl der Tage mit Temperaturen  $> 26^{\circ}\text{C}$  um mindestens 20 pro Jahr zu, so führt dies zu einem Anstieg der Spitzenabgabe  $Q_{dmax}$  um 12,5 %, während die durchschnittliche Abgabe  $Q_{dm}$  nur um 5,2 % ansteigt. Dadurch kommt es zu einer Spreizung von  $Q_{dmax}/Q_{dm}$ .
- Im Zusammenwirken mit demografischen Effekten (hier: Bevölkerungsabnahme) und sonstigen Effekten wie Feiertagen und Schulferien wird sowohl die durchschnittliche als auch die Spitzenabgabe im Versorgungsgebiet der LW abnehmen.

Im Rahmen eines laufenden DVGW-Forschungsvorhabens werden gegenwärtig die Einflüsse verschiedener Bedarfsstrukturen auf das Bedarfsverhalten und die Wasserabgabe untersucht und aktualisierte Verbrauchsganglinien ermittelt. Die bisherigen- noch nicht veröffentlichten Ergebnisse- decken sich tendenziell mit den zitierten Erkenntnissen der internen Untersuchungen des Zweckverband LW. Außerdem ist auch im Bereich der Wasserverteilung von einer Spreizung des Verhältnisses von  $Q_{hmax}$  zu  $Q_{hm}$  auszugehen. (Aktualisierung der Verbrauchsganglinien und Entwicklung eines Wasserverbrauchsmodells: laufendes DVGW-Forschungsvorhaben, unveröffentlicht, Teilergebnisse persönlich übermittelt von Prof. Dr.-Ing. W. Hoch, März 2013).

### 3.6.2.3 Infrastruktur

Potenzielle Auswirkungen einer Zunahme von  $Q_{dmax}$  sind größere notwendige Fassungs-, Aufbereitungs-, Transport- und Speicherkapazitäten. Fallen diese zusammen mit einer Verminderung oder Einschränkung des lokalen oder regionalen Wasserdargebots, kann eine Wasserversorgungsanlage trotz ausreichender Kapazitäten seiner Speicher- und Verteilungskapazitäten „versagen“. Potenzielle Auswirkungen einer Zunahme von  $Q_{hmax}$  sind größere notwendige Wasserverteilungskapazitäten.

Die lokal und regional durchgeführten Analysen der Auswirkungen des trockenen und heißen Sommers 2003 auf die vorhandene Wasserversorgungsinfrastruktur zeigen, dass kein Trinkwasserversorgungssystem (Abfrage bei LW, BWV, NOW, WKK, DVGW) in Baden-Württemberg versagt hat.

Potenzielle Auswirkungen einer Zunahme der Trinkwassertemperatur werden gegenwärtig im Rahmen des Verbundprojekts dynaklim für die Emscher-Lippe-Region untersucht. Folge einer Erhöhung der Lufttemperatur bei gleichzeitigem Zusammentreffen ungünstiger Bedingungen -lange Verweilzeiten im Verteilnetz, relativ hohe Nährstoffgehalte des Wassers und geringe Verlegetiefen- kann das Wachstum hygienisch relevanter Bakterien sein. Potenzielle Auswirkung dieser mikrobiologischen Qualitätsverminderung ist u.U. die Erfordernis zusätzlicher Aufbereitungsmaßnahmen zur weitergehenden Nährstoffverminderung oder Desinfektion und/oder Anpassungsstrategien zum Betrieb des Verteilnetzes wie etwa häufigere Leitungsspülungen. Ein umfassender Abschlussbericht soll im Juni 2014 vorliegen. Andererseits liegen analoge Problemstellungen bei vielen überdimensionierten Verteilnetzen in den neuen Bundesländern und adäquate Anpassungsstrategien bereits seit vielen Jahren vor, so dass diese Problemstellung als beherrschbar anzusehen ist.

### 3.6.3 Anpassungskapazität

Grundsätzlich steht die öffentliche Wasserversorgung von jeher vor dem Problem, kurzfristige Extremschwankungen in der Wasserabgabe -stündlich von  $Q_{hmin}$  bis  $Q_{hmax}$ , täglich von  $Q_{dmin}$  bis  $Q_{dmax}$ , wöchentlich von  $Q_{wmin}$  bis  $Q_{wmax}$  und monatlich von  $Q_{mmin}$  bis  $Q_{mmax}$ - bei gleichzeitigen mittel- bis langfristigen Schwankungen und Veränderungen des Wasserdargebots durch eine entsprechende Auslegung und einen flexiblen Betrieb der Infrastruktureile zu bewältigen. Die Lebens- und Betriebsdauer der einzelnen Infrastruktureile beträgt mehrere Jahrzehnte. Dadurch sind Transformationsprozesse bei der Infrastruktur sehr langwierig und erfordern entsprechend langfristige Vorplanungen. Daher gilt hier in hohem Maße das Gebot der erforderlichen Redundanz für alle Infrastruktureile und das Gebot einer hohen Anpassungskapazität der Gesamtanlagen.

Beim Wasserdargebot, d.h. der Anpassung des Infrastrukturteiles Wasserfassung stehen grundsätzlich folgende Optionen offen:

- Nutzung langfristig hoch ergiebiger Ressourcen
- Aufgabe sensibler Ressourcen und Verlagerung der Wasserentnahme auf nicht sensitive oder hoch anpassungsfähige Ressourcen
- Verteilung der Wasserentnahme auf unterschiedliche Ressourcen. Konkret erfordert dies die Erschließung einer weiteren oder zweier weiterer unabhängiger Ressourcen -das sog. 2. und 3. Standbein- mit einem Ausbaugrad der Fassungen, der in der Summe deutlich über  $Q_{dmax}$  liegen muss
- Schaffung von Verbänden bei der Rohwasserbereitstellung mit Möglichkeit des gegenseitigen Austauschs.

Institutionell und organisatorisch bestehen die Möglichkeiten:

- Festsetzung des Vorrangs der Wasserversorgung vor den Nutzungen des Wasserdargebots durch andere Sektoren z.B. im Falle niedriger GW-Stände oder bei Niedrigwasser
- Ausweisung von Wasserschutz-, Wasservorrang- und Wasservorbehaltsgebieten
- Regionales oder gar landesweites Wasserdargebotsmanagement für Baden-Württemberg ausgehend vom Vorrang der öffentlichen Wasserversorgung.

Bei der Infrastruktur, d.h. der Anpassung der Infrastrukturteile Aufbereitung, Transport, Speicherung und Verteilung stehen grundsätzlich folgende technische Optionen offen:

- Landesweit bzw. regional: Schaffung von Verbänden mit gemeinsamer Nutzung von Aufbereitungs-, Transport- und Speicherkapazitäten
- Lokal: Vergrößerung von Aufbereitungs-, Transport-, Speicher und Verteilungskapazitäten

Institutionell und organisatorisch bestehen die Möglichkeiten:

- (Forderung und) Förderung von fundierten Strukturuntersuchungen für WVU
- (Forderung und) Förderung von Ausbaumaßnahmen
- (Forderung und) Förderung von technisch-organisatorischen Verbänden

Bei der Wasserabgabe, d.h. der Beeinflussung des Bedarfsverhaltens stehen grundsätzlich folgende Optionen offen:

- Mittel- bis langfristiges Wasserbedarfsmanagement bei den Verbrauchern: Verminderung der Abgabe durch Einführung/Förderung/Forderung wassersparender

Sanitär- und Wassernutzungstechnologien wie z.B. Toilettensparspülungen, effizientere Geschirrspül- und Waschmaschinenteknik, wassersparende Duschköpfe

- Kurzfristiges bzw. temporäres Wasserbedarfsmanagement bei den Verbrauchern in konkreten Wassermangelsituationen: Beschränkung/Limitierung der Abgabe durch Nutzungsbeschränkungen wie z.B. Verbot der Gartenbewässerung oder Verbot häufigen Duschens.
- Mittel- bis langfristiges WVU-internes Wasserbedarfsmanagement mittels Verminderung der Abgabe durch Minimierung von Rohrnetzverlusten und Eigenverbrauch der WVU.
- (Forderung und) Förderung von Programmen zur Minimierung von Rohrnetzverlusten und Eigenverbrauch der WVU
- Verminderung der (Spitzen-)Abgabe durch Förderung dezentraler privater Regenwassernutzungsmaßnahmen für die Gartenbewässerung.

Die heutige technische und institutionell-organisatorische Situation der Wasserversorgung in Baden-Württemberg beruht auf einem spezifischen Entwicklungsprozess, in dessen Verlauf einerseits grundsätzlich die Prinzipien Redundanz und hohe Anpassungskapazität und andererseits viele der zu Beginn dieses Abschnittes aufgelisteten Anpassungsoptionen zumindest zeitweilig Anwendung fanden. Zum Verständnis des heutigen Zustands wird im Folgenden ein kurzer geschichtlicher Aufriss der Entwicklung der Wasserversorgungsinfrastruktur in Baden-Württemberg dargestellt.

Trotz des generell sehr hohen Wasserdargebots in Baden-Württemberg kam es bis in die 50-er und 60-er Jahre des vorigen Jahrhunderts hinein regional -z.B. auf der Schwäbischen Alb und im mittleren Neckarraum- und lokal zu quantitativen und vereinzelt auch qualitativen Engpässen in der Bedienung der Nutzungswünsche und bei der Bedarfsabdeckung. Die Ursachen hierfür lagen vor allem in der unterschiedlichen Verteilung der Niederschläge und geologischen Gegebenheiten im Landesgebiet einerseits und der Entwicklung der Siedlungs- und Industriestrukturen andererseits. Entlang der Landesgrenzen –am Bodensee, im Iller- und Donautal und im Oberrheingraben gibt es sehr wasserreiche Gebiete. Diesen stehen wasserarme Gebiete im mittleren Neckarraum, auf der Hochfläche der Schwäbischen Alb und in einzelnen Schwarzwaldregionen gegenüber (siehe Abbildung 7). Die Erfahrungen mit dieser Wasserknappheit und den damaligen Engpässen bei der Wasserversorgung hat zur Verfolgung einer Planungsphilosophie und Förderstrategie auf der Basis von hoher Wasserqualität und hoher Versorgungssicherheit, Vorsorgeprinzip, Nachhaltigkeit, kommunaler Verantwortung für diese wesentliche Aufgabe der Daseinsvorsorge und Vorrang für ortsnahe Versorgung geführt [UM 2007b]. Resultat ist eine Wasserversorgungsstruktur

mit 1345 Wasserversorgungsunternehmen mit den sogenannten 3 Säulen Gemeinde-, Gruppen- und Fernwasserversorgungen: ca. 1150 Gemeindewasserversorgungen (987 kommunale, 83 privatrechtliche und 103 private Kleinversorger) decken ca. 47 %, 186 Gruppenwasserversorgungen decken ca. 20 % und 4 Fernwasserversorgungen (Zweckverband Bodensee-Wasserversorgung (BWV), Zweckverband Landeswasserversorgung (LW), Zweckverband Wasserversorgung Nordostwürttemberg (NOW) und Zweckverband Wasserversorgung Kleine Kinzig (WKK) decken ca. 33 % des Wasserbedarfs ab. Diese sind teilweise untereinander über Verbünde verknüpft. Gut die Hälfte der Wasserversorgungsunternehmen haben dabei eine Abgabemenge von < 250.000 m<sup>3</sup>/a, was einer Vergleichsgröße von ca. 5.000 Einwohnergleichwerten entspricht.

Geschützt wird die Qualität und Ergiebigkeit des Wasserdargebots für die Trinkwasserversorgung durch die Ausweisung von gegenwärtig ca. 2600 Wasserschutzgebieten, die etwa 26 % der Landesfläche bedecken.

In Abbildung 46 ist die aktuelle Struktur der Wasserversorgung in Baden-Württemberg schematisch dargestellt. Deutlich wird das hohe Maß an Vielfalt und Komplexizität.

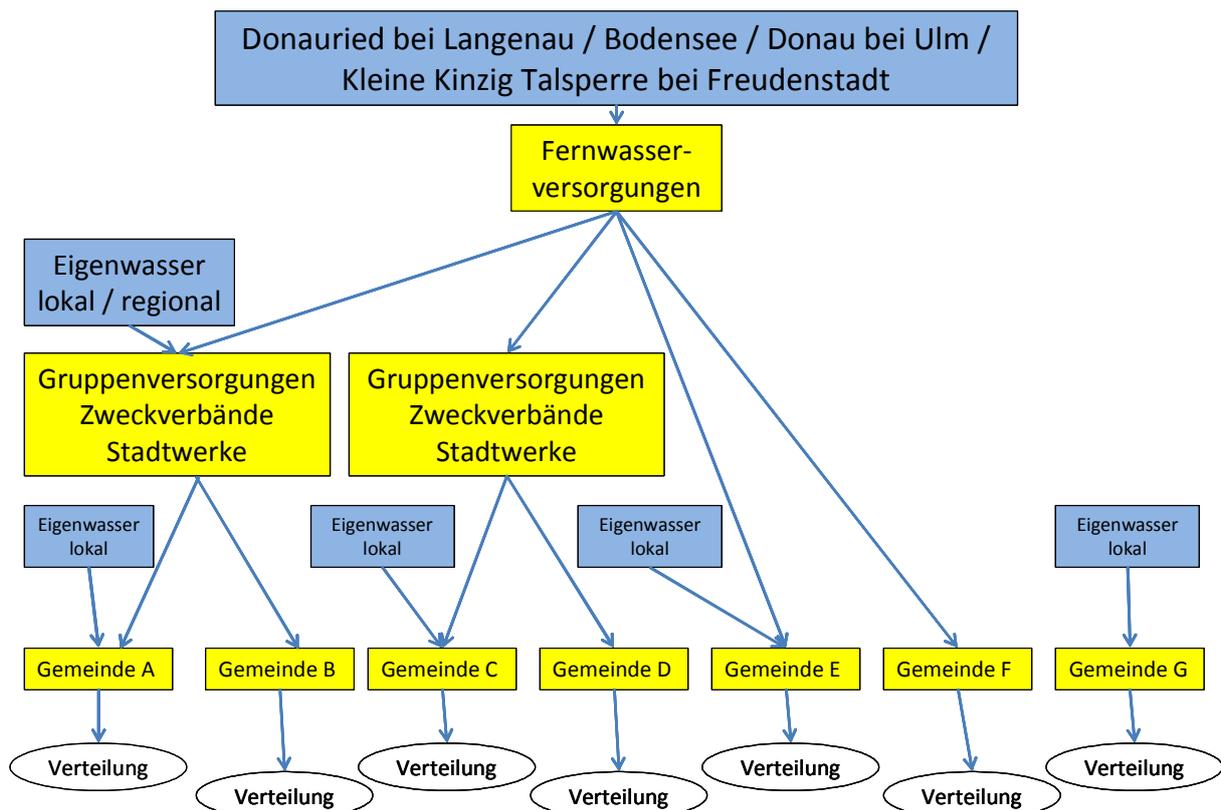


Abbildung 46: Gegenwärtige Struktur der Wasserversorgung in Baden-Württemberg (In Anlehnung an [Hofmann 2012])

Aus der Planungsphilosophie der anzustrebenden hohen Versorgungssicherheit folgt, dass bei der Planung und dem Betrieb der einzelnen Wasserversorgungssysteme grundsätzlich auf allen drei Ebenen auf redundante Strukturen zu achten ist, die auch bei Wegfall eines

Elements noch funktionsfähig sind (Beachtung der sogenannten n-1-Regel). Hieraus ergibt sich eine große Flexibilität und hohe Kapazitätsreserven bei den einzelnen WVU. Zusätzlich erhöht werden kann diese Flexibilität noch durch Schaffung von Verbänden zwischen Unternehmen einer Ebene oder Unternehmen verschiedener Ebenen.

Kritisch hinsichtlich einer flächendeckenden und zentralen Beurteilung der möglichen Anpassungspotenziale an Folgen des Klimawandels ist die Verteilung der Verantwortung für die Wasserversorgung auf drei Ebenen und eine Vielzahl von Unternehmen auf Gemeindeebene, da letztlich für eine exakte und fundierte Beurteilung jedes einzelne Unternehmen auf Gemeindeebene getrennt betrachtet werden muss.

Abbildung 47 stellt die Zuordnung aller Gemeinden in Baden-Württemberg zu einem der 4 Fernwasserversorgungssysteme bzw. zu einer Gruppenversorgung dar. Die nicht farblich angelegten Gemeinden stellen daher Gemeindegewässerversorgungssysteme dar.

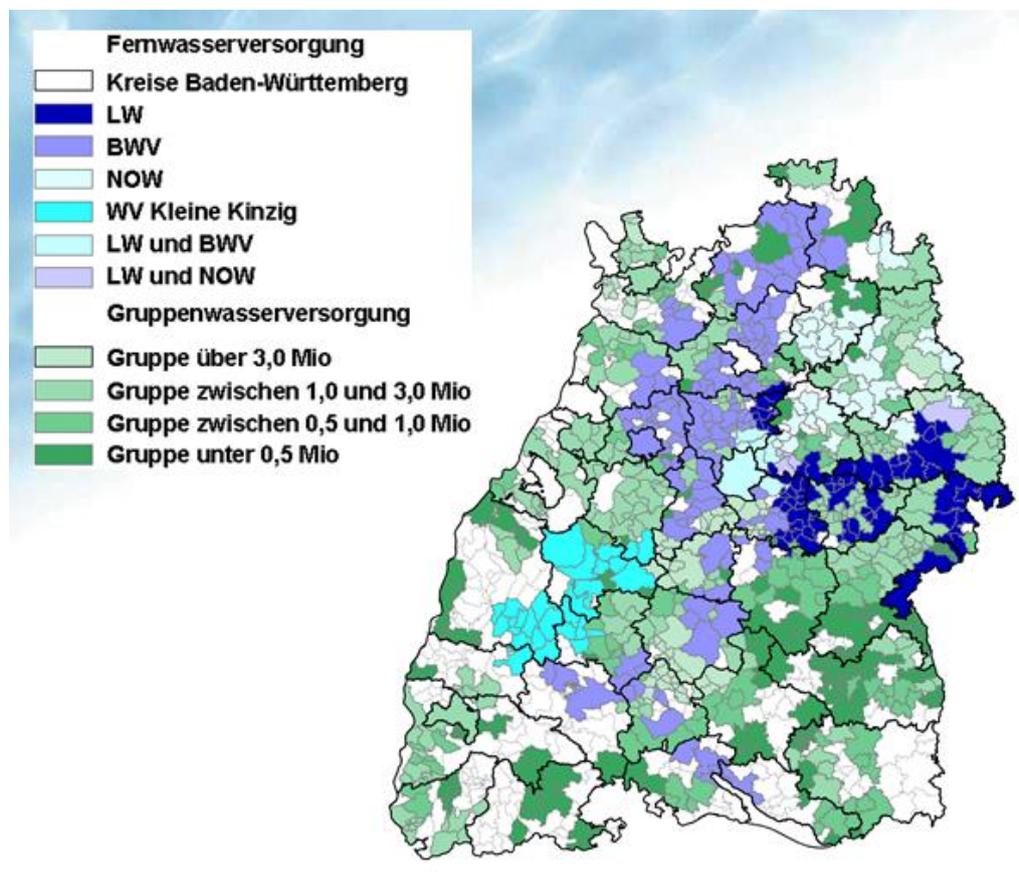


Abbildung 47: Zuordnung der Gemeinden von Baden-Württemberg zu einem Fernwasser- oder Gruppenwasserversorgungssystem. (Auswertung des Zweckverbandes LW auf Basis der Daten des statistischen Landesamtes [ZVLW 2004])

In den letzten 10 Jahren erfolgten weitergehende Optimierungen der Wasserversorgungsstrukturen mit den Zielrichtungen Kosteneinsparung und Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit, nachhaltigere Ressourcennutzung, Stärkung des Anlagenverbundes,

verbesserte und effektivere Anlagenauslastung und Optimierung des Personaleinsatzes. Erreicht werden sollte dies durch Bündelung der Kräfte –konkret Kooperationen und Fusionen, regionale Verbünde und gemeinsame Erledigung von Aufgaben sowie Einschaltung privater Dritter [UM 2003]). Dadurch wurden auch technische und organisatorische Verbünde geschaffen, die durch Zusammenfassen verschiedener lokaler Eigenvorkommen und Verknüpfung mit Fernwasserversorgungsstrukturen zu höherer Versorgungssicherheit und Flexibilität führten.

Als Beispiel sei hier das Rohwasserkonzept des Zweckverband NOW genannt, welches durch Einbindung regionaler bzw. lokaler Eigenwasservorkommen in den Verbund eine Erhöhung des Eigenwasservorkommens von ca. 0,2 Mio m<sup>3</sup> in 2005 über 1,4 Mio m<sup>3</sup> in 2008 auf ca. 3,6 Mio. m<sup>3</sup> in 2010 bewirkte [NOW 2011].

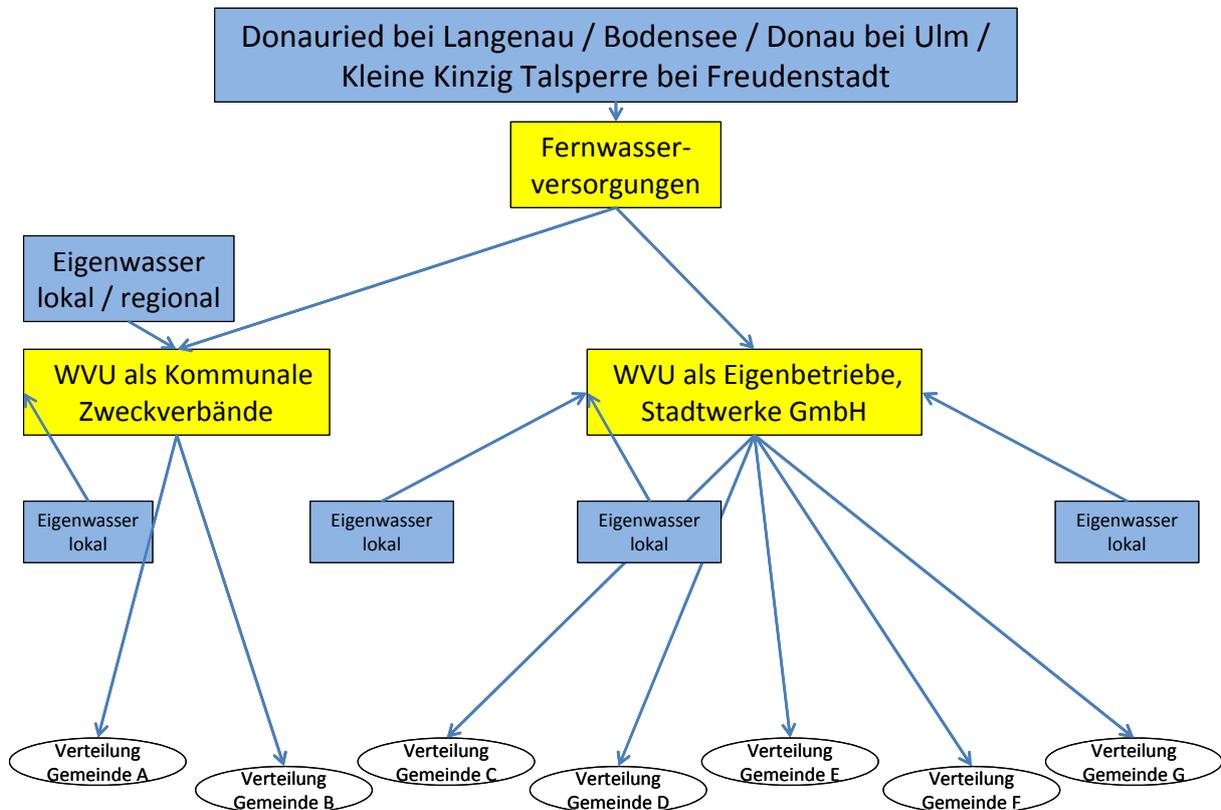


Abbildung 48: Gegenwärtig angestrebte und teilweise bereits erreichte Struktur der Wasserversorgung in Baden-Württemberg (In Anlehnung an [Hofmann 2012])

Abbildung 48 zeigt die angestrebte und in Teilen bereits umgesetzte Struktur der Wasserversorgung in Baden-Württemberg. Ziel ist, durch die Zusammenfassung vieler kleiner Gemeinde-WVU in kommunalen Zweckverbänden oder Eigenbetrieben eine deutliche Zentralisierung der Verantwortlichkeiten und des Know-Hows zu erreichen, wodurch eine flexiblere und effizientere Nutzung des Wasserdargebots und der zentralen Infrastruktureile wie Fassung, Aufbereitung, Transport und Speicherung im Verbund möglich wird.

Bei Berücksichtigung der Zielvorgaben Erhöhung von Versorgungssicherheit und Flexibilität führt die Bildung von Verbänden neben wirtschaftlichen Vorteilen auch zu einer höheren Anpassungskapazität der Verbände gegenüber aktuellen und möglichen zukünftigen Klimabedingungen.

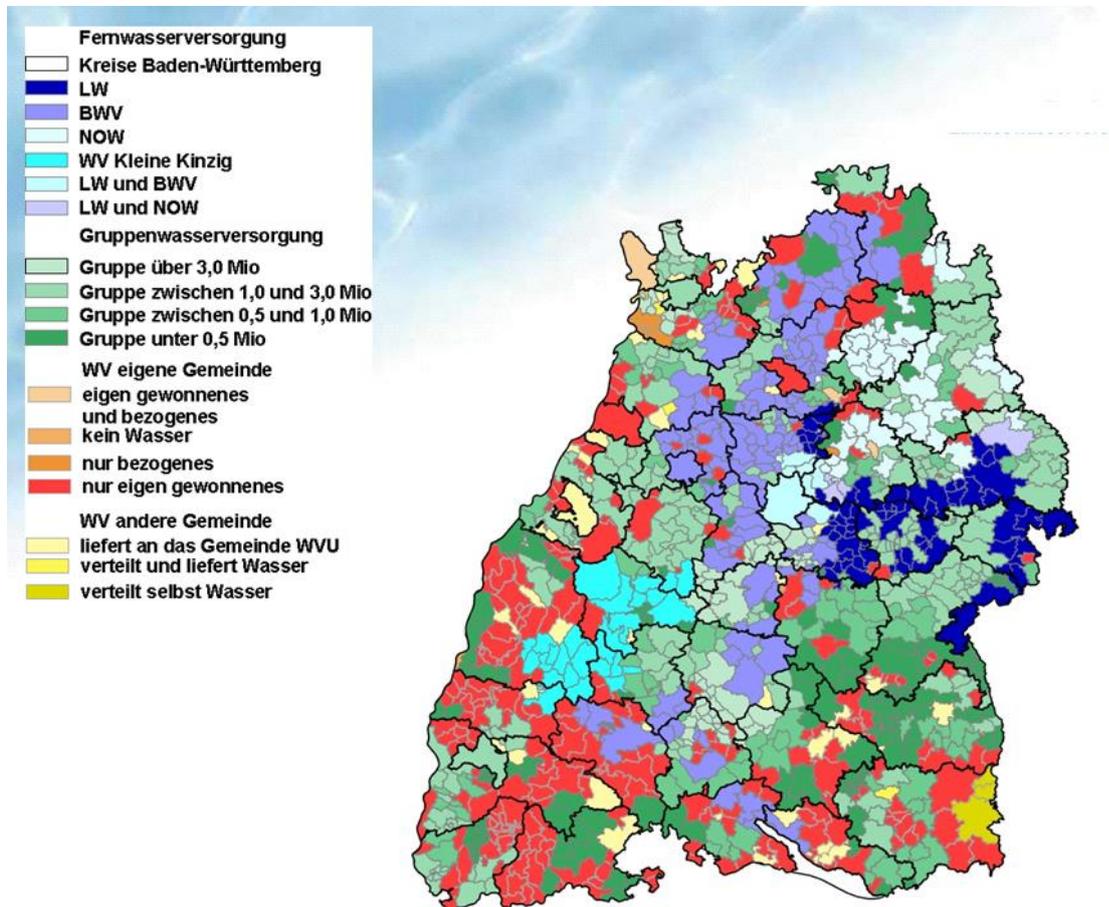


Abbildung 49: Wasserbereitstellungsstruktur der Städte und Gemeinden in Baden-Württemberg (Auswertung des Zweckverbandes LW auf Basis der Daten des statistischen Landesamtes [ZVLW 2004])

### 3.6.3.1 Aktuelle Anpassungskapazität hinsichtlich des Wasserdargebots und der Wasserabgabe

Aus der in Abbildung 49 dargestellten Wasserbereitstellungsstruktur aller Städte und Gemeinden Baden-Württembergs lässt sich ein erster Hinweis auf die Anpassungskapazität einzelner Gemeinden oder Städte an Änderungen des Wasserdargebots bzw. gegenüber starken Änderungen der Wasserabgabe abschätzen. Eine möglicherweise geringe Anpassungskapazität weisen solche Gemeinden bzw. WVU auf, die –statistisch betrachtet– nur über ein „Standbein“ verfügen, d.h. nur Eigenwasser nutzen (rot) oder nur bezogenes (bräunlich-beige) oder nur EIN Fernwasser beziehen (Farben der 4 einzelnen Fernwasserversorgungssysteme).

Bei diesen WVU muss eine weitergehende detaillierte Analyse zum verfügbaren Wasserdargebot erfolgen. Insbesondere ist zu klären:

- handelt es sich beim erschlossenen Eigenwasser tatsächlich nur um eine Ressource oder möglicherweise doch um mehrere unabhängige Ressourcen (wie z.B. Brunnen in oder Quellen aus mehreren unabhängigen Aquiferen)
- in welcher Relation stehen Ergiebigkeit(en) der Ressource(n) zu Entnahmerechten und  $Q_{dmax}$ : macht der  $Q_{dmax}$  nur einen geringen Anteil an der Ergiebigkeit der Ressource(n) aus, ist die Anpassungskapazität trotz der Abhängigkeit von nur einem Standbein hoch.
- bei Fremdbezug bzw. Fernwasserbezug: in welcher Relation stehen Bezugsrechte und  $Q_{dmax}$ : Liegen die Bezugsrechte deutlich über  $Q_{dmax}$  oder lässt die Kapazität der Fernwasserversorgung oder des Vorlieferanten eine Erhöhung der Bezugsrechte zu, ist die Anpassungskapazität trotz der Abhängigkeit von nur einem Standbein hoch.

Eine tatsächlich geringe Anpassungskapazität hinsichtlich Wasserdargebot und Wasserabgabe weisen demnach:

- WVU auf, die nur eine Ressource nutzen –d.h. nur eigenes Grundwasser oder Quellwasser aus einem Aquifer oder eine eigene Oberflächenwasserressource- UND die Ergiebigkeit dieser Ressource weitgehend ausnutzen
- ODER diejenigen WVU, die nur ein Fremd- oder Fernwasser beziehen UND die ihre Bezugsrechte weitgehend ausnutzen UND bei denen eine Erhöhung der Bezugsrechte nicht möglich ist.

Bei allen Gemeinden, die mehrere Wasservorkommen nutzen und daher –statistisch betrachtet- zunächst auf den ersten Blick eine höhere Anpassungskapazität aufweisen, muss im Detail geprüft werden, ob wirklich die technischen Voraussetzungen vorhanden sind, damit das gesamte Versorgungsgebiet aus mehreren Wasservorkommen versorgt werden kann oder ob möglicherweise doch Versorgungszonen vorhanden sind, die nur mit einem Wasservorkommen versorgt werden können. Des Weiteren muss auch für diese WVU das Verhältnis ihres  $Q_{dmax}$  zu den Bezugsrechten und Ergiebigkeiten der verschiedenen genutzten Wasservorkommen ermittelt und bewertet werden.

Unter Berücksichtigung der Strukturdiagramme aus Abbildung 46 bzw. Abbildung 48 wird darüber hinaus klar, dass die fundierte Beurteilung der Anpassungskapazität erfordert, jede der drei bzw. zwei Ebenen für sich und zusätzlich im Verbund zu betrachten. Besonders komplex wird die Beurteilung der Situation von Gemeinden, die wie z.B. Gemeinde A eine Wasserbereitstellung aus drei Ressourcen erhalten: „eigenes“ ortsnahes Eigenwasser, Eigenwasser Ihrer Gruppenversorgung bzw.

Ihres Zweckverbandes sowie Fernwasser. Auf den ersten Blick bietet eine solche Wasserversorgung auf drei Standbeinen eine höhere Flexibilität und damit auch höhere Anpassungskapazität gegenüber Einflüssen des Klimawandels als die Situation von Gemeinde G, die nur lokale Eigenwasservorkommen nutzen kann. Bei der Beurteilung der Anpassungskapazität muss allerdings für jede Gemeinde bzw. jedes Versorgungssystem detailliert die Kapazität der einzelnen Ressourcen und ihre tatsächliche technisch-hydraulische Nutzbarkeit -Ergiebigkeit, Bezugs- und Entnahmerechte, Kapazität der Fassungen bzw. Übergabepunkte- überprüft werden. Dies kann zum Ergebnis haben, dass eine Gemeinde G mit einer sehr ergiebigen Eigenwasserressource, die sie nur zu einem sehr geringen Anteil nutzt, eine weit höhere Anpassungskapazität gegenüber Klimaschwankungen aufweist, als eine Gemeinde A, die zwar aus drei Ressourcen versorgt wird, die aber in ihrer Ergiebigkeit bereits weitgehend ausgeschöpft sind und daher hoch sensitiv gegenüber Klimaschwankungen ist, die sich auf die Ergiebigkeit einer oder mehrerer Ressourcen auswirken..

FAZIT: Die vorhandene Wasserversorgungsstruktur in Baden-Württemberg hat technisch und organisatorisch ein sehr hohes Maß an Komplexität. Bisher hat dieses System auch ein hohes Maß an Flexibilität und Kapazitätsreserven gezeigt, die auch im heißen Sommer 2003 ausreichend waren. Die momentan betriebenen und geförderten Strukturänderungen mit einer Zentralisierung des Wissens und der Verantwortlichkeiten vermindern die Komplexität und erhöhen die Flexibilität, so dass -landesweit für Baden-Württemberg betrachtet- bei der Infrastruktur technisch und organisatorisch eine hohe Anpassungskapazität an die bisher aufgetretenen klimabedingten Änderungen des Wasserdargebots und der Wasserabgabe gegeben war.

Wie aus den Vorüberlegungen hervorgeht, weist die Wasserversorgung in Baden-Württemberg vom Systemaufbau her mit den vorhandenen Verbänden und Redundanzen prinzipiell eine hohe Anpassungskapazität auf. Mögliche negative Einflüsse auf das Wasserdargebot können durch Verbände ausgeglichen werden, wenn diese entsprechend vorhanden und ausgestaltet sind. Mögliche negative Einflüsse auf die Wasserabgabe werden in der Dimensionierung und dem Betrieb der Infrastruktur berücksichtigt und können dort ebenso durch Verbände ausgeglichen werden, wenn diese entsprechend vorhanden und technisch-organisatorisch ausgestaltet sind.

Wie aus den bisherigen Betrachtungen auch hervorgeht, wurden zur Erreichung des aktuellen Standes einige der zu Kapitelbeginn aufgelisteten Maßnahmen noch nicht flächendeckend und gezielt zur Anwendung gebracht. Dies sind insbesondere:

- Regionales oder gar landesweites Wasserdargebotsmanagement für Baden-Württemberg ausgehend vom Vorrang der öffentlichen Wasserversorgung

- Kurzfristiges bzw. temporäres Wasserbedarfsmanagement bei den Verbrauchern in konkreten Wassermangelsituationen: Beschränkung/Limitierung der Abgabe durch Nutzungsbeschränkungen wie z.B. Verbot der Gartenbewässerung oder Verbot häufigen Duschens.
- Mittel- bis langfristiges WVU-internes Wasserbedarfsmanagement mittels Verminderung der Abgabe durch Minimierung von Rohrnetzverlusten und Eigenverbrauch der WVU.
- (Forderung und) Förderung von Programmen zur Minimierung von Rohrnetzverlusten und Eigenverbrauch der WVU.
- Verminderung der (Spitzen-)Abgabe durch Förderung /Forderung dezentraler privater Regenwassernutzungsmaßnahmen für die Gartenbewässerung

Hierbei ist zu beachten, dass bei Maßnahmen der Beschränkung der Abgabe durch kurzfristiges Wasserbedarfsmanagement der Effekt nur schwer kalkulierbar bzw. die Einhaltung nur schwer kontrollierbar ist.

Bei der Förderung der dezentralen privaten Regenwassernutzung ist der Effekt ebenfalls nur schwer kalkulierbar, da eine Verminderung der hier relevanten und kritischen Spitzentagesabgabe  $Q_{dmax}$  nur beim Zusammentreffen mehrerer besonders günstiger Voraussetzungen –sehr hohes Verhältnis von angeschlossener Dachfläche zu Einwohnerzahl, günstige Dachgestaltung, sehr groß dimensionierte Zisternen, hoher Anteil der Gartenbewässerung an der Regenwassernutzung- zu erwarten ist. In allen Fällen, die nicht dieser Idealkonstellation entsprechen, ist bei der dezentralen Regenwassernutzung sogar ein negativer Effekt auf die Anpassungskapazität des betroffenen WVU zu besorgen: Sind im Einzugsgebiet viele Regenwassernutzungsanlagen vorhanden, so kann im Jahresmittel pro Regenwassernutzungsanlage bis zu 50 % des Trinkwasserbedarfs durch Regenwasser substituiert werden, was zur Folge hat, dass der  $Q_{dm}$  stark abnimmt. Andererseits sind Zisternen, die an nicht ausreichend großen Dachflächen installiert oder nicht ausreichend groß dimensioniert sind mit hoher Wahrscheinlichkeit nach einer längeren Trocken-Heiß-Periode leer und müssen mit Trinkwasser nachgefüllt werden, wodurch der  $Q_{dmax}$  für das WVU ansteigt. Durch diese Spreizung des  $Q_{dmax}/Q_{dm}$  sinkt die Anpassungskapazität des betroffenen WVU.

Eine weitere, gegenwärtig auf europäischer Ebene kontrovers diskutierte Maßnahme, nämlich:

- Mittel- bis langfristiges Wasserbedarfsmanagement bei den Verbrauchern: Verminderung der Abgabe durch Einführung/Förderung/Forderung wassersparender

Sanitär- und Wassernutzungstechnologien wie z.B. Toilettensparspülungen, effizientere Geschirrspül- und Waschmaschinenteknik, wassersparende Duschköpfe

wird bei genauer Betrachtung in Baden-Württemberg durch eine entsprechende Öffentlichkeitsarbeit, ein hohes Umweltbewusstsein der Bevölkerung, das breite Angebot an wassersparenden Technologien und die hohe Bereitschaft von Haushalten und Industrie, diese –oft teureren- Technologien auch einzusetzen, bereits flächendeckend seit Jahrzehnten umgesetzt. Anders sind die seit Anfang der 1990er Jahre stetig fallenden spezifischen Wasserverbrauchswerte, die mittlerweile in Baden-Württemberg auf 115 [l/E\*d] im Jahre 2010 gefallen sind und damit noch deutlich unter den Vergleichswerten anderer Länder mit geringem Verbrauch wie z.B. Belgien (120 [l/E\*d]) oder Dänemark (136 [l/E\*d]) liegen, nicht zu erklären.

Andere Maßnahmen, wie die institutionellen und organisatorischen Möglichkeiten:

- (Forderung und) Förderung von fundierten Strukturuntersuchungen für WVU
- (Forderung und) Förderung von technisch-organisatorischen Verbänden

stehen erst in den letzten Jahren im Vordergrund und beruhen aufgrund der grundgesetzlich festgelegten Zuordnung der Wasserversorgung zur kommunalen Selbstverwaltung auf dem Freiwilligkeitsprinzip.

Insofern ist hier noch von einem hohen ungenutzten Anpassungspotenzial auszugehen, welches erst eine detaillierte und gezielte flächendeckende Analyse der technischen und organisatorischen Struktur aller WVU auf der Basis der zu Beginn des Kap. 3.6 genannten Kennzahlen in Baden-Württemberg quantifizieren kann.

Die Anpassungskapazität der Wasserversorgung kann daher wie folgt beurteilt werden:

- Wasserdargebot: landesweit strukturell hoch, lokale Einzelfallbetrachtung von Redundanz und Verbundmöglichkeiten notwendig
- Infrastruktur: landesweit strukturell hoch, lokale Einzelbetrachtung von Redundanz und Verbundmöglichkeiten zwingend erforderlich
- Wasserabgabe: landesweit gering, lokale Einzelfallbetrachtung für das durch Wasserverlustminimierung erreichbare Potenzial notwendig

Fazit: Das Wissen über Anpassungsstrategien und –maßnahmen ist im Prinzip vorhanden. Auch die technische, institutionelle oder organisatorische Fähigkeit der Akteure der Wasserversorgung zur Planung, Vorbereitung, Unterstützung und Umsetzung von Handlungsmaßnahmen zur Anpassung sowie die Anpassungsbereitschaft darf vorausgesetzt werden. Allerdings ist die erforderliche Datengrundlage für die notwendigen fundierten Einzelfallbetrachtungen in der erforderlichen Genauigkeit und Aktualität noch bei

verschiedenen Akteuren verteilt. So ist zwar die vorhandene technische Infrastruktur mit vielen Details in einer GIS-Datenbank zentral erfasst. Entscheidende Informationen zu Wasserefassungen, Aufbereitungs- und Speicherkapazitäten, Ausbaugrad der Verteilnetze, vorhandenen Verbundstellen, aktuellen und tatsächlich genutzten Wasserentnahmerechten, aktuellen und genutzten Fernwasserbezugsrechten etc. sowie der aktuelle reale praktizierte Verbund mit den zu Beginn des Abschnittes 3.6 spezifizierten Kennzahlen liegen jedoch oft nur bei den einzelnen WVU vor. Dieser Mangel an zugänglichen, zentral dokumentierten und fortgeschriebenen sowie bewerteten Daten zur Wasserversorgung führt dazu, dass die Anpassungskapazität der einzelnen WVU im Rahmen dieses Gutachtens nicht quantifiziert werden kann. Zur Lösung dieses Problems bieten sich grundsätzlich zwei Wege an:

- a) Die zentrale Zusammenführung, Überprüfung, Fortschreibung und ggfls. Ergänzung der bisher bei verschiedenen Akteuren vorliegenden Daten und darauf aufbauend dann eine zentrale Bewertung mit dem Ziel einer flächendeckenden Analyse der Sensitivität, Anpassungskapazität und damit der Vulnerabilität aller WVU nach einheitlichem Standard.
- b) Die zentrale Vorgabe eines einheitlichen Standards von Daten entsprechend den zu Beginn von Abschnitt 3.6 spezifizierten Kennzahlen und von Auswertungs- und Bewertungsschemas, anhand derer dann alle WVU dezentral eine fundierte Analyse ihrer Sensitivität und Anpassungskapazität sowie ihrer Vulnerabilität durchführen können. Die Ergebnisse dieser dezentral durchgeführten Analysen sollten dann jedoch zentral gesammelt, zusammengefasst bzw. verfügbar gemacht werden.

Eine Diskussion dieser beiden Varianten erfolgt in Abschnitt 4.6.

### 3.6.4 Dringlichkeit

*Tabelle 11: Beurteilung der Dringlichkeit für die Teilbereiche des Schwerpunktthemas Trinkwasser*

Teilbereich	Geschwindigkeit	Handlungsdruck	Ökon. Belastung	Bereits Veränderungen	Kenntnisstand	Landesweite Relevanz	Dringlichkeit
Dargebot	mittel	mittel	0	ja	teilweise vorh.	ja	gering
Infrastruktur	mittel	0 - mittel	0	ja	nur lückenhaft	ja	0 - mittel
Wasserabgabe	mittel	mittel	0	ja	teilweise vorh.	ja	gering

0 = Bewertung (noch) nicht möglich, z.B. aufgrund fehlender oder mangelnder Datengrundlage

### 3.6.5 Gesamtbetrachtung der Vulnerabilität

Hinsichtlich des Wasserdargebotes und der Infrastruktur ist die Vulnerabilität im Einzelfall für jedes WVU zu analysieren. Die Vulnerabilität des Teilbereiches Wassergabe wird bei hoher Exposition, mittlerer Bewertung von Sensitivität und potenziellen Auswirkungen und nicht bewertbarer bis geringer Anpassungskapazität als hoch eingestuft.

### **Kernaussagen zum Schwerpunktthema Trinkwasser**

- Unabhängig vom Klimawandel ist die Nutzung der Wasserressourcen landesweit in den letzten beiden Jahrzehnten insgesamt um über 30 % zurückgegangen. Da auch die öffentliche Wasserversorgung einen Rückgang von etwa 14 % zu verzeichnen hat und diese an der gesamten Wassernutzung einen Anteil von lediglich 14 % aufweist, geht landesweit von der öffentlichen Wasserversorgung ein geringer Nutzungsdruck auf die Wasserressourcen aus.
- Der Einfluss des Klimawandels auf die Wasserversorgung muss zusammen mit den Einflüssen von Demografie, Bedarfsverhalten und Bedarfsentwicklung der wesentlichen Verbrauchergruppen Haushalte, Industrie und Landwirtschaft beurteilt werden
- Die fundierte Beurteilung der Vulnerabilität der Wasserversorgung erfordert die detaillierte Einzelbetrachtung jedes Wasserversorgungsunternehmens (WVU) hinsichtlich Wasserdargebot, Infrastruktur und Wasserabgabe. Die hierzu erforderlichen Daten müssten bei jedem WVU vorliegen. Grundsätzlich denkbar wäre daher, dass alle WVU dezentral nach einem zentral vorgegebenen einheitlichen Standard diese Vulnerabilitätsbeurteilung durchführen und die Ergebnisse dann zentral z.B. statistisch erfasst und ausgewertet werden.
- Grundsätzlich denkbar ist auch eine zentral durchgeführte Vulnerabilitätsanalyse für alle WVU des Landes. Die hierzu erforderlichen Daten liegen auf verschiedenen Ebenen bzw. bei vielen verschiedenen Akteuren vor. Für eine sichere zentrale Beurteilung müssen diese Daten zunächst bei den verschiedenen Akteuren abgefragt, überprüft, möglicherweise ergänzt und schließlich einheitlich bewertet werden.
- Die vorhandene Wasserversorgungsstruktur in Baden-Württemberg hat bisher technisch und organisatorisch ein ausreichend hohes Maß an Flexibilität und Kapazitätsreserven gezeigt.
- Die Bildung von Verbänden erhöht bei richtiger Ausgestaltung die Flexibilität und Anpassungskapazität.
- WVU, die nur eine Eigenwasserressource nutzen oder die nur ein Fremd- oder Fernwasser beziehen, weisen potenziell eine geringe Anpassungskapazität hinsichtlich klimatisch bedingter Änderungen des Wasserdargebots und der Wasserabgabe auf. Diese WVU sollten dringend die Notwendigkeit der Schaffung einer Redundanz hinsichtlich des Wasserdargebots prüfen.
- Ein beträchtlicher Anteil der WVU weist Wasserverluste von über 20 % auf. Eine Verringerung der Verluste auf akzeptable Werte von < 10 % würde die Flexibilität und Anpassungskapazität dieser WVU deutlich erhöhen und damit die Vulnerabilität deutlich verringern.

## 3.7 Bodensee

### 3.7.1 Exposition

Die Veränderung der klimatischen Kenngrößen und die daraus möglicherweise resultierenden Auswirkungen auf den Bodensee sind in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Expositions Betrachtung für das Schwerpunktthema Bodensee - Zirkulationsverhalten

KK	Veränderung KK	unmittelbar nachgelagerte Effekte (Exposition)
T	Zunahme Mitteltemperatur	Zirkulationsverhalten mittelbar durch: Erhöhung der Schichtungsstabilität Verminderung der Durchmischungshäufigkeit
GS	Zunahme Globalstrahlung	Zirkulationsverhalten mittelbar durch: Erhöhung der Schichtungsstabilität Verminderung der Durchmischungshäufigkeit
W	Zunahme Windstärke	Zirkulationsverhalten: Unter Umständen Erhöhung der Durchmischungshäufigkeit
N*	Änderung der Niederschlags-saisonalität im Einzugsgebiet	Niedrigwasser: Mehr Niederschlag im Winter weniger Niederschlag im Sommer führt zu häufigerem Auftreten von extremem Niedrigwasser im Sommer.  *: Kenngröße außerhalb Baden-Württembergs

• KK: Klimatische Kenngrößen (N: Niederschlag, T: Temperatur, GS: Globalstrahlung, W: Wind)

Seen reagieren aufgrund der hohen Wärmekapazität von Wasser verlangsamt und auf komplexe Weise auf Klimaänderungen. Für die langfristige Entwicklung von Seen ist das Zirkulationsverhalten maßgeblich, das von einer Reihe an meteorologischen Einflüssen abhängig ist (siehe Abbildung 50). Aus Klimakennndaten ausgehende Vorhersagen sind schwierig zu machen. Zudem ist es von Bedeutung, wie sich die Änderung der klimatischen Kenngrößen über das Jahr verteilt.

Die Möglichkeit zur Durchmischung ergibt sich im Winter, wenn die oberen Schichten auskühlen und der See damit über die Tiefe ein weitestgehend gleichförmiges Temperaturprofil erlangt. Maßgeblich für die Zirkulation sind damit die winterlichen Temperaturen. Außerdem wirkt sich ein sehr kalter Winter negativ auf die Durchmischungswahrscheinlichkeit im nächsten Winter aus, da die Wassertemperaturen in der Tiefe bis in den nächsten Winter gering bleiben und ein längerer kalter Zeitraum notwendig ist, um die oberen Schichten auf das Vorjahresniveau abzukühlen [KLIWA 2007]. Zunehmende Temperaturen führen im Allgemeinen zu einer Stärkung der Schichtungsstabilität und damit zu seltenerer Durchmischung. Aus modellgestützten Untersuchungen im Rahmen des KLIWA-Projekts lassen sich ungefähre Durchmischungshäufigkeiten in Abhängigkeit zu einer mittleren Erhöhung der Lufttemperatur ableiten. Diese Zahlen sollten aber nicht überinterpretiert werden, da ihnen Szenarien zugrunde liegen, die nur von einer Veränderung der Mitteltemperatur ausgehen. Demnach

durchmischte der Bodensee in Zeitraum von 1960 bis 2006 34 mal (bzw. 16-mal zwischen 1985 und 2006) [KLIWA 2009d].

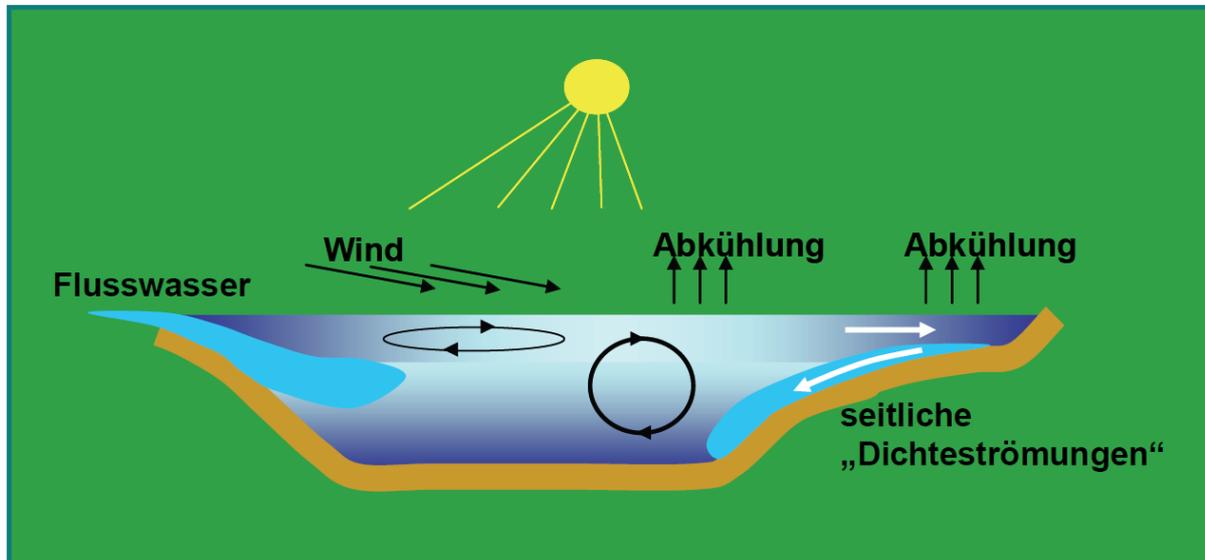


Abbildung 50: Schema zur vertikalen Durchmischung [KLIWA 2007]

Neben den direkten Einflüssen durch Meteorologie wirken auch hydrologische Faktoren auf den Bodensee. Das Einzugsgebiet des Bodensees liegt zum großen Teil in den Alpen und damit außerhalb des Untersuchungsgebiets und der Gültigkeit der Klimaleitplanken (siehe Abbildung 51). Der jährliche Gang der Wasserspiegelhöhe ist in erster Linie von den Verhältnissen im alpinen Einzugsgebiet abhängig (Niederschlag, Verdunstung, Schneeverhältnisse). Wasserverlust durch Verdunstung über die Wasseroberfläche wird zudem von Faktoren beeinflusst, die nicht ohne weiteres aus den Klimaleitplanken abgeleitet werden können.

Zwar ist ein Rückgang des Wasserspiegels zu beobachten (siehe Abbildung 52), die Ursachen liegen allerdings höchstens teilweise am Klimawandel [LUBW 2011]. Änderungen im Langzeitverhalten ergaben sich aus dem Ausbau und Betrieb von Kraftwerkspeichern im Einzugsgebiet und den hydraulisch bedingten Veränderungen in Durchflussbereichen (Konstanzer Schwelle, Seerhein, östlicher Untersee zwischen Gottlieben und Ermatingen, Eschenzer Horn) [LUBW 2011]. Allerdings ergaben sich auch in den letzten beiden Jahrzehnten saisonale Änderungen der mittleren Wasserstandsverläufe, die nicht durch den Speicherbau erklärt werden können. Diese stehen eher in einem Zusammenhang zu dem veränderten Niederschlag und Verdunstung sowie Schneespeicherung aufgrund von wärmeren Wintern im Einzugsgebiet [LUBW 2011].

## Einzugsgebiet des Bodensees



Abbildung 51: Einzugsgebiet des Bodensees [IGKB 2013]

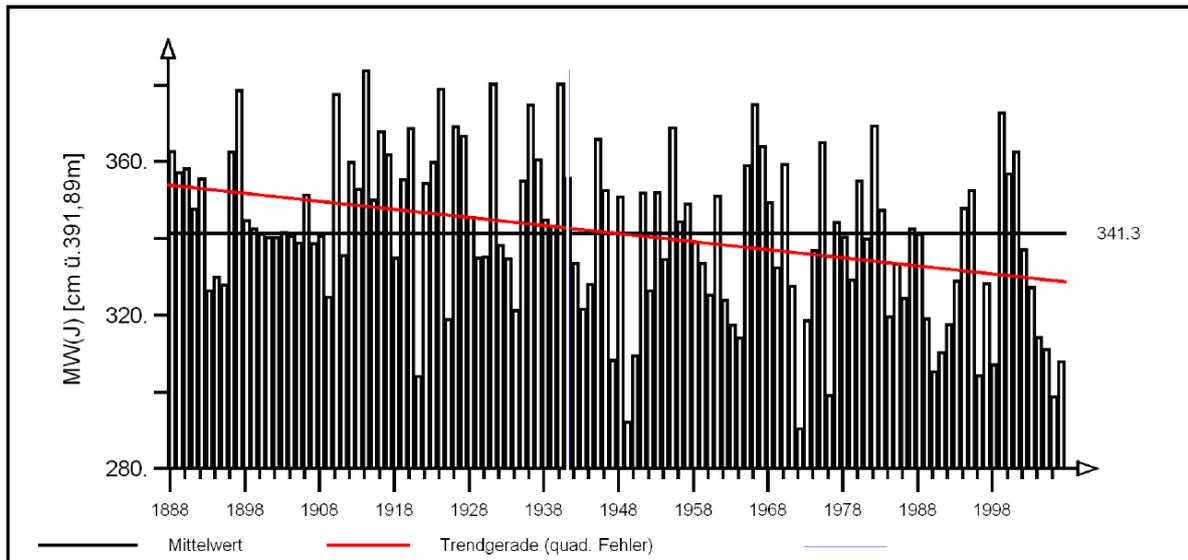


Abbildung 52: Entwicklung der mittleren jährlichen Wasserstände am Pegel Konstanz (Bodensee/Obersee) [abgeändert nach LUBW 2011]

### 3.7.2 Sensitivität und potenzielle Auswirkungen

#### 3.7.2.1 Zirkulationsverhalten

Eine erhöhte Globalstrahlung kann zu einer erhöhten Schichtungsstabilität führen, da durch sie die oberste Wasserschicht erwärmt wird. Modellgestützte Szenarienrechnungen mit verringerter Wolkenbedeckung im Rahmen von KLIWA belegen die Erwärmung des Metalimnions, schränken allerdings eine Änderung der Durchmischungshäufigkeit ein, da der Effekt im Sommer stärker als im Winter ist [KLIWA 2009d]. Die Unsicherheit dieser Variablen in den Klimaleitplanken erlaubt allerdings keine Aussage.

Eine erhöhte Schichtungsstabilität verringert die Wahrscheinlichkeit einer Vollzirkulation, verhindert sie jedoch nicht. Selbst in Wintern mit hoher Lufttemperatur können Stürme die für eine Durchmischung notwendige Energie aufbringen [KLIWA 2007]. Die Klimaleitplanken erlauben an dieser Stelle keine klare Aussage. Die eventuell häufiger auftretenden Starkwinde würden, wenn sie zudem im Winter auftreten würden, Vollzirkulationen begünstigen.

Modellgestützte Untersuchungen zeigen, dass die Windrichtung einen großen Einfluss auf die vertikale Durchmischung hat [KLIWA 2009d]. Änderungen der Windrichtung sind bei veränderten Häufigkeiten von Wetterlagen denkbar.

Längere Zeiten ohne Durchmischung sorgen für eine Abnahme der Sauerstoffkonzentration in tieferen Schichten, wodurch vielfältige biologische und chemische Prozesse in Gang gesetzt werden können. So kann es bei geringen Sauerstoffkonzentrationen zur Rücklösung von Nähr- und Schadstoffen aus dem Sediment kommen, die eine Verschlechterung der Rohwasserqualität bewirken [IGKB 2009b] und dadurch einen erhöhten Aufwand für die

Trinkwasseraufbereitung erforderlich machen können. Im Bodensee unerwünschte (Spuren-)Stoffe werden sich bei ausbleibender Vollzirkulation länger im tieferen Wasser aufhalten.

Neben der Trinkwasserqualität werden auch die aquatischen Lebensgemeinschaften im See von einem veränderten Zirkulationsverhalten beeinflusst. Früher auftretende Schichtung geht mit einem früheren Algenwachstum einher. Mit dem Algenwachstum im Frühling beginnt das Wachstum der Zooplankton-Population, die die Nahrung der Fellechenlarven sind. Bei veränderter Phänologie von Algenwachstum, Zooplanktonwachstum und Schlüpfen der Fischlarven, könnte sich ein „mismatch“ ergeben und auf die Fischpopulationen auswirken. Auch hier bestehen große Unsicherheiten.

### **3.7.2.2** Niedrigwasser / Flachwasserzone

Schwankungen im Wasserspiegel wirken sich in flachen Ufergebieten am stärksten aus. In flachen Ufergebieten ist zudem die höchste Artenvielfalt anzutreffen. Die Uferzonen bieten sowohl Laichplätze für Fische und Krebstiere als auch Brutgebiete für Wasservögel. Auf der anderen Seite können sich bei Niedrigwasser die Schilfbestände weiter ausbreiten, sind jedoch an diesen tiefer liegenden Standorten stärker vor Hochwasser bedroht. Sehr niedrige Wasserstände gehen außerdem mit Einschränkungen der Schifffahrt einher, wenn Hafenanlagen teilweise oder ganz trocken fallen. Zudem kann es durch Rückgang von Schilfgürteln nach starken Hochwassern zu einer stärkeren Ufererosion kommen [Ostendorp et al. 2007]. Die dabei entstehenden Sedimente können sich unter anderem in Hafenanlagen und Schiffsrinnen absetzen.

Grundsätzlich können sich die Lebensgemeinschaften in der Flachwasserzone an veränderte Wasserspiegel anpassen. Selbst extreme Ereignisse wie der Sommer 2003 hinterließen keine nennenswerten, bleibenden Schäden [Galonska et al. 2005].

Es ist nicht anzunehmen, dass sich bei niedrigeren Wasserständen eine Gefährdung der Trinkwasserversorgung ergibt. Das Volumen an verfügbarem Tiefenwasser ist groß und die Wasserentnahme durch die Bodenseewasserversorgung unterhalb der erlaubten oberen Grenzen. Selbst als die Bodenseewasserversorgung im Sommer 2003 am 8. August die bisher höchste Tagesmenge an Wasser entnahm, war diese immer noch 30 Mal geringer als die zufließende Wassermenge [Zintz et al. 2009].

### **3.7.3** Anpassungskapazität

#### **3.7.3.1** Zirkulationsverhalten

Durchmischungen sind auch bei generell höheren Wassertemperaturen möglich und werden bei Seen in geringeren Breitengraden beobachtet [Boehrer und Schultze 2008, Gal et al

2003]. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass sich Vollzirkulationen bei einem System der Größe des Bodensees nicht auf künstliche Weise herbeiführen lassen.

Neben der Vollzirkulation sind weitere Prozesse bekannt, die sauerstoffhaltiges Wasser in tiefere Schichten transportieren. Während kürzeren, windstillen Frostperioden kann es zu Dichteströmen aus flachen Randbereichen in tiefere Schichtiefen kommen, die schneller als der Hauptwasserkörper abkühlen. In [KLIWA 2007] wird erwartet, dass dieser „differential cooling“ genannte Prozess bei einem wärmeren, oberflächennahen Wasser die winterlichen vertikalen Austauschvorgänge dominiert. Inwieweit er eine ausbleibende Vollzirkulation kompensieren könnte, ist ungeklärt.

Hochwasserereignisse könnten zudem dazu führen, dass verhältnismäßig warmes Fluss- und Oberflächenwasser in tiefere Schichten gelangt. Dieser Prozess trägt nicht nur direkt Sauerstoff in tiefere Schichten ein, sondern erwärmt diese auch und begünstigt damit die Vollzirkulation im nächsten Winter. Die unter den Szenarien CH2011 häufiger auftretenden winterlichen Starkniederschläge im alpinen Einzugsgebiet [SCCS 2011] könnten diesen Effekt verstärken. Erste Ergebnisse des Forschungsprojektes KLIMBO weisen darauf hin [Eder 2013, IGKB 2013].

### **3.7.3.2** Niedrigwasser / Flachwasserzone

Stehen unausgebaute Ufergebiete zur Verfügung, hat die Natur dort die Möglichkeit sich anzupassen. In der Vergangenheit haben Maßnahmen zur Uferrenaturierung geholfen, solche Gebiete zu schaffen. Die Auswirkungen durch Sedimentation auf den Schiffsverkehr sind durch Ausbaggern kompensierbar. Allerdings sind diese auch nur im Falle einer Sedimentation vorzusehen, da dadurch die Erosion in der Flachwasserzone verstärkt werden kann.

## **3.7.4** Dringlichkeit

### **3.7.4.1** Zirkulationsverhalten

Eine signifikante Verschlechterung der Trinkwasserqualität ist vor dem Hintergrund des Klimawandels unwahrscheinlich. Wegen der Unsicherheiten der Randbedingungen ist dies allerdings eine wenig belastbare Aussage. Zudem ist die Richtungssicherheit der Aussage über seltenere Durchmischungen gering, da Temperaturerhöhung und winterliche Starkwinde, die bei der erwarteten Häufung von zyklonalen Westwetterlagen wahrscheinlicher werden [Hennegriff, Reich 2007], einen gegenläufigen Einfluss haben. Daher sollten Monitoring-Maßnahmen durchgeführt, bzw. bestehende Maßnahmen weitergeführt werden, welche die Entwicklung des Tiefenwassers überwachen.

### 3.7.4.2 Niedrigwasser / Flachwasserzone

Schwankungen des Wasserspiegels sind auch in Zukunft zu erwarten. Saisonale Niedrigwasserstände könnten öfter auftreten, sind aber aufgrund der Unsicherheiten in der Modellkette nicht mit genügender Sicherheit prognostizierbar.

Hydrologische Modellierungen unter Verwendung der für die Schweiz entwickelten Klimaszenarien CH2011 des Einzugsgebietes ergaben wenige Änderungen des Abflussverhaltens. So wird eine Änderung der Saisonalität des Niederschlags zu weniger Niederschlag im Sommer und mehr im Winter projiziert [KLIWA 2012c].

### 3.7.5 Gesamtbetrachtung der Vulnerabilität

Die Vulnerabilität für das Zirkulationsverhalten wird insgesamt als mittel eingestuft. Obwohl die Exposition hoch ist, sind Sensitivität, potenzielle Auswirkungen und Anpassungskapazität mittel.

Bei Niedrigwasser ist zwar die Exposition hoch und Sensitivität sowie potenzielle Auswirkungen mittel, in der Gesamtbetrachtung der Vulnerabilität ist hier allerdings die vorhandene hohe Anpassungskapazität maßgeblich für eine insgesamt geringe Vulnerabilität.

#### **Kernaussagen zum Schwerpunktthema Bodensee**

- *Das System Bodensee wird von meteorologischen und hydrologischen Faktoren beeinflusst und ist damit Änderungen durch den Klimawandel ausgesetzt.*
- *Das für die langfristige Entwicklung wichtige Zirkulationsverhalten wird von den Änderungen der klimatischen Kenngrößen gegenläufig beeinflusst.*
- *Eine Reihe wichtiger Einflussfaktoren sind nicht oder nur schlecht projizierbar (Windrichtung, Globalstrahlung, Starkwindereignisse).*
- *Bestrebungen, die in der Vergangenheit schon zu einer Verbesserung der Wasserqualität geführt haben, werden vor dem Hintergrund des Klimawandels noch wichtiger.*
- *Schwankungen im Wasserspiegel stellen kein langfristiges Problem dar.*
- *Vulnerabilität ist insgesamt Mittel für Zirkulationsverhalten und gering für Niedrigwasser.*

## 3.8 Gesamtbeurteilung zur Vulnerabilität und zum Handlungsdruck

Anhand der Ausführungen und Auswertungen in den Abschnitten 3.1 bis 3.7 kann eine Gesamtbeurteilung der Vulnerabilität des Wasserhaushaltes vorgenommen und damit der Handlungsdruck abgeleitet werden.

## Gesamtbeurteilung der Vulnerabilität

Anhand der in Tabelle 13 aufgestellten Beziehungen ergibt sich bei einer Gesamtbetrachtung der Komponenten Exposition, Sensitivität, potenzielle Auswirkungen sowie Anpassungskapazität die Vulnerabilität für den Wasserhaushalt gegenüber Folgen des Klimawandels in Baden-Württemberg gemäß Tabelle 14.

Tabelle 13: Bestimmung der Vulnerabilität aus Sensitivität, potenziellen Auswirkungen und Anpassungskapazität bei hoher Exposition

Vulnerabilität (bei hohen Exposition)		Sensitivität und potenzielle Auswirkungen		
		gering	mittel	hoch
Anpassungskapazität	hoch	gering	gering	mittel
	mittel	gering	mittel	hoch
	gering	mittel	hoch	hoch

Tabelle 14: Darstellung der Vulnerabilität des Wasserhaushalts als kombinierte Betrachtung aus Exposition, Sensitivität und Anpassungskapazität

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

\*: Einzelfallanalyse für jedes WVU erforderlich

## Gesamtbeurteilung des Handlungsdruckes

Anhand der in Tabelle 15 aufgestellten Beziehungen ergibt sich bei einer Gesamtbetrachtung der Komponenten Vulnerabilität, Dringlichkeit und vorhandener bzw. teilweise vorhandener Anpassungsstrategie der Handlungsdruck im Bereich Wasserhaushalt gegenüber Folgen des Klimawandels in Baden-Württemberg gemäß Tabelle 16. Da für sämtliche der untersuchten Schwerpunkte des Wasserhaushalts Anpassungsziele definiert und Anpassungsmaßnahmen vorhanden oder teilweise vorhanden sind und in den nächsten Jahren weiterentwickelt werden können, geht der Punkt der Anpassungsstrategie nicht weiter in die Ableitung des Handlungsdruckes ein.

Tabelle 15: Bestimmung des Handlungsdruckes aus Vulnerabilität und Dringlichkeit bei einer vorhandenen bzw. teilweise vorhandenen Anpassungsstrategie

Handlungsdruck (bei vorhandener bzw. teilweise vorhandener Anpassungsstrategie)		Vulnerabilität		
		gering	mittel	hoch
Dringlichkeit	gering	gering	gering	mittel
	mittel	gering	mittel	hoch
	hoch	mittel	hoch	hoch

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Exposition des Wasserhaushalts nach dem derzeitigen Kenntnisstand für alle untersuchten Bereiche als hoch eingeschätzt wird, da die wirksamen Klimafaktoren Niederschlag, Temperatur, Globalstrahlung und Wind die Wasserhaushaltskomponenten Verdunstung, Niederschlag, klimatische Wasserbilanz, Abflussverhalten, Grundwasserneubildung, Schneemenge und -schmelze teilweise deutlich verändern.

Tabelle 16: Darstellung des Handlungsdruckes im Bereich Wasserhaushalt als kombinierte Betrachtung aus Vulnerabilität, Dringlichkeit und Anpassungsstrategie

Handlungsfelder	Vulnerabilität	Dringlichkeit	Anpassungsstrategie	Handlungsdruck
Hochwasser	hoch	hoch	vorh.	hoch
Niedrigwasser	hoch	hoch	vorh.	hoch
Gewässerökologie	hoch	hoch	teil. vorh.	hoch
Siedlungsentwässerung				
- Überflutung	hoch	mittel	vorh.	mittel
- Emissionen	hoch	mittel	vorh.	mittel
- Abwasserreinigung	gering	gering	vorh.	gering
Grundwasser	mittel	gering	teil. vorh.	gering
Trinkwasser				
- Wasserdargebot	gering bis hoch	gering	teil. vorh.	gering
- Infrastruktur	gering bis hoch	mittel	teil. vorh.	mittel
- Wasserabgabe	hoch	gering	teil. vorh.	mittel
Bodensee				
- Zirkulationsverhalten	mittel	gering	teil. vorh.	gering
- Niedrigwasser	gering	mittel	teil. vorh.	gering

Die Sensitivität und die damit verbundenen potenziellen Auswirkungen werden vor allem bei den von Starkniederschlägen und sommerlicher Trockenheit beeinflussten Teilbereichen Hochwasser, Niedrigwasser und Gewässerökologie als hoch eingeschätzt. Da gerade die hierfür zugrunde gelegten klimatischen Einflussfaktoren von den Klimaleitplanken als nicht oder nur eingeschränkt zufriedenstellend eingestuft werden, muss davon ausgegangen werden, dass hier die Unsicherheiten besonders groß sind. Je nach der vorhandenen Anpassungskapazität ergibt sich außer für die Bereiche Abwasserreinigung und Niedrigwasser im Bodensee eine mittlere bis hohe Vulnerabilität des Wasserhaushalts für alle anderen Bereiche und insbesondere für die Bereiche Hochwasser, Niedrigwasser, Gewässerökologie, Überflutungen und Emissionen in der Siedlungsentwässerung sowie die

Trinkwasserwasserabgabe. Die für die Gewässerökologie angegebene mittlere Anpassungskapazität ist darin begründet, dass die Gesamtbiozönose selbst zwar in der Regel hoch anpassungsfähig ist, Konsequenzen einer veränderten Gewässerbiozönose aber für einzelne Arten sehr unterschiedlich sein können. Zur Vulnerabilität des Teilbereiches Infrastruktur in der Wasserversorgung kann zum derzeitigen Kenntnisstand aufgrund unzureichend vorhandener Daten keine eindeutige Aussage gemacht werden. Für die Bewertung des Zirkulationsverhaltens des Bodensees ist festzuhalten, dass die beschriebene mittlere Sensitivität im Zirkulationsverhalten in erster Linie auf die Sauerstoffkonzentration sowie Nährstoffeinträge bezogen ist. Bezüglich auf Aussagen zu Auswirkungen auf die Biozönose im Bodensee ist die vorhandene Datengrundlage noch nicht ausreichend.

Die Dringlichkeit von Handlungen wird in einer Spanne zwischen gering bis hoch eingeschätzt. Da Anpassungsstrategien meist vorhanden oder zumindest teilweise vorhanden sind, wird der resultierende Handlungsdruck für die meisten Teilbereiche als gering bis mittel eingeschätzt. Die Ausnahme bilden auch hier wieder die fließgewässerbezogenen Teilbereiche Hochwasser, Niedrigwasser und Gewässerökologie, für die sowohl die Vulnerabilität als auch die Dringlichkeit als hoch eingestuft werden.

### **Kernaussagen zur Vulnerabilität**

- *Die Vulnerabilität des Wasserhaushalts wird für die Bereiche Hochwasser, Niedrigwasser, Gewässerökologie sowie im Bereich der Siedlungsentwässerung für Überflutungen durch Starkregen und für Emissionen aus Mischwasserentlastungen als hoch eingestuft. Hierbei handelt es sich um Bereiche, die maßgeblich von kurzfristigen Niederschlagsereignissen und/oder der Zunahme von Trockenperioden beeinflusst werden, in denen die Sensitivität und die potenziellen Auswirkungen hoch sind. Ebenso ergibt sich eine hohe Vulnerabilität für die Abgabe von Trinkwasser, die nur eine geringe Anpassungskapazität an die potenziellen Auswirkungen des Klimawandels aufweist.*
- *Anpassungsstrategien sind für alle Bereiche zumindest teilweise vorhanden bzw. in Planung.*
- *Der höchste Handlungsdruck wird für die fließgewässerbezogenen Handlungsfelder gesehen, da hier die Vulnerabilität und die Dringlichkeit als hoch eingestuft werden.*
- *Der niedrigste Handlungsdruck wird für den Bodensee, das Grundwasser, das Trinkwasserdargebot und die Abwasserreinigung gesehen, da hier die Vulnerabilität und/oder die Dringlichkeit als gering eingestuft werden*
- *Gerade die kurzfristigen Niederschlagsereignisse und die Trockenperioden sind mit großen Unsicherheiten verbunden, wodurch die getroffene Einschätzung der Vulnerabilität und des Handlungsdruckes ebenfalls mit großen Unsicherheiten behaftet ist.*

## 4 Anpassungsziele und –maßnahmen

Auf der Grundlage der Aussagen zur Vulnerabilität und zur Dringlichkeit für die verschiedenen Teilbereiche des Wasserhaushaltes werden in diesem Abschnitt für die untersuchten Schwerpunktthemen Aussagen zu Anpassungszielen und zu Anpassungsmaßnahmen erarbeitet. Dazu sollen bereits bestehende Maßnahmen betrachtet als auch neue aus der Vulnerabilitätsanalyse hergeleitete Maßnahmen benannt werden. Zudem soll der Stand der Anpassungsmaßnahmen bewertet werden und aufgezeigt werden, bei welchen Maßnahmen Nachbesserungen gegenüber dem bisherigen Stand erforderlich sind. Die benannten Anpassungsziele und –maßnahmen sollen auch hinsichtlich einer Priorisierung der Maßnahmen nach Effektivität und Aufwand (Zeit, technischer und verfahrenstechnischer Aufwand) bewertet werden. Bei der Priorisierung potenzieller Maßnahmen sollen „**No-regret-Maßnahmen**“ (dt.: „Maßnahmen ohne Bedauern“) besonders berücksichtigt werden. Nach dem IPCC sind „No-Regret-Maßnahmen“ Maßnahmen, deren gesellschaftlicher Nutzen, der zusätzlich zum Nutzen der verhinderten Klimaänderung eintritt, den gesellschaftlichen Kosten gleichkommt oder diese übersteigt. Beispiele für No-regret-Maßnahmen wären die Erarbeitung von Evakuierungsplänen und Frühwarnsystemen im Hochwasserschutz oder die Einführung von energieeffizienten Gebäudestandards in den Bereichen Wärmedämmung und Heizung (das Klima wird geschützt und die Heizkosten fallen). No-Regret-Strategien beinhalten Modelle und Maßnahmen, die auch unabhängig vom Klimawandel ökonomisch und ökologisch sinnvoll sind. Sie werden vorsorglich ergriffen, um mögliches Unheil zu vermeiden oder zu lindern. Ihr gesellschaftlicher Nutzen ist dann immer noch hoch, wenn der Grund für die ergriffene Strategie nicht eintritt. Abschließend sollen hinsichtlich der vorgeschlagenen Maßnahmen die betroffenen Akteure, der Zeithorizont sowie die Dringlichkeit der Anpassungsmaßnahmen benannt und in einem Maßnahmenformblatt für jede Maßnahme dargestellt werden. [LUBW 2012c].

### 4.1 Hochwasser

Im Bereich Hochwasser ist folgender Stand von Anpassungsmaßnahmen in Baden-Württemberg bereits vorhanden:

- Der Lastfall Klimaänderung wird bei der Planung und Bemessung von Anlagen des technischen Hochwasserschutzes bereits berücksichtigt.[LfU 2005b].
- Hochwasser-Gefahrenkarten werden derzeit landesweit erstellt.
- Die Einrichtung von Hochwasser-Partnerschaften zur Koordinierung der Hochwasservorsorge ist flächendeckend erfolgt.
- Im Rahmen von KLIWA findet ein Klimamonitoring statt, dessen Ergebnisse alle ca. fünf Jahre veröffentlicht werden. Basierend auf einem integrierten Messnetz

(Messstationen des DWD und der Länder) werden die relevanten hydrometeorologischen und hydrologischen Kenngrößen in ihrer zeitlichen Entwicklung erfasst und in regelmäßigen Abständen zeitnah ausgewertet [KLIWA 2011a].

- Neben der Hochwasservorhersage erfolgte 2007 die Einführung eines landesweiten Hochwasser-Frühwarnsystems für kleine Einzugsgebiete.
- Den Kommunen wird zur Unterstützung der Gefahrenabwehr und Umsetzung ihrer Alarm- und Einsatzpläne das EDV-System FLIWAS zur Verfügung gestellt.
- Hochwasserrisikomanagementpläne werden bis 2015 landesweit erstellt.
- Es erfolgt eine kontinuierliche Optimierung des Pegelmessnetzes und des Monitorings möglicher klimabedingter Änderungen in quantitativer Hinsicht.

Baden-Württemberg hat bereits im Jahr 2003 im Rahmen des Gemeinschaftsprojektes "Hochwassergefahr und Strategien zur Schadensminderung in Baden-Württemberg" des Umweltministeriums, des Innenministeriums und des Wirtschaftsministeriums gemeinsam mit den Kommunen eine Leitlinie zum Umgang mit Hochwasser entwickelt, die auch von der Bund-Länder Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) zum Umgang mit den Folgen des Klimawandels empfohlen wird [LAWA 2010].

Derzeit wird die Europäische Hochwasserrisikomanagementrichtlinie (EU HWRM-RL) umgesetzt. Im Fokus steht dabei stärker der Umgang mit dem Hochwasserrisiko und den negativen Folgen des Hochwassers. Ein umfassendes Hochwasserrisikomanagement beinhaltet die systematische Identifizierung, Koordination und Umsetzung von Maßnahmen, die nachteilige Folgen von Hochwasserereignissen vermeiden oder verringern können. Diese reichen von der Wiedergewinnung von Retentionsräumen über die hochwasserangepasste Nutzung gefährdeter Gebiete, den Bau von technischen Hochwasserschutzmaßnahmen bis hin zu Alarm- und Einsatzplänen für ein planvolles Handeln im Gefahrenfall. Dabei sind die Auswirkungen auf die Schutzgüter menschliche Gesundheit, Umwelt, Kulturerbe und wirtschaftliche Tätigkeit zu betrachten.

Damit wird die Hochwasserschutzstrategie des Landes Baden-Württemberg von 2003 konsequent fortgesetzt.

Aus Vorsorgegründen ist eine Anpassungsstrategie notwendig, die zwar die mögliche Entwicklung der nächsten Jahrzehnte berücksichtigt, aber auch den Unsicherheiten, die es bei jeder Prognose für die Zukunft gibt, Rechnung trägt. Zukünftige Festlegungen sollten daher einerseits langfristig unschädlich und andererseits bei Bedarf (z.B. bei neuen Erkenntnissen der Klimaforschung) anpassbar sein („flexible and no regret“-Strategie“). So wurde z.B. der bisherige Weg bei der Festlegung von Bemessungsabflüssen für

Hochwasserschutzanlagen modifiziert, in dem aus Vorsorgegründen aufgrund des Klimawandels ein „Lastfall Klimaänderung“ zu berücksichtigen ist.

Die zu erwartenden steigenden Hochwasserabflüsse legen trotz der verbleibenden Unsicherheiten nahe, noch konsequenter die Schaffung neuer Gefährdungslagen zu vermeiden. Bei neuen Hochwasserschutzanlagen müssen die Erkenntnisse aus dem Monitoring und der Modellierung bei der Planung einfließen und im Übrigen sind die Strategien zur Vorbeugung von Hochwassergefahren entschlossen umzusetzen. Daraus ergeben sich folgende Ziele:

- Betroffenheit gegenüber einer Hochwasserverschärfung reduzieren,
- potenzielle Überschwemmungsflächen von Bebauung freihalten,
- Hochwasservorsorge stärken,
- Wasserrückhalt in der Fläche stärken.

Aus diesen Zielen lassen sich die im Folgenden beschriebenen Anpassungsmaßnahmen ableiten.

#### **4.1.1 Hochwasser-Flächenmanagement**

##### **Landesweite Erstellung von Hochwasser-Gefahrenkarten**

Für das Land Baden-Württemberg werden derzeit flächendeckend Hochwassergefahrenkarten für alle relevanten Gewässer in einem Gemeinschaftsprojekt der Kommunen und des Landes Baden-Württemberg erstellt. Sie liefern an ca. 12.500 km Gewässern konkrete Informationen über die mögliche Ausdehnung und Tiefe einer Überflutung. Somit sind sie die Grundlage für Maßnahmen der Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes sowie für Bürgerinnen und Bürger, die Schutzmaßnahmen planen oder optimieren. Auch für die Kommunal- und Regionalplanung spielen die Gefahrenkarten eine zentrale Rolle. Sie ermöglichen es, wichtige Retentionsräume zu schützen und neue Risiken durch zusätzliche Siedlungsflächen zu verhindern. Bereiche, für die die Gefahrenkarten eine Überflutung zeigen, die statistisch einmal in hundert Jahren auftritt (HQ100), sind per Gesetz „Überschwemmungsgebiete“, für die besondere Vorschriften für alle Nutzer dieser Flächen gelten.

Die Hochwassergefahrenkarten beinhalten [UM 2005]:

- Darstellung der räumlichen Ausdehnung von Hochwasserereignissen mit unterschiedlichen Wiederkehrintervallen, so genannten Jährlichkeiten,
- Darstellung der Überflutungstiefen,
- Darstellung extremer, historischer Ereignisse soweit vorhanden,
- Darstellung von Hochwasserschutzeinrichtungen,

- ausreichender Detaillierungsgrad der Darstellung für örtliche Auswertungen und Planungen.

Die Hochwassergefahrenkarten sollten weiterhin regelmäßig mit den Ergebnissen aus dem Monitoring sowie aufgrund von Erkenntnissen rezenter Hochwasserereignisse fortgeschrieben werden. Zur Bewusstseinsbildung und der Erkenntnis und Übernahme einer gewissen Eigenverantwortung der Bevölkerung ist eine regelmäßige direkte Information und die Veröffentlichung der Hochwassergefahrenkarten sinnvoll.

### **Förderung eines natürlichen Hochwasserrückhalts in der Fläche**

Durch Freihaltung und Wiederanbindung von Auen kann der natürliche Hochwasserrückhalt gefördert werden. Überschwemmungsgebiete können als natürliche Retentionsflächen dienen und somit den Hochwasserabfluss in seiner Fülle nach unterstrom entzerren. In Bereichen wo eine Deichrückverlegung möglich ist, sollte dies unbedingt in Erwägung gezogen werden. Insbesondere wenn eine Steuerung als Polderfläche erfolgt, kann das Retentionsvolumen zu dem Zeitpunkt der Hochwasserspitze zur Verfügung gestellt werden und so die Hochwasserspitze weiter unterstrom reduzieren. Außerdem tragen größere Aueflächen zu einer natürlicheren Gewässerentwicklung und Verbesserung der ökologischen Funktionsfähigkeit des gesamten Gewässersystems bei.

### **Freihalten überflutungsgefährdeter Bereiche**

Die in den HWGK ausgewiesenen überflutungsgefährdeten Bereiche sollen von Bebauung freigehalten werden. Nach Wasserhaushaltsgesetz (WHG §§ 76 bis 78) sind neue Baugebiete, bauliche Anlagen sowie hochwasserverschärfende Nutzungen in Überschwemmungsgebieten (HQ100) verboten. Es ist aber durchaus zu überlegen, auch besonders gefährdete bereits bestehende Bebauung durch Umsiedlung aus Überschwemmungsgebieten zu entfernen, wie es entlang des Rheins in den Niederlanden in einigen Bereichen bereits geschehen ist. Betroffene Überschwemmungsgebiete können aus Hochwassergefahrenkarten entnommen werden. Klimawandelbedingte Veränderungen sollten bei der Fortschreibung mit einbezogen werden. Für die Bewusstseinsbildung im Umgang mit Hochwasser und die Eigenvorsorge ist die Bevölkerung über die Bedeutung eines HQ100 bzw. eines HQextrem aufzuklären.

## **4.1.2 Technisch-Infrastruktureller Hochwasserschutz**

### **Wirtschaftlicher Einsatz des technischen Hochwasserschutzes durch Berücksichtigung des Lastfalls Klimaänderung**

Bei der hydrologischen Extremwertanalyse wird bisher, stets auf der Grundlage der Stationaritätsannahme, die Zeitreihe des gesamten Messzeitraumes herangezogen. Die

Stationaritätsannahme besagt, dass die einzelnen HQ-Werte zwar einer natürlichen Variabilität unterliegen, dass aber wichtige Einflussfaktoren wie das Klima keine systematischen Veränderungen erfahren.

Der Leitfaden „ Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes“ [LfU 2005b] enthält die für Baden-Württemberg geltenden Regelungen. In ihm ist auch die Vorgehensweise beim Lastfall Klimaänderung beschrieben. Anhand von Fallbeispielen aus der Praxis wird nachgewiesen, dass eine Berücksichtigung der Auswirkungen der Klimaänderung in den meisten Fällen zu relativ moderaten Kostensteigerungen geführt hätte, wenn dieser Lastfall bereits bei der Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen berücksichtigt und beim Bau zumindest entsprechende Vorkehrungen für eine spätere Anpassung getroffen worden wäre. Spätere Anpassungen sind jedoch meist mit sehr hohen Kosten verbunden.

Der Lastfall Klimaänderung soll deshalb bei allen neuen Hochwasserschutzmaßnahmen mit untersucht werden. Es ist aufzuzeigen, welche Konsequenzen sich durch den Lastfall auf die Auslegung der Maßnahmen ergeben und welche Mehrkosten dadurch zu erwarten sind. Aufgrund der dann vorliegenden Erkenntnisse kann entschieden werden, inwieweit der Lastfall Klimaänderung bereits in der Planung berücksichtigt wird. Dabei sind auch Möglichkeiten für eine spätere Anpassung in Betracht zu ziehen [LfU 2005b].

Beim Lastfall Klimaänderung handelt es sich um eine No-regret Maßnahme. Vor dem Hintergrund der bestehenden Unsicherheiten beim Blick in die Zukunft sollen neue Hochwasserschutzmaßnahmen nicht a priori größer dimensioniert und gebaut werden. Es ist vielmehr sinnvoll, Flächen z. B. für Dammerhöhungen oder Rückhalteräumen frei zu halten oder Baumaßnahmen so vorzubereiten, dass sie bei Bedarf mit geringem Aufwand nachgerüstet werden können.

Dem Lastfall Klimaänderung müssen erhöhte Bemessungsabflüsse zugrunde gelegt werden [Hennegriff, Reich 2007]. Dies erfolgt durch einen Zuschlag („Klimaänderungsfaktor“) zum derzeit gültigen Bemessungswert (zum Beispiel  $HQ_{100}$ ). In Baden-Württemberg ergeben sich je nach Wiederkehrintervall (Jährlichkeit  $T_n$ ) regional unterschiedliche Klimaänderungsfaktoren. Für die anzusetzenden Bemessungsabflüsse können beim Lastfall Klimaänderung ( $HQ_{T_n, \text{Klima}}$ ) die aus der Hochwasserregionalisierung oder hydrologischen Modellberechnung vorliegenden Hochwasserkennwerte  $HQ_{T_n}$  direkt um den Klimaänderungsfaktor  $f_{T, \text{Klima}}$  erhöht werden (Abbildung 53):

$$HQ_{T_n, \text{Klima}} = f_{T, \text{Klima}} \cdot HQ_{T_n}$$

In Baden-Württemberg hat die LUBW bereits umfangreiche Berechnungen mit den Wasserhaushaltsmodellen für alle Flussgebiete (Neckar, Donau, Tauber, Bodenseezuflüsse, Hoch- und Oberrheinzuflüsse) durchführen lassen; für den Rhein sind die Untersuchungen

noch im Gange. Ziel ist es, mit pragmatischen Szenarien- und Ensemble-Ansätzen für diese Gebiete Klimaänderungsfaktoren für die Abflüsse festzulegen.

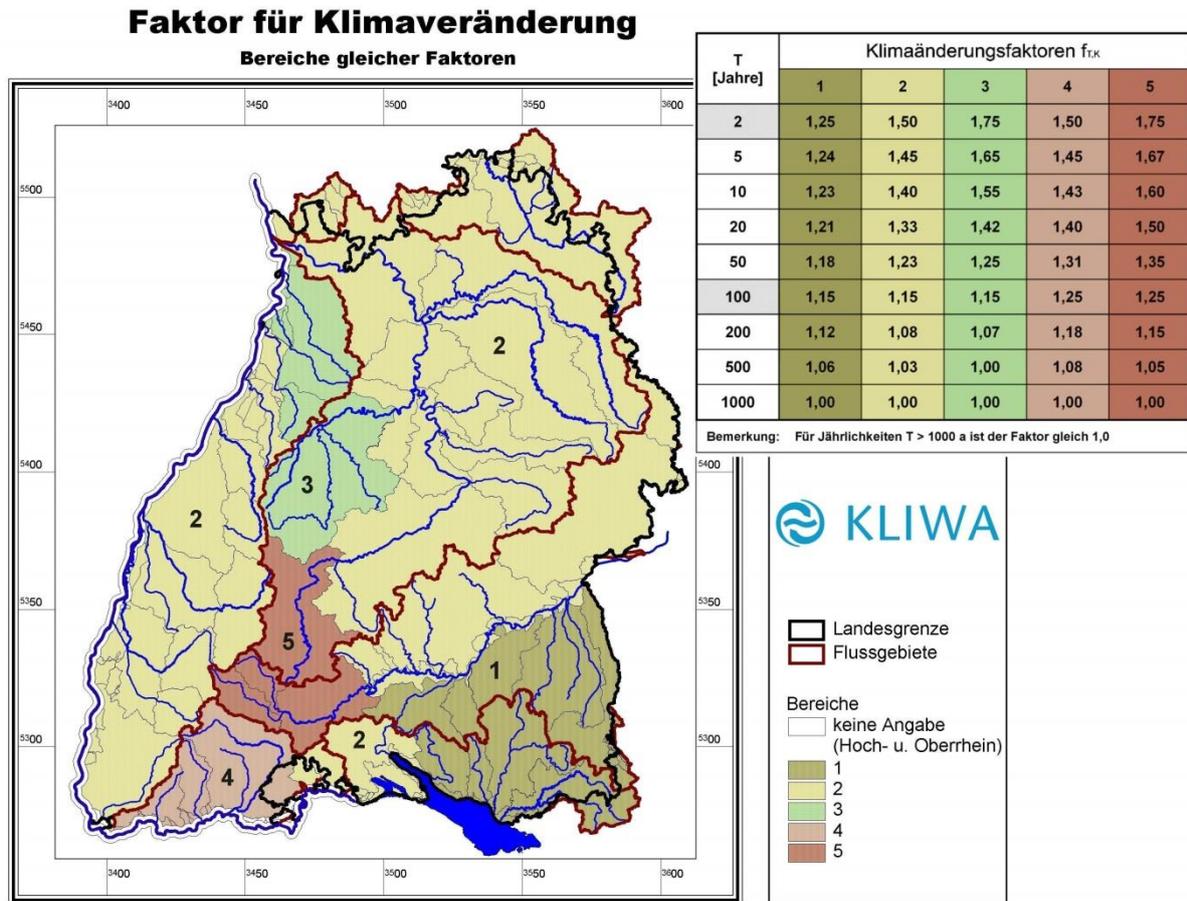


Abbildung 53: Regionen mit einheitlichen Klimaänderungsfaktoren  $f_{T,K}$  und Tabelle der Faktoren  $f_{T,K}$  [LUBW 2012b]

Zusammengefasst über alle untersuchten Jährlichkeiten ergeben sich für Baden-Württemberg die in Abbildung 53 dargestellten fünf Regionen mit den in der Tabelle aufgelisteten Klimaänderungsfaktoren.

#### 4.1.3 Hochwasservorsorge

##### Systematisches Zusammenwirken der Betroffenen bei der Festlegung von Anpassungsmaßnahmen und Öffentlichkeitsarbeit

Die flächendeckend vorhandenen Hochwasserpartnerschaften, ein Zusammenschluss von Kommunen, Fachverwaltungen und Institutionen innerhalb eines Einzugsgebietes, sollen sich neben den Fragen des „klassischen“ Hochwasserschutzes auch mit den Auswirkungen des Klimawandels auf die örtliche Situation und ggf. dadurch erforderliche Anpassungsmaßnahmen befassen.

Öffentlichkeitsarbeit ist ein wichtiger Bestandteil der Hochwasservorsorge. Sie hilft die Bevölkerung nachhaltig über ihr Hochwasserrisiko zu informieren und ihr dadurch die Möglichkeit zu geben Vorsorgemaßnahmen zu treffen. Zudem soll die Bevölkerung bereits vor einem Hochwasserereignis über das richtige Verhalten im Hochwasserfall informiert sein [IKONE 1999].

Durch Bauvorsorge, insbesondere durch Abschirmung und Abdichtung, sowie durch Sicherung von Tankanlagen gegen Auftrieb können Schäden an Gebäuden und Gefahren für Mensch und Umwelt abgewendet werden. Dies sollte insbesondere beim Neubau von Gebäuden und Anlagen direkt berücksichtigt werden, jedoch sollte auch im Bestand eine Aufrüstung erfolgen. Hierfür ist Öffentlichkeitsarbeit von großer Bedeutung, um auf Vorsorgemöglichkeiten und Gefahren hinzuweisen. Um die monetären Schäden für die Betroffenen einzugrenzen sollten diese auf Möglichkeiten einer privaten Risikoversorge hingewiesen werden. Nach aktueller Versicherungslage ist der Abschluss einer speziellen Hochwasserversicherung für diejenigen die in Überschwemmungsgebieten wohnen, nicht oder nur mit sehr hohen Kosten möglich. Das Hochwassers 2013 hat in Deutschland Schäden von mehreren Milliarden Euro verursacht und viele Menschen in existenzielle Not gebracht. Um das monetäre Risiko innerhalb der Solidargemeinschaft zu verteilen, wäre es sinnvoll eine generelle Gebäudepflichtversicherung für alle Immobilienbesitzer einzuführen, in der alle Elementarschäden abgedeckt sind.

### **Kontinuierliche Optimierung des Pegelmessnetzes**

Um auf Veränderungen durch den Klimawandel oder andere Einflüsse, insbesondere bei Extremereignissen aber auch in ihrem langfristigen Verlauf, adäquat reagieren zu können, ist eine genaue Beobachtung der Abflüsse entscheidend. Ausbau des Messnetzes, sollte immer unter Berücksichtigung der zu erwartenden steigenden Hochwasserabflüsse, erfolgen. Die Wetter- und Pegeldata sind weiterhin regelmäßig auszuwerten und die Wasserhaushaltsmodelle auf Basis von Klimaprognosen fortzuschreiben. Nach Zusammenführung der Daten und Prognosen sind ggf. die Maßnahmen (u. a. „Lastfall Klimawandel“) anzupassen.

### **Betrieb und Optimierung von Warn- und Alarmdiensten**

Die zuverlässige und ausfallsichere Bereitstellung von aktuellen Pegeldata und verlässlichen Hochwasservorhersagen und Frühwarnungen sind Grundvoraussetzung für eine effektive Gefahrenabwehr und Schadensminderung. Betrieb, Ausbau und Weiterentwicklung der Hochwasservorhersagezentrale stellen eine unverzichtbare Anpassungs- und Vorsorgemaßnahme des Landes dar. Kommunen, Betriebe und Bürger

benötigen verlässliche Informationen im Hochwasserfall, um gezielt Schäden vermeiden bzw. verringern zu können.

Hochwasserinformationen der LUBW werden auch eingespeist in das EDV-System FLIWAS, welches das Land den Kommunen zur Unterstützung der Gefahrenabwehr und Umsetzung ihrer Alarm- und Einsatzpläne anbietet. Es ist sinnvoll dieses System kontinuierlich an die Erkenntnisse aus dem Monitoring sowie Erfahrungen bei Hochwasserereignissen, bei Übungen und aus dem dauerhaften Betrieb der Systeme anzupassen. Es sollte regelmäßig überprüft werden, ob aus sich verändernden Eingangsdaten und sonstigen Bedingungen (beispielsweise bei der Nutzung mobiler Endgeräte) die Notwendigkeit entsteht, auch Anpassungen am EDV-System durchzuführen.

### **Erstellung und Fortschreibung von Hochwasserrisikomanagementplänen**

Hochwasserrisikomanagementpläne werden bis 2015 landesweit erstellt. Im Hochwasserrisikomanagementplan werden Maßnahmen zur Verringerung der Risiken durch zu erwartende Hochwässer festgelegt. Der Plan ist das Ergebnis eines mehrstufigen Prozesses:

- Bewertung und Beschreibung der Risiken auf der Grundlage der Hochwassergefahrenkarten und –risikokarten.
- Ermittlung der Defizite und des Handlungsbedarfs. Als Richtschnur dienen dabei landesweit abgestimmte Ziele für die einzelnen Schutzgüter.
- Identifikation von geeigneten Maßnahmen auf Basis eines landesweit einheitlichen Maßnahmenkatalogs.
- Priorisierung und Koordination dieser Maßnahmen. Dabei werden auch die Zuständigkeiten und Zeiträume für die Realisierung festgelegt und im Plan dokumentiert.

Die Hochwasserrisikomanagementpläne werden auf verschiedenen Ebenen erstellt:

Für die Beteiligung der Akteure werden die Bearbeitungsgebiete in Projektgebiete aufgeteilt und unter Federführung des jeweiligen Regierungspräsidiums die Maßnahmenberichte erarbeitet. Um auf Veränderungen durch den Klimawandel aber auch auf schon erfolgte Maßnahmen oder andere Änderungen einzugehen, müssen die Risikomanagementpläne regelmäßig überprüft und fortgeschrieben werden.

Da sich gezeigt hat, dass auch schon in den vergangenen 30 Jahren klimawandelbedingt höhere Hochwasserabflüsse beobachtet wurden und davon auszugehen ist, dass es zukünftig noch zu einer Verschärfung der Problematik kommt, sollten entsprechend den rechtlichen Rahmenbedingungen, den wasserwirtschaftlichen Prioritäten und den verfügbaren Ressourcen, Anpassungsmaßnahmen weiterhin zeitnah umgesetzt werden.

Durch die klimawandelbedingten Veränderungen erhöht sich die Dringlichkeit für die Umsetzung von Hochwasservorsorge- und Hochwasserschutzmaßnahmen.

## 4.2 Niedrigwasser

Bei der Langzeitanalyse der Niedrigwasserkennwerte muss grundsätzlich beachtet werden, dass die Abflüsse im Niedrigwasserbereich sehr sensibel auf wasserwirtschaftliche Nutzungen am Gewässer reagieren (z. B. Einleitungen von Kläranlagen oder Kühlwasserrückleitungen). Zudem sind die Pegel in Baden-Württemberg nicht speziell für Niedrigwasser ausgelegt. Dies bedeutet, dass die Messunsicherheit bei niedrigen Abflüssen und geringen Wassertiefen hoch sein kann [KLIWA 2012b].

Die Erfahrungen mit extremen Niedrigwasserperioden in der Vergangenheit, wie z. B. in den Jahren 2003 oder 2011 und die dabei getroffenen Maßnahmen fließen in die Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen ein. Die vorhandenen Anpassungsmaßnahmen werden nachfolgend stichpunktartig aufgelistet. Diese Maßnahmen bilden eine gute Basis für die Anpassung an klimawandelbedingte Veränderungen und sollten unbedingt fortgeführt werden, um für die weiteren zu erwartenden Entwicklungen gerüstet zu sein.

- Prognosemodelle
- Niedrigwasservorhersage
- Wassertemperaturvorhersage
- Sauerstoffreglement Neckar
- Renaturierungen einzelner Teilstrecken
- Angepasste Bauweisen zur Verminderung des Oberflächenabflusses

Auf die einzelnen Punkte wird im nachfolgenden Text noch weiter eingegangen. Als Anpassungsziele unterscheiden die „Leitlinien für ein nachhaltiges Niedrigwassermanagement“ der LAWA [2010] zwei Teilbereiche der Anpassung (siehe auch Abbildung 54: Strategien zur Verminderung der Auswirkungen von Niedrigwasser [Quelle: abgeändert nach LAWA 2007]):

- Niedrigwasservorsorge, z. B. Wasserrückhalt, Erhöhung der Grundwasserneubildung, Erhalt und Schaffung naturnaher Gewässerstrukturen
- Niedrigwassermanagement, z. B. Niedrigwasserinformationsdienst mit aktuellen Messdaten und Lageberichten

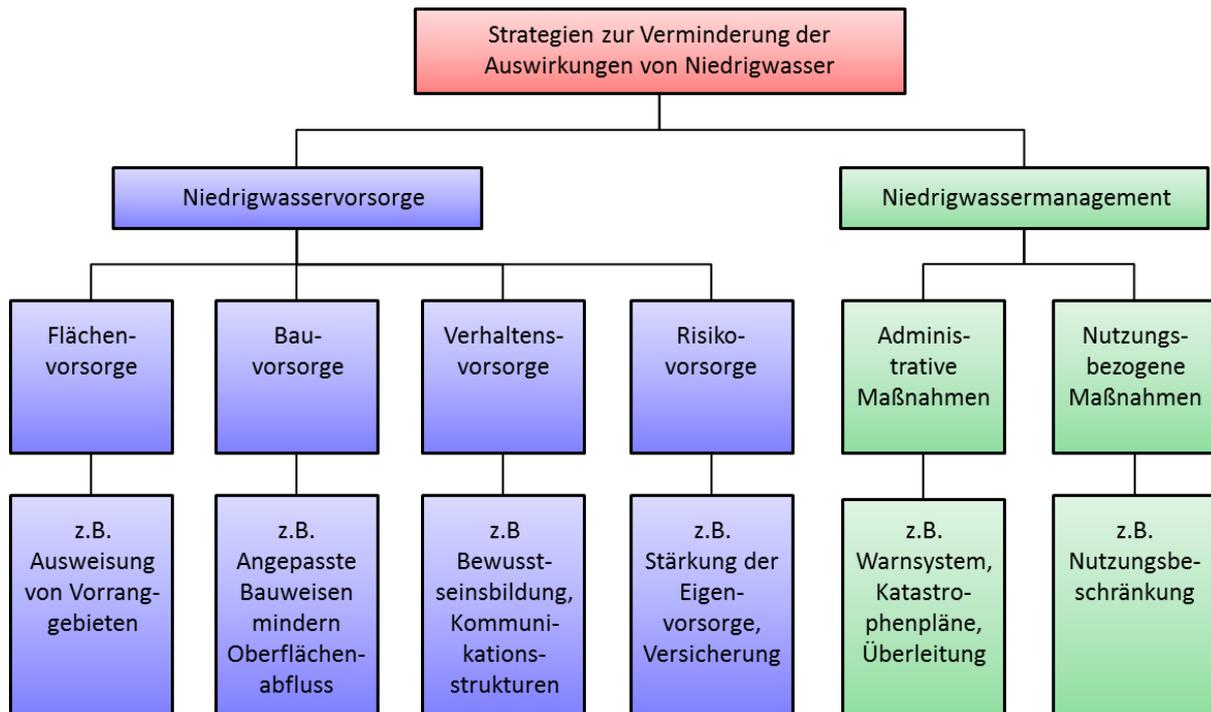


Abbildung 54: Strategien zur Verminderung der Auswirkungen von Niedrigwasser [Quelle: abgeändert nach LAWA 2007]

#### 4.2.1 Niedrigwasservorsorge

Im Rahmen der Niedrigwasservorsorge können durch geeignete Maßnahmen das Ausmaß und die Auswirkungen von Niedrigwasserperioden schon im Vorfeld deutlich reduziert werden. Hierfür eignen sich insbesondere Maßnahmen, die einen Rückhalt in der Fläche fördern sowie administrative (wie z. B. angepasste Nutzungsvereinbarungen) und Prognosemaßnahmen, die zur Vorbereitung genutzt werden können. Synergien zwischen Hochwasser- und Niedrigwassermanagement sollen zukünftig genutzt werden. Ein Beispiel hierfür ist die Förderung des natürlichen Wasserrückhalts und dezentraler Niederschlagsversickerung, die gleichzeitig auf die Grundwasser- und Hochwasserbewirtschaftung positive Auswirkungen haben.

##### Verbesserung des natürlichen Wasserrückhalts

Durch die Förderung und Reaktivierung von Auenflächen, naturnahen Überflutungsflächen sowie forstwirtschaftlichen Maßnahmen kann der Rückhalt des Wassers in der Fläche gefördert werden. Durch Deichrückverlegungen wird die naturnahe Sukzession in den Auegebieten gefördert und somit genau wie durch eine Förderung der naturnahen Waldwirtschaft der Wasserrückhalt im Boden erhöht. Die Erhaltung bzw. Reaktivierung von Mooren und Feuchtgebieten trägt weiterhin zu einem Wasserrückhalt in der Fläche bei.

## **Erhaltung bzw. Wiederherstellung naturnaher Gewässerstrukturen**

Naturnahe Gewässerstrukturen können die Resilienz gegenüber Hoch- und Niedrigwasserereignissen verbessern. Sie unterstützen den natürlichen Wasserrückhalt. Die Hitze- und Trockenperioden der vergangenen Jahre haben gezeigt, dass Maßnahmen wie Verbesserung der Durchgängigkeit und der Gewässermorphologie, Erhöhung des Wasserrückhalts in der Fläche positive Wirkungen für die Lebensbedingungen und die Belastbarkeit der Ökosysteme haben. Insbesondere an kleineren Gewässern bewirkt ein intakter Ufergehölzsaum eine Reduzierung der Wärmebelastung durch Beschattung.

## **Förderung der Grundwasserneubildung**

Je nach Grundwasserverhältnissen muss es auch in wärmeren und trockeneren Sommern nicht zwingend zu geringeren mittleren Monatsabflüssen kommen, wenn sich die Niederschlagsmenge ganzjährig nicht verändert [LAWA 2010]. Durch dezentrale Versickerung und eine Verminderung des Oberflächenabflusses kann lokal die Grundwasserneubildung gefördert werden. Über Quellschüttung steht dieses Wasser dann in Niedrigwasserperioden verzögert zur Verfügung. Weiterhin kann bei entsprechenden Grundwasservorkommen für einige Nutzungsarten, wie beispielsweise Bewässerungswassergewinnung, dann eine Grundwasserentnahme statt einer direkten Entnahme aus den Fließgewässern in Erwägung gezogen werden.

## **Anpassung des Messnetzes und der Pegel an Niedrigwasser**

Häufig sind die an den Gewässern vorhandenen Pegel und Messeinrichtungen nicht für Niedrigwasserabflüsse geeignet. Die vorhandenen Abflusskurven an bestehenden Pegeln weisen meist aufgrund der relativ seltenen Niedrigwasserereignisse nur eine geringe Messdichte für die Kalibrierung der Q-h-Beziehung im unteren Abflussbereich auf. Weiterhin sind die Abflussquerschnitte an vielen Pegelstellen ziemlich homogen (d. h. es gibt keine „Niedrigwasserrinne“). Da bei kleinen Abflüssen die Wassertiefe dann sehr klein wird, ist zum einen die Messgenauigkeit relativ groß und zum anderen eine entsprechend hoch aufgelöste Geschwindigkeitsmessung nicht möglich. Daher ist es sinnvoll und notwendig, die Pegelmessstellen entsprechend anzupassen und zu optimieren. Weiterhin sollte an Pegelmessstellen (möglichst flächendeckend, nicht nur an bekannten Temperatur-Hotspots wie z. B. den Neckar) auch gleichzeitig die Wassertemperatur erfasst werden. Mit einem intensiveren Monitoring ist es möglich klimabedingte Änderungen in quantitativer Hinsicht besser zu erfassen und die Ergebnisse besser in die entsprechenden Managementmaßnahmen zu integrieren. Hierbei können teilweise Synergien zwischen der Anpassung und Optimierung des Messnetzes auf erhöhte Hochwasserabflüsse und die Anpassung auf Niedrigwasser genutzt werden. Wenn beispielsweise eine bauliche

Anpassung der Pegelmessstelle erfolgt, sollte darauf geachtet werden, dass die Messstelle sowohl für extreme Niedrigwasser- als auch Hochwasserereignisse geeignet ist.

### **Erstellung und Erweiterung von Prognosemodellen**

Zur Erfassung der wasserwirtschaftlichen Situation von Gewässern oder Gewässerabschnitten sind Bilanz- und darauf aufbauend Prognosemodelle ein sinnvolles und in Baden-Württemberg bereits erprobtes Mittel. Es existieren Prognosemodelle für die Niedrigwasser- und Temperaturvorhersage beispielsweise schon seit langem für den Neckar. Aber auch andere Gewässer, die weniger stark durch Abwassereinleitung, Wasserkraftnutzung, Schifffahrt und Kühlwasserbereitstellung genutzt sind, werden zukünftig vorr. vermehrt von Niedrigwasser betroffen sein.

Um das Zusammenwirken der jeweiligen anthropogenen Nutzungen besser einschätzen zu können, sollte für weitere Gewässer bzw. Gebietseinheiten zunächst eine wasserwirtschaftliche Bilanz aufgestellt werden, anhand der die Zuflüsse, Abflüsse und Entnahmen ersichtlich sind. Auf Basis der Wasserbilanz für die jeweiligen Teileinzugsgebiete wird ersichtlich wo prioritäre Problemlagen zu erwarten sind. Darauf basierend können dann entsprechende Prognosemodelle aufgestellt werden, die erlauben zukünftige Managementstrategien zu entwickeln, um ein Gewässer in einer Niedrigwasserphase möglichst wenig zusätzlich zu belasten.

### **Vorbereitung von administrativen Maßnahmen**

Niedrigwassermanagementmaßnahmen können nur dann effektiv und effizient durchgeführt werden, wenn im Vorfeld entsprechende Pläne erstellt und Strukturen geschaffen werden. Daher ist es unabdingbar, administrative Maßnahmen, die im Falle von Niedrigwasser durchgeführt werden sollen, entsprechend vorzubereiten. Dies ist im Rhein- und Neckareinzugsgebiet schon weitgehend umgesetzt. An kleineren Gewässern sind es meist stark regulierte Abschnitte oder Ausleitungsstrecken die ggf. zusätzlich durch Kläranlageneinleitungen oder (ggf. zukünftige) Entnahme von Bewässerungswasser bei Niedrigwasser extreme Last erfahren. Die aquatische Flora und Fauna ist dadurch erheblich gestresst. Vereinbarungen zu Nutzungseinschränkungen oder Vorüberlegungen zu Managementstrategien basierend auf Vorabprognosen sind eine gute Grundlage zur Umsetzung von Stützungsmaßnahmen.

#### **4.2.2 Niedrigwassermanagement**

Im Rahmen des Niedrigwassermanagements werden folgende Maßnahmen vorgeschlagen:

## **Monitoring (Menge, Güte, Bilanzierung)**

Um Veränderungen durch den Klimawandel entsprechend abschätzen sowie auf Extremereignisse zeitnah reagieren zu können, ist es sowohl nötig ein dauerhaftes Monitoring der Wassermenge (und damit verbunden der Wasserbilanzierung für Teileinzugsgebiete) sowie der Wassergüte durchzuführen. Speziell beim Eintreten von extremen Niedrigwasserereignissen sind Aussagen über die hydraulischen Verhältnisse (z. B. minimale Wassertiefen) und Gewässergüteparameter, wie beispielsweise Sauerstoff und Nährstoffe aufzunehmen und auszuwerten. Daraus kann abgelesen werden an welchen Gewässerabschnitten mittelfristig eine bauliche Umgestaltung (z. B. Einrichtung einer Niedrigwasserrinne) oder kurzfristige Stützungsmaßnahmen beispielsweise durch Einschränkung von Entnahmen oder lokale Belüftungsmaßnahmen durchzuführen sind. Außerdem können so längerfristige Zusammenhänge und Veränderungen besser erkannt und neue Anpassungsoptionen entwickelt werden.

## **Niedrigwasservorhersage**

Eine Niedrigwasservorhersage bildet die notwendige Voraussetzung, um ein fundiertes Niedrigwassermanagement zu betreiben und sollte auch für kleinere weniger resiliente Gewässer erweitert bzw. ausgebaut werden.

In Trockenperioden sind die täglich aktualisierten Niedrigwasservorhersagen der LUBW eine wichtige Grundlage für das Niedrigwassermanagement. Die Hochwasservorhersagezentrale der LUBW veröffentlicht täglich Wasserstands- und Abflussvorhersagen für rund 100 Pegel in den baden-württembergischen Einzugsgebieten von Bodensee, Hochrhein, Oberrhein, Donau, Neckar und deren wichtigen Zuflüssen sowie für die Tauber unter <http://www.hvz.lubw.baden-wuerttemberg.de>. Diese Vorhersagen umfassen in Niedrig- und Mittelwassersituationen einen Zeitraum von bis zu sieben Tagen. Die Vorhersagen geben Informationen zum mittelfristig zu erwartenden Rückgang der Wasserstände bei weiterer Trockenheit bzw. zu möglichen Wasserstandsanstiegen aufgrund vorhergesagter Niederschläge und ggf. einer Schneeschmelze. Hierdurch werden Entscheidungshilfen bereitgestellt für das Niedrigwassermanagement von Behörden, Industrie, Energieversorgung und Landwirtschaft. Das Vorhersageszenario 'kein Niederschlag in den kommenden sieben Tagen' ermöglicht die Abschätzung der Niedrigwasserentwicklung. Die Verlässlichkeit der Abflussvorhersagen nimmt - entsprechend den verwendeten Wettervorhersagen - mit zunehmendem Vorhersagezeitraum ab. Die Abflussvorhersagen für kleinere Flussgebiete (Einzugsgebiet kleiner als etwa 500 km<sup>2</sup>) sind mit zusätzlichen Unsicherheiten behaftet, da kleinräumige Niederschlagsstrukturen von den Wettermodellen nur überschlägig erfasst werden. Daher werden für Vorhersagepegel an kleineren Flüssen

(mit Einzugsgebiet unter 500 km<sup>2</sup>) ausschließlich Abschätzungen veröffentlicht und für Pegel mit sehr kleinen Einzugsgebieten (< 150 km<sup>2</sup>) werden keine Vorhersagen veröffentlicht.

Die Niedrigwasservorhersagen sollten durch eine bessere Erfassung von Niedrigwasserabflüssen (s. Pegel) verbessert werden. Auch für kleinere Einzugsgebiete sollte in Trockenperioden ein Szenario 'kein Niederschlag in den kommenden sieben Tagen' berechnet werden und den Behörden sowie den Nutzern der Gewässer zur Verfügung gestellt werden. Damit können Entnahmeeinschränkungen im Voraus eingeplant werden. Dies kann beispielsweise für die Bewässerungslandwirtschaft oder die Kleinwasserkraft von Nutzen sein.

### **Wassertemperaturvorhersage**

Für den Neckar von Plochingen bis Mannheim werden ebenfalls durch die LUBW seit 2006 täglich Wassertemperaturvorhersagen für die nächsten sieben Tage unter Berücksichtigung des jeweils geplanten Einsatzes der Kraftwerke am Neckar berechnet. Damit können ökologische und wasserrechtliche Grenzsituationen frühzeitig erkannt werden. Mit dem von Land und dem Energieversorger, der EnBW AG gemeinsam entwickelten Wärmemodell für den Neckar steht ein Instrument zum Niedrigwassermanagement zur Verfügung, welches sich in den letzten Jahren in der Praxis bei kritischen Niedrigwassersituationen bereits mehrfach bewährt hat. Für den Rhein zwischen Basel und Worms wurde ebenfalls ein Wärmemodell erstellt; es ist seit Mitte 2010 im Einsatz [KLIWA 2011a].

Diese Vorhersagemodelle sollten im Rahmen der Anpassung an den Klimawandel weiter ausgebaut und an sich verändernde Verhältnisse angepasst werden. An Rhein und Neckar werden diese Modelle vor allem bzgl. der Wärmeeinleitungen bereits genutzt. Auch an anderen Gewässern, die insbesondere durch Entnahmen oder Ausleitungen beeinflusst sind, sollten Temperaturmodelle erstellt werden, damit – falls für den ökologischen Zustand oder die Gesamtwasserbilanz erforderlich – beispielsweise Nutzungen oder Entnahmen eingeschränkt werden können, bevor aufgrund niedriger Abflüsse die Wassertemperatur weiter ansteigt.

### **Nutzungseinschränkungen**

Durch den einsetzenden Klimawandel ist im Sommerhalbjahr mit häufigeren und längeren Niedrigwasserführungen der Binnengewässer zu rechnen. Dies hat gravierende ökologische und ökonomische Folgen und wird bestehende Nutzungskonflikte verschärfen. Diese müssen im Vorfeld erkannt und durch Festlegung von Prioritäten entschärft werden. Als ein bereits, beispielsweise an Rhein und Neckar, praktiziertes Verfahren sei hier das Festlegen von Schwellenwerten genannt, ab denen bestimmte Nutzungen einzuschränken sind. Darüber hinaus sind Bewirtschaftungspläne aufzustellen und wasserrechtliche Bescheide

gegebenenfalls anzupassen. Die Priorisierung sollte flussgebietsbezogen erfolgen, da insbesondere ggf. auftretende gegenseitige Beeinflussungen verschiedener Nutzungen berücksichtigt werden müssen. Außerdem spielen die naturräumlichen Gegebenheiten und die Erfahrungen vergangener Niedrigwassersituationen eine wesentliche Rolle.

Die Maßnahmen zur Reduzierung der Temperaturerhöhung in den Gewässern durch Kühlwassereinleitungen oder die Einschränkung von Entnahmen müssen weiter beibehalten werden. Für möglichst günstige ökologische und ökonomische Betriebsweisen werden diese im Vorfeld über Modelle und in Absprache mit den Kraftwerksbetreibern im Rahmen der wasserrechtlichen Erlaubnis, geplant. Die Überschreitung kritischer, gewässertypspezifischer Mischwassertemperatur von Flusswasser und eingeleitetem Kühlwasser ist zu vermeiden, daher sollten auch weiterhin Entnahmen der Kraftwerke entsprechend der Temperaturentwicklung im Gewässer eingeschränkt werden.

Zur Beurteilung der Niedrigwassersituation in den einzelnen Gewässerabschnitten wird in [LfU 2004] empfohlen, hilfsweise ein Drittel MNQ bzw. ein Sechstel MNQ als Schwellenwerte heranzuziehen, die auch im Wasserkrafterlass Baden-Württemberg vom 14.12.2000 für den Mindestabfluss in Ausleitungsstrecken für Wasserkraftanlagen zu Grunde gelegt werden. Eine Beschränkung des Gemeingebrauchs sowie der Entnahmenutzungen ist somit insbesondere dann zu prüfen, wenn der Abfluss ein Drittel MNQ erreicht hat. Ein Sechstel MNQ sollte nicht unterschritten werden. Die Werte ein Drittel MNQ und ein Sechstel MNQ sind als Entscheidungsrahmen zu verstehen. Zusätzliche örtlich relevante Beurteilungskriterien des wasserwirtschaftlich erforderlichen Mindestabflusses können darüber hinaus z. B. die Gewässergüte, der Temperaturhaushalt und zusätzliche Bei- und Einleitungen sein.

In einigen Gewässern (wie z. B. Obere Donau), die durch Freizeitnutzungen, wie beispielsweise den Kajaksport stark beaufschlagt sind, kann es außerdem nötig werden diese Nutzung bei Niedrigwasser einzuschränken. Durch die Freizeitnutzung werden Fische und andere aquatische Lebewesen in ihrem zur Verfügung stehendem Lebensraum beschränkt. Da bei Niedrigwasser bereits die Habitatflächen durch die Abflussreduzierung erheblich dezimiert sind, sollten zusätzliche Stressoren vermieden werden.

### **Stützungsmaßnahmen (z.B. Belüftungs- und Sauerstoffreglement)**

Das Land Baden-Württemberg hat ein Sauerstoffreglement für den Neckar, das 2003 aktualisiert und der zwischenzeitlich verbesserten ökologischen Situation angepasst wurde. Hierin ist mit den Betreibern der Kraftwerke am Neckar und der Stadt Stuttgart als Betreiberin der Kläranlage eine Vereinbarung getroffen, die ein fünfstufiges Vorgehen festgelegt:

- **Stufe I:** Messungen und Beobachtungen von Sauerstoffgehalt und Temperatur durch die LUBW und die Wasserschutzpolizei.
- **Stufe II:** Warnung bei Unterschreiten des Warnwerts von 4,5 mg/l. Die Warnung erfolgt gemäß einem festgelegten Schema.
- **Stufe III:** Vorbeugende Stützmaßnahmen, um ein weiteres Absinken der Sauerstoffkonzentration unter 4 mg/l zu verhindern, durch Turbinenbelüftung, Wehrüberfall bzw. durch die Abwasserbelüftung des Kläranlagenabflusses Stuttgart-Mühlhausen. Die Stützmaßnahmen werden durch die LUBW vorgeschlagen und durch die jeweiligen Betreiber veranlasst.
- **Stufe IV:** Alarmierung und Durchführung von Belüftungsmaßnahmen bei Unterschreitung des Auslösewertes von 3,5 mg/l. Die Belüftung erfolgt durch Wehrüberfall und/oder Turbinenbelüftung sowie bei Bedarf durch Inbetriebnahme der Kühltürme der Wärmekraftwerke. Die Maßnahmen werden durch die LUBW gesteuert.
- **Stufe V:** Lokale Notbelüftung, z. B. durch Einsatz der Feuerwehr, um Notatmung oder Fischsterben zu verhindern.

Auf Basis der Prognosemodelle können Fließgewässer identifiziert werden, bei denen zukünftig Temperatur bzw. Sauerstoff-Hotspots zu erwarten sind oder sich wasserbilanzbasierte Defizite abzeichnen. Hier sollten dann ähnliche, an die dortige Situation angepasste Maßnahmenpläne vorbereitet werden.

### **Spülung von Abwasserkanälen und Anpassung von Kläranlagen-Ablaufwerten**

Zu diesem Punkt wird auf Abschnitt 4.4 zur Verbundsteuerung verwiesen.

## **4.3 Gewässerökologie**

Für die Gewässerökologie lassen sich die folgenden Anpassungsziele definieren:

- Verbesserung der Gewässermorphologie,
- Niedrigwasservorsorge,
- Verringerung des Stoffeintrages (diffus und punktuell),
- Umsetzen der EG-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL).

Durch eine Verbesserung der Wasserqualität und der Gewässerstruktur wird die Resilienz gegenüber Niedrigwasserphasen und Hochwasser verbessert. Maßnahmen zur Niedrigwasservorsorge, die zu einer Erhöhung der Niedrigwasserabflüsse führen, dienen gleichzeitig der Gewässerökologie. Dasselbe gilt für Maßnahmen zur Verringerung der Wassertemperatur bzw. zur Förderung des Sauerstoffregimes.

Hochwasserschutzmaßnahmen, die dem natürlichen Hochwasserrückhalt dienen, können ebenso gleichzeitig der Gewässerökologie dienen.

LAWA (2012) schlägt Maßnahmen und Handlungsoptionen vor, die für die Stabilisierung und Verbesserung der Gewässerökologie nützlich sind, unabhängig davon wie das Klima in der Zukunft aussehen wird. Dies sind insbesondere wasserwirtschaftliche Anpassungsmaßnahmen, die Bandbreiten tolerieren und außerdem

- flexibel und nachsteuerbar sind, d. h. die Maßnahmen werden schon heute so konzipiert, dass eine kostengünstige Anpassung möglich ist, wenn zukünftig die Effekte des Klimawandels genauer bekannt sein werden. Die Passgenauigkeit einer Anpassungsmaßnahme sollte regelmäßig überprüft werden.
- robust und effizient sind, d. h. die gewählte Anpassungsmaßnahme ist in einem weiten Spektrum von Klimafolgen wirksam. Maßnahmen mit Synergieeffekten für unterschiedliche Klimafolgen sollten bevorzugt werden.

Zum bisherigen Stand von Anpassungsmaßnahmen ist festzustellen, dass die WRRL zum Teil umgesetzt ist. Monitoring-Maßnahmen zur Erfassung des ökologischen Zustandes werden durchgeführt. Aktuell läuft eine Gewässerstrukturgütefeinkartierung. Einige Maßnahmen aus den Bereichen Hoch- und Niedrigwasservorsorge, die auch der Gewässerökologie dienen, sind in der Planungs- oder Ausführungsphase. Zur Vorbereitung auf ein spezielles gewässerökologisches Klima-Monitoring werden auch im Rahmen von KLIWA Anforderungen dafür festgelegt.

Neben diesen Maßnahmen sollten noch einige speziell auf die Gewässerökologie ausgerichtete Maßnahmen durchgeführt werden, die im Folgenden näher beschrieben sind.

### **Gewässerökologisches Monitoring**

Es ist erforderlich ein gewässerökologisches Klimamonitoring zu formulieren. Im Unterschied zu den hydrologischen Disziplinen, in denen die klimatischen Veränderungen durch die Analyse langer Zeitreihen geeigneter Indikatoren bereits heute gut darstellbar sind und auch für die Kalibrierung von Modellen verwendet werden, steht das Klimamonitoring für biologische Systeme noch am Anfang. In Baden-Württemberg gibt es umfangreiche Messreihen zur Beschreibung der Qualität der Gewässer, die Hinweise auf geeignete gewässerchemische und gewässerbiologische Indikatoren enthalten. Anhand einer systematischen Analyse vorhandener Messdaten zur chemischen aber auch der biologischen Zusammensetzung kann die Wirkung bestimmter Faktoren, wie z. B. veränderte Landnutzung, Nährstoffeintrag, veränderte Globalstrahlung mit direkter Wirkung auf Organismen auf die Reaktion der Gewässerökologie relativ gut abgeschätzt werden. Da viele Faktoren nicht unabhängig voneinander sind und sich gegenseitig beeinflussen oder gar

bedingen, ist eine Priorisierung der Einflüsse und der Reaktionen jedoch schwierig bis unmöglich. Bisher nicht untersucht sind die Beziehungen zwischen den klimatischen Faktoren und den im Gewässer wirkenden Faktoren (proximate und ultimate Ursachen von Verhalten), d. h. wie verändern sich z. B. die morphologischen Gewässerstrukturen oder die Landnutzung, etc. aufgrund des Klimawandels. Damit ist offensichtlich, dass eine direkte Korrelation aufgrund der vielfältigen Einflussfaktoren und Wirkungsketten nicht möglich ist. Diese systemischen Zusammenhänge gilt es herauszuarbeiten, in den Gesamtkontext zu stellen und Maßnahmen abzuleiten. Dabei sind die nationalen Strategien für ein Klimamonitoring und die Aktivitäten in den Flussgebietskommissionen entsprechend zu berücksichtigen.

Insbesondere sollte eine regelmäßige Beprobung physikalischer, chemischer und biologischer Parameter durchgeführt werden.

Da hinsichtlich der Klimaauswirkungen auf das Makrozoobenthos, kleinere Gewässer besonders in Regionen mit geringem Niederschlag als besonders gefährdet eingeschätzt werden, insbesondere wenn hier eine zusätzliche Nutzung, z. B. durch Ausleitungskraftwerke oder Wasserentnahmen vorliegt, können in solchen Strecken durch regelmäßiges Beprobieren der Benthosorganismen, klimawandelbedingte Veränderungen frühzeitig erkannt werden.

Eine räumliche (flussaufwärtsgerichtete) Verschiebung des Lebensraums kann durch eine systematische Beprobung der Benthos- und Fischorganismen erkannt werden und Fragen nach Änderungen der Lebensgemeinschaften, Verhaltensänderungen, Lebenszyklusänderungen untersucht und geklärt werden, die dann Basis für gezielte Maßnahmen sind.

Habitatkartierungen geben Aufschluss über die Lebensräume für aquatische Organismen. Hierbei werden Gewässerstrukturen und vorherrschenden physikalischen Parameter (Fließgeschwindigkeit, Wassertiefe, etc.) erfasst, die für bestimmte aquatische Organismen oder Organismengruppen geeignet sind. Darauf aufbauend sind Habitatprognosemodelle ein probates Instrument, um auch im Fall des Niedrigwassermanagements Auskunft zu geben, welche Managementstrategie die geringsten Auswirkungen auf die Habitatqualität der jeweiligen Spezies hat oder welche präventiven Maßnahmen den zu erwartenden klimatische bedingten Stressoren (Temperaturerhöhung, Abflussreduktion, Sedimentveränderungen, etc.) entgegenwirken können. Auch hierfür sind die gewässermorphologischen Daten (s.o.) als Eingangsdaten wichtig. Es wird angeraten für Gewässer die zukünftig prioritär von Niedrigwassersituationen betroffen sein werden, Habitatmodelle zu erstellen, so dass bereits jetzt entsprechende Managementstrategien entwickelt werden können, die sich positiv auf die Gewässerökologie auswirken.

Ein spezielles Monitoring von Neobiota kann dazu dienen, Einwanderungstendenzen zu erkennen und im Bedarfsfall Maßnahmen zu ergreifen.

Ergebnisse des Monitoring, der Beprobungen und der Kartierungen sollten zeitnah ausgewertet und für längerfristige Beobachtung von Entwicklungstendenzen sowie für die Maßnahmenentwicklung zur Verfügung stehen.

### **Gewässermorphologisches Monitoring und Modellierung**

Neben der bereits etablierten Erfassung der chemischen und physikalischen Parameter, bestehen in der morphologisch-sedimentologischen Beprobung noch Defizite. Dies bezieht sich sowohl auf die Erfassung der Strukturen genauso wie auf die Menge und Zusammensetzung des vom Gewässer (Geschiebe, Schwebstoff) transportierten Materials als auch der Gewässersohlen und des Vorlandmaterials selbst.

Morphologische Strukturen, die eine Grundlage für die ökologische Qualität eines Gewässers darstellen, sind ein wesentlicher Faktor der die Resilienz der Gewässer gegenüber klimatischen Veränderungen erhöhen kann. Die Diversität der Gewässerstrukturen hängt maßgeblich von der Art, Intensität und Zusammensetzung des Sedimenttransports ab. Gewässer, die sich im Erosionsregime befinden, zeigen meist eine Reduktion der Gewässerstrukturen, tendieren zur Abpflasterung der Sohle oder leiden unter größeren kolmatierten Abschnitten. Gewässer im Sedimentationsregime tendieren dazu, bisher ggf. vorhandene Strukturen mit angelandetem Material zu überdecken.

Morphologische Verbesserungen, die für die Reaktions- und Pufferfähigkeit der Gewässerökologie gegenüber Klimaänderungen erforderlich sind, setzen meist großräumige und langfristige Prozesse in Gang. Deshalb ist eine sorgfältige Planung von Maßnahmen äußerst wichtig. Für numerische und physikalische Modelle die als Hilfsmittel für das Design von Verbesserungsmaßnahmen sowie zur Prognose deren Wirkungsweise dienen,, sind insbesondere morphologische Eingangsdaten aus Messungen unabdingbar:

1. Regelmäßige Geschiebetransportmessungen werden bisher nur am Rhein durch die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung durchgeführt. An maßgeblich von Eintiefung betroffenen Gewässern (wie z. B. Obere Donau, Iller u.a.) sollte ein regelmäßiges Monitoring des Geschiebetransports in Betracht gezogen werden. Hiermit können abflussspezifische Geschiebetransportraten sowie die Zusammensetzung des transportierten Materials erfasst werden. Erosions- und Ablagerungstendenzen können aber auch integrativ über regelmäßige, eng gesetzte Profilaufnahmen abgeschätzt werden. Informationen zur Korngrößenverteilung des Geschiebes können damit jedoch nicht erfasst werden.
2. Nachhaltige strukturbereichernde Maßnahmen beziehen sich sehr oft nicht nur auf das Gewässer selbst, sondern oftmals auch auf die Vorländer

(Gewässeraufweitungen, Laufverlängerungen, Deichrückverlegung, etc.). Für eine weitere Maßnahmenplanung ist das Wissen zur Sedimentzusammensetzung der Flusssohle aber auch des Vorlandes (räumlich verteilt und über die Tiefe) unabdingbar.

3. An einigen Abflusspegeln wird zusätzlich die Schwebstoffkonzentration (meist als Tagesmittelwert) ermittelt. Für viele kleine und mittelgroße Gewässer existieren jedoch keine derartigen Messungen. Gerade für die Abschätzung der Kolmationsprozesse ist der Schwebstoffgehalt jedoch von großer Bedeutung. Auch der Landabtrag und der damit verbundene Stoffeintrag aus der Fläche sind mit dem Schwebstofftransport direkt korreliert.
4. Es wird angeraten die erhobenen Daten langfristig in ein Sedimentkataster der Flüsse in Baden-Württemberg einzustellen, in dem die Daten aus den vorgeschlagenen Messungen (Schwebstoffkonzentration, Geschiebetransport, Sohlzusammensetzung, Korngrößen des Vorlandes) in einer Datenbank regelmäßig erfasst werden.

### **Förderung einer naturnahen Gewässerstruktur**

Die Gewässerstruktur spielt eine entscheidende Rolle für die ökologische Wertigkeit eines Gewässers, sowie für die Resilienz gegenüber klimabedingten Veränderungen. Für nachhaltig reichhaltige Gewässerstrukturen ist die morphologische Dynamik von besonderer Bedeutung. Hier spielen Abflussextrema eine wesentliche Rolle. Beispielsweise erodieren Ufer bei Hochwasserereignissen stärker, während Niedrigwasser zum Trockenfallen von Uferbereichen, zur Bildung und Verfestigung von Sand- und Kiesbänken oder zum vollständigen Austrocknen eines Gewässers führen kann. Diese Umgestaltungsprozesse sind aber nur dauerhaft vorhanden, wenn ein dynamisches Gleichgewicht herrscht. Dazu muss der Feststoffhaushalt jedoch ausgeglichen sein, d. h. die Menge an Geschiebe und Schwebstoff, die in einen Gewässerabschnitt hinein transportiert wird, ist auf längere Sicht ausgeglichen mit der die den Abschnitt wieder verlässt. Aus diesem Grund ist eine Durchgängigkeit eines Gewässers nicht nur für wanderwillige Lebewesen von großer Bedeutung, sondern auch für die Sedimente. Bei der weiteren Maßnahmenplanung zur Durchgängigkeit ist dieser Aspekt noch deutlicher in den Mittelpunkt zu stellen.

Durch zurückgehaltene Sedimente verstärkt sich die Erosionstendenz vieler Gewässer, wodurch bei höheren Abflüssen erst ein deutlich späteres Ausufer in die Vorländer erfolgt. Dies erhöht zum einen den nach unterstrom abgegebenen Abfluss (mit den bekannten Auswirkungen der Erhöhung der HW-Scheitel) zum anderen wird somit der Erosionsdruck der Sohle weiter erhöht. Eine gute Strukturgüte des Fließgewässers mit natürlichen Strukturen (z. B. angebundene Altarme, Verzweigungen, Überflutungsgebiete in der Aue) und bestehenden Auenbereichen hat in bestimmten Grenzen eine ausgleichende Wirkung

auf das durch Klimaänderung prognostizierte zunehmend extreme Abflussgeschehen und trägt zur Verbesserung des Feststofftransporthaushaltes bei. Altarme und Auenbereiche können Rückzugsräume für die Gewässerbiozönose bilden, die insbesondere bei zunehmendem klimatischem Stress von besonderer Bedeutung sind.

Ist die Durchgängigkeit von Flüssen gegeben, ist die Wanderung von Lebewesen in ggf. weniger betroffenen oder in strukturreichere Gewässerabschnitte möglich. Die Wiederbesiedlung von z. B. durch Niedrigwasser beeinträchtigten Gewässerabschnitten oder Nebengewässern durch typspezifische Arten ist besser möglich. Wenn langfristig mit einer weiteren Verschiebung der Fischzonen zu rechnen ist (vgl. Kap. 3.3.2), können sich die Fischpopulationen jedoch nur in weiter oben liegenden Gewässerabschnitten ansiedeln, wenn eine entsprechende Durchgängigkeit gegeben ist.

### **Förderung einer naturnahen Sukzession im Uferbereich und im Gewässerumfeld**

Gewässerrandstreifen haben das Ziel den diffusen Eintrag an Feinsedimenten, Schadstoffen und Nährstoffen aus landwirtschaftlichen Flächen zu verringern. Es handelt sich hierbei um 10 m breite Streifen, die einer Nutzungseinschränkung unterliegen. Sie sind gesetzlich vorgeschrieben, sind jedoch noch nicht überall beachtet. Bei entsprechender Gestaltung und Aufwuchs am Ufer können Gewässerrandstreifen gleichzeitig als Beschattung dienen und übernehmen bei einer erwarteten Zunahme der Temperatur und Globalstrahlung zumindest bei kleineren Gewässern eine gewisse Ausgleichsfunktion.

Durch die Verminderung der Sonneneinstrahlung erwärmt sich das Wasser weniger und mildert so die Sauerstoffmangelsituationen im Sommer. Beschattung wirkt einer durch Erwärmung induzierten Eutrophierung entgegen [LUBW 2007]. Zusätzlich bietet eine ufernahe Vegetation Rückzugsmöglichkeiten, um sich dem Räuberdruck zu entziehen, insbesondere für die Lebewesen, die aufgrund Niedrigwasser, Temperaturerhöhung oder Sauerstoffreduktion bereits geschwächt oder zumindest extrem gestresst sind und so eine leichte Beute wären. Gleichzeitig kann für manche Arten die Beschattung ein Habitatvorteil sein.

Zusätzlich fördert eine naturnahe Vegetation am Gewässerrandstreifen und des Gewässerumfelds verbunden mit entsprechend flachen Ufern die Biotopvernetzung.

Der o.a. erwähnte Gewässerrandstreifen von 10 m Breite ist eine minimale Anforderung, für die Verbesserung der Gewässerqualität. Ein gesundes, und damit auch gegen klimatische Veränderungen deutlich resilienteres Gewässer, zeichnet sich, je nach Gewässerzone, durch mehr oder weniger große Dynamik in Form von Laufverlagerungen aus, wofür ein entsprechend größerer Raumbedarf in Form einer breiten Au Landschaft erforderlich ist. Ein

naturnahes Gesamtsystem bestehend aus Gewässer, Ufer und Aue ist durch stetige Änderung von Form und Lage als auch der Vegetation gekennzeichnet.

### **Zeithorizont und Dringlichkeit von Anpassungsmaßnahmen**

Insgesamt ist die Bewertung, mit welchen ökologischen Veränderungen durch den Klimawandel in welchem Umfang zu rechnen ist, noch mit großen Unsicherheiten behaftet, da einerseits nur wenige Zusammenhänge tatsächlich belegt und quantifiziert werden können, sich Literaturzitate zum Teil widersprechen oder bestimmte Aspekte, wie z. B. Nahrungsnetze bisher nicht beachtet werden und andererseits ökologische Informationen zur konkreten Prognose bei den Lebensgemeinschaften nicht verfügbar sind (Senckenberg 2010). Daher ist es insbesondere wichtig, klimawandelbedingte Veränderungen über ein entsprechendes Monitoring frühzeitig zu erkennen.

Zur Erreichung des guten ökologischen Zustandes, ist es vordringlich erforderlich, Maßnahmen zur Förderung einer naturnahen Gewässerstruktur und zur Minimierung von diffusen Schad- und Feststoffeinträgen zu ergreifen. Hierbei ist zum einen die Förderung naturnaher Sukzession im Uferbereich zu nennen als auch die Herstellung und Erhaltung natürlicher Auebereiche.

Maßnahmen (wie z. B. Reaktivierung der Auen) aus den Bereichen Hoch- und Niedrigwassermanagement, die sich gleichzeitig positiv auf die Gewässerökologie auswirken, sollten zeitnah umgesetzt werden.

## **4.4 Siedlungsentwässerung**

Die im Folgenden beschriebenen Maßnahmen sind unabhängig vom Einfluss des Klimawandels sinnvoll zur Reduzierung des Überflutungsrisikos sowie zur Minderung schädlicher Auswirkungen auf die aufnehmenden Gewässer. Maßnahmen die bereits heute zum Stand der Technik gehören, wurden daher schon im Zusammenhang mit der Anpassungskapazität beschrieben.

### **Erhebung und Nutzung von Messdaten in der Entwässerungsplanung**

Um mögliche klimabedingte Veränderungen des Niederschlag-Abfluss-Geschehens zu analysieren, muss zunächst das Systemverhalten im Ist-Zustand bekannt sein. Die in der Praxis übliche Planung von Entwässerungssystemen allein auf der Basis vorhandener Planunterlagen und ergänzender Annahmen aus der Literatur führt oftmals zu Fehleinschätzungen. Deutlich wird dies z.B. beim Betrieb von Retentionsbodenfiltern zur weitergehenden Mischwasserbehandlung. Viele dieser Anlagen leiden unter Trockenstress, da das vorgeschaltete Regenbecken deutlich seltener überläuft als es sich aus den zugrunde liegenden Simulationsrechnungen ergibt.

Die bedeutendste Ursache für große Abweichungen zwischen Berechnung und realem Verhalten ist meist eine falsche Einschätzung der Abflusswirksamkeit angeschlossener Flächen. Diese wird innerhalb von Siedlungen oftmals überschätzt, während der Abfluss von Außengebieten bei Starkregen unterschätzt wird.

Um entsprechende Fehlinvestitionen zu vermeiden und umgekehrt Schwerpunkte der Gewässerbelastung zu identifizieren, empfiehlt das Umweltministerium Baden-Württemberg seinen nachgeordneten Behörden die messtechnische Überwachung wichtiger Regenüberlaufbecken wasserrechtlich zu fixieren [UM 2007a]. Insbesondere sollen Daten zu Überlaufdauer und –häufigkeit dauerhaft in hoher zeitlicher Auflösung erhoben und archiviert werden. Derartige Daten wären auch eine wichtige Grundlage für die Analyse potenziell kritischer Situationen im aufnehmenden Gewässer. Langfristig würden sie auch die Identifikation eventuell klimabedingter Veränderungen im Entlastungsverhalten ermöglichen.

Die Aussagekraft der Daten würde sich deutlich erhöhen, wenn parallel auch der Niederschlag in hoher zeitlicher Auflösung (5 min-Intervalle) gemessen würde. Im Rahmen einer Modellkalibrierung könnte somit die Übertragung von Niederschlag in Entlastungsverhalten nachgebildet werden.

Grundsätzlich empfiehlt es sich außerdem im Rahmen der generellen Entwässerungsplanung gezielt das Niederschlags-Abfluss-Verhalten bei Starkregen zu erfassen und für die Kalibrierung der hydrodynamischen Modelle zu nutzen. Dazu sind erfahrungsgemäß zeitlich begrenzte Messungen von etwa 6 bis 12 Monaten Dauer erforderlich.

### **Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Entwässerungsplanung**

Aufgrund der langen Nutzungsdauern und unbekannter zukünftiger Entwicklungen muss sich die Siedlungsentwässerung verstärkt mit der Frage der Unsicherheiten auseinandersetzen.

Mit dem Ziel robuste Lösungen zu finden, sollte die Planung in der Siedlungsentwässerung künftig nicht mehr nur auf einen Prognosezustand ausgelegt sein, sondern unterschiedliche konsistente Szenarien und Übergangszustände umfassen. Die Szenarien sollten unterschiedliche Entwicklungen klimatischer Bedingungen ebenso umfassen wie Entwicklungen der Wirtschaftsstruktur und der Bevölkerungszahlen.

Zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in kontinuierlichen Variablen empfiehlt sich außerdem die gezielte Analyse der Fortpflanzung von Unsicherheiten in den Modellen.

### **Umsetzung eines kommunalen Risikomanagements „Überflutungsschutz“**

Bei der generellen Entwässerungsplanung steht bislang noch die Leistungsfähigkeit des Kanalnetzes im Vordergrund. Die Kanalisation kann jedoch Überflutungssicherheit nur bis zu

einem bestimmten Niveau bieten. Zur Vorsorge gegenüber seltenen Starkregenereignissen ist eine Gefährdungsanalyse erforderlich, die die Topografie, die Siedlungs- und Freiraumstruktur sowie die Bebauungstypen berücksichtigt. Abhängig vom jeweils festgestellten Überflutungsrisiko wird die Analyse zunehmend detailliert. Aufbauend auf der Gefährdungsanalyse werden Vorsorgemaßnahmen entwickelt.

Ein Konzept für ein kommunales Risikomanagement wurde von Schmitt und Worreschk im Projekt KRisMa [2011] erarbeitet. Aus diesem Vorhaben ist die Broschüre „Starkregen – Was können Kommunen tun?“ hervorgegangen [IBH, WBW, 2013]. Die empfohlenen Maßnahmen umfassen u.a.:

- Flächenvorsorge: Freihaltung gefährdeter Bereiche und Bereitstellung von Grün- und Verkehrsflächen als Zwischenspeicher oder oberirdische Ableitungselemente,
- Abflussminderung innerhalb der Bebauung: dezentraler Rückhalt und Versickerung (siehe auch „naturverträgliche Regenwasserbewirtschaftung“),
- Minderung der Abflüsse von Außengebietsabflüssen: Abfanggräben für wild abfließendes Wasser und Wege als Flutrinnen, Abfluss mindernde Maßnahmen in der Land- und Forstwirtschaft,
- Lokaler Objektschutz („Bauvorsorge“): Maßnahmen, die einzelne Gebäude vor dem Eindringen oberflächiger Abflüsse schützen,
- Informations- und Verhaltensvorsorge: Die Starkniederschlagswarnungen des DWD helfen bereits heute betroffene Akteure in die Lage zu versetzen Überflutungsschutzmechanismen (z.B. Klappen, Schotten, spezielle Kellerfenster) rechtzeitig zu aktivieren. Dies sollte weiter unter der Bevölkerung bekannt gemacht werden sowie auf Instrumente hingewiesen werden, um voll automatisch Schutzmechanismen zu aktivieren (z.B. über Regensensor) sowie um auch in der Ferne über Starkniederschläge gewarnt zu werden (z.B. Wetter-App auf dem Smartphone), um Schutzmechanismen auch von der Ferne zu aktivieren (z.B. App auf dem Smartphone für den Betrieb der Schließmechanik über das Internet).

Die Umsetzung dieses Konzeptes setzt die Bereitschaft voraus, das Risikobewusstsein der Bürger zu stärken und die Notwendigkeit eigenverantwortlicher Vorsorge zu verdeutlichen. Außerdem erfordert es eine enge Zusammenarbeit der Fachplaner aus Siedlungsentwässerung, Verkehrswesen und Stadtplanung.

### **Etablierung integrierter Planungsprozesse für eine wassersensitive Stadtentwicklung**

Eine wassersensitive Stadtentwicklung (WSSE) geht über das zuvor beschriebene Anliegen des Überflutungsschutzes hinaus und umfasst alle Aspekte des Umgangs mit Niederschlagswasser und Oberflächengewässern in der Stadt. Dazu gehören z.B. die

naturverträgliche Regenwasserbewirtschaftung und Wasser als Gestaltungselement städtischer Freiraumplanung.

Die Gestaltungsmöglichkeiten der Siedlungsentwässerung sind sehr begrenzt, wenn sie im Rahmen fertiger städtebaulicher Planungen arbeiten muss. Die Umsetzung einer WSSE setzt voraus, dass die Entwässerungsplanung frühzeitig in stadtplanerische Konzepte integriert wird. Einen Anlass dafür kann beispielsweise ein im Rahmen der Gefährdungsanalyse festgestelltes Überflutungsrisiko sein. In der Praxis scheitert dieser Ansatz häufig an den Strukturen der kommunalen Verwaltung und an den Abläufen und Zuständigkeiten bei der Planung und Genehmigung.

Hier wäre eine Struktur erforderlich, die sich stärker an Projekten orientiert als an der Zugehörigkeit zu Abteilungen und Aufgabenbereichen.

### **Einsatz von Verbundsteuerungen**

Die Verbundsteuerung bietet eine Möglichkeit das Speichervolumen in Kanalnetzen ohne umfangreiche Baumaßnahmen effektiver auszunutzen. Dies ist insbesondere dann sinnvoll, wenn Messungen eine Ungleichverteilung der Entlastungsaktivität der verschiedenen Becken zeigen. Ein anderer Einsatzfall wäre die gezielte Reduzierung der Entlastungen an einem Becken zum Schutz eines empfindlichen Gewässerabschnittes. Die Verbundsteuerung kann auch genutzt werden, um durch gezielte Spülvorgänge Ablagerungen im Kanalnetz zu reduzieren.

Trotz der grundsätzlich positiven Erfahrungen herrscht bei vielen Behörden Unsicherheit über die Genehmigungsfähigkeit einer Kanalnetzsteuerung. Hier wäre die Erarbeitung innerbehördlicher Richtlinien für die Genehmigung hilfreich.

### **Schutz abwassertechnischer Anlagen gegen Hochwasser**

Mit zunehmender Intensität und Häufigkeit von Hochwasserereignissen steigt auch die Gefahr einer Überflutung von abwassertechnischen Anlagen. Insbesondere Entlastungsanlagen und Kläranlagen befinden sich häufig in unmittelbarer Gewässernähe und sind daher besonders gefährdet.

Die Anlagen sollten daher auf ein höheres Bemessungshochwasser ausgelegt werden. Die entsprechenden Wasserspiegellagen können den aktualisierten Hochwassergefahrenkarten entnommen werden.

## **Sonstige Maßnahmen**

Im Zusammenhang mit einer naturverträglichen Regenwasserbewirtschaftung wird häufig auf die Abfluss reduzierende Wirkung der Regenwassernutzung hingewiesen. Dieser Effekt ist jedoch im Zusammenhang mit Starkregenereignissen vernachlässigbar.

Diskutiert wird auch ein gezielter Einsatz von Wasserflächen zur Verbesserung des Stadtklimas im Rahmen der Regenwasserbewirtschaftung. Die Wirkung derartiger Maßnahmen, insbesondere im Vergleich zu anderen städtebaulichen Optionen, ist jedoch noch nicht nachgewiesen.

Als negativer Effekt offener Wasserflächen wird gelegentlich ein Gesundheitsrisiko durch Stechmücken diskutiert. Dieses Risiko könnte sich durch steigende Temperaturen verstärken. Bei Versickerungsmulden, die nach den derzeit gültigen Richtlinien bemessen werden, besteht dieses Risiko nicht, da die maximale Einstaudauer auf 2 Tage begrenzt ist. Bei dauerhaft stehenden Wasserflächen kann diese Gefahr durch entsprechende Gestaltung der Uferzonen und die Wahl der Bepflanzung reduziert werden. Erfahrungswerte für das Risiko von Moskitoansiedlungen in derartigen Wasserflächen in Mitteleuropa liegen jedoch nicht vor.

## **4.5 Grundwasser**

Für den Bereich Grundwasser ist das wichtigste Anpassungsziel an den Klimawandel die Sicherstellung der Wasserversorgung unter den sich abzeichnenden Klimaveränderungen. Da der überwiegenden Teil des Trinkwassers in Baden-Württemberg aus Grundwasser gewonnen wird muss darauf geachtet werden, dass die Anlagen zur Wasserversorgung und zur Trinkwasserverteilung (Wasserversorgungstechnik und Behälterkapazitäten) so geplant bzw. ausgebaut werden, dass die Wasserversorgung unter den zu erwartenden Zunahmen von Trockenperioden gewährleistet ist. Quervernetzungen des Grundwassers bestehen insbesondere zu Schwerpunktbereichen Hoch- und Niedrigwassermanagement sowie Gewässerökologie (z.B. Maßnahmen zum Wasserrückhalt in der Fläche, grüne Infrastruktur, Grundwasserneubildung), Siedlungsentwässerung (z.B. Vernässung) und (z.B. Wasserdargebotsmanagement).

Folgende Anpassungsmaßnahmen werden vorgeschlagen:

### **Erhalt und Ausbau des Grundwassermessnetzes**

Wegen der derzeitigen Unsicherheiten bei den Klimaprognosen sollte das bisherige Grundwassermessnetz erhalten werden und ggf. weiter ausgebaut werden um Änderungen bei der Grundwassermenge, -temperatur und -beschaffenheit und mögliche Engpässe frühzeitig erkennen zu können. Obwohl Baden-Württemberg über ein vergleichsweise

dichtes Grundwassermessnetz verfügt (v.a. im Oberrheingraben), gibt es noch Regionen mit einer geringen Messstellendichte wie bspw. weite Teile des Schwarzwalds und der Schwäbischen Alb. Ferner gibt es bislang nur etwa 200 Trendmessstellen mit wöchentlichen Wasserstandsmessungen. Um Veränderungen im Grundwasserbereich rechtzeitig erkennen zu können wäre es sinnvoll, dieses Messnetz weiter auszubauen um feststellen zu können, wo künftig Engpässe bzw. Nutzungskonflikte auftreten könnten. So könnte an bestehenden Brunnen zur Überwachung der GW-Güte der Wasserstand mitgemessen werden. Generell wäre bei allen Grundwasserstandsmessungen ein einheitliches Messintervall von 1 Monat (besser noch kürzer) anzustreben, um so bspw. Veränderungen durch die zu erwartende interannuelle Variabilität der klimatischen Wasserbilanz (und indirekt auch der GW-Neubildung) zu erkennen. Diese Informationen sind u.a. für die Unternehmen der öffentlichen Wasserversorgung relevant, die sich somit frühzeitig auf sich abzeichnenden Veränderungen einstellen können.

Bevor konkrete Vorschläge zur Monitoringstrategie (zeitliche Auflösung der Messungen, erfasste Parameter usw.) sowie zum Ausbau des Messnetzes abgeleitet werden können bedarf es zuerst einer detaillierten Untersuchung des bestehenden Systems.

### **Optimierung der Bewässerung**

Die Zunahme der Trockenperioden geht mit einem erhöhten Wasserbedarf in der Landwirtschaft einher. Dadurch sind auch Nutzungskonflikte mit der Trinkwasserversorgung möglich. Um begrenzte Wasservorräte optimal zu nutzen und eine gezielte und bedarfsgerechte Bewässerung zu ermöglichen, sind Aussagen der Landwirtschaft zum Bedarf von Wasser zur Bewässerung sowie Bewässerungskonzepte erforderlich. Weiter sollten bessere Bewässerungstechnologien verwendet werden.

### **Dezentraler Oberflächenwasserrückhalt zur Grundwasseranreicherung**

Die Grundwasserneubildung erfolgt größtenteils über die Versickerung von Regenwasser. Durch die Vermeidung von Bodenversiegelung und Sicherstellung von flächenhafter Infiltration von Regenwasser kann lokal gezielt eine Grundwasseranreicherung erfolgen. Zusammenhänge mit dem Klimawandel sollten in zukünftigen Konzepten zur Regenwasserbewirtschaftung berücksichtigt werden.

### **Urbane Grundwasserbewirtschaftung**

- Entwicklung eines kommunalen GW-Managements z.B. Anpassung/Ergänzung der Bauleitplanung durch Ausweisung von Gebieten mit dem Risiko der Vernässung
- Versickerung von Regenwasser zur Grundwasseranreicherung
- Anpassungsstrategien zur nachhaltigen Siedlungsentwässerung

## 4.6 Trinkwasser

Für das Schwerpunktthema Trinkwasser leiten sich anhand der Ausführungen in Abschnitt 3.6 folgende Anpassungsziele ab:

- Schaffung einer vollständigen und belastbaren, zentral abrufbaren Datenbasis als Planungs- und Bewertungsgrundlage.
- Erhöhung der Anpassungskapazität einzelner WVU sowie des Wasserdargebots.
- Schaffung einer Bewertungsgrundlage für die Vulnerabilitätsanalyse der öffentlichen Trinkwasserversorgung.

Das Ziel der Schaffung einer vollständigen und belastbaren, zentral abrufbaren Datenbasis als Planungs- und Bewertungsgrundlage ist grundlegend für alle weitergehenden Analysen, Modellierungen und die Entwicklung übergeordneter Managementmaßnahmen. Es muss daher angestrebt werden, dass alle WVU in einem möglichst kurzen Zeitraum entweder die erforderlichen Daten selbst nach vorgegebenen einheitlichen Standards dezentral auswerten und die Ergebnisse zentral erfasst und bewertet werden oder dass die erforderlichen Daten zunächst von allen WVU und sonstigen Akteuren zentral erfasst und zentral ausgewertet und bewertet werden. Neben der Kosten- und Zeiteffizienz ist hier als wesentliches Kriterium auch die zu erwartende Datenqualität relevant.

Erfahrungen im Rahmen des KlimaMORO-Vorhabens zeigen, dass eine freiwillige und zeitnahe Mitarbeit aller WVU nicht grundsätzlich erwartet werden kann. Es ist vielmehr insbesondere bei kleineren Gemeinde-WVU ein hoher Aufwand bei der Informations- und Überzeugungsarbeit und der Unterstützung bei der richtigen Bearbeitung von Fragebögen und Bewertungsschemas zu leisten, um belastbare und verwertbare Daten zu erhalten. Insofern erscheint es notwendig, die erforderliche vollständige Teilnahme aller WVU durch die Schaffung von Anreizen –z.B. im Rahmen der FrWw- und den Einsatz eines zentralen, von allen Akteuren der Wasserversorgung als kompetent angesehenen Expertenteams zu unterstützen.

Andererseits liegt bereits ein relativ großer Teil der erforderlichen Daten zentral in GIS-Datenbanken vor. Es ist daher naheliegend, auf der Basis bestehender zentraler Datenbanken die noch dezentral bei den einzelnen WVU vorliegenden Daten durch ein zentrales, von allen Akteuren der Wasserversorgung als kompetent angesehenes Expertenteam abzufragen, zentral zu ergänzen und ggf. Datenabgleiche, Aktualisierungen und Fortschreibungen durchführen zu lassen. Zu erwarten sind hier höhere personelle und zeitliche Effizienz sowie höhere Datenqualität. Aus wissenschaftlicher Sicht ist daher dieser Variante der Vorzug zu geben.

Aus diesen Zielen leiten sich die folgenden Anpassungsmaßnahmen für das Wasserdargebot, die Infrastruktur und die Wasserabgabe ab:

**Schaffung einer detaillierten und belastbaren Datenbasis als Planungs- und Bewertungsgrundlage: Zentrale Erfassung, Dokumentation und Bewertung des Standes von Infrastruktur und Organisation aller einzelnen Wasserversorgungsunternehmen (WVU)**

Die für fundierte flächendeckende Vulnerabilitätsanalysen und weiterführende Modellierungen und die Entwicklung von übergeordneten Managementmaßnahmen erforderliche Datengrundlage ist in der erforderlichen Genauigkeit und Aktualität noch bei verschiedenen Akteuren verteilt und muss zunächst zentral zusammengeführt, überprüft und ggf. ergänzt werden. So ist zwar die vorhandene technische Infrastruktur mit vielen Details zentral erfasst. Entscheidende Informationen zu Wasserfassungen, Aufbereitungs- und Speicherkapazitäten, Ausbaugrad der Verteilnetze, vorhandenen Verbundstellen, aktuellen und tatsächlich genutzten Wasserentnahmerechten, aktuellen und genutzten Fernwasserbezugsrechten etc. sowie der aktuelle reale praktizierte Verbund liegen jedoch oft nur bei den einzelnen WVU vor. Damit fehlen unverzichtbare und entscheidende Planungsgrundlagen. Konkret müssen für jedes WVU erfasst, geprüft und bewertet werden:

a) zum verfügbaren Wasserdargebot des WVU:

- Art, Anzahl und Ergiebigkeit der jeweils verfügbaren und erschlossenen Ressourcen in [L/s] (unterschiedliche Grundwasserhorizonte sind ggf. als getrennte Ressource zu betrachten),
- Entnahmerechte aus eigenen ortsnahen Ressourcen bzw. Bezugsrechte aus Gruppen- oder Fernwasserressourcen in [L/s]
- Verhältnis der Bezugsrechte zu den tatsächlichen Kapazitäten bzw. Ergiebigkeiten der Gruppen- oder Fernwasserressourcen

b) zur vorhandenen technischen Infrastruktur des WVU:

- Ausbaugrad von Fassungen, Aufbereitung, Transport in [L/s] sowie in Relation zum Tagesspitzenverbrauch  $Q_{dmax}$  in [%] sowie Speicherung in Relation zum Tagesspitzenverbrauch  $Q_{dmax}$  in [%]
- Anzahl der Versorgungs- bzw. Druckzonen mit Zuordnung zu den einzelnen Ressourcen
- Ausbaugrad der Verteilung in Relation zum Stundenspitzenverbrauch  $Q_{hmax}$  in [%]
- Technische Details bezüglich der Transport- und Speicherbauwerke zur Herstellung eines Verbundes mit Gruppen- oder Fernwasserversorgungen für jede einzelne

Versorgungs- bzw. Druckzone (Schemaplan zur hydraulischen Verschaltung des WVU intern und im Verbund)

c) zur tatsächlichen Wasserabgabe, Eigenverbrauch und Wasserverlusten des WVU in den letzten 10 Jahren:

- Spitzenwasserabgabe  $Q_{dmax}$  und durchschnittliche Tagesabgabe  $Q_{dm}$  in  $[m^3/d]$  und Spitzenstundenabgabe  $Q_{hmax}$  in  $[m^3/h]$  pro Versorgungs- bzw. Druckzone
- Eigenverbrauch und Wasserverluste in [%] der Jahresabgabe  $Q_a$

Als Handlungsempfehlung für die Anpassung an Folgen des Klimawandels (auch notwendig zur Anpassung an demografischen Wandel) wird daher die Schaffung einer zentralen GIS-basierten Datenbank durch Erhebung, Zusammenführung, Fortschreibung, Ergänzung und Bewertung der bisher bei verschiedenen Einrichtungen und den WVU vorhandenen Daten gegeben. Die Bewertung der angegebenen Daten sollte durch Bildung von Klassen erfolgen.

Als Basis dieser zentralen GIS-Datenbank wird die bereits landesweit vorhandene zentrale GIS-Datenbank mit den Infrastrukturinformationen der WVU –der sogenannte blaue Atlas- vorgeschlagen. Es erscheint zielführend, die hier vorhandenen Daten um die in a) bis c) zusätzlich genannten Kenngrößen zu ergänzen. Da der zeitliche und finanzielle Aufwand für die Erhebung und Bewertung aufgrund der Erfahrungen bei ähnlich gelagerten lokalen und regionalen Vorgängervorhaben wie etwa dem KlimaMORO-Vorhaben des Verbandes Region Stuttgart [Mahler 2012] sehr hoch ist, wird vorgeschlagen, diese Ergänzung zunächst in einem ersten Schritt im Rahmen eines Modellprojekts regional durchzuführen und zu überprüfen. Hierfür würde sich die beim Verband Region Stuttgart bereits in Ansätzen vorhandene Datenbank anbieten. Die so durch Zusammenführung entstandene -zunächst noch regionale- „Gesamtdatenbank“ wäre dann auf ihre Übertragbarkeit auf Baden-Württemberg zu prüfen. Dann wäre eine ggf. modifizierte und erweiterte Version für den Regierungsbezirk Stuttgart als Modellregion zu erstellen.

### **Einzelfallbetrachtung: Vulnerabilitätsanalyse für jedes einzelne WVU**

Ausgehend von der zentralen, detaillierten und aktuellen Datenbasis sollte im zweiten Schritt flächendeckend für jedes einzelne WVU eine Vulnerabilitätsanalyse durchgeführt werden.

Bei WVU mit GW-Nutzung sollte dies auf der Basis von nicht weit zurückliegenden Extremjahren hinsichtlich Wasserdargebot (bei Grundwasserneubildung 1998) und Wasserabgabe (Sommer 2003) und bei den WVU, die den Bodensee oder die Talsperre Kleine Kinzig nutzen, auf der Basis von Langzeitsimulationen erfolgen. Im Fall des Bodensees kann/soll dies ggf. noch im laufenden KLIMBO-Vorhaben erfolgen. Aufgrund der Vielzahl der WVU in Baden-Württemberg empfiehlt sich eine Priorisierung bei der Durchführung der Vulnerabilitätsanalysen: Vorrangig sind solche WVU zu betrachten, die

beim Wasserdargebot nur auf eine Rohwasserressource oder ein Fernversorgungsunternehmen angewiesen sind und bei denen die Bewertung ergibt, dass das WVU die Ergiebigkeit bzw. Kapazität dieser Ressource bzw. das Bezugsrecht zu über 80 % ausschöpft.

### **Förderung der Zusammenfassung von Gemeinde-WVU zu Verbänden (ggf. mit Fernwasserverbund)**

Die Förderung von Investitionsmaßnahmen zur qualitativen Verbesserung der öffentlichen Wasserversorgung und Maßnahmen zu Strukturverbesserung –sprich: Kooperationen und Fusionen- durch strukturelle und interkommunale Zusammenarbeit nach FrWw 2009 sollte unter dem Gesichtspunkt der Erhöhung der Anpassungskapazität gegenüber denkbaren Klimafolgen unbedingt beibehalten werden. Konkret sollten technisch-organisatorische Verbände und Ausbaumaßnahmen verstärkt gefördert werden, die eine signifikante Erhöhung der Anpassungskapazität erwarten lassen. Insofern sind ggf. die Fördergrundsätze hinsichtlich einer Priorisierung des Aspekts Anpassungskapazität anzupassen.

### **Programm zur Minimierung von Rohrnetzverlusten und Eigenverbrauch der WVU**

Das Potenzial zur Verringerung der Wasserabgabe durch Minimierung von Rohrnetzverlusten und Eigenverbrauch der WVU ist lokal signifikant hoch. Ein besonders hohes Potenzial wird lokal im Bereich der Netzverluste erwartet. Die Statistik gibt als mittleren Wert für Baden-Württemberg im Jahr 2010 hierfür einen Wert von 13,23 % der entnommenen und aufbereiteten Wassermenge an. Eine eigene stichprobenartige Auswertung von 30 WVU von A wie Aalen bis Z wie Zwingenberg ergab für den Anteil der Verluste und des Eigenverbrauchs Werte zwischen 7,14 und 42,84 %, wobei mehrfach Werte von über 30 % auch bei WVU größerer Städte auftraten [Statistisches Landesamt, 2010]. Neben der Tatsache, dass dies schlicht eine Ressourcenverschwendung auf mehreren Ebenen ist (Trinkwasser; Energie zur Fassung, Aufbereitung und zum Transport; Chemikalien zur Aufbereitung) kann durch Verringerung der Abgabe eine Erhöhung der Anpassungskapazität erreicht werden.

### **Regionales oder landesweites Wasserdargebotsmanagement für Baden-Württemberg, ausgehend vom Vorrang der öffentlichen Wasserversorgung**

Regional und lokal können andere Sektoren neben der Wasserversorgung einen signifikanten Nutzungsdruck auf das Wasserdargebot ausüben. Zu erwarten ist dies insbesondere in Regionen mit hohem und zukünftig weiter steigendem Wasserbedarf für die landwirtschaftliche und gartenbauliche Bewässerung sowie Regionen mit hohem Wasserbedarf der Industrie sowie des Energieerzeugungssektors. Hier sind z.B. regionale landwirtschaftliche Bewässerungspläne und der regionale Abgleich aller Wassernutzungen

mit der öffentlichen Trinkwasserversorgung erforderlich. Grundsätzlich sollten alle relevanten wassernutzenden Sektoren einer Region einbezogen werden, z.B. auch relevante Industriebetriebe mit Eigenversorgung.

Beim Grundwassermanagement im Hessischen Ried auf der Basis des Grundwasserbewirtschaftungsplans Hessisches Ried wurden positive Erfahrungen hinsichtlich der Erhöhung der Anpassungskapazität der Wasserwirtschaft an den Klimawandel gewonnen. Hier koordiniert ein regionales WVU im Regierungsbezirk Darmstadt sämtliche Grundwasserentnahmen und Grundwasseranreicherungsmaßnahmen auf einer Fläche von ca. 2000 km<sup>2</sup> und steuert durch gezielten Einsatz eigener Wasserfassungen und Infiltrationsanlagen die Grundwasserstände so, dass eine gezielte Grundwasserbewirtschaftung erreicht wird [Mikat und Manger 2010] [Gerdes et al 2010]. Die Entwicklung analoger regionaler Wasserdargebotsmanagementsysteme in Baden-Württemberg erscheint zielführend zur signifikanten Erhöhung der Anpassungskapazität der Wasserwirtschaft an den Klimawandel.

## **4.7 Bodensee**

Der generell gute Zustand des Bodensees muss auch unter geändertem Klima erhalten bleiben. In der Vergangenheit durchgeführte Maßnahmen zum Schutz des Bodensees und dabei insbesondere Maßnahmen zur Reduktion von Stoffeinträgen müssen weitergeführt werden.

### **4.7.1 Zirkulationsverhalten**

Zum Stand der Anpassungsmaßnahmen ist festzuhalten, dass der Gewässerschutz kein neues Thema für den Bodensee ist. Der Phosphoreintrag wurde bereits durch eine Reihe von Maßnahmen gesenkt. Spurenstoffe sind Gegenstand aktueller Forschung (Interreg IV Projekt „Klimawandel am Bodensee“, KLIMBO, BMBF Programm RiSKWa „Schussen Aktiv Plus“, IGKB Untersuchungen zu Mikroverunreinigungen). Monitoring des Tiefenwassers wird vom Institut für Seenforschung bereits durchgeführt. „Differential cooling“ ist Gegenstand im KLIMBO-Projekt und aktueller DFG-finanzierter Forschung (Effects of climate warming and increased meteorological variability on large monomictic lakes – a simulation approach using ecological lake models).

Zur Nutzung des Bodensees als Trinkwasserspeicher als auch gewässerökologisch ist es notwendig, dass in regelmäßigen Abständen eine Vollzirkulation stattfindet. Diese kann allerdings nicht mit künstlichen Mitteln herbeigeführt werden. Wie in Abschnitt 1.3.2 und Abbildung 4 ausgeführt ist, haben die erfolgreichen Bemühungen zur Reduktion von Nährstoffeinträgen dazu geführt, dass das Ausbleiben von Sauerstoffzufuhr nicht sofort zu

kritischen Situationen führt. Dieser trophisch günstige Zustand bleibt also der wirksamste Schutz vor nachteiligen klimatischen Änderungen.

Vor dem Hintergrund der zu berücksichtigenden klimatischen Veränderungen, den Anpassungszielen und den Zusammenhängen im System Bodensee sind daher folgende Anpassungsmaßnahmen zu nennen:

- Konsequente Weiterführung von bisherigen Anstrengungen zum Gewässerschutz.
- Monitoring, um auf Veränderungen reagieren zu können.
- Forschung und Entwicklung, um Prozesse besser zu verstehen und deren Auswirkungen zu prognostizieren.

### **Nährstoffeintrag gering halten**

Der Nährstoffeintrag sollte im Hinblick auf die Sauerstoffkonzentration im Tiefenwasser weiter gering bleiben. Dies wird bei in Zukunft eventuell seltener werdenden Durchmischungsereignissen noch wichtiger als in der Vergangenheit. Auch Spurenstoffe waschen unter Umständen langsamer aus und bleiben länger in tieferen Schichten. Bestehende Maßnahmen zur Reduktion des Eintrags sollten verstärkt werden.

### **Monitoring**

Aufgrund der komplexen Zusammenhänge und unsicheren Klimaprojektionen ist eine klare Prognose der Klimafolgen im See nicht möglich. Maßnahmen, die eine Reaktion auf konkrete zukünftige Entwicklungen darstellen, sind daher nicht formulierbar. Stattdessen muss der Zustand des Bodensees kontinuierlich überwacht werden, um auf wichtige Änderungen reagieren zu können. Zur Überwachung des Zirkulationsverhaltens sind neben den laufenden Messungen des entnommenen Trinkwassers mindestens regelmäßige Profilmessungen von Temperatur und Sauerstoff notwendig. Diese werden schon durchgeführt. Der Übergang von Monitoring zu Forschung ist hier fließend. Findet eine Vollzirkulation seltener statt, werden andere Prozesse, die zu einer Erneuerung des Tiefenwassers führen, wichtiger. Relevant ist hier das „differential cooling“, das im Herbst bis frühen Winter bei windstillen Wetterlagen zu einem Transport von kaltem Wasser aus Ufergebieten in tiefere Schichten führen kann. Dieses Phänomen ist nur möglicherweise relevant, weil sein Ausmaß - vor allem unter veränderten klimatischen Verhältnissen - unklar ist. Ort dieser Strömungen und genaue meteorologische Rahmenbedingungen sind noch nicht bekannt. Notwendig sind also mindestens regelmäßige explorative, schiffsgestützte Messkampagnen, um bei dafür günstigen Wetterbedingungen kalte Dichteströme ausfindig zu machen und deren Ausmaß einzuschätzen. Zusätzlich sollten Temperaturlogger an strategischen Positionen am randständigen Gewässerboden ausgebracht werden.

### **Kontinuierliche Analyse mit Hilfe eines operativen Modellsystems**

Die Interpretation der Messungen ist nicht trivial. Neben der Datenerhebung müssen Ressourcen zur Verfügung stehen, um Erkenntnisse aus den Daten zu erlangen. Es muss möglich sein, aus den immer wieder aktualisierten Datenbeständen routiniert die Dringlichkeit eines Eingreifens abzuleiten. Dafür wird eine Integration der Daten in ein operatives, modellgestütztes System wie BodenseeOnline vorgeschlagen. Diese Maßnahme ist als eine Verbindung von Monitoring und Forschung zu sehen.

#### **4.7.2 Niedrigwasser/Flachwasserzone**

Maßnahmen zum Schutz und zur Wiederherstellung von Ufer- und Flachwasserzone werden bereits seitens der IGKB durchgeführt [IGKB 2004, 2009]. Sie beziehen sich jedoch nicht explizit auf den Klimawandel.

In Zukunft könnte es zu häufigeren Auftreten von saisonalem Niedrigwasser und saisonalen Schwankungen des Wasserspiegels kommen. Dies birgt Gefahren für die Flachwasserzone. Da die Ökosysteme der Flachwasserzone auf Schwankungen reagieren können, sollten diesbezügliche Eingriffe minimiert werden.

Da die Unsicherheiten groß sind, werden keine baulichen Maßnahmen empfohlen, die ihrerseits große Kosten und starke negative Effekte hätten, wie etwa eine Wasserstandregulierung [Galonska et al. 2005].

Negative Auswirkungen auf die Schifffahrt ließen sich bei vermehrtem Auftreten von Niedrigwasser durch ein Eintiefen der Hafenbecken und Schifffahrtsrinnen vermindern. Diese Maßnahme wäre weniger eingriffsintensiv als weiter in den See „hineinwachsende“ Hafenanlagen, muss aber gegen damit einhergehenden negativen Auswirkungen durch Erosionsprozesse abgewogen werden.

### **4.8 Gewichtung und Priorisierung der Anpassungsziele und –maßnahmen**

Um die in den Abschnitten 4.1 bis 4.7 beschriebenen Anpassungsziele und –maßnahmen priorisieren zu können, müssen sowohl die Einzelmaßnahmen als auch ihre Wechselwirkungen und Gemeinsamkeiten mit anderen Bereichen sowie weitere regionale und globale Einflüsse betrachtet werden. Dazu enthält Tabelle 17 eine zusammenfassende Aufstellung der für den Wasserhaushalt beschriebenen Maßnahmen und vergleicht diese anhand ihrer Effektivität sowie nach dem erforderlichen zeitlichen oder technischen Aufwand. Des Weiteren wird angegeben, ob es sich um No-regret-Maßnahmen handelt, die auch unabhängig vom Klimawandel ökologisch und ökonomisch sinnvoll und daher besonders zu

berücksichtigen sind. Anhand dieser Kriterien erfolgt eine Abschätzung zur Priorität der verschiedenen Maßnahmen, die allerdings aufgrund der in unterschiedlichem Maße vorhandenen Unsicherheiten nur in einer bestimmten Bandbreite bzw. mit einer gewissen Subjektivität erfolgen kann. Alle Maßnahmen werden als No-regret Maßnahmen eingestuft.

*Tabelle 17: Priorisierung der vorgeschlagenen Maßnahmen nach Effektivität, Aufwand und Zuordnung als No-regret-Maßnahme*

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

	Maßnahme	Effektivität	Aufwand	No regret	Priorität
<b>Gewässerökologie</b>					
21	Gewässermorphologisches Monitoring	hoch	hoch	ja	hoch
22	Erhaltung/Wiederherstellung naturnaher Gewässerstrukturen	hoch	mittel/hoch	ja	hoch
23	Förderung naturnaher Sukzession auf Gewässerrandstreifen	hoch	niedrig	ja	hoch
<b>Siedlungsentwässerung</b>					
24	Erhebung und Nutzung von Messdaten in der Entwässerungsplanung	mittel	niedrig	ja	hoch
25	Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Entwässerungsplanung	mittel	niedrig	ja	mittel
26	Umsetzung eines kommunalen Risikomanagements „Überflutungsschutz“	hoch	mittel	ja	hoch
27	Etablierung integrierter Planungsprozesse für eine wassersensitive Stadtentwicklung	hoch	mittel	ja	mittel
28	Einsatz von Verbundsteuerungen im Mischsystem	hoch	mittel	ja	mittel
29	Schutz abwassertechnischer Anlagen gegen Hochwasser	hoch	mittel	ja	hoch
<b>Grundwasser</b>					
30	Erhalt und Ausbau des Grundwassermessnetzes und Intensivierung des Monitorings (z.B. GW-Temperatur)	hoch	mittel	ja	mittel
31	Optimierung der landwirtschaftlichen Bewässerung	hoch	gering	ja	hoch
32	Dezentraler Oberflächenwasserrückhalt zur Grundwasseranreicherung (Verbesserung Grundwasserneubildung), Ertüchtigung von Grabensystemen in vernässungsgefährdeten Siedlungsbereichen, Erstellung und Erweiterung von Prognosemodellen	mittel	hoch	ja	mittel
<b>Trinkwasser</b>					
33	Erfassung, Dokumentation und Bewertung des Standes von Infrastruktur und Organisation aller einzelnen Wasserversorgungsunternehmen (WVU)	hoch	hoch	ja	hoch
34	Einzelfallbetrachtung: Vulnerabilitätsanalyse für jedes einzelne WVU	hoch	hoch	ja	hoch
35	Zusammenfassung von Gemeinde-WVU zu Verbänden (ggf. mit Fernwasserverbund)	hoch	mittel	ja	hoch
36	Programm zur Minimierung von Rohrnetzverlusten und Eigenverbrauch der WVU	hoch	mittel	ja	hoch
37	Regionales oder globales Wasserdarstellungsmanagement für Baden-Württemberg, ausgehend vom Vorrang der öffentlichen Wasserversorgung	hoch	hoch	ja	mittel - hoch

	Maßnahme	Effektivität	Aufwand	No regret	Priorität
<b>Bodensee</b>					
38	Nährstoffeintrag gering halten	hoch	mittel	ja	hoch
39	Gewässermonitoring	hoch	gering	ja	hoch
40	Messung und Forschung zu vertikalen Austauschprozessen	mittel	gering	ja	gering
41	Interpretation und Nutzung von Monitoring- und Meteorologiedaten in Modellsystemen	hoch	gering	ja	mittel

Insgesamt werden 30 der 41 in Tabelle 17 beschriebenen Maßnahmen mit einer hohen Priorität bewertet. Dabei werden für alle Bereiche des Wasserhaushaltes Maßnahmen zur Datenerfassung und zum Monitoring mit besonders großer Bedeutung und Priorität genannt. Dabei ist besonders hervorzuheben, dass die über das Instrument Monitoring erfassten Daten neben ihrer Funktion zur Gewässerüberwachung eine wesentliche Grundvoraussetzung für das Verständnis von Systemen, für wissenschaftliche Untersuchungen sowie für die Optimierung und Weiterentwicklung bestehender Systeme darstellen. Die Maßnahmen Nr. 8 und 9 betreffen einmal aus der Sicht des Hochwasserschutzes die Förderung eines natürlichen Hochwasserrückhalts in der Fläche und einmal aus der Sicht des Niedrigwassermanagements die Förderung des natürlichen Wasserrückhalts. Beide Maßnahmen werden mit einer hohen Priorität bewertet und zeigen – wie auch die Maßnahmen 10 und 22- beispielhaft Überschneidungen zwischen verschiedenen Bereichen auf, die entsprechend aufeinander abgestimmt werden sollten. Zudem wird dem Bereich des Umweltmanagements und der Öffentlichkeitsarbeit eine hohe Priorität eingeräumt.

Zusammenfassend kann damit festgestellt werden, dass durch die beschriebene integrale Hochwasserschutzstrategie des Landes Baden-Württemberg und die bereits durchgeführten Maßnahmenprogramme zur Herstellung des guten Zustandes der Gewässer bereits eine gute Basis geschaffen wurde, auf welche eine Anpassungsstrategie aufsetzen kann. Dazu sind folgende Maßnahmen (M) zu nennen:

- Landesweite Erstellung von Hochwasser-Gefahrenkarten (M1),
- Freihalten überflutungsgefährdeter Bereiche (M5),
- Betrieb von Warn- und Alarmdiensten (M6),
- Erstellung und Fortschreibung von Hochwasserrisikomanagementplänen (M7),
- Die Erhaltung/Wiederherstellung naturnaher Gewässerstrukturen (M22, M23).

Als neue Maßnahmen im Hinblick auf die Anpassungsstrategie an die Folgen des Klimawandels werden vorgeschlagen:

- Anpassung des Messnetzes und der Pegel auf Niedrigwasser (M12),

- Vulnerabilitätsanalyse für jedes einzelne Wasserversorgungsunternehmen (M34).

Darüber hinaus sind insbesondere folgende Maßnahmen im Handlungsfeld Wasserhaushalt weiter zu führen bzw. gegebenenfalls zu modifizieren:

- Ertüchtigung des Monitorings zur Erfassung klimabedingter qualitativer und quantitativer Änderungen der Fließgewässer und des Bodensees (M4, M14, M20, M21, M39),
- Förderung des natürlichen Wasserrückhaltes in der Fläche (M8, M9, M11),
- Förderung einer naturnahen Sukzession im Uferbereich und im Gewässerumfeld (M22),
- Schutz abwassertechnischer Anlagen gegen Hochwasser (M29),
- Umsetzung eines kommunalen Risikomanagements „Überflutungsschutz“ in der Siedlungsentwässerung (M26),
- Erfassung, Dokumentation und Bewertung des Standes von Infrastruktur und Organisation der einzelnen Wasserversorgungsunternehmen (M33),
- Minimierung von Rohrnetzverlusten und Eigenverbrauch der Wasserversorgungsunternehmen (M36),
- Einbeziehen der Betroffenen bei der Festlegung von Anpassungsmaßnahmen und Öffentlichkeitsarbeit (M3, M17),
- Wirtschaftlicher Einsatz des technischen Hochwasserschutzes unter Berücksichtigung des Lastfalls Klimaänderung (M2),
- Erweiterung der Temperatur- und Niedrigwasservorhersage auf kleinere Einzugsgebiete (M15, M16),
- Zusammenfassung von Wasserversorgungsunternehmen auf Gemeindeebene zu Verbänden (M35).

Zur Abschätzung von Anpassungsstrategien und Anpassungsmaßnahmen kann somit festgestellt werden, dass in Baden-Württemberg für das Handlungsfeld Wasserhaushalt ein hohes Wissen über die Folgen des Klimawandels vorhanden ist. Nach heutigem Kenntnisstand ist das vorhandene Wissen hinsichtlich einzelner Klimafaktoren und dabei insbesondere der Temperatur und ihrer Veränderungen schon recht sicher, während beim Niederschlag und der daraus resultierenden Größe Abfluss oder bei einem Zusammenwirken mehrerer Klimafaktoren teilweise noch hohe Unsicherheiten bestehen. Wenn auch das Wissen um die Auswirkungen des Klimawandels noch nicht umfassend vorhanden ist, sollten aufgrund der erforderlichen Langfristigkeit in der Planung und Umsetzung vieler Maßnahmen bereits zum jetzigen Zeitpunkt Weichen gestellt werden. Dies geschieht z.B. durch den wirtschaftlichen Einsatz des technischen Hochwasserschutzes durch Berücksichtigung des Lastfalls Klimaänderung. Darüber hinaus sollte ein besonderer Schwerpunkt auf

weiterentwickelte Datenerhebungen und Monitoringinstrumente gelegt werden und damit in erster Linie dem Wissensgewinn dienen. Beispiele sind im Bereich des Niedrigwassers ein Ausbau des Pegelmessnetzes oder modellgestützte Systeme zur Interpretation von Messungen (Maßnahmen 12, 42). Auch dabei gilt es wieder, Wechselwirkungen beispielsweise zwischen Frühwarnsystemen im Hochwasserschutz und Maßnahmen im Hochwasserrisikomanagement gründlich abzustimmen und bereits umgesetzte technische sowie ökologische Maßnahmen und ihre Auswirkungen im Rahmen des Monitorings gründlich zu dokumentieren.

Des Weiteren sollten Maßnahmen priorisiert werden, die die Verbesserung und Anpassung von Planungs- und Bewertungsgrundlagen zum Inhalt haben, indem die durch den Klimawandel erhöhten Unsicherheiten in der Planung und Bemessung von Anlagen berücksichtigt werden (z.B. Maßnahmen 25 und 38). Dabei sollen im technischen Bereich robuste und flexible Anlagen priorisiert werden, mit denen es möglich ist, zeitnah und flexibel auf neue Entwicklungen und wissenschaftliche Erkenntnisse sowie politische und gesellschaftliche Entwicklungen reagieren zu können.

Erst wenn sich auf der Grundlage nur noch gering vorhandener Unsicherheiten ein Handlungsdruck für bauliche oder technische Maßnahmen ergibt, sollten solche Maßnahmen priorisiert werden.

### **Kernaussagen zu den Anpassungsmaßnahmen**

- *Die bestehenden Unsicherheiten der verwendeten Klima- und Wirkmodelle müssen in die Entwicklung von Anpassungsstrategien einfließen.*
- *Ein Hauptziel der vorgeschlagenen Maßnahmen ist die Minimierung dieser Unsicherheiten durch:*
  - *Wissensgewinn bzgl. der komplexen Zusammenhänge innerhalb des Handlungsfeldes Wasserhaushalt sowie bzgl. der Wechselwirkungen mit anderen Handlungsfeldern (Untersuchungs- und Forschungsprojekte zu relevanten Fragestellungen, siehe Fachgutachten Teil B),*
  - *Schaffung einer soliden Datenbasis durch Weiterentwicklung und sinnvollem Ausbau des bestehenden Monitorings und der Datenanalyse.*
- *Weitere Ziele sind:*
  - *der wirtschaftliche Einsatz des technischen Hochwasserschutzes durch Berücksichtigung des Lastfalls Klimaänderung*
  - *den derzeit in der Umsetzung befindlichen Maßnahmen zum Hochwasserschutz und zur Gewässerökologie vor dem Hintergrund des Klimawandels eine besondere Bedeutung zukommen zu lassen,*
  - *der Einsatz robuster und flexibler Maßnahmen, anhand derer es möglich ist, zeitnah und flexibel auf neue Entwicklungen und wissenschaftliche Erkenntnisse sowie politische und gesellschaftliche Entwicklungen reagieren zu können,*
  - *die Verbesserung und Anpassung von Planungsinstrumentarien und Regularien,*
  - *präventive Maßnahmen zur Verbesserung des Umweltmanagements sowie Intensivierung der Öffentlichkeitsarbeit zur Sensibilisierung potenziell Betroffener.*
- *Dabei sollten die Auswirkungen des Klimawandels immer im Zusammenhang mit weiteren anthropogenen Faktoren (z.B. demografische Veränderungen oder Landnutzungsänderungen) betrachtet werden.*

# Literatur

---

- ARL (2013): Klimaprojektionen; Akademie für Raumforschung und Landesplanung, Leibniz-Forum für Raumwissenschaften; [www.klima-und-raum.org/klimaprojektion](http://www.klima-und-raum.org/klimaprojektion) [geprüft am 11.06.2013]
- ATV (1997): 2. Arbeitsbericht der ATV-Arbeitsgruppe 2.1.1 "Beeinflussung der Gewässergüte durch Mischwassereinleitungen". Korrespondenz Abwasser 44, Nr.5, 922-927.
- ATV-DVWK (2003): Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 198 "Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen", Hennef.
- Bárdossy, A. (1998): Generating precipitation time series using simulated annealing. *Water Resources Research* 34(7): 1737-1744.
- Bárdossy, A., Giese, H., Haller, B., Ruf, J. (2000): Erzeugung synthetischer Niederschlagsreihen in hoher zeitlicher Auflösung für Baden-Württemberg. *Wasserwirtschaft* 90(11). 548-553.
- Bartels, H., Kolokotronis, V., Zimmermann, L. (2005): Klimaentwicklung und Hochwasserschutz. Klimastatusbericht 2005
- Baumgartner, A.; Reichel, E. (1974): Die Wasserbilanz von Europa im Rahmen der Weltwasserbilanz. *Dt. Gewässerkundliche Mitteilungen* 18, 29-24
- Beck, F. (2013): Generation of spatially correlated synthetic rainfall time series in high temporal resolution – a data driven approach, Dissertation, Institute for Modelling Hydraulic and Environmental Systems, University of Stuttgart, 2012
- Beck, F., Bárdossy A., (2010): Das Programmsystem NiedSim-Klima zur Berücksichtigung des Klimawandels bei der Erzeugung synthetischer Niederschlagszeitreihen von hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung, Forschungsprojekt im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Projektbericht
- Bendel, D., Beck, T., Beck F., Dittmer U. (2012): Auswirkungen des Klimawandels auf die Mischwasserbehandlung. In: Johannes Pinnekamp (Hg.): *Gewässerschutz - Wasser - Abwasser*, Bd. 230. 45. Essener Tagung für Wasser und Abfallwirtschaft "Wasserwirtschaft und Energiewende". Essen, 14.-16.03.2012. Institut für Siedlungswasserwirtschaft der Rhein.-Westf. Techn. Hochschule Aachen (230), S. 34/1 - 34/13.
- Bendel, D., Beck F., Dittmer U. (2013): Modeling climate change impacts on combined sewer overflow using synthetic precipitation time series, *Water Science and Technology*, 2013, IWA Publishing, [in press]
- Benndorf, J. (1986): Erhaltung und Wiederherstellung naturnaher Fließgewässer als Voraussetzung für ihre Mehrzwecknutzung. *Naturschutzarbeit in Sachsen* 28, 21-32
- BFG (2006): Niedrigwasserperiode 2003 in Deutschland: Ursachen - Wirkungen - Folgen. Mitteilung Nr. 27, Bundesanstalt für Gewässerkunde: 211 S.
- Bodengut, Institut für Bodenkunde und Standortslehre der Universität Hohenheim iBS (2013): Fachgutachten zum Handlungsfeld Boden in der Anpassungsstrategie an die Folgen des Klimawandels für Baden-Württemberg, Entwurf; in: *Materialien zur Erarbeitung der Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Klimaanpassung INTERN*. [www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/218566/](http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/218566/) [gepr.am 10.06.2013]
- Bohatsch, A. (2012): Strategien gegen Geruch und Korrosion im Kanal. In: Bayerische Kanal- und Kläranlagennachbarschaften, Jahrbuch 2011
- Boehrer, B., Schultze, M. (2008): Stratification of lakes. *Reviews of Geophysics*, 46(2), RG 2005. doi:10.1029/2006RG000210
- Buisson, L., Thuiller, W., Lek, S., Lim, P., Grenouillet, G. (2008): Climate change hastens the turnover of stream fish assemblages. *Global Change Biology* 14(10): 2232-2248.
- Burkhardt-Holm, P. (2009): Climate change and decline in abundance of brown trout –Results from Switzerland. *Klimawandel und Bachforellenrückgang - gibt es einen Zusammenhang? Resultate aus der Schweiz*: 1-9.
- BMU (2008): Grundwasser in Deutschland, <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3642.pdf>
- Caspary, H.-J., Bárdossy, A. (1995): Markieren die Winterhochwasser 1990 und 1993 das Ende

- der Stationarität in der Hochwasserhydrologie infolge von Klimaänderungen? Wasser und Boden 47.
- Caspary (2007): Trockenperioden, Niedrigwasser und Hitzewellen in Südwestdeutschland auslösende „kritische“ Wetterlagen (Studie im Auftrag der LUBW, unveröffentlicht), LUBW, Karlsruhe
- CIPRA (2011): CIPRA International, Wasser im Klimawandel, [www.cipra.org/de/cc.alps/ergebnisse/compacts](http://www.cipra.org/de/cc.alps/ergebnisse/compacts)
- CORDELLIER, M. (2009): Impact of climate change on freshwater snail species' ranges. Dissertation des Fachbereichs Biowissenschaften der Johann Wolfgang Goethe-Universität in Frankfurt am Main 107S.
- Curry, J.A., Webster, P.J. (2011): Climate Science and the Uncertainty Monster, Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 92, pp. 1667-1682, 2011. <http://dx.doi.org/10.1175/2011BAMS3139.1>
- DIN 4049-3 (1994): DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Herausgeber); DIN 4049-3, Oktober 1994. Hydrologie - Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie
- DIN EN 752 (2008): Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden
- DWA (2006a): DWA-A 100, Leitlinien der integralen Siedlungsentwässerung, ISBN: 978-3-939057-70-3
- DWA (2006b): DWA A 118, Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen (März 2006). (Korrigierte Fassung, Stand: September 2011), ISBN: 978-3-939057-15-4
- DWA (2011): DWA Themen 1/2011, Wirkung und Folgen möglicher Klimaänderungen auf den Grundwasserhaushalt
- DVGW (2013): Aktualisierung der Verbrauchsganglinien und Entwicklung eines Wasserverbrauchsmodells: Laufendes DVGW-Forschungsvorhaben, Teilergebnisse pers. übermittelt von Prof. Dr.-Ing. W. Hoch
- Eder, M. (2013): persönliche Kommunikation am 02.04.2013
- Emmert (2013): persönliche Mitteilung durch Dr. Emmert am 27.03.2013.
- Fenrich, E., Marx, W., Schneider, M. (2009): Balancing ecological, hydropower and agricultural water demands on the Lower Argen River. 7th International Symposium on Ecohydraulics (12. - 16. January 2009, Concepcion, Chile).
- FrWw (2009): Förderrichtlinie Wasserwirtschaft, Ministerium für Umwelt
- Gal, G., Imberger, J., Zohary, T., Antenucci, J., Anis, A., Rosenberg, T. (2003): Simulating the thermal dynamics of Lake Kinneret. Ecological Modelling, 162(1-2), 69–86. doi:10.1016/S0304-3800(02)00380-0
- Galonska H., Heinisch T., Krays U., Gleissner S., Kitt M. (2005): Niedrigwasserregulierung am Bodensee, Masterprojekt der Hochschule Konstanz
- GDV (2011): Auswirkungen des Klimawandels auf die Schadenssituation in der deutschen Versicherungswirtschaft, Studie im Auftrag des Gesamtverbandes der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. [http://www.gdv.de/wp-content/uploads/2012/01/Klimakonferenz\\_2011\\_PIK\\_Studie\\_Hochwasser.pdf](http://www.gdv.de/wp-content/uploads/2012/01/Klimakonferenz_2011_PIK_Studie_Hochwasser.pdf)
- Gerdes, H., Kämpf, M.; Ergh, M.; Euler, Ch.(2010): Grundwasserbewirtschaftung im Zeichen des Klimawandels. Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 201, Deutscher Industrieverlag, München
- Giesecke, J., Jorde, K., Schneider, M. (1999): Simulationsmodell zur Beurteilung ökologischer Auswirkungen von Mindestwasserregelungen, Teil IV. Technischer Bericht, 1999/16. Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 1999
- GKB (2013): <http://www.igkb.de/klimbo.html>, 22.04.2013
- GLOWA (2012): GLOWA-Danube, Integrative Techniken, Szenarien und Strategien zur Zukunft des Wassers im Einzugsgebiet der Oberen Donau, Abschlussbericht Phase III, <http://www.glowa-danube.de/de/publikationen/publikationen.php> [geprüft am 08.04.2013]
- Gündra, H., Jäger, S., Schroeder, M., Dikau, R. (1995): Bodenerosionsatlas Baden-Württemberg, Agrarforschung in Baden-Württemberg Band 24, Stuttgart; [www.geomorphologie.uni-bonn.de/persons/content/Gesamtdatei.pdf/view](http://www.geomorphologie.uni-bonn.de/persons/content/Gesamtdatei.pdf/view); Abbildung 10, Seite 33 "Flächengewichteter Bodenabtrag auf Ackerflächen"
- Haakh, F. (2006): „Jahrhundertsommer“ als Vorboten des Klimawandels – Wie sicher ist die Wasserversorgung in Baden-Württemberg? LW-Schriftenreihe Heft 25/2006

- Haeberli, W. (2009): Climate change and high-mountain regions – Adaptation strategies for the Alps. In: Kreutzmann H., Hofer T., Richter J.: Meeting of minds - Decision-makers from Asian and Alpine mountain countries sharing policy experiences in regional cooperation for sustainable mountain development, 59-66. Bonn.
- Heitzmann, Diana (2012): Die öffentliche Wasserversorgung in Baden-Württemberg 2010, Statistisches Monatsheft 5/2012, Statistisches Landesamt Baden-Württemberg
- Hennegriff, W. Reich, J. (2007): Auswirkungen des Klimawandels auf den Hochwasserschutz in Baden-Württemberg, BWGZ 2/2007, S. 65 – 69
- Hennegriff, W., Ihringer, J., Kolokotronis, V. (2008): Prognose von Auswirkungen des Klimawandels auf die Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg, Korrespondenz Wasserwirtschaft · 2008 (1) · Nr. 6
- Hering, D., Graf, W., Schmidt-Kloiber, A. (2007): Autökologische Eigenschaften europäischer Köcherfliegenarten: eine Analyse entlang klimatischer Gradienten. Deutsche Gesellschaft für Limnologie (DGL) - Tagungsbericht 2006 (Dresden): 71-74.
- HLUG (2010): Bund-Länder Fachgespräche „Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimadaten“, [www.klimawandel.hlug.de](http://www.klimawandel.hlug.de) [geprüft am 08.04.2013]
- Hoch (2013): Aktualisierung der Verbrauchsganglinien und Entwicklung eines Wasserverbrauchsmodells, Laufendes DVGW-Forschungsvorhaben, Teilergebnisse pers. übermittelt von Prof. Dr.-Ing. W. Hoch
- Hofmann, K. (2012): Anforderungen an eine zukunftsfähige (kommunale) Trinkwasserversorgung, Vortrag bei der Informationsveranstaltung zu aktuellen Fragen der Trinkwasser- und Badewasserhygiene am 15.05.2012
- IBH, WBW (Hrsg), 2013: Starkregen – Was können die Kommunen tun? Informations- und Beratungszentrum Hochwasser, Rheinland-Pfalz und Wasserwirtschaftsverband Baden-Württemberg
- Ibisch, R.B. (2004): Biogene Steuerung ökologischer Systemeigenschaften des hyporheischen Interstitials der Lahn (Hessen). Dissertation am Institut für Hydrobiologie, Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften, Wasserwesen der Technischen Universität Dresden. 180 S.
- IGKB (2004): Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (Hrsg.) Rey, P. 2004: Aktionsprogramm Bodensee 2004 bis 2009 – Schwerpunkt Ufer- und Flachwasserzone, Bregenz, ISBN 3-902290-05-6
- IGKB (2009a): Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (Hrsg.) Rey P., Teiber, P. & Huber, M. Renaturierungsleitfaden Bodenseeufer, Bregenz
- IGKB (2009b): Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB): Bodensee-Untersuchung-Seeboden. Forschungsprojekt von 2003 bis 2006, Blaue Reihe, Bericht Nr. 56.
- IGKB (2013): [http://www.igkb.de/html/aufgaben/content\\_a.html](http://www.igkb.de/html/aufgaben/content_a.html), [geprüft am 22.04.2013]
- Ihringer, J. (2004): Ergebnisse von Klimaszenarien und Hochwasserstatistik; KLIWA-Berichte, Heft 4, Tagungsband zum 2. KLIWA Symposium am 3./4.Mai in Würzburg
- IKONE (1999): Integrierende Konzeption Neckar-Einzugsgebiet, UMW Baden-Württemberg
- IKSR (2004): Wärmebelastung der Gewässer im Sommer 2003. Zusammenfassung der nationalen Situationsberichte. 70. Plenarsitzung – 8./9. Juli 2004 - Bern. Bericht Nr. 142d, Internationale Kommission zum Schutz des Rheins: 46 S.
- IPCC (2001), Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by J. T. Houghton et al., 881 pp., Cambridge Univ. Press, New York.
- IPCC (2007), Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Climate Change: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by S. Solomon et al., Cambridge Univ. Press, New York.
- Katzenberger, B. (2013): Abflussprojektionen bis 2050 am Oberrhein – neue KLIWA-Ergebnisse. Vortrag beim IKSR-Workshop Auswirkungen des Klimawandels auf das Flussgebiet Rhein (30./31.Jan.2013, Bonn). <http://www.iksr.org/index.php?id=366>
- KLARA (2005): PIK Report 99: KLARA –Klimawandel Auswirkungen Risiken Anpassung, Manfred Stock (Hrsg.), Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.

- KLIWA (2005): Langzeitverhalten des Gebietsniederschlags in Baden-Württemberg und Bayern, KLIWA-Berichte Heft 7, ISBN 3-937911-19-7
- KLIWA (2006a): Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland. Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt. KLIWA-Berichte, H. 9, Mai 2006, 5-8, ISBN 3-88251-305-5
- KLIWA (2006b): 3. KLIWA-Symposium. Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. KLIWA-Berichte H.10, September 2007, ISBN 978-3-88251-325-7
- KLIWA (2006c): Langzeitverhalten der Starkniederschläge in Baden-Württemberg und Bayern, KLIWA-Berichte Heft 8, München, ISBN 3-88148-412-4, 978-3-88148-412-1
- KLIWA (2007): Zum Einfluss des Klimas auf den Bodensee. KLIWA-Berichte H.11, Oktober 2007, ISBN 978-3-88251-326-4
- KLIWA (2008): Langzeitverhalten von Sonnenscheindauer und Globalstrahlung sowie von Verdunstung und klimatischer Wasserbilanz in Baden Württemberg und Bayern. KLIWA Heft 12, 2008, ISBN 978-3-88148-429-9
- KLIWA (2009a): Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. 4. KLIWA-Symposium. KLIWA-Berichte. Heft 15, 2009, ISBN 978-3-933123-20-6
- KLIWA (2009b): Klimawandel im Süden Deutschlands. Ausmaß-Folgen-Strategien. Stuttgart
- KLIWA (2009c): Auswirkungen des Klimawandels auf die Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. KLIWA-Berichte. Heft 14, 2009, ISBN 978-3-88251-346-2
- KLIWA (2009d): Modellunterstützte Untersuchungen zum Einfluss des Klimas auf den Bodensee, KLIWA Berichte, Heft 13, 2009, ISBN 978-3-88251-345-5
- KLIWA (2011a): Klimawandel in Süddeutschland. Veränderungen von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen – Monitoringbericht 2011
- KLIWA (2011b): Langzeitverhalten von Grundwasserständen, Quellschüttungen und grundwasserbürtigen Abflüssen in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. KLIWA Berichte, Heft 16, 2011.
- KLIWA (2012a): Klimawandel im Süden Deutschlands. Ausmaß – Auswirkungen – Anpassung. Folgen für die Wasserwirtschaft. LUBW Karlsruhe, LfU Augsburg, LUWG Mainz, DWD Offenbach.
- KLIWA (2012b): Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. Untersuchungen auf Grundlage von WETTREG2003- und WETTREG2006-Klimaszenarien. KLIWA Berichte, Heft 17, 2012.
- KLIWA (2012c): Kurzfassung der Vorträge zum 5. KLIWA-Symposium am 06./07.12.2012 in der Residenz in Würzburg
- KLIWAS (2011): Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland, 2. Statuskonferenz am 25. und 26. Oktober 2011, BMVBS, Berlin.
- Koop, J. H. E., Bergfeld, T., Keller, M. (2005): Einfluss von extremen Niedrigwasser-Ereignissen auf die Ökologie von Bundeswasserstraßen, Bundesanstalt für Gewässerkunde Veranstaltungen 5/2005
- Landtag Baden-Württemberg (2012): Stellungnahme des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft. Konsequenzen aus dem Klimawandel für das Grundwasser im Oberrheingebiet. Drucksache 15/1810. 11.06.2012
- LAWA (2007): Leitlinien für ein nachhaltiges Niedrigwassermanagement, Verlag Kulturbuch
- LAWA (2010): Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (2010): „Strategiepapier „Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft“. Bestandsaufnahme und Handlungs-empfehlungen. März 2010, Dresden, 21-22, 26-27
- Lenderink, G., van Meijgaard, E. (2008). Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes, Nature Geoscience, 1, 511-514
- LfU (2000): Niederschlagsreihen für die Langzeitsimulation. Karlsruhe, 2000
- LfU (2004): Das Niedrigwasserjahr 2003. Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie, H. 85, Karlsruhe, 36S.
- LfU (2005a): Arbeitshilfen für den Umgang mit Regenwasser in Siedlungsgebieten, Karlsruhe, 2005, <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/13994/>, [geprüft am 22.04.2013]
- LfU (2005b): Leitfaden „Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes“, Karlsruhe.

- LfU Bayern (2007): Auswirkungen der Gewässererwärmung auf die Physiologie und Ökologie der Süßwasserfische Bayerns, [www.nid.bayern.de/hilfe/docs/Auswirkungen%20der%20Gew%C3%A4ssererw%C3%A4rmung-Literaturstudie%20LFU%20Bayern\\_Datum.pdf](http://www.nid.bayern.de/hilfe/docs/Auswirkungen%20der%20Gew%C3%A4ssererw%C3%A4rmung-Literaturstudie%20LFU%20Bayern_Datum.pdf)
- LfU Bayern (2013): Bayerisches Landesamt für Umwelt, Grundwasserneubildung, [www.lfu.bayern.de/wasser/grundwasserneubildung/index.htm](http://www.lfu.bayern.de/wasser/grundwasserneubildung/index.htm) [geprüft am 22.04.2013]
- LORENZ, A., GRAF, W. (2008): (Mögliche) Verlierer und Gewinner des Klimawandels innerhalb der Insektenordnung Plecoptera (Steinfliegen). Deutsche Gesellschaft für Limnologie (DGL) - Tagungsbericht 2007 (Münster) S.326-330.
- LGL (2013): Geobasisdaten © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg, [www.lgl-bw.de](http://www.lgl-bw.de), Az.: 2851.9-1/19
- LGRB: Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau im Regierungspräsidium Freiburg; Karte der hydrogeologischen Einheiten in Baden-Württemberg. [www.lgrb.uni-freiburg.de](http://www.lgrb.uni-freiburg.de); Stand 2008
- LGRB: Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau im Regierungspräsidium Freiburg; Karte der Grundwasserergiebigkeiten in Baden-Württemberg; [www.lgrb.uni-freiburg.de](http://www.lgrb.uni-freiburg.de)
- LUBW (2007a): Naturschutz-Info; Fachdienst Naturschutz, Heft 2, Karlsruhe
- LUBW (2007b): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch. Rheingebiet, Teil I, Hoch- und Oberrhein, Karlsruhe
- LUBW (2008): Maßnahmenplanung im Hinblick auf die Phosphorbelastung zur Fließgewässerbewertung Baden-Württembergs – Teil II Pfadspezifische Emissionsbetrachtung – MONERIS-Baden-Württemberg
- LUBW (2010): NIEDSIM. Niederschlagsreihen für die Langzeitsimulation. Oktober 2010, Karlsruhe
- LUBW (2011): Langzeitverhalten der Bodensee-Wasserstände, ISBN: 978-3-88251-361
- LUBW (2012a): Umweltdaten 2012 Baden-Württemberg. Karlsruhe. [www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/220765/](http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/220765/) [geprüft am 08.04.2013]
- LUBW (2012b): Vergleich regionaler Klimaprojektionen für Baden-Württemberg. Karlsruhe. Klimaanpassung INTERN. [www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/220740/](http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/220740/) [geprüft am 08.04.2013]
- LUBW (2012c): Materialien zur Erarbeitung der Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Klimaanpassung INTERN. [www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/218566/](http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/218566/) [geprüft am 08.04.2013]
- LUBW (2012d): Grundwasserüberwachungsprogramm. Ergebnisse der Beprobung 2011
- LUBW (2013): <http://www2.lubw.baden-wuerttemberg.de/public/abt5/klima/klima/niederschlag/jahresgang/index.html>, [geprüft am 26.02.2013]
- Mahler, J.(2012): Regionales Konzept zum vorsorgenden Grundwasserschutz und zur Entwicklung der Wasserversorgung in der Region Stuttgart im Hinblick auf den Klimawandel. Diplomarbeit im Rahmen des KlimaMORO-Vorhabens an der Universität Stuttgart
- Marten, M. (2012): Gewässerökologisches Klimawandel-Monitoring in Baden-Württemberg. Deutsche Gesellschaft für Limnologie e. V., Erweiterte Zusammenfassungen der Jahrestagung 2012 (Koblenz), Hardegsen 2013: (in Vorbereitung).
- Marten, M. (2011): Trendbiomonitoring – Biozönotisches Langzeit-Monitoring in Fließgewässern Baden-Württembergs. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe
- Marx, W., Eisner, A., Opatá, R. (2005): Strategies for Orchard Irrigation in South-Western Germany under the Limitation of Meeting Instream Flow Requirements of the Used Stream. Integrated Land and Water Resources Management: Towards Sustainable Rural Development, International Commission on Irrigation and Drainage, 21st European Regional Conference (15. - 19. Mai 2005, Frankfurt (Oder)).
- Mehlig, B., Rosenbaum-Mertens, J. (2008): Klimawandel – Auswirkungen auf Oberflächengewässer: Quantität und Qualität. Präsentation zur Fachtagung „Folgen des Klimawandels für die Wasserwirtschaft, 20. Mülheimer Wassertechnisches Seminar 2007“.

- Mikat, H., Manger, V. (2010): Grundwasserbewirtschaftung/Grundwassermanagement –Erfahrungen aus der Sicht eines Wasserversorgungsunternehmens. Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 201, Deutscher Industrieverlag, München
- Noack, M., Eisner, A., Wieprecht, S., Schneider, M. (2008): Auswirkungen von Stauraumpülungen auf die Fließgewässerökologie – Dynamische Habitatmodellierung mit CASiMiR. Korrespondenz Wasserwirtschaft 6 (2008) 320-325NOW (2011): <http://www.now-wasser.de/frameset/index.htm>; Geschäftsberichte des Zweckverband NOW der Jahre 2002 bis 2011.
- NOW (2011): Zweckverband Wasserversorgung Nordostwürttemberg (Hrsg.): Geschäftsberichte der Jahre 2002-2011.
- Pinnekamp, J., Köster, S., Siekmann, M., Staufer, P. (2008):Klimawandel und Siedlungswasserwirtschaft, In: Tagungsband der 41. Essener Tagung, Gewässerschutz-Wasser-Abwasser, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, Bd. 410,S. 1/1-1/18, Aachen
- Ostendorp, W., Brem, H., Dienst, M., Jöhnk, K., Mainberger, M., Peintinger, M., Rey, P. (2007): Auswirkungen des globalen Klimawandels auf den Bodensee. Schriften des Vereins für die Geschichte des Bodensees und seiner Umgebung, Bd 125 (2007): 199-244.
- Reinartz, R., Bohl, E., Hermann, M. (2007): Auswirkungen der Gewässererwärmung auf die Physiologie und Ökologie der Süßwasserfische Bayerns, Bayerisches Landesamtes für Umwelt, Referat 57/Gewässerökologie: 124 S.
- Sailer, G. (2005): The roles of local disturbance history and microhabitat parameters for stream biota. Dissertation an der Fakultät für Biologie der LMU München: 195 S.
- Schaber, J. (2012): „Wasser marsch!“ für Gemüse, Mais und Co. Ersatz fehlender Niederschläge durch Bewässerung sichert Menge und Qualität, Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg 5/2012
- SCCS (2011): Swiss Climate Change Scenarios CH, published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate and OcCC, Zurich, Switzerland, 88p., ISBN: 978-3-033-03065-7
- Schick, R., Meggeneder, M. (2013): Auswirkungen/Folgen des Klimawandels auf die Trinkwasserversorgung aus dem Bodensee. Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 213, Deutscher Industrieverlag, München
- Schmitt, T.G., Worreschk, S. (2011): KRisMa – Kommunales Risikomanagement „Überflutungsschutz“, Studie der TU Kaiserslautern im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz und der WBW Fortbildungsgesellschaft für Gewässerentwicklung, Karlsruhe
- Schmitt, T.G., Becker, M., Pfeiffer, E.; Sitzmann, D., Uhl, M.(2008): Modellkalibrierung zur Qualitätssicherung von Kanalnetzrechnungen. Korrespondenz Abwasser, Abfall (55), Nr. 12
- Schmutz, S., Matulla, C., Melcher, A., Gerensdorfer, T., Haas, P., Formayer, H. (2004): Beurteilung der Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf die Fischfauna anhand ausgewählter Fließgewässer. Endbericht, im Auftrag des BMLFUW, GZ 54 3895/163-V/4/03.
- Scholten, A.; Rothstein, B. (2012): Auswirkungen von Niedrigwasser und Klimawandel auf die verladende Wirtschaft, Binnenschifffahrt und Häfen entlang des Rheins – Untersuchungen zur gegenwärtigen und zukünftigen Vulnerabilität durch Niedrigwasser. Würzburger Geographische Arbeiten. 107. 376 S.
- Schuchardt, B., Wittig, S., Spiekermann, J. (2011): Klimawandel in der Metropolregion Bremen-Oldenburg. Regionale Analyse der Vulnerabilität ausgewählter Sektoren und Handlungsbereiche. Juni 2011, Bremen, 140-210
- Seidel, J. Bárdossy, A. (2010): Berücksichtigung von historischen Extremereignissen in der Extremwertstatistik. Geographische Rundschau 3/2010 42-47.
- Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung (2010): KLIWA - Einfluss des Klimawandels auf die Fließgewässerqualität – Literaturoswertung und erste Vulnerabilitätseinschätzung
- Statistisches Landesamt (2010) – Daten des Statistischen Landesamtes Baden-Württemberg zur Wasserwirtschaft (2010): online abrufbar unter [www.statistik.baden-wuerttemberg.de/UmweltVerkehr/Landesdaten](http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/UmweltVerkehr/Landesdaten)

- Statistisches Landesamt (2012): Wasser marsch! Für Gemüse, Mais und Co. Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg 5/2012, [www.statistik.baden-wuerttemberg.de/veroeffentl/Monatshefte/PDF/Beitrag12\\_05\\_06.pdf](http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/veroeffentl/Monatshefte/PDF/Beitrag12_05_06.pdf), [geprüft am 11.06.2013]
- Steinmetz, H., Dittmer, U. (2011): Schadstoffströme im Abwassersysteme, Fachkonferenz Siedlungswasserwirtschaft, DWA Landesverband Baden-Württemberg, 30.03.2011, Tagungsband
- Schmitt, T.G., Becker, M., Flores, C., Pfeiffer, E., Sitzmann, D., Uhl, M. (2008): Modellkalibrierung zur Qualitätssicherung von Kanalnetzberechnungen; Korrespondenz Abwasser, Abfall 2008 (55) Nr. 12
- Trenberth, K. E. (1999). Conceptual framework for changes of extremes of the hydrological cycle with climate change. *Climatic Change*, 42:327–339, 1999. ISSN 0165-0009.10.1023/A:1005488920935.
- UBA (2012): Wirkungsketten. [www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/218566/](http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/218566/) [geprüft am 08.04.2013]
- UM (2003): Umweltministerium Baden-Württemberg: Leitfaden „Kooperationen und Fusionen in der Wasserversorgung“
- UM (2005): Leitfaden Hochwassergefahrenkarten in Baden-Württemberg, [www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/71525/](http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/71525/) [geprüft am 11.06.2013]
- UM (2007a): Messungen des Entlastungsverhaltens an Regenüberlaufbecken, Arbeitsmaterialien zur fortschrittlichen Regenwasserbehandlung, Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg
- UM (2007b): Leitbild Zukunftsfähige Trinkwasserversorgung Baden-Württemberg, Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg, 2. Auflage
- UM (2009): Förderrichtlinie Wasserwirtschaft FrWw, Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg
- UM (2011): Umweltministerium Baden-Württemberg: Bewertung des Hochwasserrisikos und Bestimmung der Gebiete mit signifikantem Hochwasserrisiko in Baden-Württemberg
- UM (2013a): Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden Württemberg: Kommunales Abwasser Lagebericht 2013, UM Juni 2013
- UM (2013b): Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden Württemberg, Organisation HWRM-RL, [www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/75017/](http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/75017/), [geprüft am 11.06.2013]
- UM (2013c): Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden Württemberg, Hochwasserpartnerschaften, [www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/71522/](http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/71522/) [gepr.am 20.07.2013]
- UM (2013d): Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden Württemberg, FLIWAS <http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/83910/>
- UM und LUBW (2010): Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr Baden-Württemberg & Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2010): Klimawandel in Baden-Württemberg. Fakten-Folgen-Perspektiven.
- UM und LUBW (2012): Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr Baden-Württemberg & Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2012): Klimawandel in Baden-Württemberg – Fakten-Folgen-Perspektiven. ISBN 978-3-88251-368-4, 2. aktualisierte Auflage: März 2012
- Wald, J. (2004): Auswirkungen der Klimaveränderungen auf Planungen - Praxisbeispiele, 2. Symposium; KLIWA-Berichte, Heft 4, Tagungsband zum 2. KLIWA-Symposium am 3./4.Mai in Würzburg
- Zintz, Löffler, Schröder (2009): Der Bodensee – Ein Naturraum im Wandel, Thorbecke Verlag
- ZVLW (2004): Zweckverband Landeswasserversorgung: Wasserbereitstellungsstruktur der Städte und Gemeinden Baden-Württembergs im Jahr 2004. Interne Auswertung auf Basis der Daten des Statistischen Landesamtes des Jahres 2004, unveröffentlicht, Stuttgart, 2004
- ZVLW (2009): Zweckverband Landeswasserversorgung, Trinkwasser für Baden-Württemberg. Stuttgart
- ZVLW (2011): Zweckverband Landeswasserversorgung, Geschäftsberichte der Jahre 2002 bis 2011.
- ZVLW (2012): Zweckverband Landeswasserversorgung , Einfluss des demografischen Wandels und des Klimawandels auf die technische Infrastruktur der Landeswasserversorgung. Interner Bericht für die Verwaltungsratssitzung vom 25.09.2012

# Anhang

---

## **Anlage 1 - Definition der relevanten Klimakennzahlen**

Im Folgenden sind die in diesem Bericht betrachteten relevanten Klimakennzahlen gemäß LUBW [LUBW 2012b] definiert:

### **Kennzahlen der Lufttemperatur**

#### **Jahresmitteltemperatur (T Mittel)**

Die Jahresmitteltemperatur [°C] beschreibt das arithmetische Mittel aller Tagesmitteltemperaturen im betrachteten Zeitbereich.

#### **Tropennacht**

Ein Tag bzw. Nacht wird als Tropennacht definiert, wenn das Temperaturminimum größer oder gleich 20°C ist. Die Anzahl der Tropennächte je Zeitbezug (Monat oder Jahre) wird ermittelt [Anzahl Tage].

#### **Sommertag**

Als Sommertag wird ein Tag definiert, an dem das Temperaturmaximum mindestens 25 C erreicht. Die Anzahl der Sommertage je Zeitbezug (Monat oder Jahre) wird ermittelt [Anzahl Tage].

#### **Frosttag**

Ein Tag wird als Frosttag definiert, wenn das Temperaturminimum unter 0°C liegt. Die Anzahl der Frosttage pro Kalenderjahr wird ermittelt [Anzahl Tage].

#### **Eistag**

Als Eistag wird ein Tag definiert, bei dem das Temperaturmaximum unter 0°C liegt. Die Anzahl der Eistage pro Kalenderjahr wird ermittelt [Anzahl Tage].

### **Kennzahlen des Niederschlags**

#### **Niederschlagssumme im Jahr (N Jahr)**

Als Niederschlagssumme im Jahr wird die Gesamtniederschlagssumme des Jahres bezeichnet [mm].

### **Niederschlagssumme im hydrologischen Winterhalbjahr (N-Hyd-Winter)**

Die Niederschlagssumme im hydrologischen Winterhalbjahr ist die Gesamtniederschlagssumme, die in den Monaten November (Vorjahr) bis April fällt [mm].

### **Niederschlagssumme im hydrologischen Sommerhalbjahr (N-Hyd-Sommer)**

Die Niederschlagssumme im hydrologischen Sommerhalbjahr ist die Gesamtniederschlagssumme, die in den Monaten Mai bis Oktober fällt [mm].

### **Anzahl der Tage ohne Niederschlag (N-Tage-Trocken)**

Bei der Bezeichnung „Anzahl der Tage ohne Niederschlag“ handelt es sich um die Anzahl der Tage mit einer Niederschlagshöhe unter 1 mm/Tag pro Kalenderjahr [Anzahl Tage]. Je nach Messprinzip des Niederschlagsmessgeräts („Sammler“, „Tropfer“ oder „Wägeprinzip“) ist die Messgenauigkeit sehr unterschiedlich. Durch Definition eines Grenzwertes von 1 mm, bei dem die Messgenauigkeit keine Rolle spielt, wird eine stabilere und vergleichbare Kennzahl definiert.

### **Anzahl der Tage mit Starkniederschlag (N-Tage-StarkN)**

Hierbei werden die Tage eines Jahres gezählt, an denen die Niederschlagssumme eine Höhe von 25 mm überschreitet [Anzahl Tage].

### **Starkniederschlags-Höhe (StarkN)**

Die Starkniederschlags-Höhe ist die Summe des maximalen Niederschlags an einem Tag innerhalb eines Kalenderjahrs [mm].

### **Kennzahlen der Globalstrahlung**

#### **Summe der Globalstrahlung/Jahr (Glob-Jahr)**

Die Summe der Globalstrahlung pro Jahr bezeichnet die eingefallene solare Leistung pro Quadratmeter im Jahr [kWh/m<sup>2</sup>].

#### **Standardabweichung der Globalstrahlung (Glob-Stabw)**

Die Standardabweichung der Werte der Globalstrahlung ist ein Maß für die Schwankungsbreite der Globalstrahlung [W/m<sup>2</sup>].

#### **Minimale mittlere Globalstrahlung (Glob-Min)**

Das Minimum der täglichen Globalstrahlungswerte wird pro Kalenderjahr ausgewertet [W/m<sup>2</sup>].

### **Maximale mittlere Globalstrahlung (Glob-Max)**

Das Maximum der täglichen Globalstrahlungswerte wird pro Kalenderjahr ausgewertet [ $\text{W}/\text{m}^2$ ].

### **Kennzahlen der Windgeschwindigkeit**

#### **Mittlere Windgeschwindigkeit (Wind-Jahr)**

Die mittlere Windgeschwindigkeit ist das arithmetische Mittel der täglichen Windgeschwindigkeiten eines Jahres [ $\text{m}/\text{s}$ ].

#### **Standardabweichung der Windgeschwindigkeit (Wind-Stabw)**

Die Standardabweichung der Werte der Windgeschwindigkeit wird ebenfalls aus den täglichen Windgeschwindigkeiten eines Tages gebildet und ist damit ein Maß, wie stark die Windgeschwindigkeiten variieren [ $\text{m}/\text{s}$ ].

#### **Maximale mittlere Windgeschwindigkeit (Wind-Max)**

Als maximale mittlere Windgeschwindigkeit wird der maximale Wert pro Kalenderjahr verstanden [ $\text{m}/\text{s}$ ].

#### **Anzahl der Tage > 8 m/s Windgeschwindigkeit (Wind-Tag > 8ms)**

Die Anzahl der Tage eines Jahres, an denen die Windgeschwindigkeit im Mittel über 8 m/s liegt, ist eine Maßzahl, die für den Betrieb von Windkraftanlagen interessant ist [Anzahl Tage].