



**F&E-Vorhaben
Klimawandel am Bodensee (KlimBo)**

**Risikobewertung klimatischer
Einflüsse auf die Trinkwasserversorgung
aus dem Bodensee**

zusammengestellt

von

Dr.-Ing. Roland Schick, Dr.-Ing. Marcel Meggeneder
Dipl.-Ing. Michael Fleig

im Auftrag der
Landesanstalt für Umwelt, Messungen und
Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)



Landesanstalt für Umwelt, Messungen und
Naturschutz Baden-Württemberg

Juni 2013

Impressum

- Titel:** Risikobewertung klimatischer Einflüsse auf die Trinkwasserversorgung aus dem Bodensee
- Herausgeber:** Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)
Abteilung Wasser
Postfach 10 01 63
76231 Karlsruhe
<http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de>
- Koordination:** Institut für Seenforschung
Argenweg 50/1
88085 Langenargen
Leitung: Dr. Gerd Schröder, Projektbetreuung: Bernd Wahl
E-Mail: isf@lubw.bwl.de
Tel.-Nr.: 0049 (0)7543/304-0, Fax: 07543/304-299
- Bearbeitung:** Zweckverband Bodensee-Wasserversorgung
Hauptstraße 163
70563 Stuttgart
E-Mail: bwv@zvbvw.de
Tel.-Nr.: 0049 (0)711/973-0, Fax: 0711/973-2030
- DVGW-Technologiezentrum Wasser
Karlsruher Straße 84
D-76139 Karlsruhe
E-Mail: info@tzw.de
Tel.-Nr.: 0049 (0)721/9678-0, Fax: 0721/9678-101
- Autoren:** Dr.-Ing. Roland Schick, Dr.-Ing. Marcel Meggeneder, Dipl.-Ing. Michael Fleig
- Stand:** Juni 2013, Version 1.1
- ISSN / ISBN:**
- Copyright:** Die Veröffentlichung, die Vervielfältigung und der Nachdruck, ist -auch auszugsweise- nur mit vorheriger Zustimmung des Herausgebers unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet
- Haftung:** Sowohl der Herausgeber als auch der Zweckverband Bodensee-Wasserversorgung und das DVGW-Technologiezentrum Wasser übernehmen keine Haftung für Schäden, die aufgrund von weiterführenden oder fehlerhaften Anwendungen der in diesem Bericht dargestellten Ergebnisse und Sachverhalte entstehen

Die vorliegende Literaturstudie wurde im Rahmen des F&E-Verbundforschungsvorhabens „Klimawandel am Bodensee, KlimBo“ durch die Europäische Union aus dem Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung sowie des INTERREG IV-Programms „Alpenrhein, Bodensee, Hochrhein“ gefördert.



EUROPÄISCHE UNION
Europäischer Fonds
für Regionale Entwicklung



„Es kommt nicht darauf an, die Zukunft vorauszusagen,
sondern darauf, auf die Zukunft vorbereitet zu sein“

Perikles um 500-420 v.Chr., athenischer Politiker und Feldherr

Vorbemerkungen

Der globale Klimawandel ist eine der großen Herausforderungen für die Menschheit des 21. Jahrhunderts. Der Klimawandel manifestiert sich dabei nicht nur in verstärkt auftretenden Wetteranomalien und Extremereignissen sondern vielmehr auch in subtilen, z.T. nicht reversiblen Veränderungen, die zukünftig unsere Lebensgrundlagen in zunehmendem Maße beeinflussen werden. Führende Fachgremien und anerkannte Forschergruppen rechnen mit weitreichenden Veränderungen und einer erheblichen Zunahme von klimabedingten Schäden, wenn es nicht gelingt, den bereits quantifizierbaren und prognostizierten Temperaturanstieg der Erdatmosphäre zu begrenzen. Daher wird mit Ausnahme weniger Skeptiker die Notwendigkeit und Dringlichkeit von Maßnahmen

- zur Vermeidung oder zumindest Minderung von klimawirksamen Treibhausgasemissionen sowie
- zum Erhalt bzw. zur Optimierung der Anpassungsfähigkeit natürlicher, gesellschaftlicher und ökonomischer Systeme an die unvermeidbaren Auswirkungen

in Fachkreisen nicht mehr bestritten.

In der Bodenseeregion ist bereits heute das Ausmaß der weltweiten Klimaveränderung in mannigfaltiger Weise sicht- und spürbar. Um im Kontext der Klimaveränderung frühzeitig die sich ändernden Rahmenbedingungen erkennen, deren Entwicklungen und Auswirkungen für das aquatische System „Bodensee“ abschätzen und beurteilen sowie erforderliche Handlungsoptionen u.a. für die Wasserversorgungsunternehmen erarbeiten zu können, besteht Konsens darüber, die bisherigen Schutzmaßnahmen im Rahmen international abgestimmter Anstrengungen und innovativer Aktivitäten verstärkt fortzusetzen.

Das von der Europäischen Union im Rahmen des Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung sowie des INTERREG IV-Programms „Alpenrhein, Bodensee, Hochrhein“ geförderte Verbundforschungsvorhaben

„Klimawandel am Bodensee, KlimBo“

kann hierbei einen wesentlichen Beitrag leisten. An dem Gesamtprojekt, das insgesamt auf einen Förderzeitraum von drei Jahren ausgerichtet ist, wirken im Rahmen einer interdisziplinären Zusammenarbeit bzw. eines regelmäßigen Erfahrungsaustausches folgende Institutionen mit:

- Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB)
- Arbeitsgemeinschaft Wasserwerke Bodensee-Rhein (AWBR)
- Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)
- Bundesamt für Umwelt, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (BAFU)
- Amt für Umwelt und Lebensmittelsicherheit des Landes Vorarlberg (AUL)
- Universität Stuttgart, Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung (IWS)
- Universität Konstanz, Limnologisches Institut (LIK)
- Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG)
- Ingenieurbüro Prof. Kobus und Partner GmbH (kup)
- DVGW-Technologiezentrum Karlsruhe (TZW)
- Zweckverband Bodensee-Wasserversorgung (BWV)

Ziel dabei ist es, bis Ende 2014 in 6 Teilprojekten weiterführende Erkenntnisse aufzuzeigen, mit denen die zu erwartenden meteorologischen / hydrologischen Auswirkungen des Klimawandels auf die Entwicklungen im Bodenseegebiet sowie auf die hydrodynamischen, biologischen und physikalisch/chemischen Wechselwirkungen im Bodensee im Sinne einer gesamtheitlichen Betrachtungsweise charakterisiert werden können. U.a. werden in langfristig angelegten Messkampagnen und Modellsimulationen die klimabedingten Einflüsse auf die Wasserqualität, die Tiefenwassererneuerungen und Stoffaustauschprozesse sowie auf den Wärmehaushalt des Bodensees und seiner Kompartimente eingehend untersucht und bewertet.

Im Rahmen der vorliegenden Literaturstudie

„Risikobewertung klimatischer Einflüsse auf die
Trinkwasserversorgung aus dem Bodensee“

wurden speziell die Folgen der klimatischen Veränderungen aus Sicht der Trinkwasserversorgung aufgezeigt. Sie wurde von der Bodensee-Wasserversorgung (BWV) in enger Zusammenarbeit mit dem DVGW-Technologiezentrum Karlsruhe (TZW) und der Arbeitsgemeinschaft Wasserwerke Bodensee-Rhein (AWBR) erstellt und zeigt in beispielhafter Weise die kooperative und erfolgreiche Zusammenarbeit zwischen Praxis und Wissenschaft auf.

An dieser Stelle möchten wir uns bei allen Mitwirkenden, die durch ihre fachliche Kompetenz, ihre wertvollen Hinweise und konstruktive Kritik wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, recht herzlich bedanken. Für ihre tatkräftige Unterstützung gilt unser ganz besonderer Dank vor allem

- Herrn Dipl.-Ing. Burkhard Schneider, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
- Herrn Dr. Gerd Schröder, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Institut für Seenforschung
- Herrn Bernd Wahl, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Institut für Seenforschung

sowie allen

- am Verbundforschungsvorhaben „Klimawandel am Bodensee“ mitwirkenden Institutionen
- Mitgliedern des Sachverständigenkreises der Internationalen Gewässerschutzkommission für den Bodensee
- Mitgliedern des wissenschaftlichen Beirates der Arbeitsgemeinschaft Wasserwerke Bodensee Rhein und allen
- beteiligten Mitarbeitern des DVGW-Technologiezentrums Wassers und des Zweckverbandes Bodensee-Wasserversorgung.

Der Europäischen Union sowie den Anrainerstaaten des Bodensees danken wir für die finanzielle Unterstützung. Neben einer Förderung zur nachhaltigen Entwicklung der Grenzgebiete als attraktiver Lebens-, Natur-, Wirtschafts- und Kulturraum konnte dadurch ein weiterer wesentlicher Beitrag zur grenzüberschreitenden Zusammenarbeit zwischen den in der Bodenseeregion tätigen wissenschaftlichen Institutionen geleistet werden.

Nicht zuletzt danken wir dem Institut für Seenforschung der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, das die Gesamtkoordination aller erforderlichen organisatorischen und administrativen Aufgaben übernommen hat.

Zweckverband
BODENSEE-
WASSERVERSORGUNG



Dr. Marcel Meggeneder

ARBEITSGEMEINSCHAFT
WASSERWERKE BODENSEE-RHEIN



Dr. Kurt Ruegg

DVGW-TECHNOLOGIEZENTRUM
WASSER KARLSRUHE



Dr. Josef Klinger

Abstract

Apart from global population growth and the questions about future energy supply, climate change represents one of the most important challenges of the 21st century. The subject of “global climate change” and its effects and consequences is thus not only in the focus of international politics and experts, but has also aroused public interest.

Since the middle of the past century, global increase of temperature and numerous directly and indirectly related consequences have been observed. These effects can no longer be explained on the basis of natural factors alone. With the exception of only few sceptics, scientists agree that climate change, caused primarily as a result of anthropogenic sources of greenhouse gas emissions, can no longer be prevented but their effects merely be reduced. Even with an immediate significant reduction of greenhouse gas emissions or a stabilisation at today’s levels, the trends observed today will continue in the coming decades. As a result, our very basis of existence and our future generation’s opportunities for development will change increasingly. If the anthropogenic impacts on climate cannot be minimized, a mid- to long-term expansion of significant climate-induced damage is inevitable.

The observed effects of climate change have become clearly noticeable and tangible not only worldwide but also in the region of Lake Constance with its drainage basin and the area which it supplies with drinking water. Particularly the hydrological cycle, a key aspect of climate, has been affected significantly and sustainably. Hence, concerted efforts and innovative research are needed in order to meet the demands of water management, preventive water protection and the supply of drinking water under these conditions.

The collaborative research project

“Klimawandel am Bodensee, KlimBo”

can make a key contribution in this regard. The project is sponsored by the European Union through the European Regional Development Fund and the INTERREG IV Programme “Alpenrhein, Bodensee, Hochrhein”. The following institutions are involved in the overall project, which is planned to take place over a period of three years:

- International Commission for the Protection of Lake Constance (IGKB)
- Association of Waterworks of Lake Constance/Rhine River Region (AWBR)
- State Institute for Environment, Measurements and Nature Conservation Baden-Württemberg (LUBW)
- Federal Office for the Environment, Department of the Environment, Transport, Energy and Communications (BAFU)
- State of Vorarlberg, Institute for Environment and food
- University of Stuttgart, Institute for Water and Environmental System Modelling (IWS)
- University of Konstanz, Institute for Limnology
- Swiss Federal Institute for Aquatic Science and Technology (EAWAG)
- Prof. Kobus and Partner Engineering Consultants (kup)
- DVGW Karlsruhe Water Technology Centre (TZW)
- Lake Constance Water Supply Association (BWV)

The programme includes 6 sub-projects aimed at completion by the end of 2014. The programme's goal is to look at the topic in its entirety and to gain a better understanding of the expected meteorological and hydrological effects of climate change on the development of the Lake Constance region and on the hydrodynamic, biological, physical and chemical interactions of Lake Constance. One aspect of the programme will be the use of long-term field monitoring and model simulations to provide a detailed examination and evaluation of climate-induced impacts on water quality, deep water renewal and the processes of exchange of matter, as well as on thermal regulation within Lake Constance and its compartments.

This survey of current scientific literature

“Risk Assessment of the Climatic Impact on the Supply of
Drinking Water from Lake Constance”

specifically addressed the consequences of climate change on the supply of drinking water. Using the example of Lake Constance and its drainage basin and area of supply for drinking water, the following key points have been made:

- deficits in the knowledge must be identified,
- the relevant disturbance variables in the “drinking water supply and climate change” system must be specified, prioritised and evaluated through vulnerability and risk assessments, and
- integrated options for actions and adaptation measures must be worked out, taking into consideration the related issues of the production, treatment and distribution of drinking water.

However, because there is a range of variables involved, as well as their mutual interactions, deriving prognoses based on scenarios is possible only with huge uncertainties, which are based in part on both the time frame considered (to 2050 or 2100) and on the uncertainties of climate modelling. Even the smallest deviations in the relevant assumptions of future realities can result in significant misinterpretations. A key case-by-case assessment is therefore essential. The factors considered and conclusions drawn therein can thus be viewed primarily as “aids for decision-making and guidance” that appear plausible from today’s standpoint. Moreover, these ideas can contribute to increase the awareness of decision makers of the topic “climate change” and their willingness to question the previous approaches in an open-ended and unbiased way.

Overall, it has been shown that the aspects considered are not unknown to the water supply companies of Lake Constance and the region it supplies with drinking water. They are used to

- planning and thinking for long-term investment periods,
- dealing with changing conditions and
- making decisions involving uncertainties.

Furthermore, there is already relevant experience both for extreme events and their associated challenges and in dealing with long-term and temporary change in water conditions.

The vulnerability and risk management assessments have also clearly indicated that the expected climate changes will have an impact on the supply of drinking water. However, to date there is no evidence suggesting an acute and urgent need for action. Nevertheless, all the “actors” that are involved are called upon to take part in an active and factual examination of the subject of “climate change” and to prepare with appropriate adaptation strategies and courses of action. Established approaches should be maintained and advanced with a sense of proportion in the coming years/decades, taking into consideration the political, social and economic circumstances as well as the site-specific conditions¹. The climate-induced effects/consequences that have not been addressed to date, including the anthropogenic “change processes” and the increasing impacts on aquatic systems through the input of substances must be integrated at an early stage into the systematic overall analysis for planning and operating the future supply structure; this approach builds upon a consistent implementation of measures that are based primarily on the following key points:

¹ drainage basin, water supply, water quality, supply network, consumers' behaviour, population growth, economic development or agricultural water use

- precautionary and sustainable protection of water resources,
- regular monitoring of water in all links of the “drinking water” supply chain,
- the use of proven and innovative technologies for sourcing, treating and distribution/storage including the maintenance of such technologies,
- the promotion and active participation in relevant research and development programmes and
- a forward-looking economic strategy.

As a consequence, farsighted and responsible conduct by the water supply companies of Lake Constance contributes enormously to continuing to ensure a sustainable supply of drinking water within the Lake Constance region even under the altered conditions of climate change.

Inhaltsverzeichnis

1.0 Einleitung	1-1
1.1 Allgemeines und Problemstellung.....	1-1
1.2 Zielsetzung	1-4
2.0 Stand des Wissens - Von der Wetter- und Klimaforschung über die Beobachtungen/Ursachen der globalen Klimaveränderung bis hin zur aktuellen Klimapolitik	2-1
2.1 Allgemeines	2-1
2.2 Grundlagen der Wetter- und Klimaforschung.....	2-1
2.2.1 Historie	2-1
2.2.2 Möglichkeiten und Grenzen der Klimamodellierung	2-5
2.3 Globale Beobachtungen, Ursachen und Auswirkungen/Folgen der Klimaveränderung.....	2-14
2.3.1 Globaler Klimawandel.....	2-14
2.3.2 Weltweite Beobachtungen - gestern und heute	2-17
2.3.3 Ursachen der beobachteten Klimaveränderungen	2-21
2.4 Prognostizierte Auswirkungen/Folgen des Klimawandels.....	2-27
2.5 Die zwei Eckpunkte der Klimapolitik – Klimaschutz/Vermeidung und Anpassung.....	2-33
3.0 Beobachtete Klimaentwicklungen im Einzugs- und Trinkwasserversor- gungsgebiet des Bodensees	3-1
3.1 Allgemeines	3-1
3.2 Meteorologische und hydrologische Auswirkungen im Einzugs- und Trinkwasserversorgungsgebiet des Bodensees	3-3
3.2.1 Luft-/Umgebungstemperatur.....	3-3
3.2.2 Heißere Sommer mit länger anhaltenden Trockenperioden	3-5
3.2.3 Wind	3-7
3.2.4 Niederschlag.....	3-8
3.2.5 Gletscherschmelze und Auftauen von Permafrostgebieten.....	3-12
3.2.6 Schmelzwasserabfluss und Schneebedeckung.....	3-15
3.2.7 Abflussregime von ausgewählten Zuflüssen zum Bodensee.....	3-17
3.2.8 Grundwasserneubildung und -beschaffenheit im Trinkwasser- versorgungsgebiet des Bodensees	3-22

3.3	Gewässerspezifische Beobachtungen.....	3-24
3.3.1	Allgemeines.....	3-24
3.3.2	Wasserstand Bodensee, Beispiel Pegel Konstanz.....	3-26
3.3.3	Erkenntnisse zu hydrodynamischen Vorgängen im Bodensee.....	3-29
3.3.4	Schichtungs- und Zirkulationsverhalten.....	3-33
3.3.5	Entwicklungen zur Wasserbeschaffenheit.....	3-34
3.3.6	Aquatische Lebensräume und -gemeinschaften im Freiwasser-, Flachwasser- und Uferbereich.....	3-44
3.4	Abschließende Bemerkungen.....	3-47
4.0	Erwartete Auswirkungen der Klimaveränderungen.....	4-1
4.1	Allgemeines.....	4-1
4.2	Meteorologische, hydrologische Auswirkungen im Einzugs- und Trinkwasserversorgungsgebiet des Bodensees.....	4-1
4.3	Gewässerspezifische Auswirkungen.....	4-15
4.4	Abschließende Bemerkungen.....	4-23
5.0	Der Klimawandel und die Folgen für die Trinkwasserversorgung	
	Nutzungsspezifische Aspekte.....	5-1
5.1	Allgemeines.....	5-1
5.2	Ansatz des „vernetzten Denkens“.....	5-3
5.3	Beschaffenheit des Bodenseewassers und landseitig genutzter Ressourcen.....	5-4
5.4	Versorgungssicherheit.....	5-5
5.4.1	Wasserdargebot.....	5-5
5.4.2	Trinkwasserbedarf, Trinkwasserabgabe der Seewasserwerke.....	5-8
5.4.3	Technische Versorgungsstruktur.....	5-18
5.5	Strom- und Energieversorgung.....	5-27
5.6	Sozio-ökonomische Fragestellungen.....	5-29
5.6.1	Einflüsse der Klimaänderung auf das menschliche Wohlbefinden und Gesundheit.....	5-29
5.6.2	Ökonomie.....	5-31
5.7	Abschließende Bemerkungen.....	5-32
6.0	Systemanalyse – Überlegungen zur Sensitivität, Exposition, Vulnerabilität und Risikomanagement.....	6-1
6.1	Allgemeines.....	6-1
6.2	Allgemeine Überlegungen zum methodischen Vorgehen.....	6-4
6.3	Exposition-, Sensitivitäts- und Vulnerabilitätsabschätzungen, dargestellt am Beispiel der Bodensee-Wasserversorgung.....	6-7
6.4	Präventives Risikomanagement.....	6-16
6.5	Abschließende Bemerkungen.....	6-24

7.0	Mögliche Anpassungsstrategien – Empfehlungen und Handlungsoptionen für die Wasserversorgungsunternehmen.....	7-1
7.1	Allgemeines	7-1
7.2	Vorsorgender Gewässerschutz.....	7-3
7.3	Qualitätssicherung – Überwachung der Wasserbeschaffenheit.....	7-6
7.4	Versorgungssicherheit - Technische Belange der Wassergewinnung, -aufbereitung und -verteilung/-speicherung	7-7
7.5	Präventivmaßnahmen zur Energie- und Stromversorgung sowie von IT- und Kommunikationssystemen	7-12
7.6	Forschung und Kenntniserweiterung	7-17
7.7	Katastrophen- und Notfallmanagement	7-19
7.8	Präventive Kommunikations- und Dialogstrategie, Zusammenarbeit mit Dritten	7-22
7.9	Personelle Aspekte.....	7-23
7.10	Rechtlicher Ordnungsrahmen.....	7-25
7.11	Ökonomie	7-27
7.12	Abschließende Bemerkungen.....	7-29
8.0	Gesamtbeurteilung und Ausblick.....	8-1
9.0	Literatur	9-1
A.	Anhang	A-1
A.1	Erläuterungen von Fachbegriffen, Glossar	A-1
A.2	Ausgewählte Behörden und wissenschaftliche Fachinstitutionen	A-6
A.3	Ausgewählte Förderprogramme und F&E-Projekte	A-9

1.0 Einleitung

1.1 Allgemeines und Problemstellung

Das Klima der Erde ist ein komplexes System, das über nahezu die gesamte Erdschicht allein durch

- die Energieaufnahme aus dem Weltall (u.a. Sonneneinstrahlung, elektromagnetische Wellen, ...),
- die Umsetzung der Energie in der Atmosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre, Biosphäre und Pedosphäre sowie
- die Energieabgabe der Erde in Form von Infrarotstrahlung (Wärme)

charakterisiert werden konnte. Die Entwicklung des Klimas wurde hierbei lediglich durch natürliche Wechselwirkungen, die entweder innerhalb des Klimasystems selbst (z.B. Rückkopplungseffekte) oder von außen einwirken (Änderung der Erdbahnparameter, Vulkanausbrüche, Sonnenaktivität...) bestimmt. Mit dem Anstieg der Weltbevölkerung, der beginnenden Industrialisierung vor ca. 250 Jahren und dem damit einhergehenden erhöhten Verbrauch an fossilen Energieträgern wurde der natürliche Stoff- und Energiezustand jedoch zunehmend auch durch die anthropogen bedingte Emission von sogenannten Treibhausgasen, vorrangig Wasserdampf (H₂O), Kohlendioxid (CO₂) und Methan (CH₄) aber auch von naturfremden Luftschadstoffen/Aerosolen (z.B. Schwefelverbindungen, Fluorkohlenwasserstoffe, ...) beeinflusst [ÖWVA (2010)]. Dies hatte zur Folge, dass seit Mitte des vorigen Jahrhunderts weltweit eine globale Erwärmung beobachtet wird, die „mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit von über 90%“ [IPCC (2007c)] durch natürliche Einflussfaktoren allein nicht mehr erklärbar ist [North u.a. (2007)]. Darüber hinaus gibt es deutliche Belege dafür, dass sich in den letzten 50 Jahren auch die Stärke und Verteilung von Wasserhaushaltsgrößen (z.B. Niederschläge, Verdunstung,...) in Abhängigkeit von den regionalen Gegebenheiten z.T. drastisch verändert haben [ÖWVA (2010)]. Vor allem die weltweiten, in den letzten Jahren verstärkt beobachteten Extremereignisse (z.B. Hoch-/Niedrigwasser, Überschwemmungen, Überflutungen von flachen Küstenregionen, Hurrikane, Taifune, Unwetter, Hitze- und Dürreperioden,...) führten auch dazu, dass das Thema „globaler Klimawandel“ und die damit verbundenen Auswirkungen/Folgen in zunehmendem Maße im Fokus der internationalen Politik und der interessierenden Öffentlichkeit steht.

Die von Fachgremien sowie von einer Vielzahl anerkannter Forschergruppen (vgl. Anhang A2 und A3) erarbeiteten Erkenntnisse deuten darauf hin, dass sich unter Einbeziehung von Naturphänomenen und anthropogen bedingten Einflüssen die beobachteten Trends in den nächsten Jahrzehnten verstärkt fortsetzen und sich dadurch die Lebensgrundlagen bzw. Entwicklungschancen künftiger Generationen zunehmend verändern werden [IPCC (2007a – 2007f), IPCC (2012a – 2012d), EU (2009), EU (2013), Bundesregierung (2008), Bundesregierung (2011), OcCC (2007), OcCC (2008), Lebensministerium (2011a), Lebensministerium (2011b), ZAMG

(2010), Göttle (2007)]. Bis auf wenige Skeptiker [Feierabend (2010), Klimaskeptiker (2012a), Klimaskeptiker (2012b), NABU (2012), BAFU (2010a), Vahrenholt (2012)] besteht wissenschaftlicher Konsens darüber, dass die Klimaänderung bereits „im Gange“ ist und nicht mehr verhindert, sondern lediglich in ihrer Auswirkung gemindert werden kann. Für nahezu alle Regionen der Erde werden Veränderungen erwartet, die sowohl für natürliche als auch anthropogene Systeme erhebliche Auswirkungen zur Folge haben. Selbst bei einer sofortigen Stabilisierung der Treibhausgasemissionen auf heutigem Niveau oder gar einer signifikanten Verringerung ist mit einem anhaltenden Temperaturanstieg in den nächsten Jahrzehnten zu rechnen.

Aber nicht nur weltweit, sondern auch in der Bodenseeregion und in dessen Einzugs- bzw. Wasserversorgungsgebiet ist das zu erwartende Ausmaß der Klimaänderung bereits deutlich sicht- und spürbar [z.B. AGBU (2006)]. Insbesondere der Wasserkreislauf als wesentlicher Bestandteil des Klimas ist hiervon signifikant und nachhaltig betroffen. Als augenscheinlichstes Beispiel ist u.a. das beschleunigte Abschmelzen von Hochgebirgsgletschern in den Alpen und das damit verbundene Abflussregime der entsprechenden Bodenseezuflüsse zu nennen. Um den zukünftigen Herausforderungen der Wasserwirtschaft, des vorsorgenden Gewässerschutzes und der Trinkwasserversorgung unter derartigen Rahmenbedingungen gerecht zu werden, bedarf es daher weiterhin regional/lokal abgestimmter Anstrengungen und entsprechend innovativer Forschungsaktivitäten. Es gilt, gemeinsam mögliche Defizite zu erkennen, integrale Lösungsansätze zu erarbeiten und die notwendigen Maßnahmen den sich ändernden klimatischen Rahmenbedingungen anzupassen. Diesbezüglich sind sich die Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB) sowie die durch die Arbeitsgemeinschaft Wasserwerke Bodensee-Rhein (AWBR) vertretenen Wasserversorgungsunternehmen mehr denn je ihrer Verantwortung und Verpflichtung bewusst. Sie setzen sich nicht nur für die ökologische Stabilität des Bodensees, den Ressourcenschutz und die Belange der Wasserversorgung ein, sie sind ihrer Tradition folgend auch bereit, aktiv bei entsprechenden F&E-Vorhaben mitzuwirken, die zu einer weitergehenden Aufklärung der in unserer aquatischen Umwelt zu beobachtenden Prozessabläufe beitragen. Als eingehendes Erfolgsbeispiel ist u.a. das zwischenzeitlich abgeschlossene Projekt „Bodensee Online“ (**Bild 1.1**) zu nennen, das einen Meilenstein in dem Zusammenhang mit der Entschlüsselung des „sensiblen Chaos“ der Strömungs- und Stofftransportvorgänge im Bodensee darstellt [Bodensee Online (2008), Eder (2008a), Eder (2008b), Gönner (2008), IGKB (2008b), Kempke (2008), Lang (2008a), Lang (2008b), Mehlhorn (2008), Rinke (2008), Schavan (2008), Scheuermann (2008)].

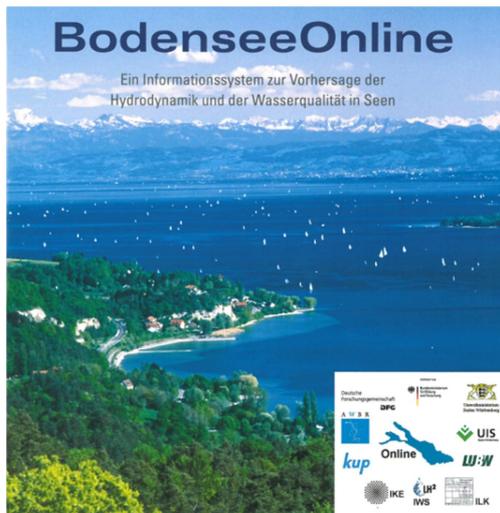


Bild 1.1:
Abgeschlossenes Forschungsvorhaben „Bodensee Online – Ein Informationssystem zur Vorhersage der Hydrodynamik und der Wasserqualität in Seen“ [Wasserwirtschaft (2008)]

Während sich die bisherigen Forschungsaktivitäten [BodenseeOnline (2008), Wasserwirtschaft (2008); IGKB (2008b), Lang (2010), AWBR (2006), Kempke (2007)] vorrangig auf die grundsätzliche Entwicklung eines Modell-Instrumentariums zur Beschreibung und Vorhersage von kurzfristigen Strömungs-, Stofftransport- und Umsetzungsprozessen konzentrierten, stand bzw. steht bei dem F&E-Projekt „BodenseeKlima“ [Bardossy (2012), Frassl (2012)] sowie bei dem von der IGKB und der AWBR initiierten F&E-Verbundvorhaben

„Klimawandel am Bodensee, KlimBo“

schwerpunktmäßig die Quantifizierung von längerfristig im Bodensee ablaufenden Vorgängen im Mittelpunkt des Interesses [IGKB (2011b), IGKB (2011c), LUBW (2011a, 2011b), Nagler (2011)]. Gesamtziel dabei ist es, bis Mitte 2014 weiterführende Erkenntnisse aufzuzeigen, mit denen die zu erwartenden Auswirkungen und Folgen des Klimawandels auf die hydrodynamischen, biologischen und physikalisch/chemischen Wechselwirkungen charakterisiert und beurteilt werden können. Im Rahmen einer interdisziplinären Zusammenarbeit bzw. eines regelmäßigen Erfahrungsaustausches zwischen den im Internationalen Kooperationsnetzwerk Bodensee (IKNB) zusammengeschlossenen Institutionen

- Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB),
- Arbeitsgemeinschaft Wasserwerke Bodensee-Rhein (AWBR),
- Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW),
- Universität Stuttgart, Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung (IWS),
- Universität Konstanz, Limnologisches Institut (LIK)

und

- dem Bundesamt für Umwelt, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (BAFU),
- dem Amt für Umwelt und Lebensmittelsicherheit des Landes Vorarlberg (AUL),
- der eidgenössischen Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG),
- dem Ingenieurbüro Prof. Kobus und Partner GmbH (kup),
- dem DVGW-Technologiezentrum Karlsruhe (TZW) sowie
- dem Zweckverband Bodensee-Wasserversorgung (BWV)

ist geplant, hierbei neue Wege zu beschreiten und Prognosen abzuleiten, die im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtungsweise eine modelltheoretische Beschreibung der potenziellen Auswirkungen von verschiedenen Klimaszenarien erlauben [Schick (2013a), Schick (2013b)]. Vor allem wurden bzw. sollen dabei folgende Arbeitsschwerpunkte/Aspekte eingehend berücksichtigt werden:

- Modellierung und Downscaling von räumlich und zeitlich hochauflösenden Temperatur- und Windfeldern
- Entwicklung eines „Wettergenerators“ auf der Basis statistischer Kenngrößen
- Risikobewertung klimatischer Einflüsse auf die Trinkwasserversorgung (Literaturrecherche)
- Einfluss der klimatischen und hydrologischen Entwicklungen im Einzugsgebiet auf den Bodensee
- Messkampagnen und Modelluntersuchungen zu Klimaeinflüssen auf Wasseraustauschprozesse und Wasserqualität
- Modellierungen hydrodynamischer Prozesse in der Flachwasserzone
- Modelluntersuchungen zum Wärmehaushalt [Hunziker (2011)] und zu Auswirkungen von Wärmenutzungen im Bodensee

1.2 Zielsetzung

Speziell die im Rahmen des Werkvertrages ISF-0415.1/BWV-KlimBo vom 29.06.2011 zwischen der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) und dem Zweckverband Bodensee-Wasserversorgung (BWV) erstellte Literaturstudie

„Risikobewertung klimatischer Einflüsse auf die
Trinkwasserversorgung aus dem Bodensee“

zielte darauf ab, die aus den klimatischen Veränderungen resultierenden Auswirkungen und Folgen auf die Wasserversorgung kohärent aufzuzeigen und zu analysieren. Unter Berücksichtigung der Unwägbarkeiten, die u.a. in dem zu betrachtenden Zeithorizont bis 2050 bzw. 2100 und den Unsicherheiten der Klimamodellierung begründet sind, sollten dabei am Beispiel des Bodensees und dessen Einzugs- und Trinkwasserversorgungsgebietes

- kritische Punkte und Wissensdefizite identifiziert,
- im Sinne einer Vulnerabilitätsabschätzung bzw. eines Risikomanagements die relevanten Störgrößen im System „Trinkwasserversorgung und Klimawandel“ konkretisiert, priorisiert und beurteilt sowie
- integrale Lösungsansätze im Hinblick auf die damit verbundenen Belange der Trinkwassergewinnung, -aufbereitung und -verteilung erarbeitet

werden. Als Diskussionsgrundlage und Orientierungshilfe kann der vorliegende Bericht somit wesentlich dazu beitragen,

- die betroffenen Entscheidungsträger verstärkt für das Thema „Klimaveränderung“ zu sensibilisieren,
- ihre Wahrnehmung und Aufmerksamkeit für die damit verbundenen Chancen und Risiken zu stärken sowie
- ihre zukünftige Verhaltensweisen entsprechend auszurichten.

Im einzelnen wurden eine Vielzahl an klimarelevanten Fragestellungen und Einflussfaktoren berücksichtigt. In der nachfolgenden Übersicht sind beispielhaft einige relevante Aspekte zusammengestellt.

- **Meteorologische und hydrologische Rahmenbedingungen im Einzugs- und Wasserversorgungsgebiet**
 - ✓ Welche meteorologischen und hydrologischen Auswirkungen wurden im Einzugsgebiet bzw. in der Bodenseeregion/Süddeutschland bereits beobachtet bzw. welche Rahmenbedingungen sind zukünftig zu erwarten?
 - ✓ Wie wirken sich die zu erwartenden Extremereignisse sowie die jahreszeitlich schwankenden Abflussmengen der Zuflüsse auf die Vorgänge im Bodensee aus?
 - ✓ Ist mit klimabedingten Änderungen der Grundwasserneubildung und jahreszeitlichen Schwankungen der Grundwasserstände im Einzugsgebiet des Bodensees bzw. im Wasserversorgungsgebiet zu rechnen?
- **Hydrodynamische Rahmenbedingungen im Bodensee**
 - ✓ Wie verändert sich bei zunehmender Wassertemperatur das jahreszeitliche Schichtungs- und Durchmischungsverhalten des Bodensees?
 - ✓ Welche Auswirkungen sind aufgrund sich ändernder Abfluss- und Einschichtungsverhältnissen der Zuflüsse und ggf. Abwassereinleitungen hinsichtlich der hydrodynamischen Rahmenbedingungen im Bodensee zu erwarten?
 - ✓ Wie wirkt sich eine denkbare Änderung der vertikalen und horizontalen Strömungen im Bodensee speziell auf die hydraulischen Verhältnisse im Bereich der Entnahmetiefen aus?
- **Beschaffenheit des Bodenseewassers**
 - ✓ Ist eine klimabedingte Aufkonzentrierung von Nähr- und Spurenstoffen im Mündungsbereich bzw. in der Flachwasserzone zukünftig denkbar?
 - ✓ Inwieweit ist eine Änderung der Beschaffenheit des Bodenseewassers im Pelagial aufgrund der zu erwartenden Verringerung an „unbelastetem“ Gletscherschmelzwasser und des zunehmenden Anteils an Wasser aus den anthropogen beeinflussten Zuflüssen vorstellbar?
 - ✓ Ist infolge klimabedingter Änderungen vermehrt mit einem Auftreten an pathogenen Mikroorganismen im Bodensee zu rechnen (z.B. bei Starkniederschlägen) und wie weit wird ihre Ausbreitung und Verteilung auch in tieferen Wasserschichten begünstigt?
 - ✓ Mit welchen Auswirkungen/Folgen ist bei einer möglichen Änderung der Einschichtungstiefen der Zuflüsse auf die Wasserbeschaffenheit in der Freiwasserzone bzw. speziell in 40 bis 60 m Tiefe (Entnahmebereich der WVU) zu rechnen?

- ✓ Sind ggf. die Aufbereitungsverfahren an die zukünftig zu erwartenden Rahmenbedingungen anzupassen?
- ✓ Sind zukünftig verstärkt Aufkeimungen bei der Trinkwasserverteilung zu befürchten?
- **Aquatische Biotope und Lebensgemeinschaften**
 - ✓ Sind klimabedingte Veränderungen innerhalb der aquatischen Biotope und Biozöosen für die ökologischen Vorgänge im Bodensee sowie für die Trinkwasserversorgung relevant?
 - ✓ Wie wirkt sich eine Temperaturerhöhung in den oberflächennahen Wasserschichten auf die Zusammensetzung, die Wachstumsphase und deren zeitliche Abfolge bei Phyto- und Zooplankton aus?
 - ✓ Ist zukünftig vermehrt mit der Bildung von algenbürtigen Geruchs- und Geschmacksstoffen bzw. der unerwünschten Freisetzung von bakteriellen Exo- und Endotoxinen zu rechnen?
 - ✓ Können durch den Eintrag von aquatischen Neozoen potenzielle Risiken für die Wasserversorgung resultieren und wenn ja, welche? (u.a. Anlagerung/Aufwuchs von Muscheln an Entnahmeverrichtungen)?
 - ✓ Sind durch die klimabedingten Veränderungen der Artenpopulation (z.B. Einschleppen von „neuen“ Krankheitserregern) gesundheitliche Gefahren für den Menschen zu besorgen?
- **Bio-/chemische Prozessabläufe**
 - ✓ Sind für die temperaturabhängigen bio-/chemischen Prozessabläufen im Bodensee (z.B. biogene Calcitsättigung) die zu erwartenden klimabedingten Veränderungen relevant?
 - ✓ Inwieweit werden im Falle einer erhöhten Wassertemperatur ggf. biologische Abbauvorgänge von Nähr- und Spurenstoffen begünstigt?
- **Milieubedingungen Seebodennähe**
 - ✓ Inwieweit ist eine verstärkte Rücklösung von Spurenstoffen und Schwermetallen aus dem Sediment bei denkbarer Änderung der Milieubedingungen in den bodennahen Wasserschichten (aerob - anaerobe Verhältnisse) zu erwarten?
 - ✓ Welche Spurenstoffe und Schwermetalle sind im Zusammenhang mit einer möglichen Remobilisierung für die Wasserversorgung besonders kritisch zu betrachten?
 - ✓ Wie wirken sich Extremereignisse (Hochwasser, Starkregen,...) auf die Aufwirbelung und Verfrachtung von Sediment aus, welche Bereiche des Seebodens sind davon vorrangig betroffen und inwieweit ist mit erhöhten Trübungen im Bereich der Entnahmetiefe zu rechnen?
- **Eintrag, Transport und Austauschprozesse unerwünschter Stoffe in/aus dem Bodensee**
 - ✓ Inwieweit lässt sich eine klimabedingte Änderung des Eintrags/Austrags von unerwünschten Stoffen (z.B. anthropogene Spurenstoffe) in/aus dem Bodensee qualifizieren bzw. quantifizieren?
 - ✓ Welche Risiken und potenziellen Gefährdungen gehen von einem atmosphärischen, punktuellen und diffusen Eintrag von Fest-, Nähr- und Spurenstoffen aus (z.B. erhöhte Luftverschmutzung bei anhaltenden Trockenperioden, Abschwemmungen von landwirtschaftlich genutzten Flächen, Eintrag von ungenügend behandeltem Abwasser wegen Überlastung von Kläranlagen im Falle von Starkregenereignissen,...)?
 - ✓ Wie wirken sich die bei Starkregen- und Hochwasserereignissen verstärkt zu erwartenden Einträge von Treibholz auf den Bodensee aus?
- **Anthropogene Maßnahmen (Hochwasserschutz und Energiegewinnung)**
 - ✓ Wie wirken sich die zukünftig geplanten Hochwasserschutzmaßnahmen auf die Wasserqualität des Bodensees aus?
 - ✓ Ist durch eine ggf. erforderliche Änderung der Schwallbewirtschaftung durch die im Alpenraum vorhandenen Wasserkraftwerke ein erhöhter Schwebstoffeintrag in den Bodensee zu erwarten?
- **Technische Aspekte**
 - ✓ Mit welchen Folgen ist hinsichtlich des Betriebs der technischen Anlagen von Wasserversorgungsunternehmen bei sich ändernden meteorologischen und hydrologischen Rahmenbedingungen (z.B. saisonale und langfristige Änderung der Seewasserstände) zu rechnen?

- ✓ Welche Chancen und Risiken sind damit für die Wasserversorgungsunternehmen verbunden?
 - ✓ Sind mittel- bis langfristig Anpassungen von technischen Anlagenkomponenten an den zukünftigen Grund- und Spitzenbedarf/-abgaben erforderlich?
 - ✓ Welche Aufbereitungsverfahren sind zukünftig erforderlich, um den mikrobiologischen bzw. physikalisch/chemischen Anforderungen an die Beschaffenheit des Trinkwasser gerecht zu werden? Ist eine Optimierung der bestehenden Aufbereitungsverfahren bzw. der Einsatz innovativer Technologien erforderlich?
 - ✓ Sind aufgrund klimatischer Einflüsse technische Maßnahmen im Verteilsystem notwendig (z.B. verstärkter Wechsel von feuchtem oder trockenem Untergrund, Schäden an Bauwerken und Leitungen, Vergrößerung des Speichervolumens wegen Spitzenbedarf,...)
 - ✓ Sind wegen des Einflusses von Klimaveränderungen auf sozio-ökologische Gegebenheiten auch Auswirkungen auf die Trinkwasserversorgung zu befürchten?
 - ✓ Sind aufgrund klimabedingter Änderungen personelle und finanzielle Anpassungen bei den Wasserversorgungsunternehmen vorzunehmen?
- **Sozio-ökonomische Aspekte**
 - ✓ Welche Auswirkungen hat die Klimaänderung auf das menschliche Wohlbefinden und die Gesundheit?
 - ✓ Inwieweit können Mitarbeiter der Wasserversorgungsunternehmen als Folge der Unwetter direkt betroffen sein?
 - ✓ Ist mit einer verstärkten Ausbreitung von endemischen Krankheitserregern bzw. die Ansiedelung von bislang nicht heimischen humanpathogenen Schädlingen zu rechnen?
 - ✓ Wie wirkt sich die Klimaänderung und deren Folgen monetär auf die Wasserversorgungsunternehmen aus?
 - ✓ Welche finanziellen Zusatzbelastungen sind zu erwarten?
 - ✓ Wieviel ist uns hygienisch einwandfreies Trinkwasser wert, das jederzeit in ausreichender Menge und Druck bis an den Zapfhahn des Verbrauchers geliefert wird?

Um die daraus abgeleiteten Chancen und Risiken sowie die Konsequenzen und Handlungsempfehlungen für die Wasserversorgungsunternehmen auf den jeweiligen Anwendungsfall übertragen zu können, sind jedoch vor einer konkreten Umsetzung der geplanten Maßnahmen die aufgezeigten Überlegungen stets kritisch zu überprüfen und ggf. an die vorgegebenen Rahmenbedingungen anzupassen.

2.0 Stand des Wissens

Von der Wetter- und Klimaforschung über die Beobachtungen/Ursachen der globalen Klimaveränderung bis hin zur aktuellen Klimapolitik

2.1 Allgemeines

Bei den Wechselwirkungen, die das aktuelle Wettergeschehen und das Klima prägen, handelt es sich in physikalisch/chemischer Hinsicht um äußerst komplexe und heterogene Prozesse. Um die dabei stattfindenden Vorgänge qualitativ beschreiben und beurteilen zu können, sind zunächst die allgemeinen Grundlagen der Wetterbeobachtung sowie die Erkenntnisse aus der Klimaforschung zu berücksichtigen (Kap. 2.2). Da darüber hinaus der Kenntnisstand über die Ursachen des globalen Klimawandels und die damit verbundenen Auswirkungen eine weitere Voraussetzung für das Verständnis der in der Bodenseeregion beobachteten Effekte darstellt, wird anschließend auf die aktuellen Wetterphänomene, die Beeinflussung des Klimas durch den Menschen sowie auf die zu erwartende Klimaentwicklungen eingegangen (Kap. 2.3). Eine kurze Darstellung ausgewählter internationaler und nationaler Strategien zur Klimapolitik rundet den Überblick über den Stand des Wissens ab (Kap. 2.4). Trotz sorgfältiger Recherche können jedoch aufgrund der Vielzahl an Publikationen und der Fülle bzw. Vielfalt der Einschätzungen nicht alle Belange in den nachfolgenden Ausführungen bis ins Detail dargestellt werden. Auch erhebt die Zusammenfassung im Sinne einer Standortbestimmung keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sie stellt vielmehr eine Auswahl an Aspekten dar, die im Hinblick auf die Zielsetzung der vorliegenden Literaturstudie von Bedeutung sind.

2.2 Grundlagen der Wetter- und Klimaforschung

2.2.1 Historie

Die heutige Wissenschaft der Meteorologie¹ geht auf Aristoteles zurück. Um 350 schrieb er sein Buch „Meteorologica“, das über 1000 Jahre als Standardwerk der Meteorologie diente. Er schilderte darin seine Beobachtungen des Wetters und der Kometen.

¹ Die Bezeichnung „Meteorologie“ kommt aus dem Griechischen und wurde von „Meteros“ abgeleitet, was „in der Luft schwebend“ bedeutet [Busch (2008)]

Bis zum Mittelalter bestand somit die Wetterkunde aus reinen Beschreibungen und überlieferten Kenntnissen. Mit der Erfindung des Thermometers und des Barometers Anfang bzw. Mitte des 17. Jahrhunderts wuchs dann auch die Erkenntnis, dass das Wetter von globalen Einflüssen abhängt, die sich nicht nur am Boden, sondern vor allem großräumig in der Erdatmosphäre abspielen. Die Seefahrt war darüber hinaus die Voraussetzung dafür, dass ein weltweites Netz von Beobachtungsstationen aufgebaut werden konnte. Der Datenaustausch dauerte aber noch Wochen, wenn nicht sogar Monate. Erst die Erfindung des Morse-Telegraphen 1832 gestattete es, aktuelle Wetterdaten verhältnismäßig schnell auszutauschen und somit erstmals „tagesaktuelle“ Wetterkarten und grobe „Wettervorhersagen“ zu erstellen. Der Erkenntnisgewinn konnte stetig erweitert werden. Als Beispiele lassen sich u.a. die Beobachtungen einzelner Wetterphänomene im Zusammenhang mit der Entstehung von Zyklo- nen durch aufeinander einwirkende Luftmassen oder die Entdeckung des Jetstreams im Rahmen der Erforschung der höheren Atmosphäre mit Radiosonden Anfang/Mitte des 20. Jahrhunderts nennen. Doch erst die Entwicklung von Rechenanlagen und Computern ab 1950 ermöglichte es, die komplexen Wechselwirkungen der Atmosphäre zunehmend auch auf der Basis von wissenschaftlichen Theorien (z.B. Hydro- dynamik, Thermodynamik, Physik, Chemie,...) zu beschreiben. Weitere „Meilenstei- ne“ folgten: beispielsweise wurde im Jahre 1960 der erste Weltraumsatellit (TIROS) und 1977 der erste europäische Wettersatellit, die geostationäre METEOSAT in den Orbit befördert. Ebenfalls 1977 erfolgte die Gründung des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersagen. Heute sind die Radar- und Satellitenbeobach- tungen, die Luftbildauswertungen, die bodennahen Wetterstationen sowie die nume- rischen Modellierungen in den Bereichen der Wettervorhersage (**Bild 2.1**) sowie der theoretischen, experimentellen und angewandten Meteorologie nicht mehr wegzu- denken [Busch (2008)].

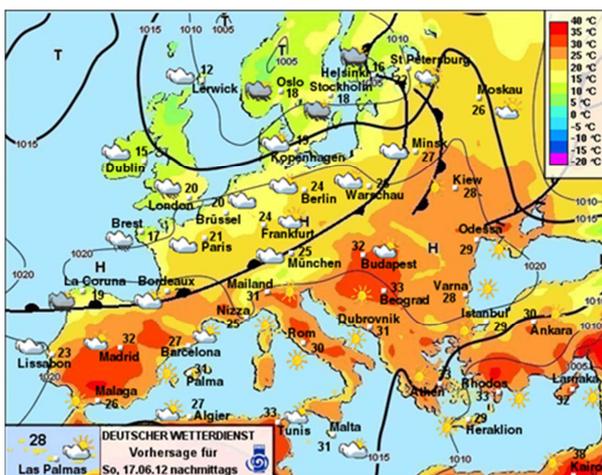


Bild 2.1:
*Typische Wetterkarte, die täglich
aktuell in den Medien veröffent-
licht werden [www.wetterdienst.de
(2012)]*

Begriffsdefinitionen „Wetter“ und „Klima“

[www.zamg.ac.at (2012), www.wiki.bildungsserver.de (2013), www.wikipedia.de (2013)]

Die Begriffe „Wetter“ und „Klima“ werden in der Diskussion der breiten Öffentlichkeit oft verwechselt oder fälschlicherweise gleichbedeutet verwendet.

Im wissenschaftlichen Sinne wird als „Wetter“ der augenscheinliche wahrnehmbare und spürbare, kurzfristige Zustand der Atmosphäre an einem ausgewählten regional/lokal begrenzten Ort bezeichnet. Das aktuelle Wettergeschehen wird hierbei vor allem durch groß- und kleinräumige Tief- oder Hochdruckgebiete „angetrieben“ und spielt sich in Zeitskalen von Stunden bis Tagen ab. In den Medien wird das „Wetter“ im Rahmen von Wetterkarten und Vorhersagen durch Parameter wie Sonnenschein, Temperatur, Niederschlag und Windverhältnisse charakterisiert.

Hingegen wird unter dem Begriff „Klima“ die quantitative Beschreibung aller in der Atmosphäre, Hydrosphäre, Cryosphäre, Lithosphäre und Biosphäre stattfindenden Prozessabläufe innerhalb eines hinreichend langen Bezugszeitraumes definiert. Dieser kann sich von Jahrzehnten bis hin zu erdgeschichtlichen Zeitskalen erstrecken. Als externe Anregungs- bzw. Antriebsfaktoren spielen neben natürlichen Vorgängen (z.B. Dauer und Intensität der Sonneneinstrahlung, Vulkanismus) vor allem anthropogene Einflüsse (z.B. Emissionen von Treibhausgasen) in zunehmendem Maße eine große Rolle. Die Quantifizierung der zeitlichen und örtlichen Häufigkeitsverteilung der Gesamtheit aller klimabestimmende Zustände erfolgt über physikalisch/chemisch messbare Größen wie z.B. Lufttemperatur, Strahlungsdauer, Niederschlagsmenge, Bodenfeuchte, Grundwasserneubildung oder Verdunstung. Um wissenschaftlich ableitbare Aussagen machen zu können, sind im Zusammenhang mit der Datenauswertung und -beurteilung jedoch nicht nur der jeweils resultierende Mittelwert sondern vielmehr typische Abweichungen (Schwankungsbereich), Extremwerte oder andere statistisch relevante Größen von entscheidender Bedeutung. Während die Wettervorhersage quasi direkt durch Beobachtungen überprüft werden kann, lässt sich die Veränderung zweier auf statistischen Aussagewahrscheinlichkeiten beruhenden Klimazuständen lediglich über einen längeren Zeitraum (mindestens 30 Jahre) miteinander vergleichen.

Wie die Wettervorhersage war auch die Klimaforschung bis ca. 1950/60 weitgehend eine beschreibende Wissenschaft, in der die vergangenen Klimazustände anhand von Beobachtungen, historischen Aufzeichnungen (z.B. Wetter, Ernteerträge,...) sowie von sogenannten Proxies (z.B. Wachstumsraten von Bäumen, ...) rekonstruiert wurden. Mit fortschreitender Entwicklung von entsprechenden Analysemethoden wurde es zudem möglich, über den „Umweg“ von Umweltsystemen wie z.B. Eisbohrkerne, Gletscherstände, Meeres- und Seesedimente, Jahresringe von Bäumen oder historische Funde klimarelevante Daten und die Veränderung der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre über die letzten 800.000 Jahre messtechnisch zu quantifizieren.

Die ersten Klimasimulationen entstanden aus den Modellen, die für die Wettervorhersage seit etwa 1950 entwickelt wurden. Hierbei wurden erstmals zur Berechnung der Strömungen in der Atmosphäre auch die Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie formuliert, ergänzt durch die Zustandsgleichung für ein ideales Gas. Da es sich jedoch bei Wechselwirkungen in der Atmosphäre um nicht-lineare

Systeme handelt, war der Beschreibung des Klimas sehr schnell Grenzen gesetzt. 1963 wurde erkannt, dass beispielsweise großskalige Bewegungsmuster in der Atmosphäre zu einem chaotischem Verhalten führen können. Obwohl zu jedem Zeitpunkt die Tendenz des Systems durch partielle Differentialgleichungen berechnet werden kann, führen kleinste Unterschiede in Anfangsbedingungen bereits nach kurzer Zeit zu völlig unterschiedlichen Zuständen. Eine Skalierung des Endzustandes als Funktionen der Anfangszustände ist somit nicht mehr möglich. Diese Erkenntnis ist damals unter dem Begriff "Schmetterlingseffekt" populär geworden.

Mit der stetigen Weiterentwicklung der Computertechnologien war es ab den 70er/80er Jahre des vorherigen Jahrhunderts sodann möglich, zunehmend global oder regional ausgerichtete Klimamodelle zu entwickeln, die sowohl den mathematischen Anforderungen als auch den im jeweiligen Bilanzraum stattfindenden physikalisch/chemisch Prozessabläufen immer mehr gerecht wurden. Ab 1990 konnten zudem weitere Klimasystemkomponenten in den Modellen aufgenommen (**Bild 2.2**) und dadurch die Realität immer besser abgebildet werden. Zwischenzeitlich umfasst die Klimaforschung nahezu alle Gebiete der

- Physik (Thermodynamik, Fluidodynamik, Atmosphärenphysik, Ozeanographie),
- Chemie (organische, anorganische, und Oberflächenchemie, Reaktionskinetik),
- Geochemie (Kreisläufe von Kohlenstoff, Stickstoff, etc.) und der
- Biologie (Vegetationsdynamik, Ökologie).

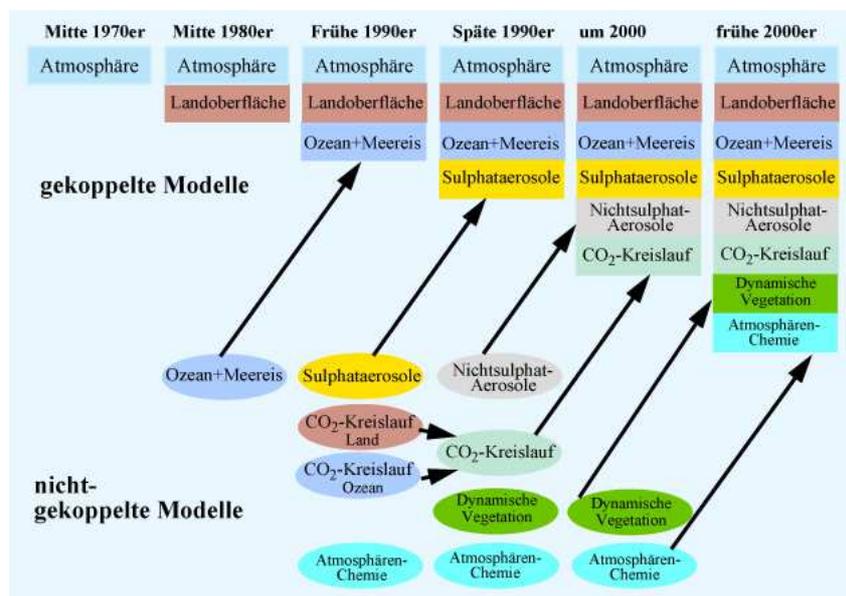


Bild 2.2:
Chronologie der Klimamodellentwicklung [Stocker (2008)]
 Die Berücksichtigung verschiedener neuer Klimakomponenten (z.B. Kohlenstoffkreislauf, Vegetation) führt zu einer drastischen Erhöhung der Komplexität und der benötigten Computerressourcen. Sie stellt aber eine notwendige Entwicklung dar, um die Wechselwirkung der verschiedenen Prozesse quantitativ so zu simulieren, dass die in der Natur beobachteten Vorgänge zumindest näherungsweise abgebildet werden können

Auf die Klimamodellierung als „Königdisziplin der Klimaforschung“ wird nachfolgend eingegangen [Stocker (2008)].

2.2.2 Möglichkeiten und Grenzen der Klimamodellierung

2.2.2.1 Globale Klimamodelle (GCM)

Um die Klimaentwicklungen sowohl in der Vergangenheit als auch in der Zukunft abschätzen und bewerten zu können, spielen heutzutage globale und regionale Klimamodelle eine bedeutende Rolle. Allen Klimamodellen ist hierbei gemeinsam, dass auf der Grundlage von

- physikalisch/chemischen/biologischen Gesetzmäßigkeiten (dynamische Modelle) oder
- statistisch abgesicherten Zusammenhängen zwischen den beobachteten Großwetterlagen und dem kleinräumigen Wettergeschehen (statische Modelle)

versucht wird, das Zusammenwirken der einzelnen Komponenten des komplexen Klimasystems und deren Veränderungsprozesse numerisch, d.h. durch mathematische Beziehungen abzubilden und über die Verteilung der häufigsten, mittleren und extremen Wetterzustände die zeitliche und räumliche Varianz einer Vielzahl an relevanten Klimakennzahlen abzuleiten. Bei Anwendung von globalen dynamischen Klimamodellen ist dabei vor allem die korrekte Approximation der externen Antriebsmechanismen, internen Einflussgrößen sowie der positiven/negativen Rückkopplungseffekte in Form eines gekoppelten Systems von algebraischen sowie nicht-linearen, partiellen und gewöhnlichen Differenzialgleichungen (**Bild 2.3**) von Bedeutung.

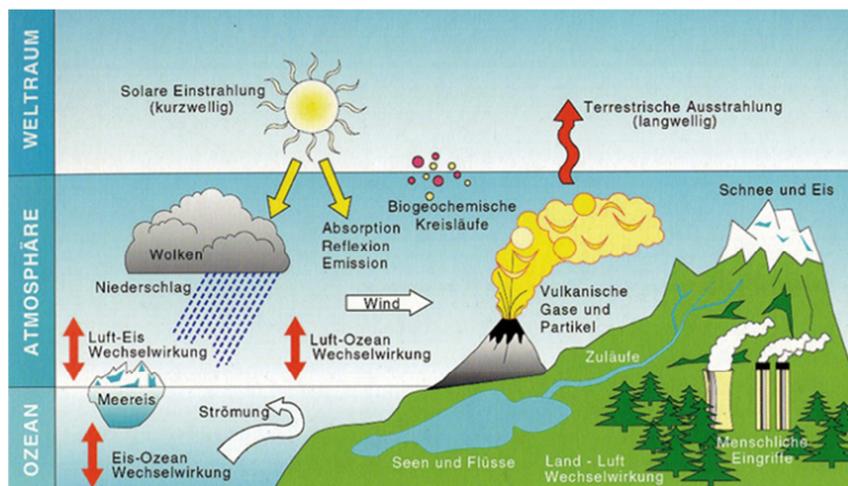


Bild 2.3:
Die wichtigsten Komponenten des weltweiten Klimasystems [Cubasch (2006), KLIWA Heft 4 (2004)]

- externe Antriebsmechanismen (z.B. Sonnenaktivität, Vulkanismus, Konzentration der Treibhausgase, menschliche Einflüsse,...)
- interne Einflussgrößen (z.B. Energietransport durch Meeresströmungen wie Golfstrom, El Nino,...)
- positive/negative Rückkopplungseffekte (z.B. Reflexion der eingestrahlten Sonnenenergie auf unterschiedlichen Landoberflächen (Eis/Schnee, Landmasse, Ozeane), Einfluss der Wolken, temperaturabhängige Löslichkeit von Gasen in aquatischen Systemen (CO₂-Aufnahme im Ozean), ...)

I.d.R. werden hierzu verschiedene Modellvorstellungen miteinander verbunden, die jeweils einzelne Wechselwirkungen und Vorgänge innerhalb der klimarelevanten Kompartimente einschließlich der anthropogenen Einflüsse näherungsweise beschreiben (**Bild 2.4**) [Cubasch (2006)].

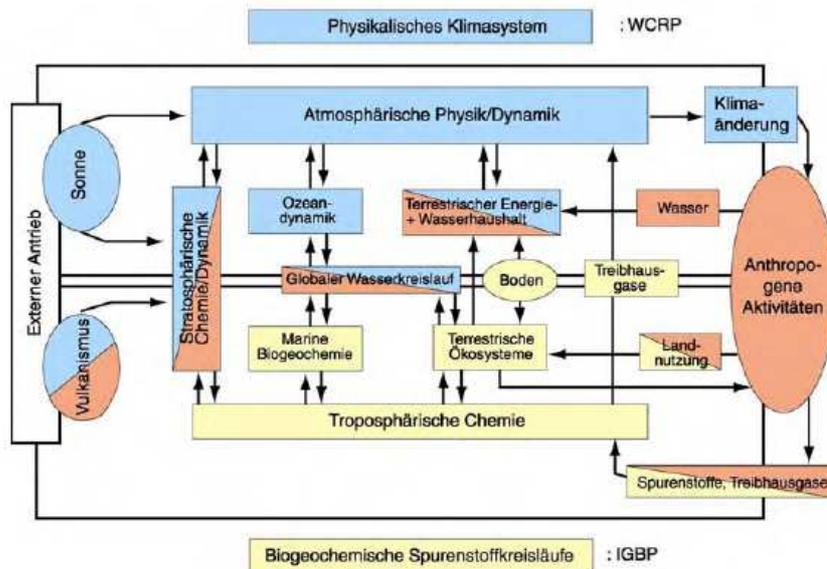


Bild 2.4:
Schematische Darstellung eines Modellsystems „Erde“
[Cubasch (2006), KLIWA Heft 4 (2004)]
Im Idealfall ist dieses gekoppelte, aus verschiedenen Teilmodulen zusammengesetzte Klimamodell so aufgebaut, dass alle klimarelevanten Prozessabläufe auf der Erde weitgehend „naturgetreu“ erfasst werden können

Um sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Ausdehnung die globale Klimaentwicklung simulieren zu können, ist es im Rahmen der mathematischen Umsetzung darüber hinaus erforderlich, über die gesamte Erde und die aquatischen Systeme (z.B. Ozeane) ein dreidimensionales Modellgitter zu legen (**Bild 2.5**).

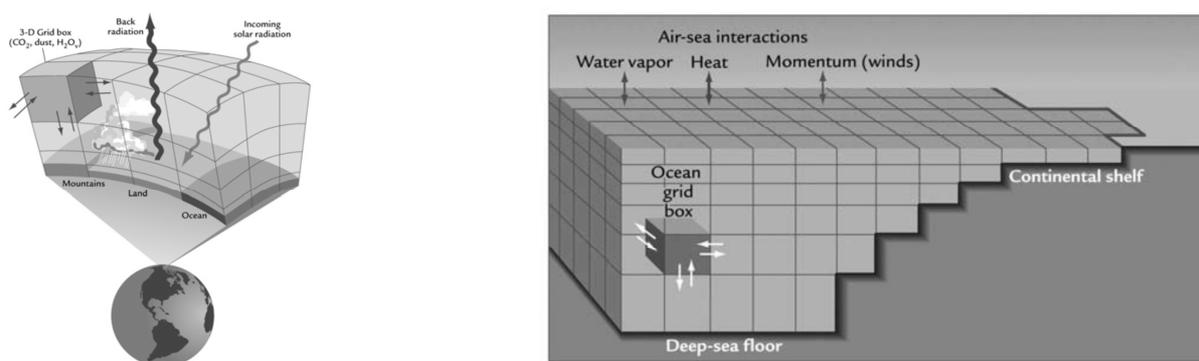


Bild 2.5:
Schematische Darstellung der Modellgitter („Boxen“) in dreidimensionalen Atmosphären- (links) und Ozeanmodellen (rechts) [Stocker (2008)]
Globale Atmosphärenmodelle erreichen aufgrund des Rechenaufwandes lediglich eine horizontale Auflösung von 250 km Rasterweite, vertikal werden bis in eine Höhe von ca. 15 km meist zwischen 10 bis 40 Schichten verwendet. Sie sind daher in ihrem räumlichen Auflösungsvermögen limitiert.

Damit ist es prinzipiell möglich, weitgehend für jeden Punkt die entsprechenden Parameterwerte wie Temperatur, Niederschlag, Wind oder die Strömungsverhältnisse hinreichend genau zu erfassen und numerisch zu simulieren. Der Abstand wie weit diese Gitterpunkte voneinander entfernt liegen (Rasterweite), wird dabei als Auflösung bezeichnet und stellt ein Maß für die räumliche Genauigkeit des Modells dar.

Wie bereits aus diesen plakativen Erörterungen hervorgeht, wird auch ohne weitere Detailkenntnisse deutlich, dass die Entwicklung eines globalen Klimamodells eines extrem hohen personellen und finanziellen Aufwandes bedarf. Da zudem an die Hardware z.T. außergewöhnliche Anforderungen gestellt werden, entwickeln und betreiben nur wenige Institutionen ihr eigenes globales Klimamodell, vielfach wird daher auf international anerkannte Entwicklungsstandards zurückgegriffen. U.a. verwendete das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) für die Berechnungen der Klimaszenarien in ihren Sachstandsberichten unterschiedliche Modelle, die stets an die neuesten Erkenntnisse angepasst werden. Viele Erkenntnisse stützen sich dabei auf das vom Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg (MPI) erarbeitete Atmosphärenmodell „ECHAM4“ bzw. „ECHAM5“ [*KLIWA Heft 9 (2006)*]. Für den 5. Sachstandsbericht der IPCC wird dessen Nachfolgemodell „ECHAM6“, das Landvegetationsmodell „JSBACG“, das globale Ozeanmodell „MPIOM“ sowie das Biogeochemiemodell „HAMOCC“ verwendet. Diese stehen allen Klimaforschern für eigene Arbeiten zur Verfügung. Ferner sind die Ergebnisse des Max-Planck-Instituts am Deutschen Klimarechenzentrum (DKRZ) für alle frei verfügbar [*Marotzke (2012)*].

2.2.2.2 Regionale Klimamodelle (RCM)

Vor dem Hintergrund, dass zwischen dem globalen und kleinräumigen Klimageschehen jedoch häufig signifikant ausgeprägte Unterschiede aufgrund geographischer/topographischer Besonderheiten (z.B. Gebirgszüge, Täler, Wasserflächen, Eisflächen...) oder meteorologisch relevanter Strukturen (u.a. Bodenarten, Vegetation, urbane Lebensräume, ...) resultieren, reichen die in ihrem räumlichen Auflösungsvermögen limitierten globalen Klimamodelle nicht aus, die regionalbezogenen Prozesse in ihrer Gesamtheit darzustellen und die Wirkung der einzelnen Einflussgrößen abzuschätzen. Um die damit verbundenen Aufgaben und die Vielzahl an offenen Fragen bearbeiten zu können, bedarf es vielmehr eines umfangreichen Spezialwissens und des Einsatzes von regionalen Klimamodellen, die an die jeweiligen Rahmenbedingungen angepasst sind. Ziel der regionalen Klimamodelle ist es dabei, für ausgewählte einzelne Regionen entsprechende Daten mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung zu ermitteln und somit die kleinräumigen Klimamuster detailliert darstellen zu können.

Im Zusammenhang mit dem sogenannten „Downscaling“ können hierzu entweder dynamische oder statistische Regionalisierungsmethoden angewandt werden, bei denen es sich vom Prinzip her um zwei grundlegend verschiedene Ansätze handelt, die nur sehr schwer miteinander zu vergleichen sind [KLIWA Heft 9 (2006), wikipedia (2012c), Kotlarski (2007), Zimmermann (2007), NKGCF (2010), UBA (2011d), www.zamg.ac.at (2013)].

- Dynamische regionale Klimamodelle basieren dabei auf den gleichen Prinzipien wie die globalen Klimamodelle. Auch bei den kleinräumigen Simulationen wird versucht, die in der Natur ablaufenden Vorgänge und Zustände anhand von physikalisch/chemischer Gesetzmäßigkeiten und parametrisierten Prozessbeschreibungen nachzubilden, ohne dass messtechnisch erfassbare Wetterdaten direkt mit in die numerischen Lösungsansätze einfließen. Die heutigen Modelle erfassen dabei i.d.R. die Abläufe in der Atmosphäre, am Boden und teilweise auch in aquatischen Systemen. Sie beziehen sich mit einer Auflösung von ca. 50 x 50 km bis minimal 10 x 10 km jedoch lediglich auf ein abgegrenztes Gebiet mit einer Kantenlänge von 1.000 bis 5.000 km. Die notwendigen zeitabhängigen „Rand- und Anfangsbedingungen“, die dem regionalen Modell die Entwicklung in den unmittelbar benachbarten Bereichen außerhalb des betrachteten Teilgebiet vorgeben, werden aus den Simulationen der übergeordneten globalen Klimamodells ermittelt (**Bild 2.6**). Die heutigen regionalen dynamischen Klimamodelle sind in der Lage, die kleinräumigen Klimaentwicklungen und -muster kontinuierlich über einen Zeitraum von mehr als 100 Jahren nachträglich oder prognostisch zu simulieren [NKGCF (2010)].

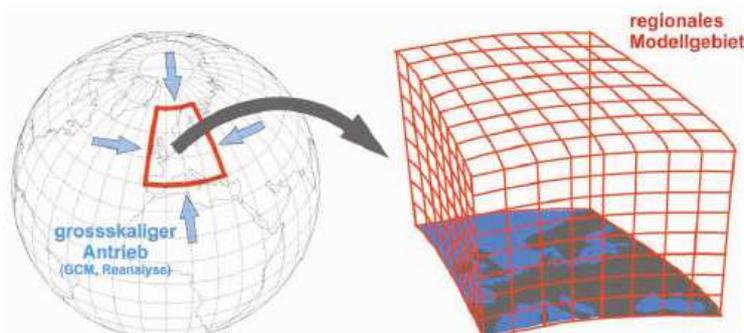


Bild 2.6:
Vom globalen zum regionalen Klimamodell (schematisch) [LUBW (2013)]

- Im Gegensatz dazu gehen die statistischen Methoden² davon aus, dass zwischen den beobachteten Häufigkeiten und Änderungen der Großwetterlagen (z.B. der großräumigen Druck- und Temperaturverteilung über dem Nordatlantik/Europa) und den Wetterentwicklungen in den betrachteten kleinräumigen Bereichen statistisch abgesicherte Zusammenhänge bestehen. Wird in erster Näherung postuliert, dass derartige Wechselwirkungen auch in Zukunft mit hoher Wahrscheinlichkeit weiterhin ihre Gültigkeit beibehalten, lassen sich unter Berücksichtigung langjähriger Messreihen in sehr hoher räumlicher Auflösung auch für die einzelnen regionalen Gebiete Aussagen über die Klimaentwicklungen und -muster ableiten. Vorteilhaft bei den statischen Verfahren ist dabei, dass bei ihrer Anwendung ein wesentlich geringerer Rechenaufwand als bei der dynamischen Vorgehensweise erforderlich ist. Es kann jedoch nicht gewährleistet werden, dass durch die für eine Referenzperiode ermittelten Parameterisierungen auch unter veränderten Klimabedingungen ihre Gültigkeit besitzen und Modellfehler entsprechend kompensiert werden [NKGCF (2010)].

² auch wetterlagenorientierte Regionalisierungsmethoden genannt

Zur Darstellung und Beurteilung der regionalbezogenen Klimaentwicklungen und -szenarien wurden bzw. werden beispielsweise im Rahmen des KLIWA-Projektes ein dynamisches Regionalmodell (REMO, Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg), ein statistisch-dynamisches Verfahren (GROWEL-Modell, Fa. Meteo-Research) und eine statistische Berechnungsmethode (PIK-Modell, Potsdam Institut für Klimafolgenforschung) herangezogen (**Bild 2.7**).

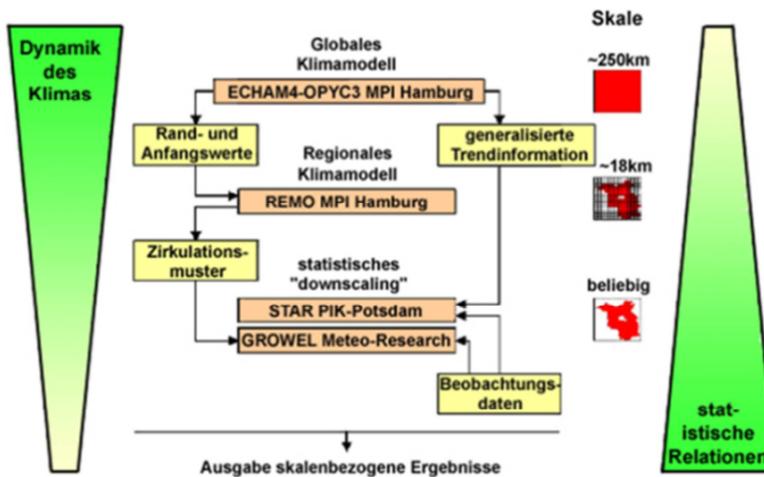


Bild 2.7:
„Downscaling“ bzw. Anwendung verschiedener Regionalisierungsmethoden (Beispiele) im Rahmen des KLIWA-Projektes [KLIWA 9 (2006)]

Ferner stehen den Klimaforschern noch weitere Regionalmodelle wie z.B. „CLM“, „STAR“ oder Wetterreg“ zur Verfügung. Allen gemeinsam ist, dass sie hiermit die Ergebnisse der globalen Klimamodellierung für Deutschland auf regionaler Ebene konkretisieren können.

Um speziell die Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt abschätzen zu können, werden sogenannte Wasserhaushaltsmodelle wie beispielsweise „LARSIM“ eingesetzt. Sie sind umfassend einsetzbare Bearbeitungsinstrumente, mit denen unter Berücksichtigung digitaler Systemdaten (Höhenmodell, vektorisiertes Flussnetz, Satellitenklassifizierung der Landnutzung, Feldkapazitäten der Böden) Teilprozesse in der Hydrologie mit einer rasterbasierten Flächenauflösung von 1 x 1 km beschrieben werden können (**Bild 2.8**).

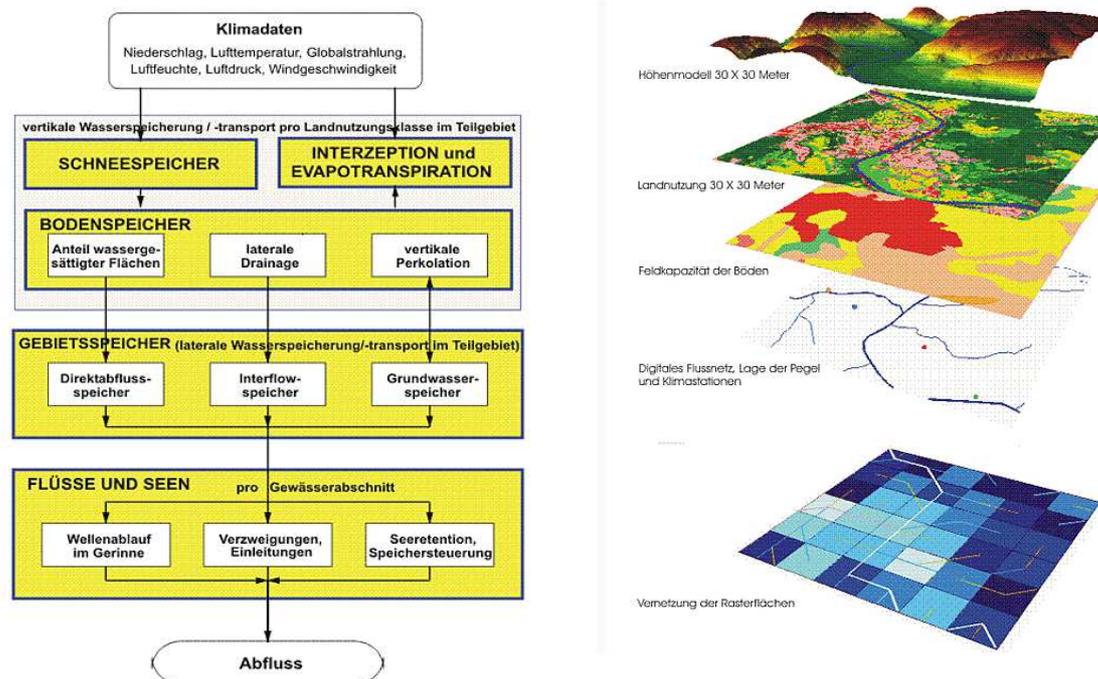


Bild 2.8:
Modellschema „LARSIM, (Large Area Runoff Simulation Model)
 [KLIWA Heft 10 (2007), KLIWA-Info (2012)]

2.2.2.3 Identifikation und Umgang mit Unsicherheiten

In den letzten Jahren wurden die computerunterstützten Simulationsmethoden zunehmend verbessert, so dass

- die in der Vergangenheit stattgefundenen bzw. die gegenwärtigen Prozessabläufe als auch
- unter Annahme einer Vielzahl an „unbekannten“, d.h. nur abschätzbaren Rahmenbedingungen die zukünftig zu erwartenden Szenarien und die damit verbundenen Klimaprojektionen

zumindest näherungsweise und in vereinfachter Form abgebildet werden können. Trotz der stetigen Weiterentwicklungen im Bereich der Computertechnik und der Datenverarbeitung sind die heutigen Möglichkeiten der Klimamodellierung jedoch noch weit davon entfernt, die Klimaentwicklungen und -muster in ihrer gesamten Komplexität wirklichkeitsgetreu zu erfassen. Auf viele anwendungsbezogene Vergangenheits- oder Zukunftsfragen sind vielfach lediglich Vertrauens- und Wahrscheinlichkeitsabschätzungen ableitbar, die z.T. durch hohe Unsicherheiten gekennzeichnet sind und deren „Qualität“ durch verschiedene Ansätze beschrieben werden können (**Tabelle 2.1**).

Tabelle 2.1:

**Mögliche Beschreibung der Unsicherheiten gemäß eines Ansatzes der ICPP [IPCC (2007c)]
Wahrscheinlichkeitsabschätzung für die Richtigkeit
Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit**

Wahrscheinlichkeitsabschätzungen für Richtigkeit	
<i>sehr hohes Vertrauen</i>	in mindestens 9 von 10 Fällen korrekt
<i>hohes Vertrauen</i>	in etwa 8 von 10 Fällen korrekt
<i>mittleres Vertrauen</i>	in etwa 5 von 10 Fällen korrekt
<i>geringes Vertrauen</i>	in etwa 2 von 10 Fällen korrekt
<i>sehr geringes Vertrauen</i>	in weniger als 1 von 10 Fällen korrekt

Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit	
praktisch sicher	>99%
höchst wahrscheinlich	>95%
sehr wahrscheinlich	>90%
wahrscheinlich	>66%
wahrscheinlicher als nicht	>50%
etwa so wahrscheinlich wie nicht	33% bis 66%
unwahrscheinlich	<33%
sehr unwahrscheinlich	<10%
höchst unwahrscheinlich	<5%
außergewöhnlich unwahrscheinlich	<1%

Die bislang bestehenden Unsicherheiten basieren dabei vorwiegend auf folgenden Wissenslücken [Bundesregierung (2011), Lebensministerium (2011a), NKGCF (2010), Schär (2000a), Schär (2000b), Stocker (2008), Zimmermann (2007)]:

- **Defizite im Prozessverständnis der im globalen bzw. regionalen/lokalen Maßstab stattfindenden Vorgänge**

Das System „Klima“ und seine Veränderungen ist von einer großen Anzahl an natürlich und anthropogen bedingten Prozessabläufen in der Atmosphäre, Hydrosphäre, Cryosphäre, Biosphäre und auf der Landoberfläche abhängig, deren komplexen Zusammenhänge bislang nur teilweise aufgeklärt sind. Auch sind Beobachtungsdaten oft nicht detailliert genug. Eine Schwierigkeit der Beschreibung und Charakterisierung der Klimaentwicklungen besteht daher darin, dass alle relevanten Einflussgrößen und deren Wirkungsmechanismen bekannt sein müssen, um die im Klimasystem resultierenden Vorgänge anhand von Modellen quantifizieren zu können. Doch bereits kleinste interne Störungen durch sog. nichtlineare Wechselwirkungen oder Rückkopplungen können prinzipiell zu unvorhersehbaren Folgen führen. Außerdem sind externe Anregungsfaktoren (u.a. Sonnenaktivität, Vulkanismus,...), die Einflüsse der höheren CO₂-Konzentration auf die Vegetation oder die in Ozeanen stattfindenden Mischungs-, Energie- und Stofftransportvorgänge bei der Klimamodellierung zu berücksichtigen, über deren Ursachen, Wirkungsweisen und Mechanismen noch viele Fragen offen sind.

Bereits durch diese wenigen Beispiele lässt sich in nachvollbarer Weise zeigen, dass aufgrund des unzureichenden Grundlagenwissens im Prozessverständnis einschließlich deren Variabilität (räumlich/zeitliche Schwankungen), Vulnerabilität (Verwundbarkeit) und Resilienzen (Widerstands-/Anpassungsfähigkeit) die an eine wissenschaftlich fundierte Vorgehensweise ver-

bundenen Anforderungen an die Klimamodellierung nur bedingt erfüllt werden können. Zudem steigen die Unsicherheiten mit zunehmender Komplexität an. Zur Verbesserung der Wissensbasis sind daher nicht nur die vorhandenen Beobachtungssysteme systematisch weiterzuentwickeln sondern vielmehr neue aufzubauen sowie eingehende Untersuchungen durchzuführen.

- **Prinzipielle Grenzen der Vorhersagbarkeit von zukünftigen Ereignissen, u.a. hervorgerufen durch den langen Zeithorizont des Klimawandels**

Ebenso wenig wie die persönliche Zukunft oder der Aktienkurs von morgen exakt vorhersagbar ist, ist es auch nur bedingt möglich, z.B. den Zeitpunkt und die Intensität eines Vulkan- oder eines Sonnenwindausbruchs mit dem heutigen Wissensstand im Vorfeld mit absoluter Gewissheit zu prognostizieren. Auch das Klima wird durch solche unvorhersehbaren Ereignisse maßgeblich beeinflusst, sei es -wie beispielhaft erwähnt- im natürlichen System „Erde“ oder im System „Mensch“. Eine der Hauptursache der globalen Erwärmung ist u.a. der seit dem Ende des 18. Jahrhunderts starke Anstieg an anthropogen bedingten Treibhausgasen in der Erdatmosphäre. Zudem spielen sozio-ökologische Entwicklungen im Hinblick auf die zu erwartenden Auswirkungen/Folgen des Klimawandels eine bedeutende Rolle (**Bild 2.9**).

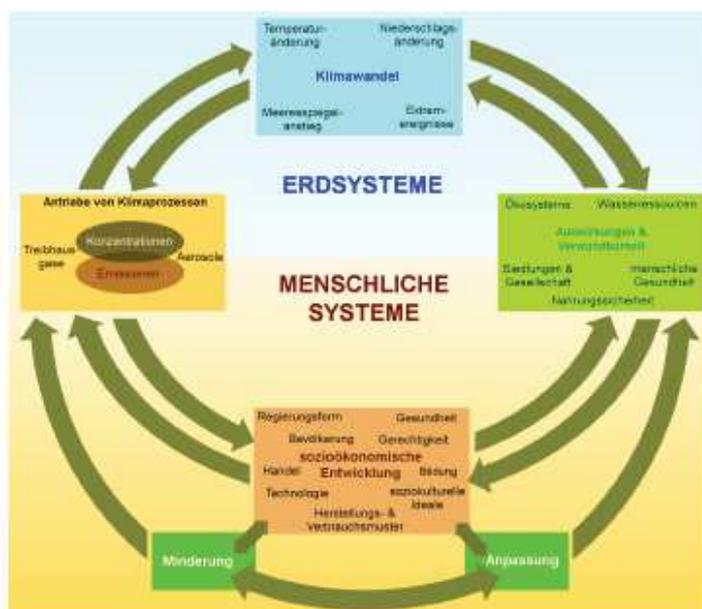


Bild 2.9:
Schematische Darstellung der natürlichen und anthropogenen Antriebe sowie deren Wechselwirkungen untereinander [IPCC (2007c)]

Unsere Lebensweise von heute bestimmt folglich das Weltklima von morgen. Da sowohl klimarelevante Naturvorgänge als auch menschliches Handeln oft anders verlaufen als erwartet, werden Klimamodellierungen stets mit z.T. erheblichen Unsicherheiten behaftet sein, die auf nicht vorhersehbare „Überraschungen“ in dem langen Zeithorizont des Klimawandels zurückzuführen sind.

- **Beschränkte Nachbildung der natürlichen und anthropogen bedingten Prozessabläufe durch Klimamodelle**

Ein Klimamodell kann wie jedes andere physikalisch/mathematische Modell lediglich eine vereinfachte Darstellung der real stattfindenden Prozessabläufe widerspiegeln. Aufgrund des mangelnden Prozessverständnisses und fehlender Grundlagendaten können niemals alle klimarelevanten Einflussgrößen und Rückkopplungsprozesse bei der Ableitung zukünftiger Klimaprojektionen berücksichtigt und in die jeweiligen Simulationsmodelle implementiert werden. Vielmehr bedarf es z.T. Annahmen, die lediglich auf groben Abschätzungen beruhen. U.U. hängen diese auch noch von ökonomischen, demographischen, technologischen und po-

litischen Parametern ab, die per se nicht exakt vorhersagbar sind. Denn niemand kennt u.a. die zukünftige Bevölkerungsentwicklung, die Veränderung des Konsumverhaltens, den Energieverbrauch, die Nutzung von Energiequellen, die technologische Entwicklung, das Ausbrechen von Kriegen usw. Darüber hinaus ist vor allem im Hinblick auf die Weiterentwicklung von bestehenden Klimamodellen und deren Validierung besondere Sorgfalt geboten. Diese kann lediglich anhand von Beobachtungen und vorhandenen Daten über das gegenwärtige und vergangene Klima vorgenommen werden. Außerdem können aber auch die Grenzen der mathematischen Modelle selbst (z.B. das eingeschränkte räumliche und zeitliche Auflösungsvermögen, negative Einflüsse der ausgewählten Netzstrukturen, numerische Instabilitäten, Einsatz von Näherungs- und Lösungsverfahren zur Berechnung der Differenzialgleichungen, Randwertprobleme,...) zu Aussagen führen, die als unsicher oder gar als nicht plausibel zu kennzeichnen sind. Auch werden die Berechnungsergebnisse umso ungenauer, je weiter der zu betrachtende bzw. zu beschreibende Zeitraum in der Zukunft liegt. Insbesondere regionale Klimamodelle sind wegen der erforderlichen Kopplung mit den globalen Klimamodellen mit z.T. hohen Unsicherheiten behaftet.

Wie die oben skizzierten Ausführungen verdeutlichen, ist die Aussagekraft der aktuellen Klimamodellierungen somit begrenzt. Vor allem die Kombination aller Unsicherheiten führt zu einer Vielzahl von möglichen Zukunftsentwicklungen mit einer enormen Spanne an möglichen Klimazuständen zum Ende des 21. Jahrhunderts. Trotz aller Schwächen und des lange zu betrachtenden Zeithorizontes dürfen die bisherigen Erkenntnisse jedoch nicht zur Verneinung des Klimawandels oder des Leistungsvermögens der Simulationsmodelle führen. Ziel zukünftiger Aktivitäten muss es vielmehr sein, die Unsicherheiten in dem Gesamtkomplex „Klimaveränderung und deren Auswirkungen/Folgen“ systematisch zu identifizieren, zu strukturieren, zu quantifizieren und wenn möglich weitgehend zu verringern [NKGCF (2010)]. Ferner gilt es, den derzeitigen Wissensstand

- als Auftrag zu weiteren Forschungsanstrengungen und zur weiteren Verbesserung der numerischen Simulationsmodelle zu nutzen sowie
- als einen integralen Bestandteil der Klimaforschung/-modellierung zur Erarbeitung der erforderlichen Vermeidungs-/Verringerungsstrategien und Anpassungsmaßnahmen in der Gesellschaft heranzuziehen.

Vor diesem Hintergrund sind daher im Umgang mit den Unsicherheiten neben der Erweiterung des Grundlagenwissens über die klimabestimmenden Prozessabläufe vor allem die sogenannten Multimodellrechnungen (Ensembleanalysen³) verstärkt weiterzuentwickeln. Ziel dabei sollte es sein, verschiedene globale und regionale Klimamodelle unter Berücksichtigung unterschiedlicher Szenarien (vgl. Kap. 2.4) in mehreren Rechenläufen miteinander zu vergleichen. Dadurch entstehen „Bandbreiten“, innerhalb deren z.B. Temperatur- und Niederschlagsveränderungen wahrscheinlich sind. Mit anderen Worten: Dadurch sollte es zumindest möglich sein, die „Wahrscheinlichkeitsverteilung“ der zu erwartenden Auswirkungen/Folgen der Klimaänderungen einschließlich deren Risiken besser abschätzen zu können.

³ Um die Auswirkungen des Klimawandels abschätzen zu können, werden heute die Ergebnisse einer Vielzahl an Szenarien Modellrechnungen berücksichtigt.

Im Falle, dass die Unsicherheiten und Ungenauigkeiten entsprechend berücksichtigt werden, stellt die Klimamodellierung gegenwärtig den bislang einzigen Lösungsansatz dar, mit dem

- die bisherigen Beobachtungen, Ursachen und Auswirkungen/Folgen der Klimaveränderungen erklärt sowie
- rationale Entscheidungen über klimapolitische Maßnahmen und erforderliche Handlungsempfehlungen für die Zukunft abgeleitet werden können.

2.3 Globale Beobachtungen, Ursachen und Auswirkungen/Folgen der Klimaveränderung

Aktuelle Wetterphänomene und langzeitliche Klimaentwicklungen

2.3.1 Globaler Klimawandel

Einer der wichtigsten Schritte unserer Menschheitsgeschichte ist die Beherrschung des Feuers. Bereits vor mehr als 1 Million Jahren nutzten es unsere Vorfahren, beispielsweise als wärmendes Lagerfeuer, das gleichzeitig auch Licht und Energie zur Zubereitung von Nahrung spendete. Im Lauf von Jahrtausenden gelang es dann der Menschheit, mit Hilfe von technischen Innovationen die Nutzung des Feuers zu perfektionieren und seine Einsatzmöglichkeiten zu erweitern. Ohne Feuer und der Verbrennung von fossilen Energieträgern -beginnend bei lokal verfügbaren Ressourcen wie Holz, Holzkohle, Torf oder Fett und seit der Industrialisierung die heute global gehandelten Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas- wäre ein „Leben der Moderne“ nicht möglich. Nur wenn ausreichend „Energie“ in Form von Strom, Kraftstoffen oder Wärme zur Verfügung steht, „funktioniert“ unsere globalisierte Welt. Doch zunehmend wächst die Einsicht, dass dies nicht das Ende der Entwicklung sein kann, da die fossilen Ressourcen nicht nur begrenzt sind und ihre Nutzung irreversibel ist, sie sind vielmehr auch für die globale Klimaveränderung verantwortlich [BAFU 2008], DPA (2007)]. Unser blauer Planet kommt ins „Schwitzen“ (**Bild 2.10**). Wie kaum ein anderes Phänomen unserer Zeit steht der „Klimawandel“ beispielhaft für die Herausforderungen einer globalisierten Welt.

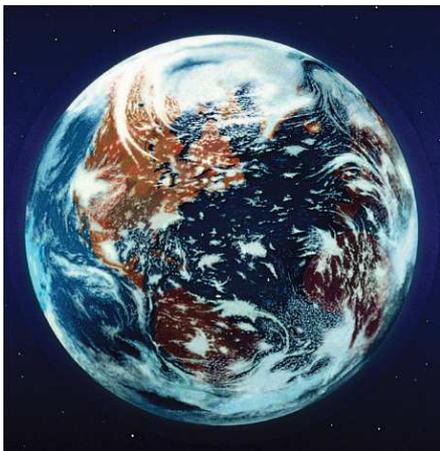


Bild 2.10:
Unser blauer Planet Erde kommt ins „Schwitzen“
[Allianz-Umweltstiftung (2007)]

Heute befassen sich eine Vielzahl an wissenschaftlich anerkannten Institutionen mit den weltweit zu beobachtenden Änderungen der Klimaentwicklung und den damit verbundene Auswirkungen/Folgen. Nachfolgend sind einige ausgewählte internationale und nationale Forschungseinrichtungen genannt, wobei die Aufzählung jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)
Das IPCC wurde 1988 vom Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UN-EP) gemeinsam mit der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) eingerichtet. Das IPCC fasst die weltweiten Forschungsergebnisse auf dem Gebiet der Klimaveränderung zusammen und bildet damit den aktuellen Stand des Wissens in der Klimatologie ab. Der vierte Sachstandsbericht wurde 2007 veröffentlicht, der fünfte wird voraussichtlich Ende 2013 erscheinen [IPCC (2001), IPCC 2007a - 2007f].
- Einen Überblick über die deutschen Aktivitäten ist in **Bild 2.11** dargestellt.
- In der Schweiz befassen sich vor allem das Bundesamt für Umwelt in Bern (BAFU), das beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung (OcCC), die Eidgenössische Technische Hochschule (ETH), das Centre for Climate System Modelling (C₂SM), die Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG), das Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz), das Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL), die Schweizer Klimaforschung (NFS Klima), der Schweizerische Verein des Gas- und Wasserfaches (SVGW) und die Universität Bern mit dem Thema „Klimawandel“ und den damit verbundenen Auswirkungen und Folgen.
- In Österreich werden u.a. wissenschaftliche Untersuchungen und Modellierungen im Auftrag des Lebensministeriums (LM), des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) oder durch die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) und die Universität Wien, Innsbruck oder Graz durchgeführt. Aber auch der österreichische Verein des Gas- und Wasserfaches (ÖVGW) befasst sich intensiv mit dem Klimawandel.

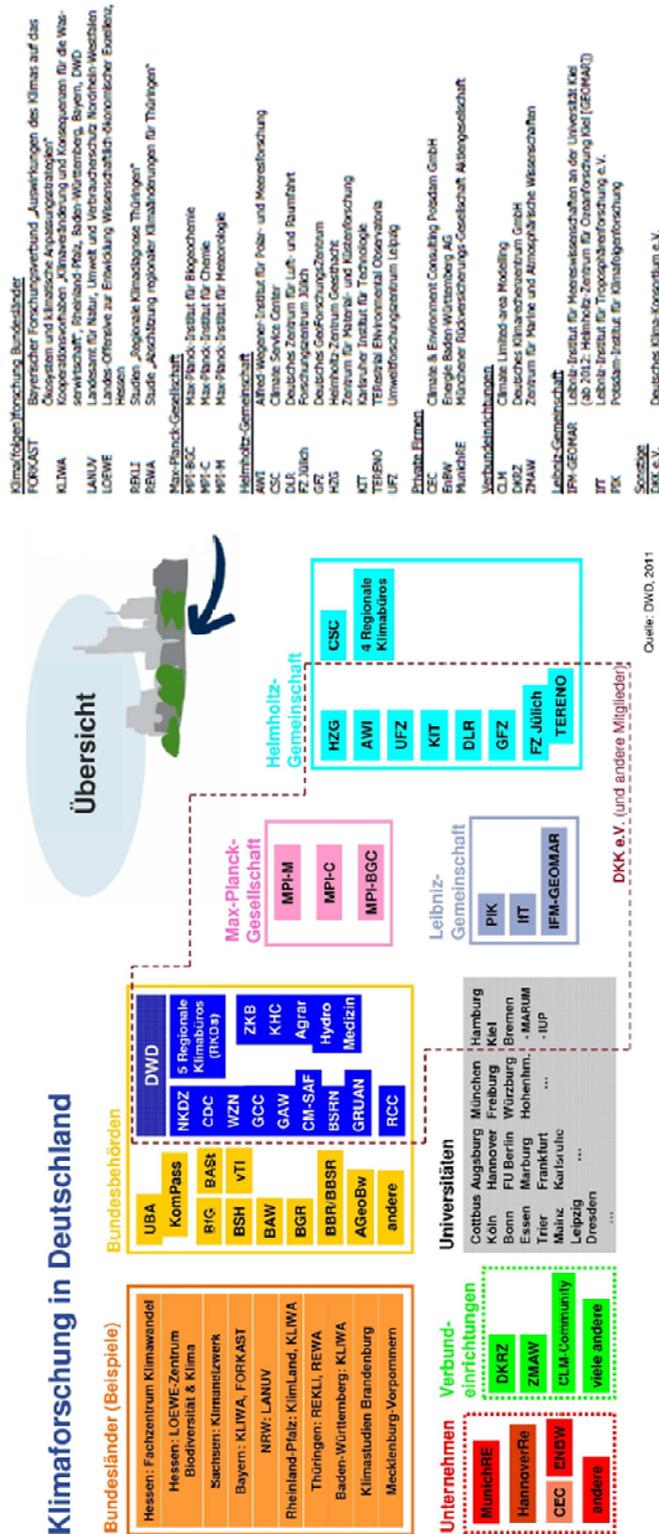


Bild 2.11:
Überblick über die Klimaforschung in Deutschland [Bundesregierung (2011)]

2.3.2 Weltweite Beobachtungen - gestern und heute

Als Hauptbeweis für die derzeitig verstärkt zu beobachtende globale Erwärmung der unteren Erdatmosphäre gelten die Auswertungen verschiedener Klimaarchive sowie die seit etwa 1860 vorliegenden weltweiten Temperaturmessungen (**Bild 2.12, Bild 2.13**).

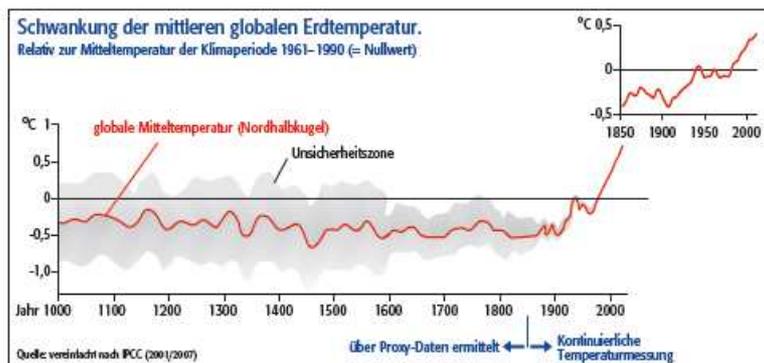


Bild 2.12:
Globale Temperaturänderungen, ermittelt aus verschiedenen Klimaarchiven wie z.B. Eisbohrkerne
Beobachtungszeitraum: 1000 bis heute [Alianz Umweltstiftung (2007)]

Seit Beginn der Industrialisierung vor ca. 200 Jahren nahmen die global gemittelten, bodennahen Lufttemperaturen um ca. 0,75 °C zu. Eine erste Erwärmungsphase war zwischen 1910 und 1945 zu beobachten, am stärksten war die Erwärmung jedoch von 1975 bis ca. 2000 ausgeprägt, seit 2000 bis heute scheint sich die Temperaturerhöhung abgeschwächt zu haben.

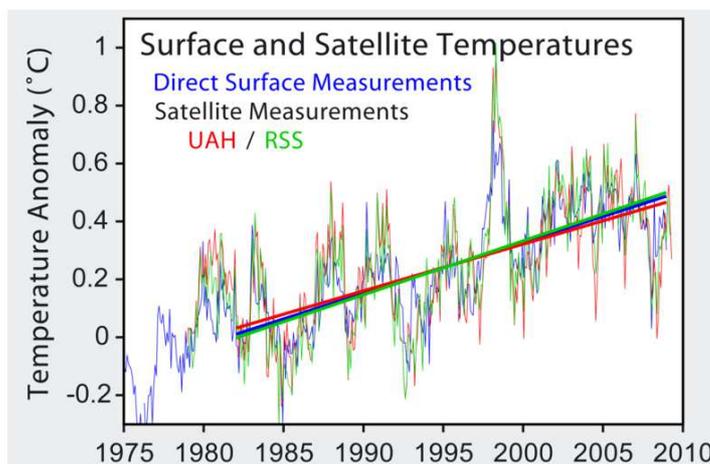


Bild 2.13:
Anstieg der Lufttemperatur von 1975 bis 2009. Seit 1979 ergänzen Satellitendaten (rot und grün) die Messungen an Bodenstationen (blau) [Wikipedia (2012f)]

Nach Angaben der NASA waren 2005 und 2010 die global wärmsten Jahre seit Beginn der Aufzeichnungen, dicht gefolgt von 1998. Auch Wissenschaftler des US-amerikanischen National Research Council gehen von den gegenwärtig höchsten erlebten Temperaturen seit mindestens 400 Jahren aus. Danach nahm in den zurückliegenden 30 Jahren die globale Durchschnittstemperatur um etwa 0,14 bis 0,17 °C pro Jahrzehnt zu [Wikipedia (2012h)]. Ähnliche Ergebnisse wurden auch vom Deutschen Wetterdienst veröffentlicht [DWD (2012a)].

Wegen des Flächenanteils der Ozeane von 71 % ist die Erwärmung der Landflächen im Mittel mehr als doppelt so groß wie über dem Meer. Dementsprechend stiegen die Temperaturen auf der Nordhalbkugel, auf der sich der Großteil der Landflächen befindet, in den vergangenen 100 Jahren stärker an als auf der Südhalbkugel (**Bild 2.14**).

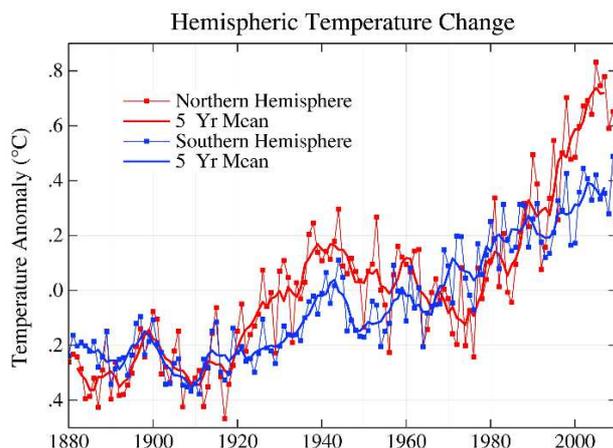


Bild 2.14:
Die Nordhalbkugel (rot) erwärmte sich etwas stärker als die Südhalbkugel (blau); Grund dafür ist der größere Anteil an Landfläche auf der Nordhemisphäre, die sich schneller aufheizt als Ozeane [Wikipedia (2012f)]

Besonders markant fiel die Erwärmung in der Arktis aus, wo sie im jährlichen Mittel etwa doppelt so hoch ist wie im globalen Durchschnitt. Dementsprechend wurde bzw. wird in den Medien stets der Eisbär auch als ein Symbol für den globalen Klimawandel dargestellt. Durch die weltweite Erwärmung sind bereits heute eine Vielzahl an Umweltauswirkungen zu beobachten und nachzuweisen. U.a. sind zu nennen:

Erwärmung der Ozeane, Änderung der Meeresströmungen, Anstieg des Meeresspiegels

Die Speicherung von Wärme durch die Ozeane spielt eine entscheidende Rolle im Klimasystem. Weltweit hat sich das Wasser aller Ozeane seit 1955 um 0,037 °C aufgeheizt, dies entspricht einer Zunahme des Energieinhaltes von etwa $14,5 \times 10^{22}$ Joule [wikipedia (2012d)]. Da die Temperaturveränderung weder zeitlich noch räumlich gleichmäßig erfolgt, kann dies zu einer Veränderung der aktuellen Meeresströmungen führen. Ein oft in den Medien diskutiertes Beispiel ist der Golfstrom. Nach heutigem Stand der Wissenschaft deutet noch nichts auf eine kurz bevorstehende Strömungsänderung hin. Setzt sich der Klimawandel aber verstärkt fort, könnte dies sich jedoch ab 2050 die Temperaturverteilung über dem ganzen Atlantikraum stark verändern. Regional könnte es so zu einer Abkühlung unter heutige Temperaturen mit einer dafür umso stärkeren Erwärmung der Südhalbkugel kommen [BAFU (2007b)]. Ferner ist der Anstieg des Meeresspiegels eng mit der globalen Erwärmung verbunden. Der mittlere Meeresspiegel ist seit 1993 weltweit zwischen 2,4 und 3,8 mm pro Jahr gestiegen. Dazu trugen vor allem schmelzende Gletscher, landseitige Eismassen sowie die thermische Ausdehnung der Ozeane bei [BAFU (2010a)].

Schnee und Eisbedeckung

Die beobachteten Rückgänge der Schnee- und Eisbedeckung sind ebenfalls konsistent mit der Erwärmung. Aus Satellitendaten ist ersichtlich, dass beispielweise seit 1979 die durchschnittliche jährliche minimale Ausdehnung des arktischen Meereises um durchschnittlich 13% pro Jahrzehnt geschrumpft ist (**Bild 2.15**, **Bild 2.16**). Insgesamt hat in dieser Zeit die arktische Eisbedeckung um ca. 3,5 Mio. km² abgenommen, während in der Antarktis eine geringfügige Zunahme zu verzeichnen war.

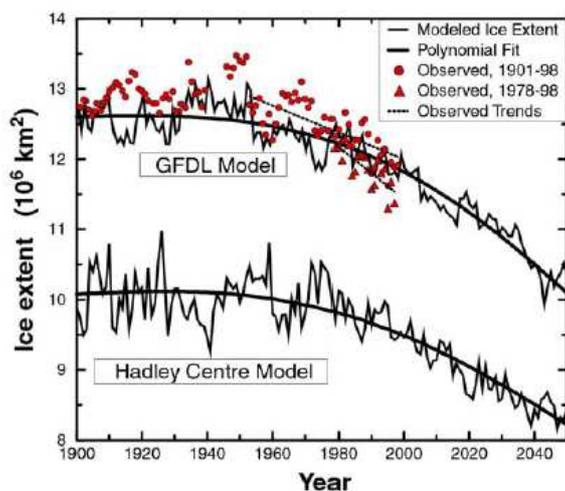


Bild 2.15:
Veränderung der Meereisbedeckung in der Arktis seit 1901 anhand von Beobachtungen (Punkte) und Modellen [Stocker (2008)]



Bild 2.16:
Arktische Eisbedeckung
oben: September 1979, unmittelbar nach der Kälteperiode der 1960er und 1970er Jahre
unten: September 2005
[www.ec.europa.eu (2013)]

Auch haben die Gebirgsgletscher und die Schneebedeckung nahezu weltweit abgenommen (**Bild 2.17**). Betroffen sind davon bis auf wenige Ausnahmen (z.B. skandinavische Länder) alle Regionen, von den Gebirgsketten des Himalaya über die mittleren Breiten bis zu den polaren Eiskappen. Durch diesen Vorgang, der auch als Gletscherschwund oder Gletscherschmelze genannt wird, hat die Mehrheit der Gletscher in den zurückliegenden Jahrzehnten zum Teil stark an Masse und Fläche verloren. Die Alpengletscher beispielsweise schrumpften in den vergangenen 150 Jahren etwa um ein Drittel ihrer Fläche.

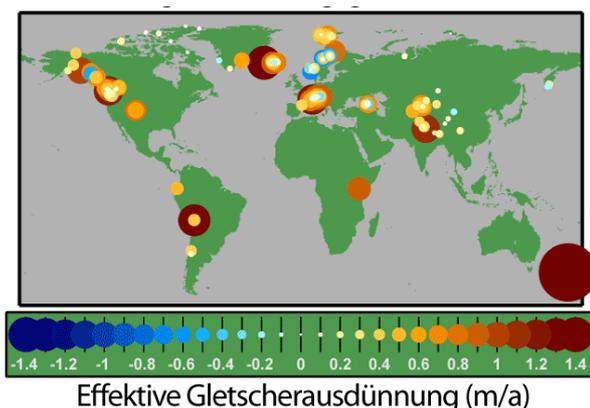


Bild 2.17:
Weltweite Veränderung der Gletscherfläche [wikipedia (2012j)]

Darüber hinaus ist ein zunehmendes Auftauen der Permafrostgebiete zu beobachten. Hierdurch wird nicht nur die Bodeninstabilität (z.B. in den Alpen) begünstigt, was wiederum zu zunehmenden Muren-, Schlamm- und Schneelawinenabgängen führt [DAV (2010), IGKB (2007a), Hamberger (2012), Formayder (2008), BUWAL (2004), KHR (2006), Schädler (2006)]. Zudem wird in der Tundra von Sibirien verstärkt Methan freigesetzt, mit der Folge, dass die weltweite Erwärmung der Atmosphäre weiter zunimmt [UBA (2006)].

Niederschlagsverteilung - weltweit

Während die Niederschläge im letzten Jahrhundert in den östlichen Teilen von Nord- und Südamerika, in Nordeuropa und in Nord- und Zentralasien signifikant zugenommen haben, wurde dagegen im Sahelgebiet, dem Mittelmeerraum, dem südlichen Afrika und in Teilen von Südasien eine Abnahme der Niederschlagsmengen beobachtet.

Extremereignisse

Das IPCC hat im Jahr 2012 einen knapp 600 seitigen Sonderbericht „Management des Risikos von Extremereignissen und Katastrophen zur Förderung der Anpassung an den Klimawandel“ vorgelegt [ICPP (2012a – 2012d), BMU (2012a)]. Im Rahmen einer globalen Sichtweise werden erstmals zumindest halbquantitativ Wahrscheinlichkeitsaussagen über das Vorkommen, die Folgen sowie Optionen zum Umgang mit Extremereignissen und Katastrophen diskutiert. U.a. lassen sich aus den Erkenntnissen folgende Kernpunkte ableiten:

- Extremereignisse sind Bestandteil der natürlichen Klimavariabilität. Da jedoch im Sinne einer statistisch abgesicherten Vorgehensweise die Extremereignisse und Katastrophen nur bedingt erfassbar sind, sind sie teilweise mit hohen Unsicherheiten verbunden. Insgesamt deuten Beobachtungen seit den 1950er Jahren jedoch darauf hin, dass die weltweit beobachtete Erwärmung bereits zu Veränderungen in der Intensität, Länge, Häufigkeit oder räumlichen Ausdehnung von Extremereignissen geführt haben. So ist davon auszugehen, dass Hitzewellen, Trockenperioden, oder extreme Starkregen- und Hochwasserereignisse zugenommen und Sturmtiefs der mittleren Breiten sich polwärts verlagert haben. Hingegen sind bislang keine eindeutigen Trends hinsichtlich Dürren, Fluten oder

kleinräumigen Wetterphänomenen wie Tornados oder Hagel erkennbar. Insbesondere im Zusammenhang mit Extremen wird sich damit auch die Volatilität der Schäden zwangsweise vergrößern [EUWID (2012a)]. Wie beispielsweise aus Angaben des Rückversicherers Munich Re hervorgeht, betragen -weltweit betrachtet- 2011 die gesamtwirtschaftlichen Schäden ca. 300 Mrd. Euro [DPA (2012b)].

Terrestrische und aquatische Ökosysteme

Hinsichtlich terrestrischer und aquatischer Ökosysteme ist bereits heute weltweit zu beobachten, dass ökologische Prozesse im Frühjahr früher eintreten, eine Verschiebung der geografischen Verbreitungsgebiete von Pflanzen- und Tierarten polwärts und in höhere Lagen erfolgt. Darüber hinaus ist bei Meeres- und Süßwassersystemen zu erwarten, dass im Zusammenhang mit steigenden Wassertemperaturen, den Veränderungen der Eisbedeckung, des Salz- und Sauerstoffgehalts und den Strömungsverhältnissen vor allem Veränderungen des Auftretens von Algen, Plankton und Fischen

Sowohl die weltweit vorliegenden Klimadaten als auch die Modellrechnungen vergangener Klimaszenarien bestätigen, dass zwar die Änderung des bisherigen Klimas von natürlichen Schwankungen überdeckt wurde, dass aber die Geschwindigkeit mit der sich der Wandel im globalen Klimasystem in den letzten Jahrzehnten vollzogen hat, damit allein nicht erklärt werden kann. Der ungewöhnliche globale Temperaturanstieg im 20. Jahrhundert stellt daher die zentrale Frage nach den Ursachen.

2.3.3 Ursachen der beobachteten Klimaveränderungen

Um die beobachteten Veränderungen im Klimasystem erklären zu können, sind alle Einflussgrößen einschließlich ihrer Zeitskalen zu berücksichtigen. Grundsätzlich ist dabei zwischen natürlichen und anthropogenen Ursachen zu unterscheiden.

Bei den natürlich auftretenden Prozessen handelt es sich um Mechanismen, die entweder innerhalb des Klimasystems selbst oder die von außen auf die globalen Klimaentwicklungen einwirken. Während die klimatischen Veränderungen, die durch die Plattentektonik oder die Erdbahnparameter bedingt sind, in Jahrtausenden bis Jahrmillionen stattfinden, können einzelne Vulkanausbrüche, die Sonnenaktivität, oder interne Einflussgrößen innerhalb weniger Jahre bis Jahrzehnte zu Schwankungen des Klimageschehens führen. Beispielsweise werden die kurzfristigen, natürliche Klimavariabilitäten vor allem durch

- die Schwankungen des ozeanisches Strömungssysteme wie der weltumspannenden meridionale Umwälzzirkulation (**Bild 2.18**),
- durch das Zusammenspiel zwischen Ozean und Atmosphäre wie im Falle der El-Niño bzw. La Nina-Phänome (**Bild 2.19**) oder durch
- Schwankungen in der Zirkulation der Atmosphäre wie etwa der Nordatlantischen Zirkulation (Luftdruckunterschied zwischen Azorenhoch und Islandtief) (**Bild 2.20**) beeinflusst.

Ferner ist die Sonne und die von ihr ausgehende Strahlungsleistung der Energielieferant des irdischen Wetters und Klimas (**Bild 2.21**). U.a. haben die verschieden starke Einstrahlung in Tropen und Polargebieten sowie Schwankungen der Sonneneinstrahlung, die durch Änderungen der Erdbahnparameter bedingt sind, einen Einfluss auf unser Klima. Die Erde bewegt sich nicht gleichmäßig wie ein Uhrwerk um die Sonne, sondern weist aufgrund der Anziehungskraft durch andere Planeten und den Mond fast regelmäßige Abweichungen davon auf. Dabei kommt es zum einen zu Abweichungen der elliptischen Erdbahn von der Kreisbahn, zweitens zu Variationen in der Neigung der Erdachse gegen die Erdbahnebene und drittens zu Pendelbewegungen der Achse der Erde. Diese Änderungen der Sonneneinstrahlung vollziehen sich jedoch auf sehr langfristigen Zeitskalen von mehreren zehntausend Jahren. U.a. lassen sich so die Kalt- und Warmzeiten der Erde erklären. Zu kürzeren Strahlungsänderungen von Jahrzehnten kommt es hingegen durch Aktivitäten (z.B. elektromagnetische Strahlung, Partikelstrahlung) auf der Sonne selbst. Das Verhalten der Sonne unterliegt hierbei wiederkehrenden zyklischen Schwankungen im Abstand von etwa 11 Jahren. Auf dem Zyklus-Höhepunkt, ereignen sich dann gewaltige Eruptionen, die große Mengen energiereicher Partikel ins All schleudern. Obwohl der Wissensstand über die Sonnenaktivität und die damit verursachten Auswirkungen auf das irdische Klima noch Wissenslücken aufweisen, kann jedoch damit der beobachtete Klimawandel in den letzten 100 Jahre nicht erklärt werden.

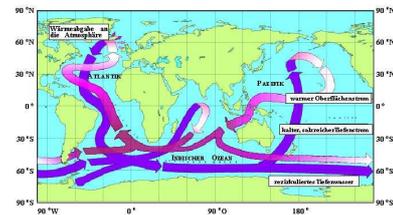


Bild 2.18:
Oberflächenströme der Ozeane
[www.wiki.bildungsserver.de (2012)]

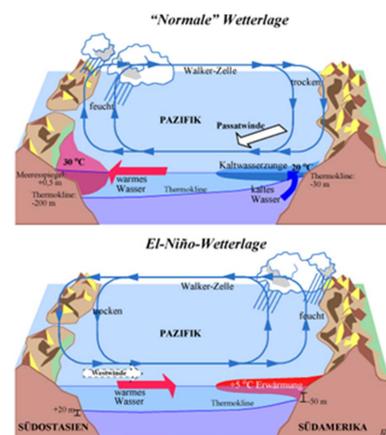


Bild 2.19:
Die Zirkulationsverhältnisse bei "normaler" und El-Niño-Wetterlage
[www.wiki.bildungsserver.de (2012)]

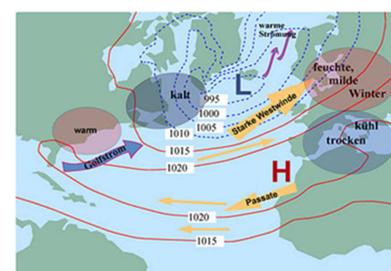


Bild 2.20:
Druckverhältnisse, Strömungen und Wetterlagen bei einem positiven NAO-Index im Winter
[www.wiki.bildungsserver.de (2012)]

Einen Einfluss auf das Klimasystem können beispielsweise auch explosive Vulkanausbrüche haben, insbesondere dann, wenn große Mengen von Partikeln (Aerosole) bis in die Stratosphäre geschleudert werden (**Bild 2.22**). Gemäß den Angaben des IPCC [IPCC (2007a - 2007f)] kann es dabei zumindest für eine Zeitperiode von einigen Jahren zu einer direkten Beeinflussung der Strahlungsbilanz kommen. An der Erdoberfläche resultiert vor allem wegen der Rückstreuung des einfallenden Sonnenlichts an Sulfataerosole sowie der Absorption langwelliger Strahlung eher eine Abkühlung, hingegen wird sich der Bereich der Stratosphäre eher erwärmen. Auch wird davon ausgegangen, dass die Zirkulation der Luftmassen sowie die lokal forcierte Wirkung vulkanischer Aerosole die Muster der natürlichen Klimavariabilität oder die Nordatlantische Oszillation beeinflussen können. Als vierte Auswirkung von vulkanischen Aerosolen wird ihre Eigenschaft genannt, dass sie als Oberflächenkatalysator für zahlreiche chemische Reaktionen wirken.

Neben Sauerstoff und Stickstoff sind u.a. auch Wasserdampf (H_2O), Kohlendioxid (CO_2) und Methan (CH_4) gasförmige Bestandteile der Atmosphäre. Die wärmende Wirkung dieser Gase ist seit über 100 Jahren bekannt (**Bild 2.23**). Dabei lassen sie die von der Sonne kommende kurzwellige Strahlung weitgehend ungehindert auf die Erde durch, absorbieren aber einen Großteil der von der Erde ausgestrahlten Infrarotstrahlung. Dadurch erwärmen sie sich und emittieren selbst Strahlung im längerwelligen Bereich. Hierdurch erwärmt sich die Erdoberfläche stärker als wenn allein die kurzwellige Strahlung der Sonne sie erwärmen würde. Ihr natürlicher Gehalt führt dazu, dass die Durchschnittstemperatur der Erde bei $+14^\circ C$ liegt, ohne den „natürlichen Treibhauseffekt“ läge sie bei ca. minus $-18^\circ C$ [wiki.bildungsserver.de (2012a)].

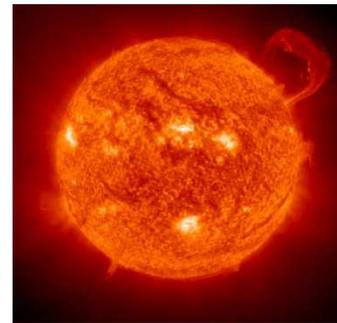


Bild 2.21:
Aktivitäten der Sonne. Je heller die Farbe, desto heißer die Oberfläche der Sonne.
[www.wiki.bildungsserver.de 2012]]

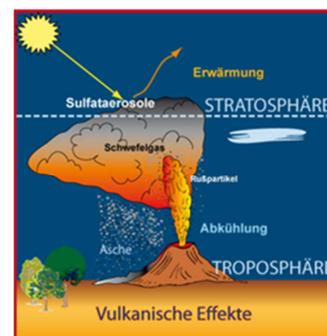


Bild 2.22:
Wirkung von explosiven Vulkanausbrüchen auf Stratosphäre und Troposphäre
[www.wiki.bildungsserver.de (2012)]

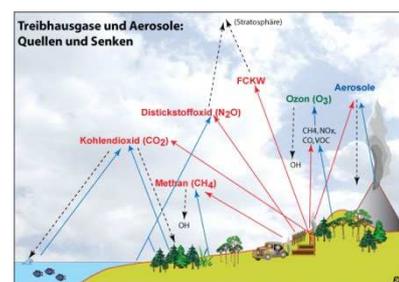


Bild 2.23:
Quellen und Senken von Treibhausgasen und Aerosolen
[www.wiki.bildungsserver.de (2012)]

Rote Schrift: anthropogen beeinflusste bzw. erzeugte Treibhausgase, rote Pfeile: anthropogene Quellen; blaue Pfeile: natürliche Quellen; gestrichelte Pfeile: Senken

Wie bereits mehrfach erörtert, ist jedoch mit zunehmender Industrialisierung die Emission an Treibhausgasen, insbesondere Kohlenstoffdioxid aufgrund menschlicher Aktivitäten stark angestiegen (**Bild 2.24**).



Bild 2.24:
Beispiel menschlicher Aktivität, Emission von Abgasen, insbesondere CO_2 durch Verbrennung fossiler Energieträger (Kohle, Erdöl, Erdgas,...)
[www.idw-online.de (2013)]

Da Schwankungen der Sonnenaktivität erst mit den seit Mitte der 1970er Jahre verfügbaren Satelliten hinreichend genau messbar waren, konnte bis in die 1980er Jahre nicht zweifelsfrei festgestellt werden, ob die damals gemessene Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur eine Folge der gestiegenen Treibhausgaskonzentration war. Bis in die 1980er Jahre war die anthropogene globale Erwärmung in Lehrbüchern zur Klimatologie daher als noch unbelegte Hypothese beschrieben. Doch heute besteht -bis auf wenige Ausnahmen- wissenschaftlicher Konsens, dass die gestiegene Konzentration der vom Menschen in die Erdatmosphäre freigesetzten Treibhausgase mit hoher Wahrscheinlichkeit die Hauptursache der globalen Erwärmung ist (**Bild 2.25**). Insbesondere die anthropogen verursachten Emissionen von Kohlendioxid CO_2 , Methan CH_4 , Distickstoffoxid (Lachgas N_2O), Schwefelhexafluorid SF_6 , Stickstofftrifluorid NF_3 und Aerosole sind hier zu nennen [Alverde (2012), DPA (2012b), www.wiki.bildungserver.de (2012)]

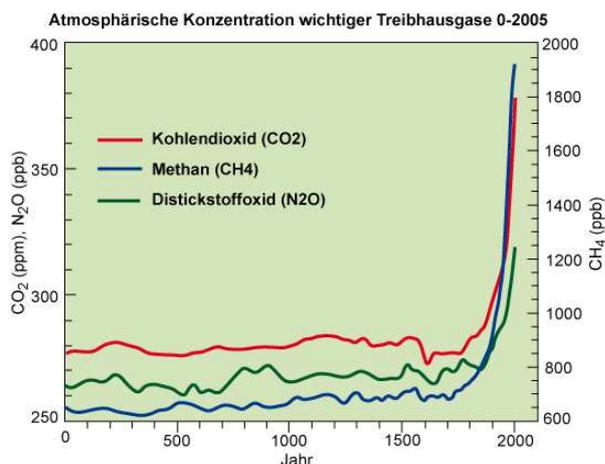


Bild 2.25:
Wachstumstrend der wichtigsten anthropogenen Treibhausgase: Kohlendioxid, Distickstoffmonoxid und Methan der letzten 2000 Jahre [www.wiki.bildungserver.de (2012)]

Ohne den Anstieg der Treibhausgase sind die in der Vergangenheit gemessenen Temperaturen der Erdatmosphäre nicht zu erklären (**Bild 2.26**). Insgesamt deuten zwischenzeitlich eine Vielzahl an Erkenntnissen und Indizien, die ein sehr hohes Vertrauen und eine sehr hohe Wahrscheinlichkeit aufweisen, darauf hin, dass die weltweite Erwärmung nicht allein auf die Variabilität natürlicher Systeme zurückgeführt werden kann. Diese These der IPCC teilen über 97% der Klimatologen sowie über 30 renommierte wissenschaftliche Institutionen, darunter u.a. die Weltorganisation für Meteorologie (WMO), European Science Foundation, die American Meteorological Society, das Network of African Science Academies [WMO (2011)] aber auch in der Klimaforschung führende deutsche, schweizerische und österreichische Forschungseinrichtungen und wissenschaftliche Institute [www.klimascout.de (2013), [wiki.bildungsserver.de (2012)]

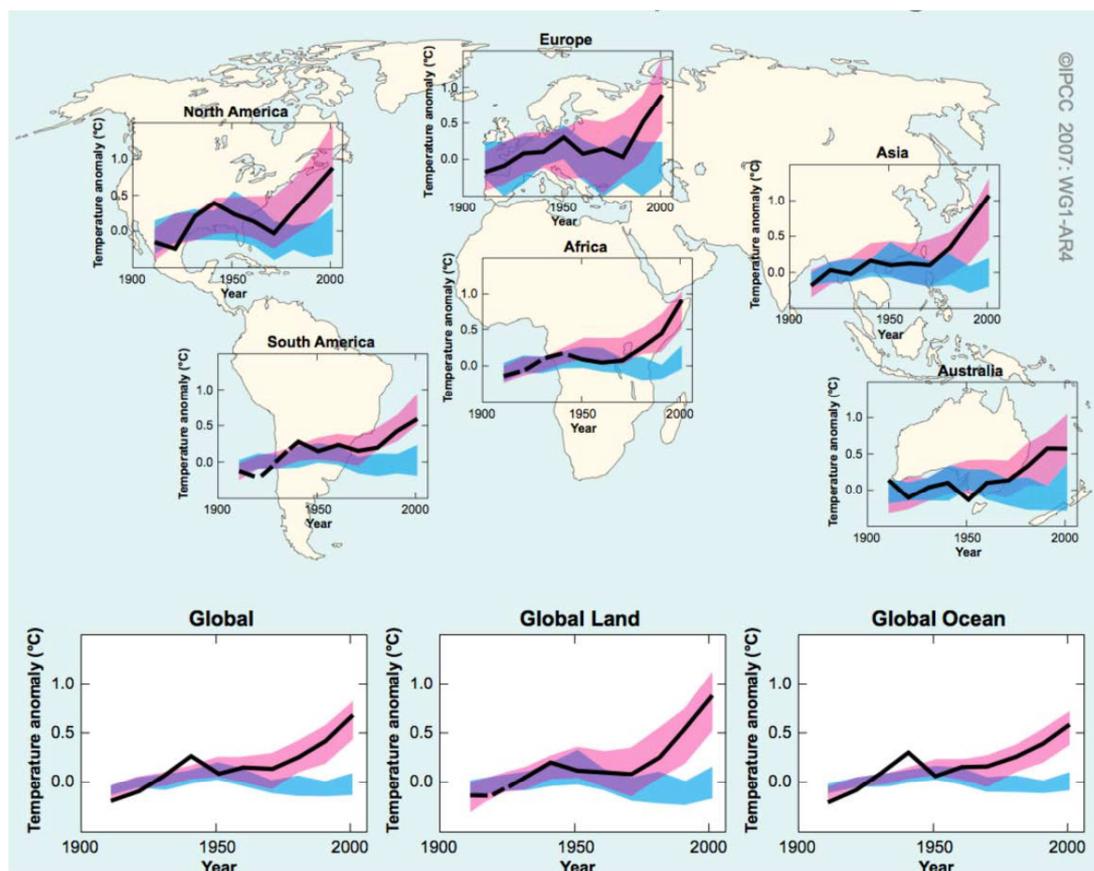


Bild 2.26:

Global und kontinental gemittelte Entwicklung der Temperatur seit 1900

Dicke Linie: Messungen

Bänder: Modellberechnungen mit unterschiedlichen Anfangsbedingungen (Ensemble Simulationen mit gekoppelten Klimamodellen)

Nur im Falle, dass die Modelle alle Antriebsfaktoren berücksichtigen, das heißt die Änderungen der Solar"konstanten" und Vulkanausbrüche, die Atmosphäre-Ozeanwechselwirkungen, die Änderungen der Konzentrationen von CO₂ und der anderen Treibhausgase sowie von Sulfataerosolen, ist die Übereinstimmung über die ganze Zeitspanne gewährleistet (obere Bänder). Werden allerdings die anthropogenen Antriebsfaktoren konstant gehalten werden, so tritt ab 1970 eine systematische Abweichung aller Modellsimulationen von den Daten auf (untere Bänder). Dieser Befund gilt global, aber auch gemittelt über kontinentale Skalen. [Stocker (2008), IPCC (2007c)]

Die Konzentration von CO₂ ist durch die Verbrennung fossiler Rohstoffe, durch die Industrie sowie die großflächige Entwaldung (z.B. Regenwald) vor allem seit Anfang des 19. Jahrhunderts von ursprünglich ca. 280 ppm im Holozän auf ca. 390 ppm (parts per million) im Jahr 2011 gestiegen (**Bild 2.27**). Dies ist der höchste Stand seit mehr als 600.000 Jahren.

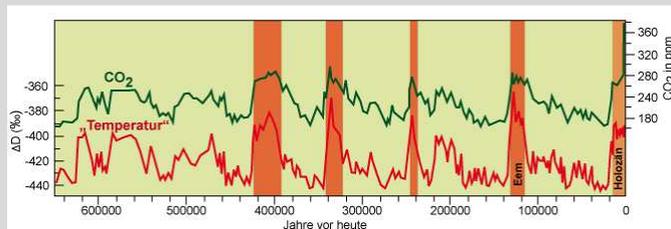


Bild 2.27:
Entwicklung der atmosphärischen CO₂-Konzentration im Laufe der letzten 600.000 Jahren
[wiki.bildungserver.de (2012)]

Zwar wird atmosphärisches Kohlendioxid im Wasser der Ozeane verhältnismäßig schnell als „Kohlensäure“ aufgenommen, nach durchschnittlich 5 Jahren wird ein CO₂-Molekül jedoch wieder an die Atmosphäre abgegeben. Dies ist die Ursache dafür, dass sich ein Teil des vom Menschen emittierten Kohlendioxids letztlich für Jahrtausende im Kohlenstoffkreislauf der Hydrosphäre und Atmosphäre anreichert [www.wiki.bildungserver.de (2012)]

Der Volumenanteil von Methan stieg im selben Zeitraum von 730 ppb auf über 1700 ppb (Teile pro Milliarde) an. Dies ist bei Kohlendioxid der höchste Stand seit mindestens 800.000 Jahren. Als eine der Ursachen hierfür ist die Viehhaltung anzuführen, gefolgt von weiteren landwirtschaftlichen Aktivitäten wie dem Anbau von Reis. Trotz der Oxidation von Methan in einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre ist das Treibhauspotenzial von Methan um über 30 mal höher als das von Kohlendioxid, insbesondere dann, wenn auch Wechselwirkungen mit atmosphärischen Aerosolen berücksichtigt werden.

Der Volumenanteil von Lachgas nahm von vorindustriell 270 ppb auf mittlerweile über 320 ppb zu. Durch sein Absorptionsspektrum trägt es dazu bei, dass das sonst zum Weltall hin offene Strahlungsfenster verringert wird. Es trägt zum anthropogenen Treibhauseffekt etwa zu 6 % bei, da seine Wirkung als Treibhausgas um nahezu Faktor 300 stärker als die von Kohlendioxid und es mit einer atmosphärischen Verweilzeit von 114 Jahren verhältnismäßig stabil ist.

Die Wasserdampfkonzentration der Atmosphäre wird durch anthropogene Wasserdampfemissionen nicht signifikant verändert, da zusätzlich in die Atmosphäre eingebrachtes Wasser innerhalb weniger Tage auskondensiert. Steigende globale Durchschnittstemperaturen führen jedoch zu einem höheren Dampfdruck, d.h. einer stärkeren Verdunstung. Der damit insgesamt global ansteigende Wasserdampfgehalt der Atmosphäre treibt die globale Erwärmung zusätzlich an. Wasserdampf wirkt somit im Wesentlichen als Rückkopplungsglied. Diese "Wasserdampfrückkopplung" ist neben der Eis-Reflexion-Rückkopplung die stärkste, positiv wirkende Rückkopplung im globalen Klimageschehen.

Neben Treibhausgasen beeinflussen zusätzlich noch sogenannte Aerosole, d.h. kleinste Partikel in der Atmosphäre das Erdklima. Die ablaufenden Vorgänge sind bislang jedoch nur bedingt bekannt. Bislang geht man davon aus, dass z.B. die Anwesenheit von Rußpartikel in der untersten Atmosphäre als Folge ihrer Absorptionsfähigkeit gegenüber Sonnenlicht sowie der Verringerung der Reflexion von Schnee- und Eisflächen zu einem geringen Temperaturanstieg führen. Insgesamt sorgen jedoch Mineralpartikel/Sulfataerosole (z.B. Freisetzung bei Vulkanausbrüchen) in höheren Luftschichten wegen ihrer abschirmenden Wirkung und ihres Einflusses auf die noch nicht vollständig verstandene Wolkenbildung (negative Rückkopplung) dafür, dass es an der Erdoberfläche i.d.R. kühler wird.

Auch der abnehmende Ozongehalt (Stichwort „Ozonloch“) führt wahrscheinlich zu einem Kühlungseffekt, der darauf zurückzuführen ist, dass insgesamt weniger wärmende Infrarotstrahlung durch die Stratosphäre auf die Erdoberfläche gelangt.

Lediglich einige wenige Skeptiker bezweifeln noch die anthropogen verursachte Erwärmung der Erdatmosphäre, von manchen Gruppen wird für die kommenden Jahrzehnte sogar eine globale Abkühlung vorausgesagt [*Feierabend (2010)*, *Klimaskeptiker (2012)*, *wikipedia (2012i)*, *NABU (2012)*, *BAFU (2010a)*]. Sie versuchen, durch plakative Behauptungen wie z.B.

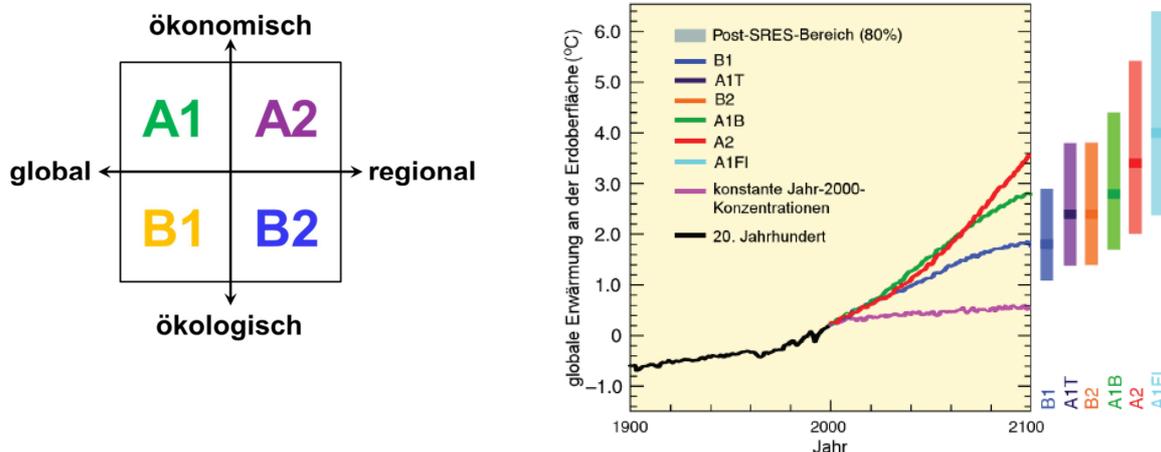
- das Klima hat sich schon immer gewandelt
- die Sonne und kosmische Strahlung verursacht den Klimawandel
- es gibt viele mögliche Gründe für die derzeitige Erderwärmung
- dDer CO₂-Anstieg ist nicht Ursache, sondern Folge des Klimawandels

den bereits heute beobachtbaren Klimawandel zu leugnen. In der Diskussion um die Ursachen der globalen Erwärmung werden von den Kritikern vor allem Faktoren genannt, die natürlichen Ursprungs sind. U.a. vertritt Vahrenholt in den Medien und eigenen Veröffentlichungen (z.B. „Die Kalte Sonne – Warum die Klimakatastrophe nicht stattfindet“ [*Vahrenholt (2012)*]) die Auffassung, dass vor allem die Sonnenaktivität (Sonnenwinde,) und eine Veränderung der kosmischen Strahlung und nur in geringem Maße der durch Menschen verursachte Kohlenstoffdioxid-Ausstoß für den globalen Klimawandel verantwortlich sei. Ferner suggeriert er, dass die Berichte des Weltklimarats IPCC von entsprechenden Interessensgruppen (z.B. Versicherungen oder Umweltorganisationen) beeinflusst seien. Auch wird oft von den Klimaskeptikern darauf verwiesen, dass die gegenwärtige Klimaerwärmung historisch einzigartig sei bzw. dass sich die Erde aktuell in einer Phase der Wiedererwärmung aus der kleinen Eiszeit befindet, weswegen über einzelne Folgen dieser Erwärmung bisweilen nur spekuliert werden kann.

Insgesamt sind unter dem Link „www.klimafakten.de“ mehr als 25 Behauptungen der Klimaskeptiker aufgeführt, die jedoch eindeutig durch Messungen und Beobachtungen widerlegt werden konnten.

2.4 Prognostizierte Auswirkungen des globalen Klimawandels

Die zentrale Frage “Wie entwickelt sich das globale Klima durch den weiteren Anstieg der anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen und welche Auswirkungen/Folgen sind zukünftig zu erwarten“ ist nicht einfach zu beantworten. Die zukünftigen Emissionen sind u.a. von ökonomischen, sozialen und politischen Entwicklungen abhängig, die grundsätzlich nicht vorhersagbar sind. Daher hat u.a. der Weltklimarat ein differenziertes Spektrum von Emissionsszenarien entwickelt, um auf diese Weise den unterschiedlichen Entwicklungsmöglichkeiten der Weltgemeinschaft Rechnung zu tragen [*IPCC (2001)*, *IPCC (2007a - f)*] (**Bild 2.28**).

**Bild 2.28:**

Beispiele von sogenannten Special Report on Emissions Scenarios (SRES-Emissions-szenarien, links) und die jeweils zu erwartenden Temperaturanstiege (rechts) [ICPP (2007a – 2007f)]

A1: Eine Welt mit schnellem Wirtschaftswachstum und schneller Einführung neuer und effizienterer Technologien. Untergruppen sind:

A1FI = Nutzung fossilintensiver Energiequellen

A1T = Nutzung nichtfossiler Energiequellen

A1B = (balanced) ausgewogene Nutzung fossiler und nichtfossiler Energiequellen

A2 = Eine sehr heterogene Welt mit einem Schwerpunkt auf traditionelle Werte

B1: Eine sich vom Materialismus abkehrende Welt und die Einführung sauberer Technologien

B2: Eine Welt mit dem Schwerpunkt auf lokale Lösungen für ökonomische und ökologische Nachhaltigkeit

Aus dem Szenario A2 resultiert für Mitteleuropa eine der höchsten Temperaturanstiege am Ende des Betrachtungszeitraumes, während das Szenario A1B einen mittleren und das Szenario B1 einen im Vergleich aller Szenarien relativ geringen Temperaturanstieg zur Folge hat.

Für den nächsten, d.h. den 5. Sachstandsbericht des IPCC wurden zwischenzeitlich sogenannte „repräsentative Konzentrationspfade“ (Representative Concentration Pathways - RCPs) entwickelt, die alle Treiber anthropogener Treibhausgasemissionen abbilden und sie in konsistente Szenarien zukünftiger Treibhausgasemissionen und resultierender Strahlungsantriebe umsetzen sollen [www.wiki.bildungsserver.de (2012)]. Anders als bei den SRES-Emissions-szenarien wird bei den neuen Szenarien der Schwerpunkt nicht auf die Emission, sondern auf die Konzentration und den Strahlungsantrieb der Treibhausgase in der Atmosphäre gelegt.

Unabhängig davon, ob SRES oder RCP angewandt werden, sind Klimaprojektionen immer „Wenn-dann-Aussagen“. Sie haben nicht den Anspruch, die „wahre“, d.h. die in Wirklichkeit eintretende Zukunft aufzuzeigen, sie projizieren vielmehr mögliche bzw. unter bestimmten Grundannahmen wahrscheinliche zukünftige Entwicklungen im 21. Jahrhundert [Anpassung (2012a), Anpassung (2012b)]. Soweit möglich, berücksichtigen sie dabei Abschätzungen hinsichtlich des Bevölkerungswachstums, ökonomische und soziale Verhältnisse, technologischer Veränderungen oder des Ressourcen-Verbrauchs. Das vielfach für weitergehende Untersuchungen herange-

zogene Szenario A1B geht dabei davon aus, dass beispielsweise weiterhin ein Wirtschaftswachstum möglich ist sowie eine baldige Einführung neuer und effizienterer Technologien unter einer ausgewogenen Nutzung fossiler und nichtfossiler Energiequellen erfolgt.

Wird beispielsweise unter den Annahmen des Szenarios A1B die Erwärmung der Atmosphäre berechnet, so zeigt sich, dass bis 2100 mit einer globalen Temperaturerhöhung gegenüber dem Referenzzustand im Jahre 2000 um ca. 2°C bis ca. 4°C zu rechnen ist. Die Temperaturzunahme fällt jedoch regional sehr unterschiedlich aus (**Bild 2.29**).

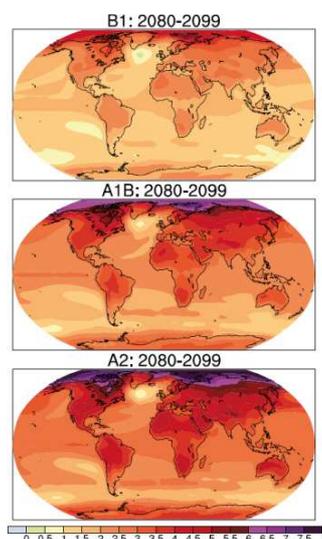


Bild 2.29:
Änderung der Atmosphärentemperatur nach dem B1-, A1B- und A2-Szenario bis 2080-2099 relativ zu 1980-1999
 [www.wiki.bildungserver.de (2012)]

Dabei wird sich die Temperatur i.d.R. sowohl über dem Land als auch über den Weltmeeren erhöhen. Nur in den nördlichen Breiten gibt es von diesem Muster eine deutliche Abweichung – insbesondere über dem Nordatlantik wird für die kommenden Jahrzehnte eine Abkühlung vorausgesagt. Ursache ist das starke Abschmelzen des arktischen Meereises, wodurch ein positiver Rückkopplungseffekt angestoßen wird. Die vom Eis reflektierte Sonnenstrahlung wird nach dem Schmelzen des Eises vom Meerwasser besser absorbiert. Dadurch wird auch die Luft über der eisfreien Wasserfläche erwärmt und es kann sich aufgrund des veränderten Luftdruckes ein Hoch über dem Ostatlantik oder Skandinavien bilden. Schwächen sich zudem das Azorenhoch und das Islandtief ab, kann bei derartigen Wetterentwicklungen sibirische Kaltluft bis weit nach Westeuropa vordringen. Nördlich der Alpen kann es dadurch -wie das Beispiel „März 2013“ gezeigt hat- zu einem länger anhaltenden Kälteeinbruch kommen [DPA (2012a), Marotzke (2012)].

Die stärksten Erwärmungen zeigen die Landgebiete in den hohen nördlichen Breiten über Sibirien, Kanada und Alaska. Auch hierfür sind Schnee- und Eiseffekte verantwortlich. Auf der Südhalbkugel wirkt sich dieser Effekt weniger aus. Hier ist nur die

Antarktis nennenswert mit Eis und Schnee bedeckt. Eine weitere Auffälligkeit ist die stärkere Temperaturzunahme im Innern der Kontinente im Vergleich zu den küstennahen Gebieten. Hier wirkt sich der dämpfende Einfluss der angrenzenden Meere aus. Verhältnismäßig gering scheint die Erwärmung als Folge der Abschwächung des Nordatlantikstroms, der Fortsetzung des Golfstroms, im Nordatlantik auszufallen.

Durch steigende Temperaturen erhöht sich allgemein auch die potentielle Verdunstung und der Niederschlag. Eine wärmere Atmosphäre kann mehr Wasserdampf aufnehmen, der Niederschläge reichlicher ausfallen lässt (**Bild 2.30**).

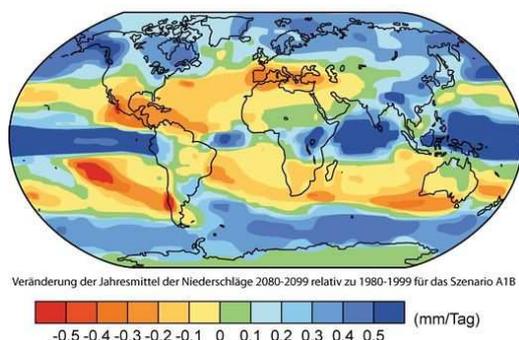


Bild 2.30:
Änderung der Niederschläge nach dem A1B-Szenario bis 2080-2099 relativ zu 1980-1999
[www.wiki.bildungsserver.de (2012)]

Dabei gibt es jedoch ebenfalls große regionale und saisonale Unterschiede. In den höheren Breiten kommt es im Sommer wie im Winter zu höheren Niederschlägen von 20 % und mehr. Ebenso ist mit höheren Niederschlägen über den tropischen Ozeanen und in einigen tropischen Monsungebieten zu rechnen. In den mittleren Breiten wird es im Sommer wahrscheinlich weniger, im Winter mehr Niederschlag geben. Nur im östlichen Asien werden auch im Sommer mehr Niederschläge fallen. In den ohnehin trockenen Subtropen nehmen die Niederschläge in den meisten Gebieten wahrscheinlich ganzjährig ab, so um bis zu 20 % im Mittelmeerraum und in der Karibik.

Ferner projizieren die durchgeführten Modellierungen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts eine deutlich erhöhte Variabilität der einzelnen Klimaparameter (**Bild 2.31**).

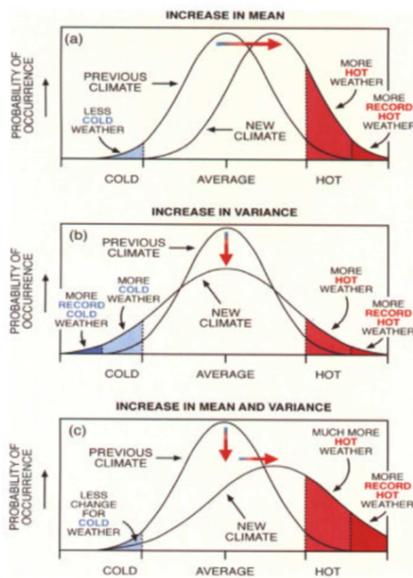


Bild: 2.31:
Zunahme von Extremwerten bei Klimaver-
schiebungen am Beispiel der Temperatur
[IPCC (2001)]

Die Klimavariabilität bezieht sich dabei auf Schwankungen des mittleren Zustandes und anderer statistischer Größen⁴ des Klimas auf allen zeitlichen und räumlichen Skalen, die über einzelne Wetterereignisse hinausgehen. Die Variabilität kann durch natürliche interne Prozesse innerhalb des Klimasystems (interne Variabilität) oder durch natürliche oder anthropogene Einflüsse (externe Variabilität) begründet sein [IPCC (2007c), www.zamg.ac.at (2012)].

Insgesamt ist auch mit einer Zunahme an Naturkatastrophen (**Bild 2.32, Bild 2.33**) und Extremwetterereignissen zu rechnen [MunichRe (2009), Höpfe (2012), IPCC 2012a - 2012d), UBA (2011f), EUWID (2012a), Bunse (2009)].

Naturkatastrophen in Deutschland 1970 - 2007

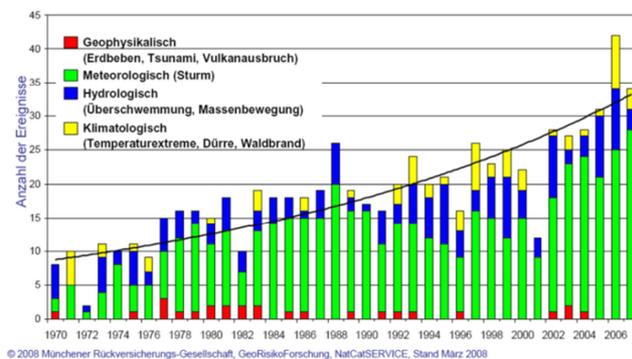


Bild 2.32:
Anzahl an Naturkatastrophen in
Deutschland, untergliedert in vier Berei-
che (geophysikalisch, meteorologisch,
hydrologisch, klimatologisch)
[MunichRe (2009), www.munichRe
(2012)]

⁴ Beispiele: Standardabweichungen, Vorkommen von Extremerscheinungen, etc.

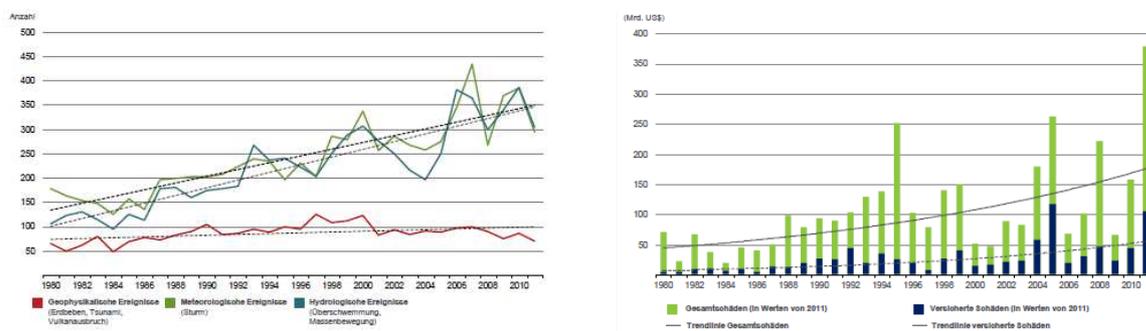


Bild 2.33:

Anzahl an Naturkatastrophen und die damit verbundenen volkswirtschaftlichen Schäden im Beobachtungszeitraum von 1980 bis 2010, weltweit [MunichRe (2009), www.munichRe (2012) Höpfe (2012)]

U.a. werden in einigen Regionen länger anhaltende Hitzewellen sowie das Ausmaß und die Anzahl von Dürren zunehmen. Außerdem ist in vielen Regionen der Erde eine Zunahme von Stark- und Extremniederschlägen sowie der Intensität (nicht der Häufigkeit) von tropischen Wirbelstürmen zu erwarten [Bunse (2009)]. Zudem sind extremere Küstenhochwasser aufgrund des ansteigenden Meeresspiegelanstiegs wahrscheinlich, ebenso wie Erdbeben oder Gletscherseeausbrüche in Hochgebirgen und Überschwemmungen [EUWID (2009)].

Außerdem steigen die Risiken für die menschliche Gesundheit bei zunehmenden Lufttemperaturen. Neben der Beeinträchtigung des Wohlbefindens wird dadurch wahrscheinlich auch die Zahl der Hitzetoten steigen. Ferner wird es zu Veränderungen des Verbreitungsgebiets, der Population und des Infektionspotentials von Krankheitsüberträgern kommen. Inwieweit sich dadurch die tatsächliche Ausbreitung der übertragbaren Krankheiten ändert, hängt jedoch nicht nur vom Klima sondern auch vom medizinischen Standard und der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit der betroffenen Regionen ab. Eine Erwärmung oberhalb von 2°C birgt zudem erhöhte Risiken für das Aussterben zahlreicher Tier- und Pflanzenarten, die sich nicht so schnell anpassen können. Zudem wird die landwirtschaftliche Produktivität sowohl von einer Temperaturerhöhung als auch von einer Veränderung der Niederschläge betroffen sein. Insgesamt ist eher mit einer Verschlechterung des globalen Produktionspotenzials zu rechnen. Tropische Regionen werden Modellrechnungen zufolge jedoch stärker betroffen sein als gemäßigte Regionen, in denen mit Kohlenstoffdüngung sogar teilweise deutliche Produktivitätszuwächse erwartet werden. Hinzu kommen wahrscheinliche Veränderungen der Verbreitungsgebiete und Populationen von Schädlingen, der Schädlingsdruck wird so insgesamt in Deutschland vermutlich zunehmen [Schneider (2010), Stark (2009), UBA (2008), UMID (2009), Löbermann (2012)].

Die wirtschaftlichen Folgen der globalen Klimaerwärmung sind nach gegenwärtigen Schätzungen beträchtlich [DIW (2007), FAZ (2007), Bunse (2009), MunichRe (2009)]. Das Deutsche Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) schätzt zwar unter großer Unsicherheit, dass ein ungebremseter Klimawandel bis zum Jahr 2050 weltweit bis zu 200 Billionen US-Dollar volkswirtschaftliche Kosten verursachen könnte. Der 2006 veröffentlichte Stern-Report der britischen Regierung beziffert die zu erwartenden Schäden durch den Klimawandel bis zum Jahr 2100 auf Werte zwischen 5% bis 20% an der globalen Wirtschaftsleistung.

Für Deutschland wird erwartet, dass selbst bei der Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen bis Mitte dieses Jahrhunderts Kosten für die Volkswirtschaft in Höhe von bis zu 800 Milliarden anfallen könnten. U.a. ist damit zu rechnen, dass sich aufgrund mangelnden Kühlwassers in den Fließgewässern sowie infolge der klimabedingten Schäden an der erforderlichen Infrastruktur der Energiebezug erheblich verteuern wird. Ebenso sind zusätzliche Schutzmaßnahmen für die Ölförderung auf See erforderlich. Da auch mit mehr Hochwasser und Überschwemmungen [EUWID (2012a)] zu rechnen ist, sind auch verstärkt Investitionen in den Dammbau und andere Maßnahmen zum Schutz vor Überschwemmungen erforderlich. Auch für die Schweiz wurden die Kosten der Klimaveränderung bis 2050 mit zusätzlich ca. 1 Milliarde Franken pro Jahr abgeschätzt [BAFU (2007a), BAFU (2007b), OcCC (2008)].

Abschließend ist zu bemerken, dass sich die bereits heute sichtbaren Auswirkungen in Zukunft verstärkt fortsetzen werden und daher nicht nur die Politik sondern jeder einzelne von uns gefordert ist, entsprechende Klimaschutzmaßnahmen und Anpassungsstrategien zu entwickeln und konsequent umzusetzen. Die bislang vorgeschlagenen nationalen Maßnahmen werden in Kap. 2.5 kurz skizziert.

2.5 Die zwei Eckpunkte der Klimapolitik - Klimaschutz/Vermeidung und Anpassung

In der internationalen Gemeinschaft werden Überlegungen zum Klimaschutz erst seit Beginn der 70er Jahre des vorigen Jahrhunderts diskutiert [LfU (2011), wikipedia (2012h)]. Erstmals wurden im Jahr 1969 von US-Präsident Nixon und 1972 auf der internationalen Umweltkonferenz der Vereinten Nationen in Stockholm klimapolitische Ziele angeregt. 7 Jahre später fand dann die erste Weltklimakonferenz in Genf statt. U.a. wurde hier die World Meteorological Organization (WMO) mit der Aufgabe betraut, den Einfluss des Menschen auf das Klima systematisch zu untersuchen. Als weitere wegweisende Schritte in der Geschichte zur Klimaschutzpolitik sind u.a.

- die rechtliche Verankerung der Umweltpolitik als Aufgabe der Europäischen Union im Jahre 1987,
- die 1988 erfolgte Gründung des Weltklimarates als zwischenstaatlicher Ausschuss (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC), der seither die Änderung des Klimas dokumentiert und die damit verbundenen Auswirkungen/Folgen bewertet sowie
- die zweite Weltklimakonferenz in Genf, in der 1990 der Klimawandel international u.a. als grundlegende Herausforderung der Menschheit anerkannt wird, zu nennen [LfU (2011)]. Darauf aufbauend wurde 1992 auf der Rio-Konferenz der Vereinten Nationen u.a. die Klimarahmenkonvention unterzeichnet, mit dem Ziel, die atmosphärische Konzentration klimarelevanter Gase auf einem Niveau zu stabilisieren, welches eine „gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems“ verhindern soll. Die Klimarahmenkonvention trat 1994 in Kraft, nachdem sie von 50 Staaten ratifiziert wurde. Seither findet jährlich eine Konferenz der zwischenzeitlich über 190 Vertragsstaaten (COP, Conference of Parties) statt, auf der die Verpflichtungen überprüft und weiterentwickelt werden. Bei der Konferenz 1997 in Kyoto unterzeichneten die COP das sogenannte Kyoto-Protokoll [IPCC (1997), UBA (2013)], einen völkerrechtlich verbindlichen Vertrag, in dem zum ersten Mal Grenzwerte für die Treibhausgasemissionen innerhalb der Staatengemeinschaften vereinbart wurden (**Bild 2.34**)

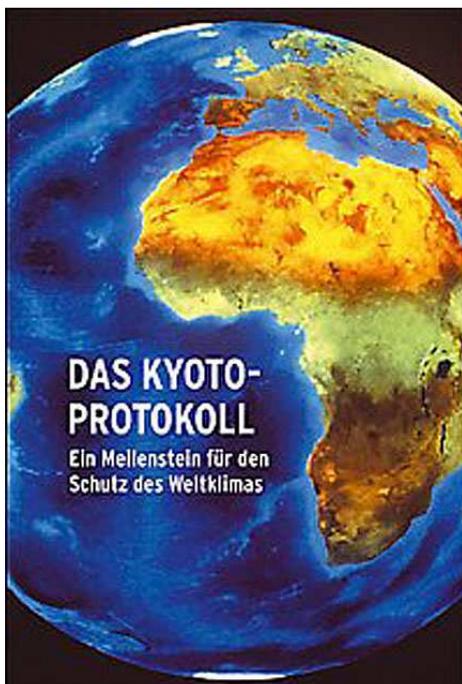
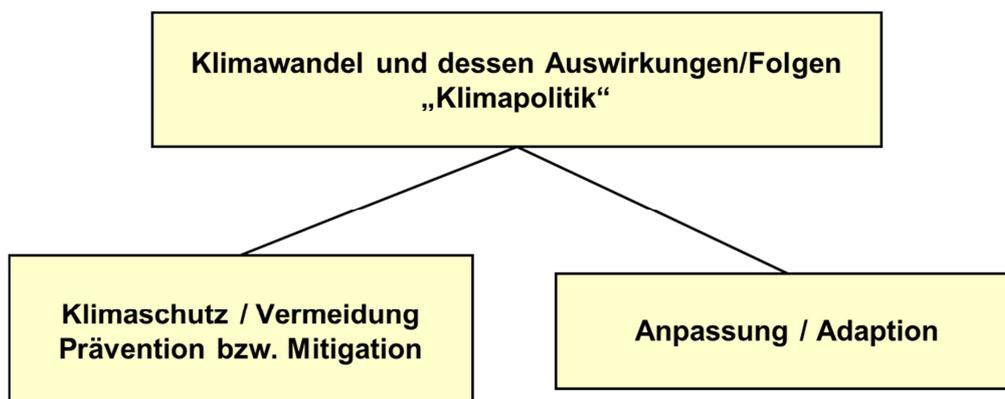


Bild 2.34:
**Kyoto-Protokoll – Ein Meilenstein für den Schutz
des Weltklimas [www.geo.uni.lu (2012)]**

Heute werden unter dem Begriff „Klimapolitik“ [wikipedia (2012h)] alle gesellschaftlichen, technischen und finanziellen Aktivitäten und Maßnahmen zusammengefasst, die dem Klimawandel und den damit verbundenen Auswirkungen/Folgen entgegen-

wirken. Da der Klimawandel weltweit beobachtet wird, hängen die zu erzielenden Fortschritte im wesentlichen von dem Erfolg der internationalen Zusammenarbeit und von den einzelnen nationalen, regionalen und lokalen Bemühungen ab. Ein weltweiter Temperaturanstieg um 2,0 °C über dem vorindustriellen Niveau wird u.a. von der Europäischen Union und von Deutschland als gerade noch beherrschbar angesehen [Bundesregierung (2008a), Bundesregierung (2008b), Wikipedia 2012h)]. Da das im 21. Jahrhundert zu erwartende Ausmaß der Klimaänderung vor allem durch die Fähigkeit der Menschheit bestimmt wird, den Ausstoß an Treibhausgasen dauerhaft in ausreichendem Maße zu verringern, ist es nach den Angaben des Weltklimarates erforderlich, die weltweiten Treibhausgas-Emissionen bis zum Jahr 2050 um 50 Prozent gegenüber dem Jahr 1990 zu verringern [IPCC (2007a - f)]. Gelingt es hingegen nicht, die anthropogen bedingten Klimaeinflüsse zu minimieren, ist mittel- bis langfristig mit Schäden in erheblichem Ausmaß zu rechnen.

Da bereits ökologische, soziale und wirtschaftliche Veränderungen zu beobachten sind und der Klimawandel trotz größter Anstrengungen sich lediglich noch abmildern lässt, wird von allen international/national maßgebenden Fachgremien und politischen Entscheidungsträgern eine Doppelstrategie als zielführend angesehen [IPCC (2007a - f)]. Als Teil einer auf Vorsorge und Nachhaltigkeit ausgerichteten Umweltpolitik stützt sich die Klimapolitik heute auf zwei Eckpunkte:



Die Hauptansätze des Klimaschutzes (Prävention / Mitigation) basieren dabei sowohl

- auf der Umsetzung von Maßnahmen, die zur langfristigen Verringerung/Vermeidung der Treibhausgas-Emission beitragen als auch
- auf weltweiten Anstrengungen, die Natursysteme wie Ozeane, Feuchtgebiete und große Waldareale (z.B. Regenwälder) so zu stabilisieren, dass diese als „CO₂-Senken“ weiterhin entsprechende Mengen an Kohlenstoffdioxid aufnehmen können.

Um den damit verbundenen Anforderungen gerecht zu werden, haben beispielsweise die Europäische Union ebenso wie die Anrainerstaaten des Bodensees daher umfassende Energie- und Klimaprogramme bzw. Klimaschutzinitiativen [ECCP (2010), BMU (2009b), BMU (2012b), BMU (2012c), IBK (2005), BAFU (2010b), Lebensministerium (2007), Stecker (2012)] entwickelt. Durch derartige politische Vor-

gaben soll versucht werden, im nationalen Maßstab eine zuverlässige, umwelt- und klimaverträgliche Energieversorgung aufzubauen, mit der die zukünftigen gesellschaftlichen Aufgaben und Ansprüche gewährleistet werden können. Große Bedeutung spielen hierbei vor allem Klimaschutzmaßnahmen zur Energieeinsparung (z.B. Industrie, Landwirtschaft, private Haushalte, Gebäudesanierung, Verkehr, ...) sowie zur Steigerung der Energieeffizienz (Einsatz und die verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien (Wasserkraft, Solarenergie, Windkraft,...)). Durch die im Rahmen der Klimaschutzinitiativen bereitgestellten finanziellen Mittel sollen außerdem vorhandene Potenziale zur Emissionsminderung kostengünstig erschlossen und entsprechende innovative Projekte angeregt werden.

Da -wie bereits angedeutet- die Erderwärmung aus Sicht vieler Fachinstitutionen trotz begonnener Prävention und Mitigation nicht mehr zu stoppen sondern vielmehr nur noch abgeschwächt werden kann, sind neben den Vermeidungs-/Verringerungsstrategien auch Initiativen und Maßnahmen zur Anpassung an den unvermeidlichen Klimawandel als zweite Säule der Klimapolitik erforderlich. Die beispielsweise in Deutschland, Schweiz und Österreich vorliegenden Anpassungsstrategien stellen dabei übergeordnete nationale Handlungsrahmen dar, die sich an den Prinzipien der Offenheit, Kooperation und Partnerschaft, der wissenschaftlichen Erkenntnisse, der zeitlichen und räumlichen Flexibilität, der Vorsorge und Nachhaltigkeit, der Subsidiarität und Verhältnismäßigkeit, des integraler Ansatzes sowie der internationalen Verantwortung orientieren [*Bundesregierung (2008a), Bundesregierung (2008b), BMU (2009a), BMU (2009b), Anpassung (2012a), Lebensministerium (2011a), AWEL/IBK (2007), OcCC (2008), BAFU (2012d)*]. Sie erlauben somit u.a.

- die Chancen des Klimawandels zu nutzen,
- die Risiken und Gefahren abzuschätzen und damit die Vulnerabilität gegenüber den Folgen des Klimawandels zu mindern
- die Anpassungsfähigkeit der natürlichen, gesellschaftlichen und ökonomischen Systeme zu erhalten bzw. zu steigern,
- alle betroffenen Akteure zu sensibilisieren sowie
- konkrete Vorsorgemaßnahmen abzuleiten, belastbare Entscheidungsgrundlagen bereitzustellen und Verantwortlichkeiten festzulegen.

Ferner lassen sich durch eine aufeinander abgestimmte Ausarbeitung und bereichsübergreifende Betrachtungsweise die dabei resultierenden Synergien zwischen den einzelnen Sektoren bestmöglich nutzen und Zielkonflikte zumindest verringern.

Eine Auswahl an Natur- und Gesellschaftsbereichen, die durch direkte oder indirekte Auswirkungen der Klimaänderung in besonderem Ausmaß betroffen sind, ist in **Bild 2.35** in Form einer einfachen Wirkungsmatrix am Beispiel der Schweiz dargestellt [*BAFU (2012d)*]. Die Punkte zeigen dabei eine einseitige oder gegenseitige Wechselwirkung zwischen den Anpassungsmaßnahmen und dem Klimawandel an.

		Klimawandel (Temperatur, Niederschlag, Wind)			
		Wasser - Niederschlag - Abfluss - Grundwasser - Wasserqualität - Schnee - Eis	Boden - C-Speicher - Fruchtbarkeit - Erosion	Luft - Ozon - Aerosole - Feinstaub	Biodiversität - Phänologie - Ausbreitung - Aussterben - Migration - Neobiota
Anpassungsmaßnahmen	Wasserwirtschaft	•	•	•	•
	Umgang mit Naturgefahren	•	•	•	•
	Landwirtschaft	•	•	•	•
	Waldwirtschaft	•	•	•	•
	Energie	•	•		•
	Tourismus	•	•	•	•
	Biodiversitätsmanagement	•	•	•	•
	Gesundheit	•	•	•	•
	Raumentwicklung	•	•	•	•

Bild 2.35:
Wirkungsmatrix: direkte oder indirekte Auswirkungen des Klimawandels und Betroffenheit ausgewählter Natur- und Gesellschaftsbereiche [BAFU (2012d)]

Für Deutschland und Österreich wurden darüber hinaus noch die Sektoren „Bauwesen, Wohnen, Finanzwirtschaft, Fischerei, Katastrophenmanagement, Bevölkerungsschutz, Ökosystem Alpen, Ökosystem Verkehrsinfrastruktur und Mobilität, Wasserhaushalt und Wirtschaft/Industrie/Gewerbe/Handel“ identifiziert, die mit Handlungsoptionen benannt sind.

Da die bislang verfügbaren Daten z.T. große Unwägbarkeiten aufweisen, sind die Anpassungsstrategien als dynamische Prozesse angelegt, die auf mögliche Änderungen der Rahmenbedingungen (z. B. weitere unerwartete Auswirkungen/Folgen, neue Forschungsergebnisse,...) jederzeit fallweise angepasst werden können. U.a. erweist es sich als vorteilhaft, hierbei am Vorsorgegrundsatz orientierte pragmatische Lösungsansätze zu verfolgen. U.a. weisen die so genannten „no/low-regret-Maßnahmen“ auch dann einen „Mehrwert“ auf, wenn die realen Entwicklungen nicht oder nur in geringerer Ausprägung eintreten sollten. Ferner können solche Strategien unter Berücksichtigung ökonomischer, demographischer, technologischer und politischer Rahmenbedingungen auch dazu beitragen, bereits heute die systembezogene Vulnerabilität zu verringern bzw. die Resilienz einzelner Systemkomponenten zu erhöhen.

Die vorgeschlagenen Handlungsoptionen wurden bzw. sind daher im Rahmen von Aktionsplänen laufend unter Beteiligung aller Betroffenen (Bund, Länder, Kantone, Gemeinden, gesellschaftlichen Interessensgruppen) zu priorisieren und konkretisieren [Bundesregierung (2011), Anpassung (2012a), Lebensministerium (2011b), CCCA (2011), BAFU (2012d)].

Um insgesamt eine angemessene Vorsorge im privaten, wissenschaftlichen, unternehmerischen sowie behördlichen Planen und Handeln zu ermöglichen, ist es ferner erforderlich

- in allen betroffenen Bereichen die noch vorhandenen Wissenslücken zu schließen,
- geeignete Strategien zum Umgang mit den vorhandenen Unsicherheiten zu entwickeln,
- innovative Techniken und Bewirtschaftungsformen zu fördern sowie
- die Anpassungserfordernisse in rechtlichen Regelungen aufnehmen sowie ökonomische Anreize z.B. im Rahmen von Forschungsvorhaben zu schaffen.

Außerdem ist für eine erfolgsversprechende Vorgehensweise eine transparente Bewusstseinsbildung in Form eines breit angelegten Kommunikations- und Dialogprozesses sowie ein kooperatives Miteinander zwischen allen Beteiligten unerlässlich.

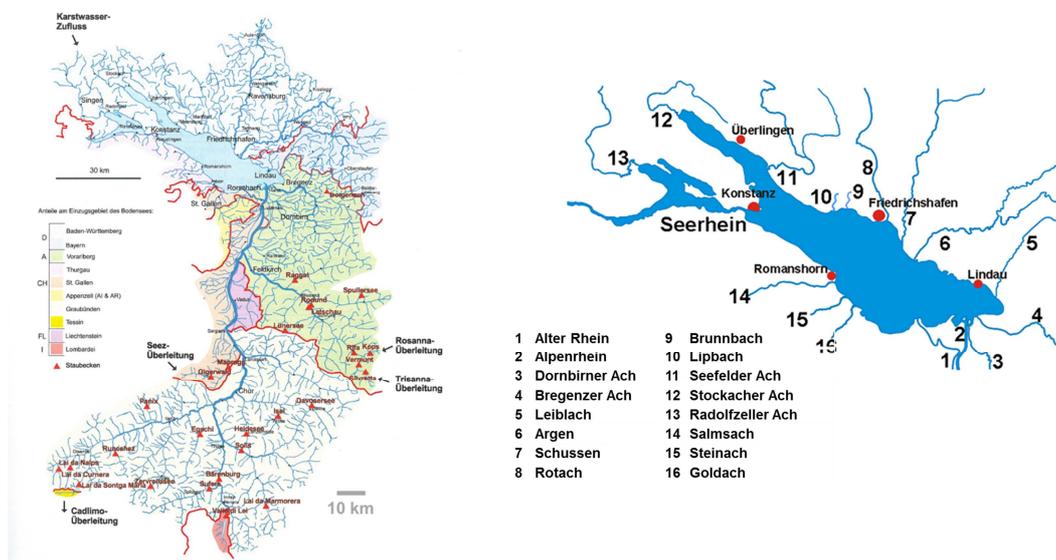
3.0 Beobachtete Klimaentwicklungen im Einzugs- und Trinkwasserversorgungsgebiet des Bodensees

3.1 Allgemeines

Der Klimawandel und die damit einhergehenden Auswirkungen sind nicht nur weltweit sondern auch in der Bodenseeregion deutlich wahrnehmbar [Born (2008), AGBU (2006)]. Mehrere Studien und Veröffentlichungen aus der Schweiz, Österreich und Deutschland [z.B. KLIWA Heft 11 (2007), Ostendorp (2007), AWEL/IBK (2007), OcCC (2007), Formayer (2008)] zeigen, dass sich vor allem in den letzten Jahrzehnten die hydrometeorologischen Verhältnisse im Bodenseeraum und dessen Einzugs- und Trinkwasserversorgungsgebiet z.T. in signifikanter Weise verändert haben. Insbesondere die Alpen sind wie kaum eine andere Region Europas hiervon betroffen. Wie anhand der Beispiele in Kap. 3.2 dargelegt wird, dokumentieren eine Vielzahl an Parametern und Langzeittrends zur Lufttemperatur, Windstärke und -richtung, Sonneneinstrahlung, Niederschlagsmenge und -verteilung, Gletscherschmelze, Grundwasserneubildung oder zum Abflussregime der Fließgewässer in den Bodensee dabei die bis dato beobachteten Auswirkungen der Klimaentwicklungen.

Neben den „landseitig“ dokumentierten Umweltauswirkungen werden durch den Klimawandel jedoch auch die gewässerspezifischen Gegebenheiten des Bodensees und seiner abiotisch bzw. biotisch veränderbaren Kompartimente maßgeblich beeinflusst. Einfache Wechselwirkungen, wie etwa die direkte Erwärmung des Seewassers und der Änderung der Wasserstände setzen sich dabei in komplexen Prozessabläufen innerhalb des sensiblen Ökosystems „Bodensee“ fort (Kap.3.3). U.a. sind hiervon die Strömungs- und Stofftransportvorgänge im See, die thermische Schichtung / Zirkulation, das Einschichtungsverhalten der Zuflüsse, die Tiefenwassererneuerung, die Änderung der Wasserbeschaffenheit sowie die Beeinflussung der ökologischen Systeme betroffen.

Das Einzugsgebiet des Bodensees umfasst das Hoheitsgebiet von 5 Staaten (Schweiz, Österreich, Deutschland, Liechtenstein, Italien) mit insgesamt 10 Ländern bzw. Kantonen (Baden-Württemberg, Bayern, Vorarlberg, Thurgau, Stankt Gallen, Appenzell, Graubünden, Liechtenstein, Tessin, Lombardei). Es weist einschließlich der Seefläche bis zum Abfluss bei Stein am Rhein eine Gesamtfläche von etwa 11.500 km² auf, ca. 50% davon befinden sich in alpin geprägten Regionen oberhalb von 1500 m. Über 75% der zufließenden Wassermenge kommt aus den schweizerischen und österreichischen Alpen. Insgesamt münden in den Bodensee mehr als 200 Flüsse, Bäche und Gräben. Der größte Zufluss ist der Alpenrhein, der etwa zwei Drittel des dem Bodensee zufließenden Wassers liefert. Außerdem hat im Einzugsgebiet des Bodensees die Wasserkraftnutzung zur Stromerzeugung und die damit verbundenen Wasserüberleitungen eine lange Tradition. Heute sind über 30 Speicherbecken mit insgesamt ca. 790 Mio. m³ Speichervolumen in Betrieb [IGKB (2013a), LUBW (2011d), BWV (2013)].



Das Trinkwasserversorgungsgebiet erstreckt sich vom Bodensee bis in die nördlichen Regionen von Süddeutschland. Insgesamt werden ca. 5 Mio. Menschen in den Kantonen Thurgau und St. Gallen sowie in Baden-Württemberg und Bayern mit Trinkwasser aus dem Bodensee versorgt. U.a. beliefert die Bodensee-Wasserversorgung über ein ca. 1700 km langes Verteilsystem 320 Städte und Gemeinden auf der Schwäbischen Alb, im Schwarzwald, im mittleren Neckarraum bis in den Main-Tauber-Kreis.



3.2 Meteorologische und hydrologische Auswirkungen im Einzugs- und Trinkwasserversorgungsgebiet des Bodensees

3.2.1 Luft-/Umgebungstemperatur

Wie die auf Deutschland, Schweiz und Österreich bezogenen Untersuchungen zum zeitlichen Verlauf der Luft-/Umgebungstemperatur der Vergangenheit zeigen, ist es vor allem seit den 60/70er Jahren des letzten Jahrhunderts in allen Anrainerstaaten des Bodensees wärmer geworden. Die Lufttemperaturen stiegen hierbei um ca. 1 °C (**Bild 3.1**).

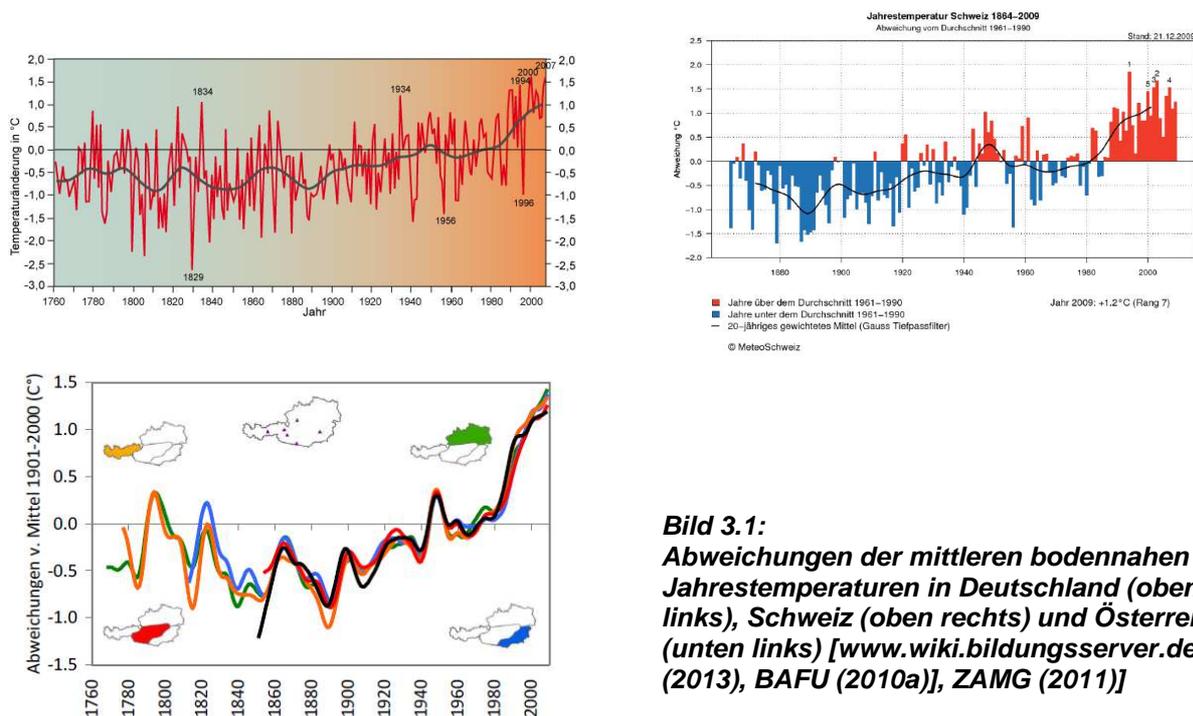


Bild 3.1:
Abweichungen der mittleren bodennahen Jahrestemperaturen in Deutschland (oben links), Schweiz (oben rechts) und Österreich (unten links) [www.wiki.bildungsserver.de (2013), BAFU (2010a)], ZAMG (2011)]

Speziell der überdurchschnittlich hohe Temperaturanstieg von über 1,5 °C im Alpenraum liegt über den welt- bzw. europaweiten Mittelwerten. Dies ist vor allem auf seine geographische Lage zurückzuführen. Dieser stellt einen Übergangsbereich verschiedener Klimaeinflüsse dar: je nach Wetterlage und Jahreszeit werden die Alpen klimatisch vom atlantischen Ozean oder durch das eurasische Festland beeinflusst. Zusätzlich liegen die Alpen im Grenzraum zwischen dem Mittelmeerklima und der Westwindzone. Bereits bei geringsten Änderungen, beispielsweise der Windzirkulation, resultieren erkennbare Einflüsse auf das Klima [ZAMG (2011), Formayer (2001), Formayer (2004), Formayer (2008), Kromp-Kolb (2008), ÖWVA (2010), ZAMG (2011), Cipra (2009), Cipra (2011), Kuhn (200x)].

Die Temperatur in den Niederungen der Alpennordseite ist dabei vor allem im Winterhalbjahr angestiegen (**Bild 3.2**). Das Fehlen sehr kalter Winterhalbjahre gegen

Ende des 20. Jahrhunderts macht deutlich, dass sich eine grundlegende Änderung im winterlichen Temperaturregime eingestellt hat. Im Hinblick auf das Sommerhalbjahr ist vor allem die markante Warmphase Mitte des 20. Jahrhunderts zu erwähnen. Das Sommerhalbjahr 2003 war 3,0 bis 3,5 °C wärmer als die anderen.

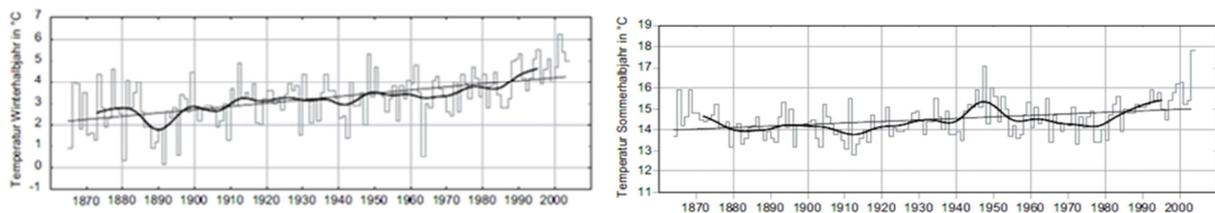


Bild 3.2:

Langjährige Temperaturentwicklung des Winterhalbjahres (links) und des Sommerhalbjahres (rechts) in den Niederungen der Alpennordseite. Angegeben sind die Werte von Jahr zu Jahr, das Mittel über 20 Jahre sowie der lineare Trend (graue Trendlinie) [BUWAL (2004)]

Auch in der Bodenseeregion und im Trinkwasserversorgungsgebiet ergaben sich ähnliche Temperaturverläufe. Die Datenreihen von Wettermessstationen am Bodensee (z.B. Konstanz und Bregenz) bzw. die Aufzeichnungen in Stuttgart und Karlsruhe zeigen den gleichen Trend (**Bild 3.3, Bild 3.4**). In allen Fällen war seit der letzten Seegfrörne 1962/63 (**Bild 3.5**) ein deutlicher Temperaturanstieg zu verzeichnen [Regionalverband (2009a), Regionalverband (2009b), Regionalverband (2010), IGKB (2013), IGKB (2004), KLIWA Heft 3 (2011)].

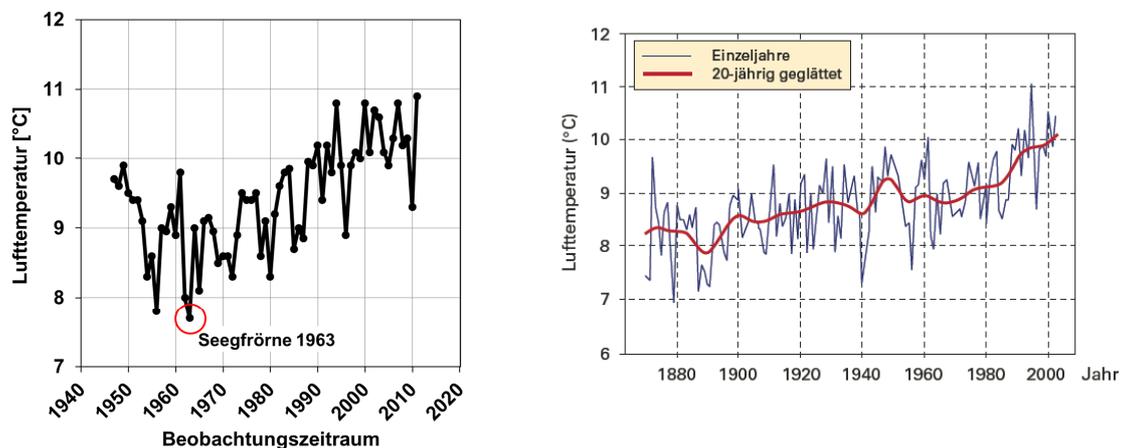


Bild 3.3:

Verlauf der mittleren Jahrestemperaturen in Konstanz (links) und Bregenz (rechts) seit 1945 bzw. 1880 [IGKB (2004), IGKB (2013b)]

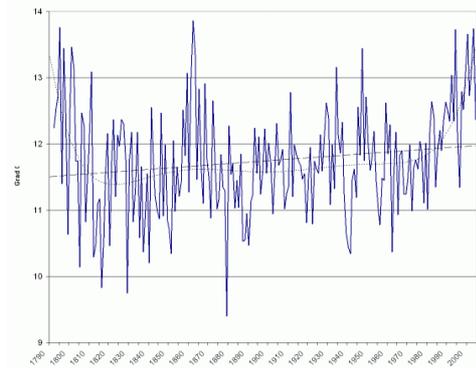
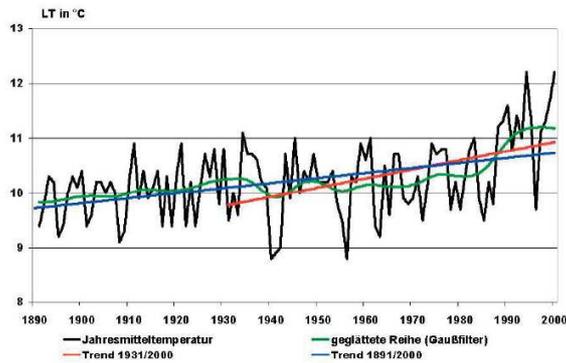


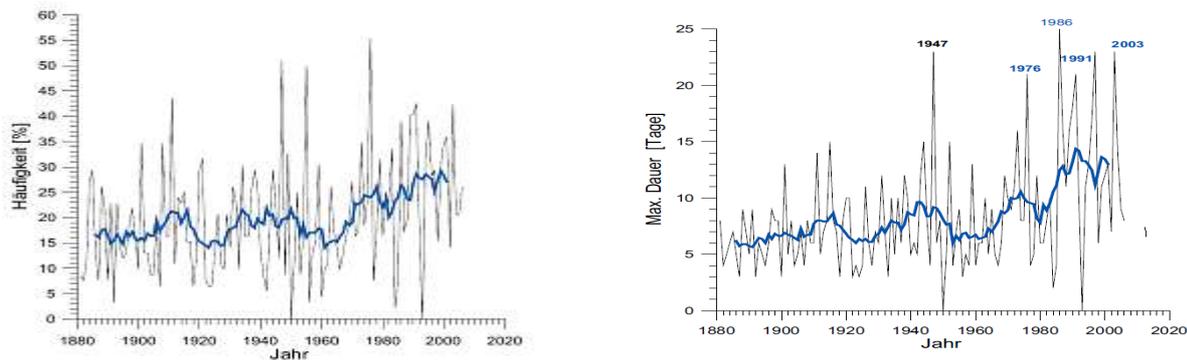
Bild 3.4:
Temperaturverlauf in Süddeutschland, dargestellt am Beispiel von Karlsruhe (links) [Günther (2004)] und Stuttgart, Klimaatlas Baden-Württemberg (rechts) [www.lubw.baden-wuerttemberg.de (2013)]



Bild 3.5:
Impressionen von der Seegröne 1962/63 [IGKB (2011c), Zintz (2009)]

3.2.2 Heißere Sommer mit länger anhaltenden Trockenperioden

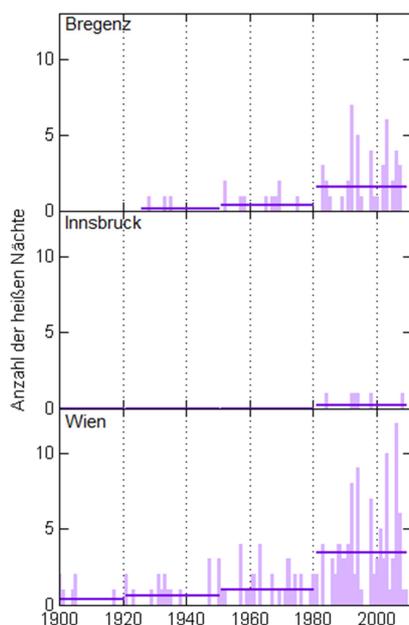
Großwetterlagen (GWL) sind für das regionale Wettergeschehen verantwortlich. Ändern sich diese, dann ändert sich auch langfristig das Klima. Im Rahmen des KLIWA-Projektes wurde am Beispiel von „kritischen“ Großwetterlagen, die zu heißen und trockenen Sommern in Süddeutschland führen, wissenschaftlich untersucht. Hierbei wurden u.a. langjährige Datenreihen der Vergangenheit statistisch ausgewertet (**Bild 3.6**) [KLIWA Heft 18 (2012)].

**Bild 3.6:**

Häufigkeit und maximale Dauer von „kritischen“ Großwetterlagen, die zu heißen und trockenen Sommern in Süddeutschland führen [KLIWA Heft 18 (2012)]

Aus den Erkenntnissen lässt sich ableiten, dass im Vergleich zu dem Zeitraum vor 1985 die Eintrittswahrscheinlichkeit für einen heißen Sommer mit länger anhaltender Trockenperiode¹ bereits heute um mehr als den Faktor 16 angestiegen ist, d.h. gegenüber früher haben wir heute bereits mehr heiße und trockene Sommer [KLIWA 18 (2012), UBA 2005a), Schneider (2013)]. Eine ähnliche Auswertung, die sich auf die Verhältnisse im Winterhalbjahr beziehen, liegt bislang für Süddeutschland noch nicht vor.

Diese Aussage wird indirekt auch dadurch bestätigt, dass in Bregenz und anderen Städten von Österreich die Anzahl an heißen Nächten angestiegen ist (**Bild 3.7**) [www.ZAMG.ac.at (2013)]

**Bild 3.7:**

Entwicklung der jährlichen Anzahl der heißen Nächte (tägliche Tiefsttemperatur über 20° C) in Bregenz (oben), Innsbruck (Mitte) und Wien-Hohe Warte (unten [www.ZAMG.ac.at (2013)] Dargestellt sind Jahreswerte (Balken) und Mittelwerte der Zeiträume 1900–1920, 1921/26–1950, 1951–1980 sowie 1981–2009 (Linien)

¹ Überschreiten der Maximaltemperatur in mehr als 15 Tagen, Häufigkeit von kritischen GWL: > 35%

3.2.3 Wind

Als Wind wird in der Meteorologie eine gerichtete Luftbewegung (Massenstrom) in der Erdatmosphäre bezeichnet, die durch Unterschiede im Luftdruck zwischen den Luftmassen bedingt ist. Dabei bewegen sich großflächig Luftteilchen aus dem Gebiet mit einem höheren Luftdruck solange in das Tiefdruckgebiet bis der Luftdruck ausgeglichen ist. Dadurch ist zusammen mit dem Einfluss der Erddrehung die Hauptwindrichtung bestimmt.

Bei der Ausprägung der regionalen und bodennahen Windfeldern spielen aber auch die Reibung und vor allem die Topographie der näheren Umgebung eine entscheidende Rolle (**Bild 3.8**). Im Bereich des Bodensees werden die Windentwicklungen vor allem durch das Rheintal, das im Norden liegende Schussental sowie den Bregenzer Wald, den Sipplinger Berg, den Bodanrück und den südlich gelegenen Rorschacher Berg wesentlich beeinflusst.

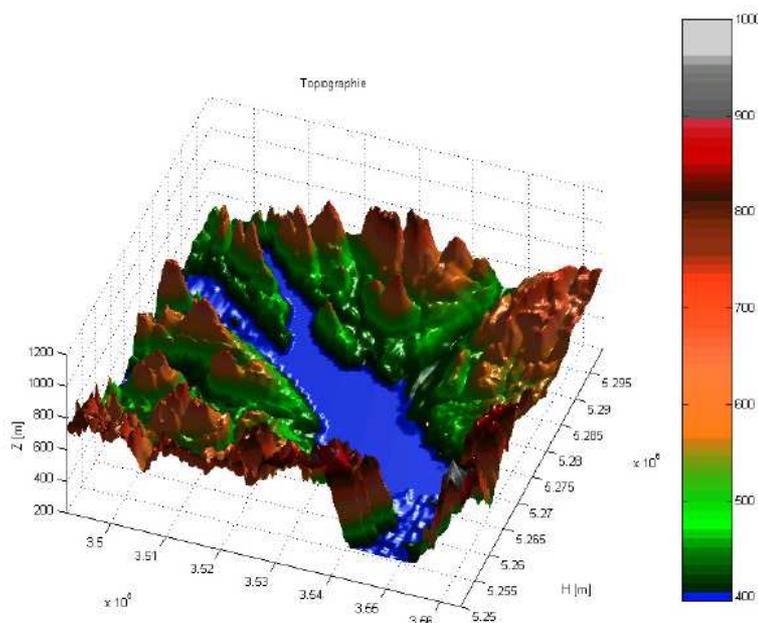


Bild 3.8:
3D Ansicht der Bodenseetopographie
[Abschlussbericht
BodenseeOnline
(2008)]
alle Flächen mit einer geographischen Lage von < 400 mN.N. sind blau eingefärbt

Wie die bisherigen Untersuchungen und Datenauswertungen zur Windrichtung und Windstärke zeigen, resultieren überwiegend Hauptwindrichtungen aus südwestlicher Richtung. Unter Berücksichtigung messtechnischer Rahmenbedingungen (z.B. Standortwechsel) sind zumindest seit 1960 keine eindeutigen Trends erkennbar. Eine signifikante, auf Klimaeinflüsse zurückzuführende Änderung der Windverhältnisse ist bislang nicht nachweisbar.

3.2.4 Niederschlag

Nach heutigem Verständnis wird unter Niederschlag Wasser bezeichnet, das infolge der Schwerkraft in flüssiger (Regen) oder fester Form (Hagel, Schnee, Graupel) aus Wolken auf die Erde fällt, oder sich direkt durch Kondensation (Tau) oder Resublimation (Reif) an Objekten absetzt. Die Häufigkeit und die Menge des Niederschlages sind den globalen Großwetterlagen und den regionalen Gegebenheiten (kleinräumig wirksame meteorologische Verhältnisse, Topographie, ...) abhängig und daher charakteristisch für die jeweiligen geographischen Gebiete.

Im Unterschied zur Temperatur zeigt das bislang beobachtete Niederschlagsmuster für die Klimaregionen des Großraums der Alpen keine einheitlichen Trends. Für zwei Gebiete sind die Langzeittrends sogar gegenläufig. Während im Nordwesten seit 1860 ein Niederschlagsanstieg zu verzeichnen ist, nahm im Südosten die Niederschlagssumme eher ab (**Bild 3.9**) [www.zamg.ac.at (2013)].

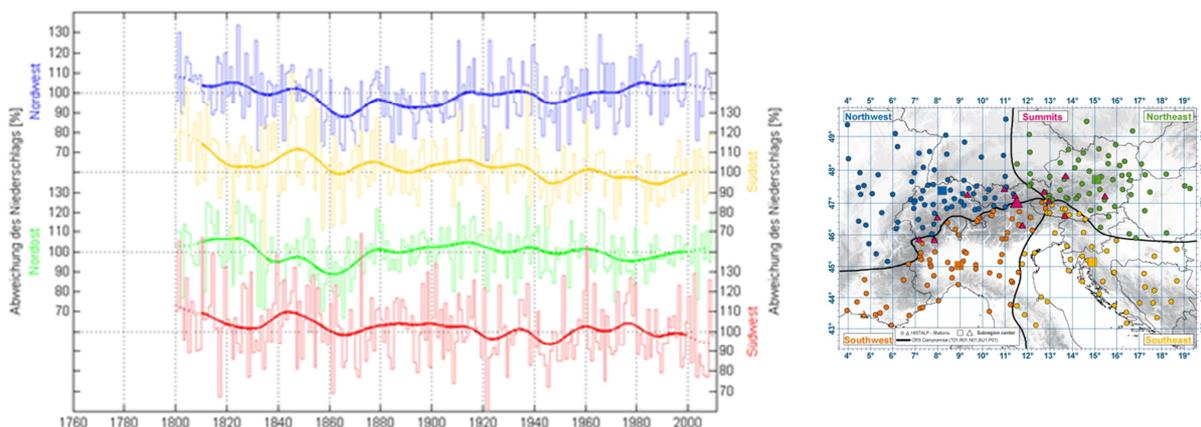


Bild 3.9:

Entwicklung der jährlichen Niederschlagssumme im Großraum der Alpen, dargestellt sind jährliche Abweichungen vom Mittel der Jahre 1901–2000 und deren geglättete Trends (Untersuchungszeitraum: 1800 – 2009) [www.ZAMG.ac.at (2013), ZAMG (2011)]

Erläuterung: Die Haupt-Klimaregionen des Großraums Alpen und das HISTALP-Stationsnetz (rechts)

Blau: Region Nordwest

Grün: Region Nordost

Gelb: Region Südost

Rot: Region Südwest (rot, rechte y-Achse) des Großraums Alpen 1800–2009.

Auch in kleinräumigeren Regionen wie in den Schweizer Alpen waren in den letzten Jahrzehnten regionale und zeitliche/saisonale Unterschiede zu erkennen (**Bild 3.10**).

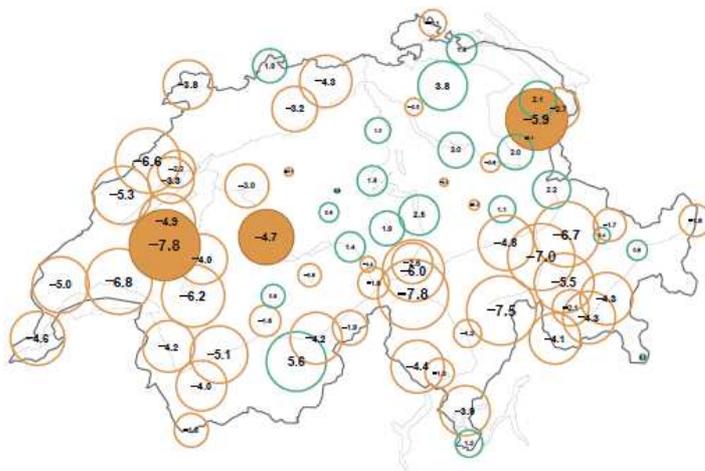


Bild 3.10:
Räumliches Muster der Jahresniederschlagsänderungen von 1982 bis 2011 in der Schweiz [BAFU (2012c)]

Die Flächen der Kreise veranschaulichen die Größe der Änderungen pro Dekade in Prozent. Grüne Farbe bezeichnet zunehmende Trends, die braune Farbe steht für abnehmende Trends. Ausgefüllte Kreise kennzeichnen signifikante Trends auf dem 95%-Niveau

Im Rahmen des ALP-IMP-Projekts wurden im Alpenraum zusätzlich die monatlichen Niederschlagssummen für den Zeitraum 1800 bis 2003 ausgewertet. Unter Berücksichtigung der Einzugsgebietsgrenzen des Bodensees konnten daraus die Gebietsniederschläge abgeschätzt werden. In **Bild 3.11** ist die dabei ermittelte zeitliche Entwicklung der Niederschlagssummen als 10-jährige gleitende Mittelwerte, untergliedert in die vier Jahreszeiten und das gesamte Jahr dargestellt [Ostendorp (2007)]. Danach stiegen in Übereinstimmung mit der überregionalen Klimaentwicklung der letzten beiden Jahrhunderte im Winterquartal die Niederschlagssummen geringfügig an. Im Sommer- und im Herbst-Quartal nahmen sie dagegen leicht ab. Insgesamt wurde für den Zeitraum 1931 bis 2003 im Einzugsgebiet des Bodensees eine weitgehend unveränderte durchschnittliche Niederschlagssumme pro Jahr zwischen 1200 und 1400 L/m² beobachtet.

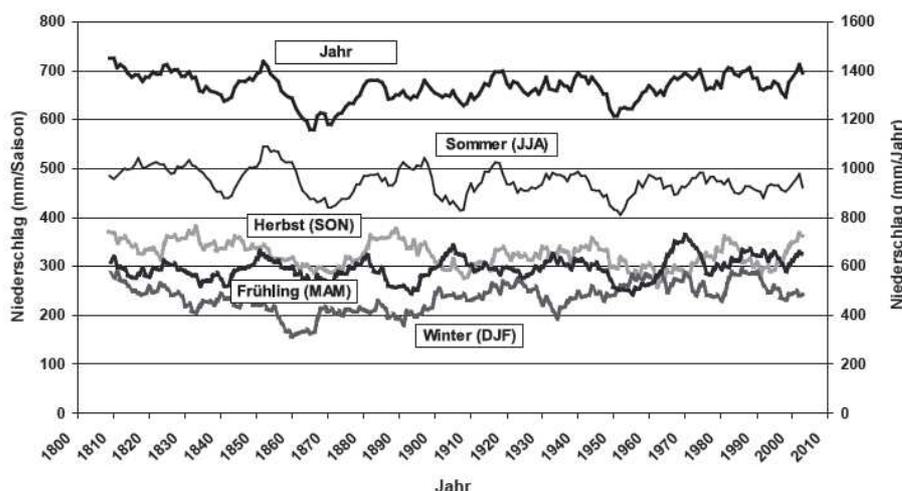


Bild 3.11:
Niederschlagsmenge im Bodensee-Einzugsgebiet von 1800 bis 2003 [Ostendorp (2007)]
Erläuterungen siehe Text

Süddeutschland, d.h. das Trinkwasserversorgungsgebiet des Bodensees, gehört zu den gemäßigten Klimazonen der mittleren Breiten. Das Wettergeschehen ist über-

wiegend von westlichen, südwestlichen Winden geprägt, die nahezu das ganze Jahr über feuchte Luftmassen vom Atlantik heranführen. Ähnlich wie in den Alpen fallen die dadurch resultierenden Niederschläge (Intensität und Häufigkeit) aufgrund der topographischen Struktur von Baden-Württemberg ebenfalls zeitlich und räumlich unterschiedlich aus (**Bild 3.12**).

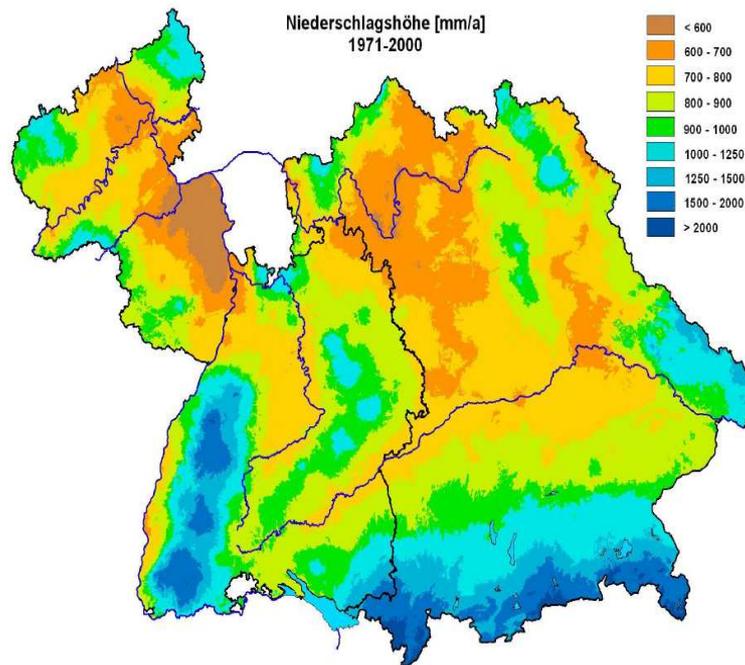


Bild 3.12:
Mittlerer jährlicher Niederschlag (Gebietsmittel) in Baden-Württemberg
Rechts: Untersuchungszeitraum 1971 – 2000
[KLIWA Heft 17 (2012)]

Während in den vom Wind angeströmten Bergen (z.B. Schwarzwald) i.d.R. hohe Niederschlagsmengen von 1400 bis 1600 mm zu verzeichnen sind, erweisen sich die Niederungen (z.B. Oberrheinebene, das mittlere Neckartal und das Taubertal) mit weniger als 500 - 800 L/m² pro Jahr als eher niederschlagsarm. In den Mittelgebirgslagen betragen die Niederschlagsmengen in den vergangenen Jahrzehnten ca. 800-1100 mm/a [KLIWA Heft 17 (2012)].

Die innerjährliche Verteilung der Niederschläge in Baden-Württemberg war bislang dadurch gekennzeichnet, dass im Sommer aufgrund von Starkregenereignissen i.d.R. insgesamt höhere Niederschlagsmengen als im Winter resultierten [KLIWA Heft 17 (2012)]. Je nach Region (z.B. Schwarzwald) wurden bzw. werden aber auch winterliche Maxima beobachtet (**Bild 3.13**).

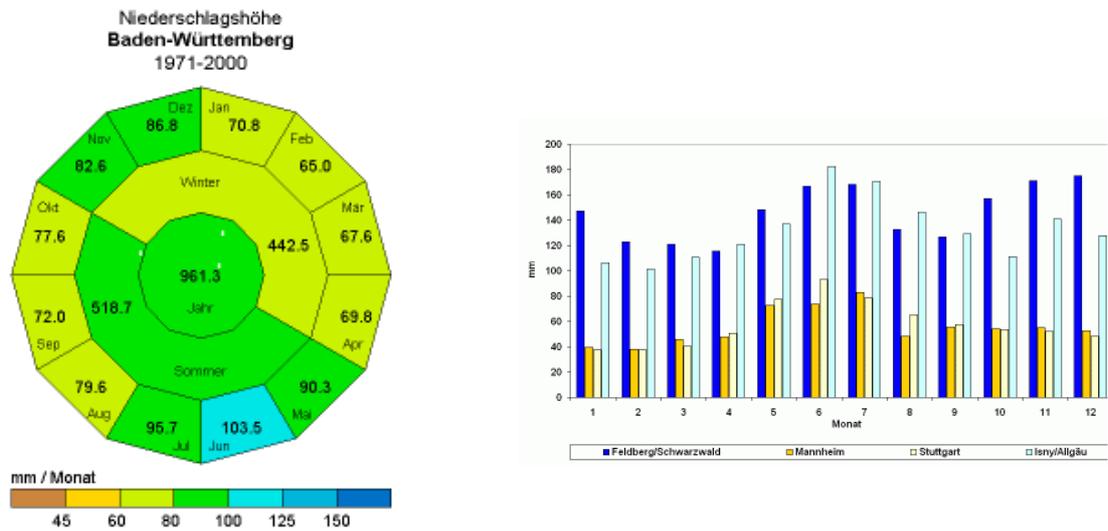


Bild 3.13: Innerjährliche Variabilität der Niederschläge in Baden-Württemberg (Untersuchungszeitraum 1971 – 2000) [KLIWA 17 (2012), www.lubw.baden-wuerttemberg.de (2013)]

Insgesamt fielen in ganz Baden-Württemberg während der letzten 100 Jahre bei leicht ansteigender Tendenz- im Jahresdurchschnitt etwa 950 L Niederschläge pro m² [www.lubw.baden-wuerttemberg.de -> Klimaatlas (2013)] (**Bild 3.14**).

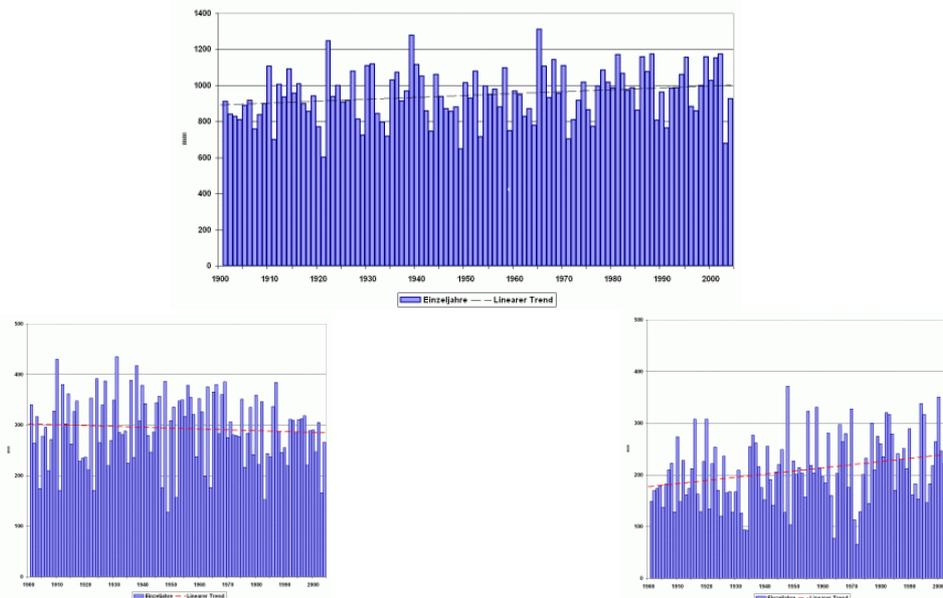


Bild 3.14: Gebietsmittel des Niederschlags in Baden-Württemberg, Untersuchungszeitraum: 1900 – 2005 [www.lubw.baden-wuerttemberg.de (2013)]
oben: Jahresdurchschnitt
unten links: Sommerniederschläge unten rechts: Winterniederschläge

Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die bei sommerlichen Starkregenernissen niedergegangenen Wassermengen seit den 30er Jahren des vorigen Jahrhunderts geringer wurden und tendenziell im Winter zunahmen [KLIWA Heft 8 (2006), Anschöber (2012)] (**Bild 3.15**).

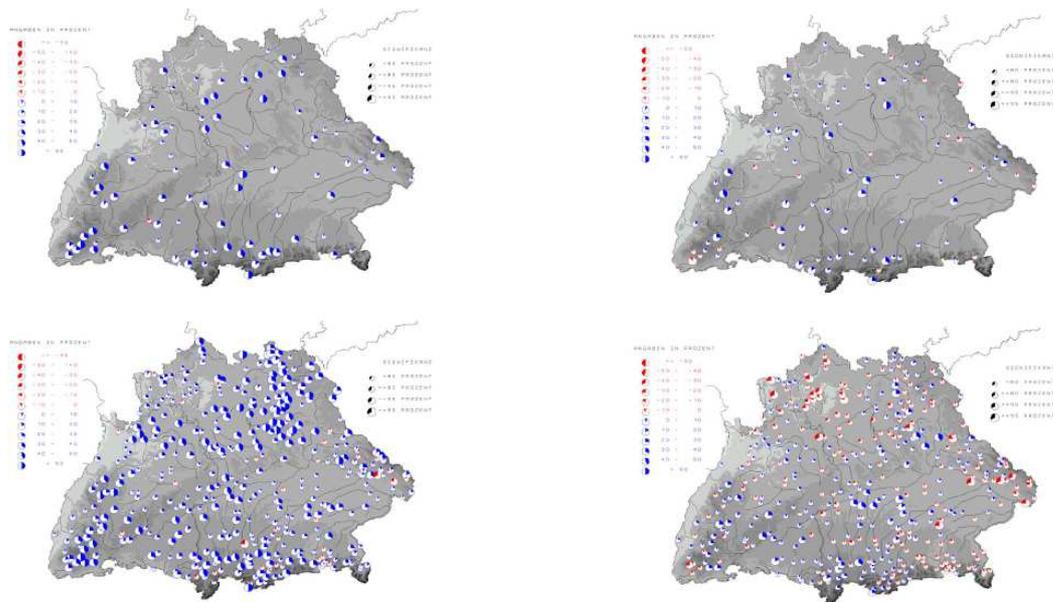


Bild 3.15:
Zu- und Abnahme der Starkniederschläge (in Prozent des Mittelwerts) in Baden-Württemberg und Bayern [KLIWA Heft 8 (2006)]
links: hydrobiologisches Winterhalbjahr *rechts: hydrobiologisches Sommerhalbjahr*
oben: 1901 bis 2000 (92 Stationen), *unten: 1931 bis 2000 (415 Stationen)*

3.2.5 Gletscherschmelze und Auftauen von Permafrostgebieten

Für die hoch gelegenen Alpenregionen sind die Klimaentwicklungen und deren Auswirkungen auf den Wasserkreislauf und die Kryosphäre von besonderer Bedeutung [Haubner (2002), Hamberger (2012), DAV (2010), IGKB (2007a), Formayer (2001), Formayer (2008), cipra (2009), cipra (2011), KHR (2006), Schädler (2006), BUWAL (2004b), Kromp-Kolb (2009), Flessner (2009), Kinzelbach (2007), BAFU (2006), BAFU (2012c)]. Sowohl das Eis der Gletscher als auch der Permafrostboden reagieren äußerst sensibel auf die beobachteten Temperaturerhöhungen (**Bild 3.16**).



Bild 3.16:
Gletscherschwund in den Alpen, Beispiel
Vernagt Ferner, Österreich [Mayer (2007)]

Seit dem letzten Gletscherhochstand von 1850 sind beispielsweise rund 100 kleinere Gletscher in den Schweizer Alpen gänzlich verschwunden. Das Volumen der größeren Gletscher hat um bis zu zwei Drittel abgenommen [BUWAL 2004]. Von 1850 bis 1973 verringerte sich das Eisvolumen von 107 km³ auf 74 km³, die Eismächtigkeit nahm dabei um durchschnittlich 19 m ab [Haubner (2002)]. Vor allem durch die Temperaturzunahme der letzten Jahrzehnte, insbesondere im Jahr 2003 hat sich der Gletscherschwund verstärkt fortgesetzt (**Bild 3.17**).

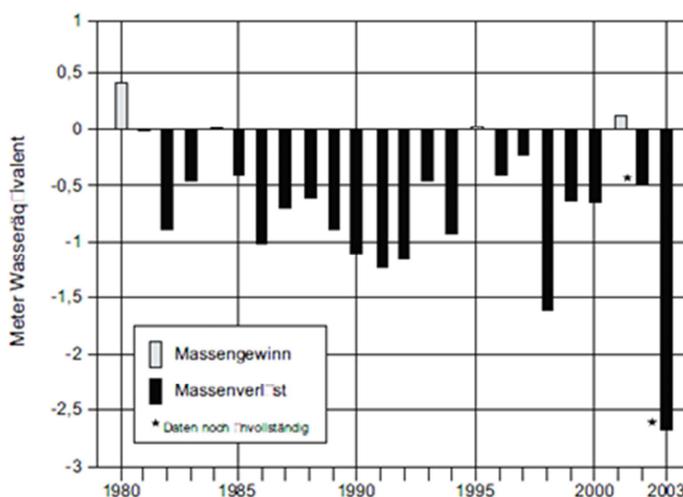


Bild 3.17:
Massenverlust ausgewählter Alpengletscher seit 1980 [BUWAL (2004)]
u.a. St Sorlin (F), Sarennes (F), Silvretta (CH), Gries (CH), Sonnblickkees (A), Vernagtferner (A), Kesselwandferner (A), Hintereisferner (A), Caresèr (I)

In der Gesamtschweiz sind heute noch ca. 55 km³, in Österreich ca. 17 km³ Wasser in Form von Eis gebunden. Im Einzugsgebiet des Bodensees ist zurzeit eine Fläche von unter 1,5% vergletschert (**Bild 3.18**), wobei das Eisvolumen auf ca. 10 km³ geschätzt wird [LUBW (2011d)], BAFU (2012c)], ZAMG (2013)]. Die Gletscher liegen in den Quellgebieten von Vorder- und Hinterrhein sowie der Ill.

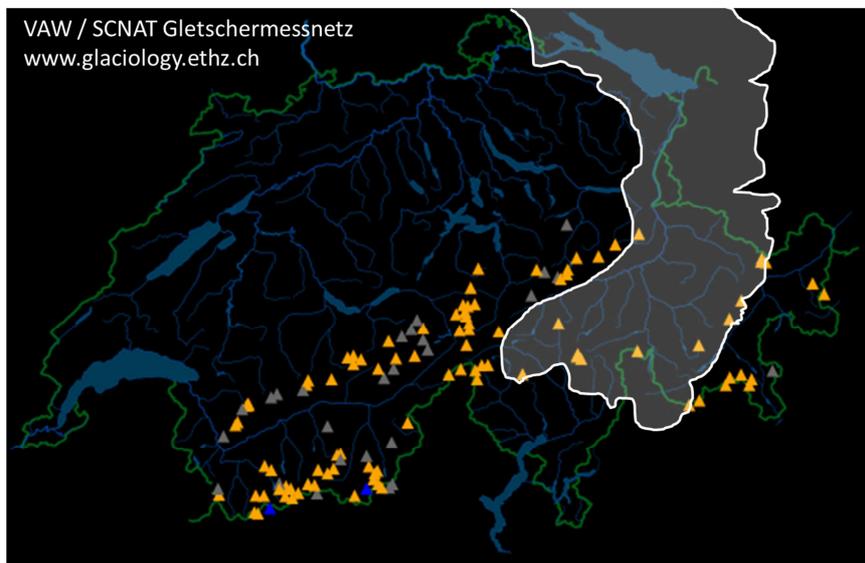


Bild 3.18:
**Gletscher in den
schweizerischen Alpen
und im Einzugsgebiet
des Bodensees**
[www.glaciology.ethz.ch
(2013), modifiziert
Schick]

Im Vergleich mit den jährlichen Niederschlagsmengen bzw. den saisonalen Schneefällen spielt das Eis der Gletscher als Wasserressource und -speicher nur eine untergeordnete Rolle. Die über Jahre stattfindende Gletscherspende trägt nur in geringem Umfang zum jährlichen Gesamtabfluss der Fließgewässer bei [BAFU (2012c)], ZAMG (2013)]. In den letzten drei Jahrzehnten konnten keine signifikanten Auswirkungen auf den Abfluss (Pegel Diepoldsau/Alpenrhein) festgestellt werden [LUBW (2011d)]. Lediglich das Abflussregime von kleineren Fließgewässern wurde im Hochsommer durch die Eisabschmelze beeinflusst. Je nach regionalen Verhältnissen wurden dabei in Trockenperioden die Niedrigwasserführungen im Sommer ausgeglichen.

Neben dem Gletscherschwund und den damit verbundenen hydrologischen Auswirkungen ist vor allem auch das zunehmende Auftauen des Permafrostbodens² für die beobachteten Hanginstabilitäten und Massenbewegungen verantwortlich. Die Permafrostgrenze hat sich aufgrund der Temperaturzunahme in den letzten 100 Jahren um 150 bis 200 m nach oben verschoben. Heute liegt die Höhenstufe des Permafrost bei etwa 2500 bis 3100 m [Kromp-Kolb (2009)]. Vor allem bei extremen Niederschlägen können so vermehrt partikuläre Inhaltsstoffe über die Zuflüsse in den Bodensee eingetragen werden.

² Der Permafrostboden ist ein ganzjährig gefrorener Boden, wo vereistes Wasser die losen Gesteinsbrocken zusammenhält. Im Hochgebirge ist Permafrost sowohl in Festgestein als auch in Lockermaterial wie Schutthalden, Moränen und Böden anzutreffen.

3.2.6 Schmelzwasserabfluss und Schneebedeckung

Wie bereits angedeutet, wird in den Gletschern das Wasser über Jahrzehnte gespeichert, während die Verweilzeit in der Schneedecke nur wenige Monate beträgt. Dies ist dadurch bedingt, dass im Laufe eines Winters die Schneedecke zunimmt und steigende Temperaturen im Frühjahr wieder zum Abschmelzen der Schneedecke führt. Bezogen auf die gesamte Schweiz resultierte dadurch pro Jahr eine Schmelzwassermenge von rund 22 km³, wovon ca. 6 km³/a dem Rheineinzugsgebiet zuzuordnen sind (**Bild 3.19**). Dies ist wesentlich mehr als der Anteil der Gletscherschmelze.

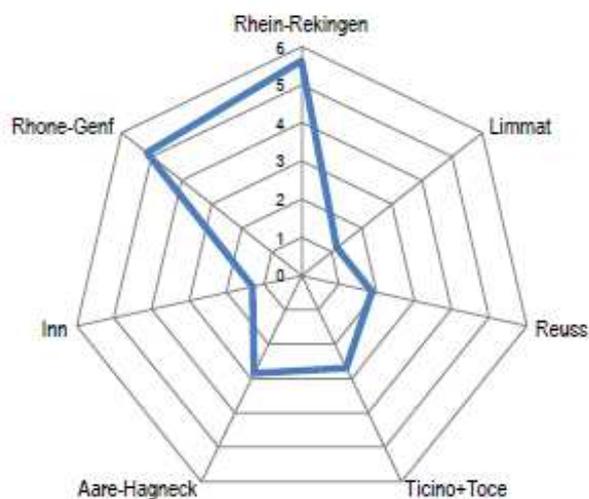


Bild 3.19:
Jährliche Schmelzwassermengen aus Schnee in verschiedenen Einzugsgebieten der Schweiz (Mittelwerte 1980 - 2009). Die größten Schneereserven sind in den Einzugsgebieten der Rhone und des Rheins zu finden. Alle Abflussangaben in Mrd. m³/a [BAFU (2012c)].

Darüber hinaus wurde in den letzten 30 Jahren beobachtet, dass sich das Verhältnis der Anzahl von Tagen mit Schneefall³ (**Bild 3.20**) im Vergleich zur totalen Anzahl Tage mit Niederschlag stark verringert hat. Beispielsweise haben zwischen 1978 und 2009 die Schneetage in den alpinen Gebieten mit einer Höhe von unter 500 m ü. NN. um über 40% abgenommen [BAFU(2012c)]. Die Grenze für Schneesicherheit liegt heute in der Schweiz bei etwa 1200 bis 1300 m ü. NN [Haubner (2002)]. Da außerdem in den letzten Dekaden vermehrt zu Beginn und Ende des Winterhalbjahres Niederschläge in Form von Regen zu verzeichnen waren, führte dies dazu, dass bereits Veränderungen im Zusammenhang mit dem innerjährlichen Abflussregime der Fließgewässer in Abhängigkeit von den zeitlichen und räumlichen Rahmenbedingungen nachzuweisen sind.

³ Zwischen 1961 und 1990 lag die Anzahl der Schneetage im Randbereich (300 bis 900 m) durchschnittlich zwischen 20 und 120 Tagen, im mittleren Bereich (900 bis 1800 m) zwischen 120 und 160 Tagen und im oberen Bereich (über 1800 m) bei 160 bis 260 Tagen. Nur auf den ganz hohen Gipfeln (ab 2700 m) lag teilweise noch länger als 260 Tage Schnee [Flessner (2009), Kotlarski (2007)].

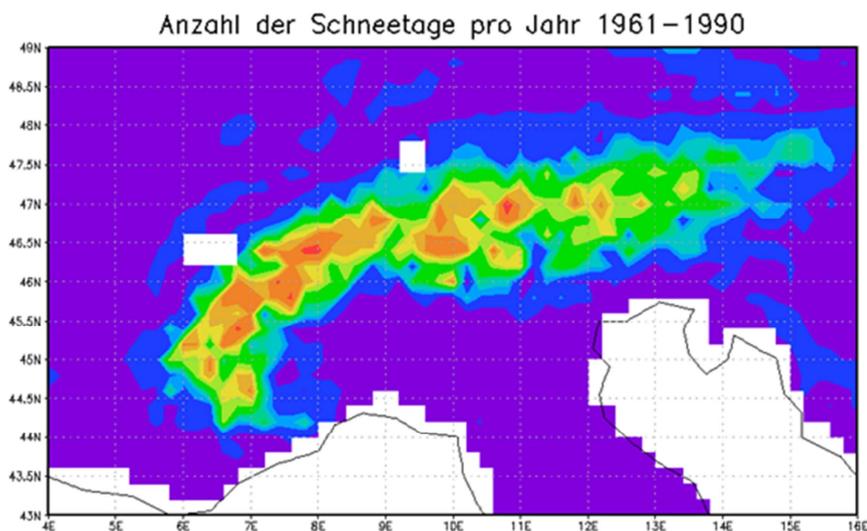


Bild 3.20:
Anzahl der Schneetage in den Alpen pro Jahr von 1961-1990 [Flessner (2009)]

Ähnliche Aussagen lassen sich auch für die Schneedeckendauer für das Trinkwasserversorgungsgebiet des Bodensees ableiten (**Bild 3.21**).

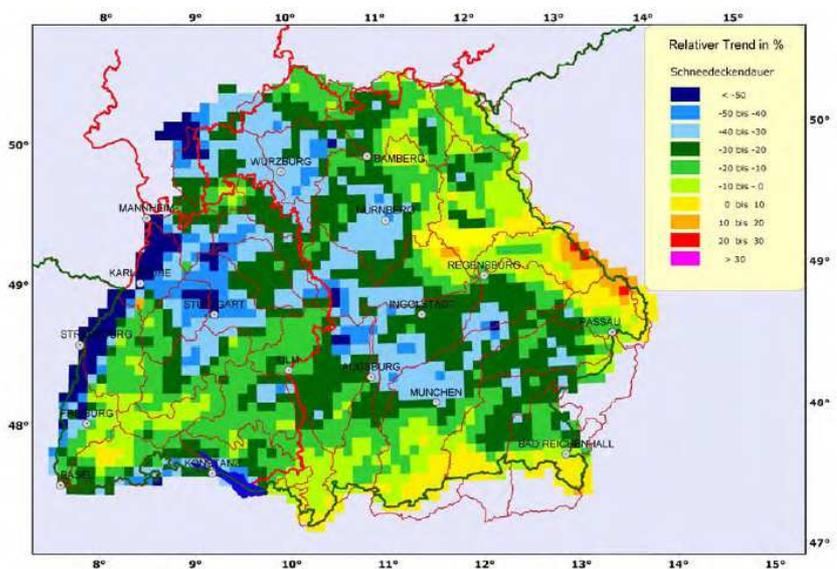


Bild 3.21:
Trend der mittleren Anzahl der Tage mit einer Schneedecke in Baden-Württemberg und Bayern, Beobachtungszeitraum: 1951/52 bis 1995/96 [KLIWA Heft 4 (2004), Günther (2004)]

Für die mittlere Schneedeckendauer⁴ ergab sich in der Bezugsperiode 1951/52 bis 1995/96 fast flächendeckend ein Rückgang. Vor allem tieferliegende Gebiete (< ca. 300 m ü. NN) und mittlere Höhenlagen (zwischen 300 und 800 m ü. NN) waren hiervon betroffen. Der Rückgang betrug stellenweise mehr als 40 %. Lediglich in höhergelegenen Regionen (> 800 m ü. NN) resultierten geringere Werte bzw. kam es zu einer leichten Zunahme.

3.2.7 Abflussregime von ausgewählten Zuflüssen zum Bodensee, dargestellt am Beispiel des Alpenrheins und der Schussen

Um das Langzeitverhalten der Bodenseewasserstände charakterisieren und beurteilen zu können, ist die Kenntnis des Abflussregimes seiner Zuflüsse erforderlich. Nachfolgend werden am Beispiel des Alpenrheins und der Schussen die Jahresabflüsse, die Jahresganglinien und das Abflussverhalten bei extremen Niederschlagsereignissen im Einzugsgebiet dargestellt.

a) Jahresabflüsse

Der Alpenrhein mit seinem überwiegend alpin geprägten Einzugsgebiet ($A_{\text{Einzugsgebiet}} = 6.000 \text{ km}^2$) liefert über 60% des Gesamtzuflusses zum Bodensee. Wie die Messungen der Jahresabflüsse und Ganglinien am Pegel Diepoldsau zeigen, sind in den letzten 100 Jahren hinsichtlich seiner Wasserführung im Jahresmittel eine insgesamt geringfügige Zunahme zu erkennen, die durch die abnehmende bzw. zunehmende Tendenz im Sommer- bzw. Winterhalbjahr bedingt ist (**Bild 3.22**) [LUBW (2011d), LUBW (2011c), Dienst (2008), IGKB (2011a), IGKB (2011b)].

Diese saisonalen Veränderungen sind jedoch nicht eindeutig auf klimatische Ursachen sondern vielmehr auch auf anthropogene Einflüsse wie z.B. den schwerpunktmäßig zwischen 1950 und 1976 stattgefundenen Ausbau und Betrieb der Speicherkraftwerke im alpinen Einzugsgebiet des Bodensees zurückzuführen. Die Speicherbecken werden i.d.R. ab Mai/Juni bei einsetzender Schneeschmelze und anlaufendem Hochwasser bis August/September langsam gefüllt. Ab September/Okttober wird durch die verstärkte Wasserabgabe die Niedrigwasserführung der Zuflüsse im Alpenrheintal dagegen teilweise kompensiert.

⁴ Die Schneedeckendauer ist dabei die aussagekräftigste, unmittelbar aus Messungen und Beobachtungen ermittelte Grundgröße zur Beschreibung der Schneedeckenverhältnisse.

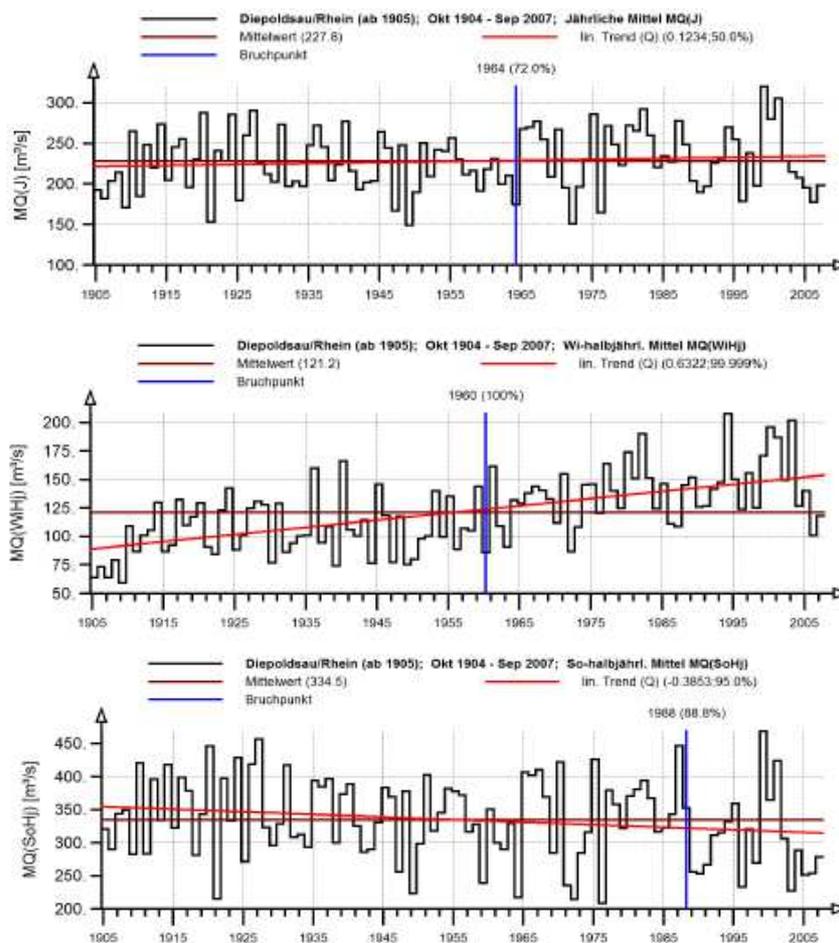


Bild 3.22:
Abfluss Alpenrhein, Pegel Diepoldsau [LUBW (2011d)]
Oben: Jahresmittel
Mitte: Winterhalbjahresmittel
Unter: Sommerhalbjahresmittel

Auch für die von Norden aus dem oberschwäbischen Moränen- und Schotterflächen- gebiet ($A_{\text{Einzug}} = \text{ca. } 780 \text{ km}^2$) in den Obersee mündende Schussen (mittlerer Gesamtzufluss zum Bodensee ca. 3%) ist seit Anfang der 20er Jahre des letzten Jahr- hundertts ein leichter Anstieg bezüglich der Wasserzuführung zu beobachten, der bei stagnierender Wassermenge im Sommer vor allem auf die Zunahme im Winterhalb- jahr zurückzuführen ist (**Bild 3.23**) [LUBW (2011d)].

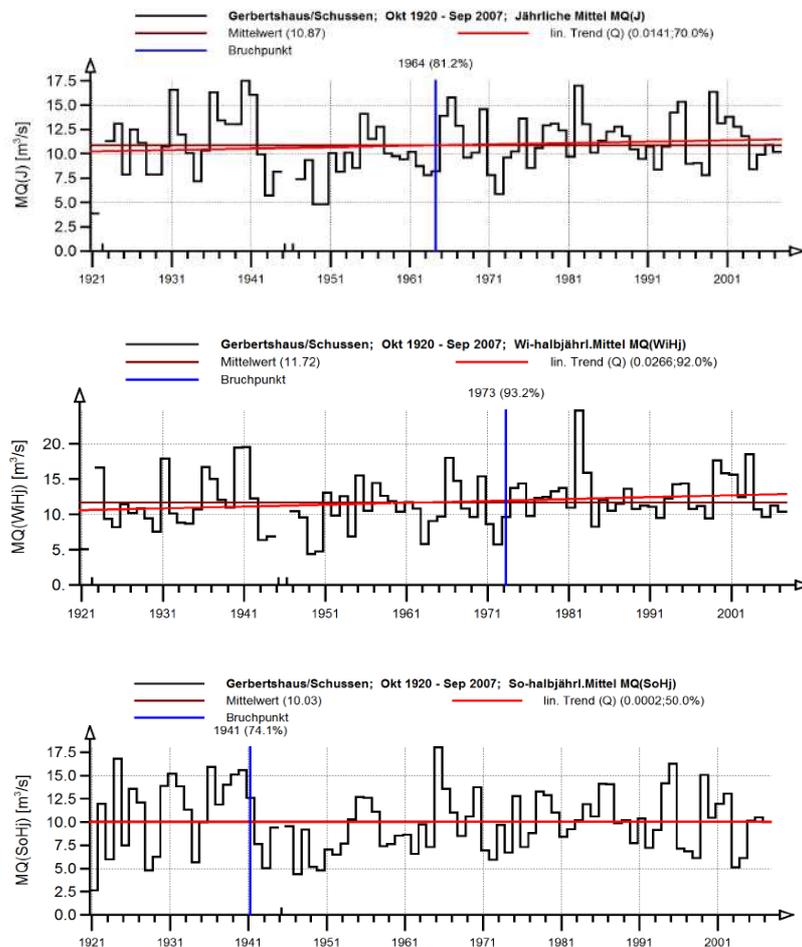


Bild 3.23:
Abfluss Schussen, Pegel Gerbertshaus [LUBW (2011d)]
Oben: Jahresmittel
Mitte: Winterhalbjahresmittel
Unter: Sommerhalbjahresmittel

b) Jahresganglinien

Zur Beurteilung des saisonalen Verhaltens der Abflusskennwerte wurden neben den Langzeitanalysen auch Jahresganglinien z.B. aus Monatsmittelwerten ermittelt [LUBW (2011d)]. Hierzu wurden verschiedene Teilzeitreihen auf der Basis statistischer Auswertungen (z.B. Bruchpunkteermittlung) miteinander verglichen. Insgesamt konnten so die o.g. Tendenzen einer saisonalen Verschiebung im Langzeitverhalten der Zuflüsse zum Bodensee bestätigt werden: die Höchstwerte im Sommer wurden insgesamt im Laufe der letzten 100 Jahre gemindert und die Niedrigwerte im Winter erhöht (**Bild 3.24**).

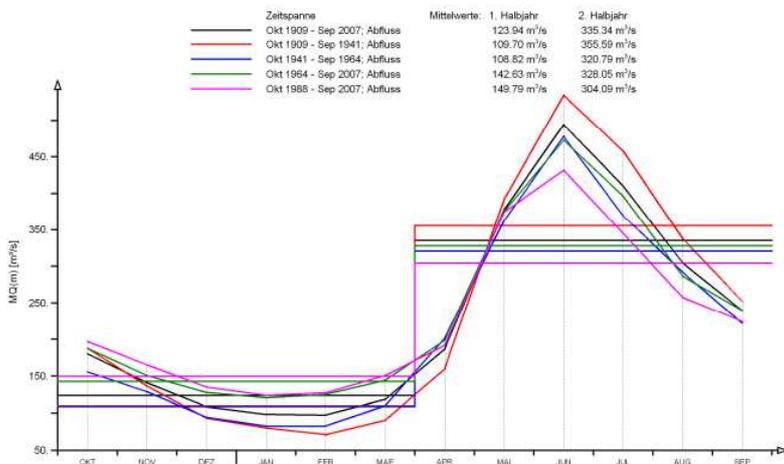


Bild 3.24: Jahrgang der mittleren monatlichen Abflüsse des Alpenrheins (Pegel Diepoldsau) für die gesamte Zeitreihe (1910-2007) und für Teilzeitreihen, ermittelt über die Bruchpunkte in den Jahren 1941, 1964, 1988 [LUBW (2011d)]

c) Abflussregime bei Extremwetterlagen

Neben den mittleren Abflussverhältnissen sind im Rahmen der vorliegenden Aufgabenstellung aber auch Extremwetterlagen mit Starkregenereignissen von besonderem Interesse (**Bild 3.25**).

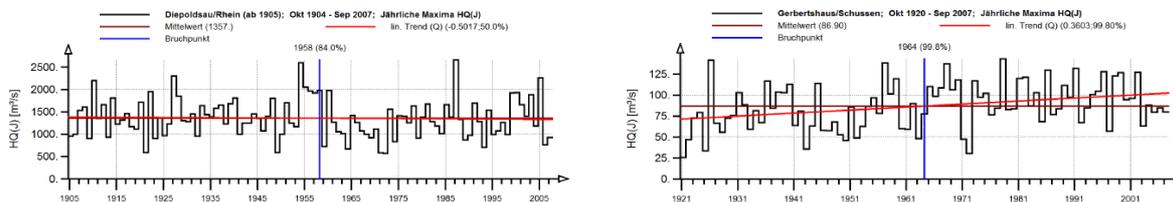


Bild 3.25: Höchste jährliche Abflüsse des Alpenrheins (Pegel Diepoldsau, links) und der Schussen (Pegel Gerbertshaus, rechts) [LUBW (2011d)]

Beispielsweise traten am Alpenrhein von 1905 bis 2007 vier Hochwässer auf, bei denen ein Abfluss von über 2000 m³/s am Pegel Diepoldau beobachtet wurde. Die Extremsituation im August 2005 wurde beispielsweise durch eine Großwetterlage ausgelöst, bei der sich ein Tiefdruckgebiet aus dem Raum Frankreich zum Golf von Genua ausdehnte und von dort weiter über die östlichen Alpen nach Norden zog. Dadurch wurden feuchtwarme Luftmassen aus dem Mittelmeerraum über die Alpen verfrachtet, die anschließend mit einer nordöstlichen Strömung zum Alpennordhang zurückkehrten. Das zusätzliche Auftreten von kühler Luft, die sich auf der Rückseite eines Tiefs von der Nordsee näherte, führte schließlich zu den großflächigen Unwettern mit langanhaltenden und ungewöhnlich hohen Niederschlagsmengen. Da außerdem die Schneefallgrenze auf über 3000 m anstieg und die Böden in den betroffenen Regionen bereits einen hohen Wassersättigungsgrad aufwiesen, waren alle

Voraussetzungen für die verheerenden Hochwasserereignisse in den Zuflüssen zum Bodensee gegeben. Im „Alpenrhein“, „Bregenzerach“ und „Dornbirnerach“ resultierten am 23./24. August 2005 so Wasserführungen, wie sie nur sehr selten erreicht werden (**Bild 3.26**).

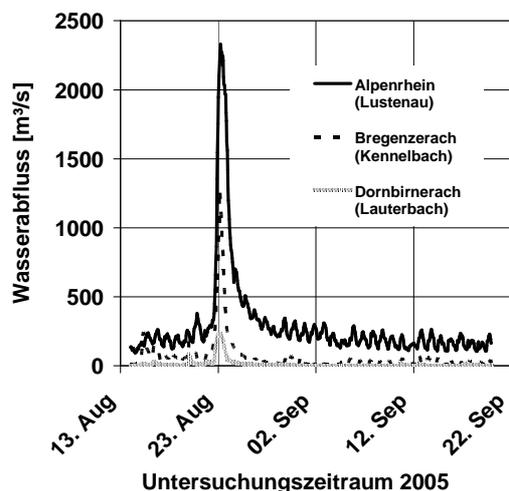


Bild 3.26:

Wasserführung des

- **Alpenrhein (Lustenau Eisenbahnbrücke),**
 $Q_{max} = 2324 \text{ m}^3/\text{s}$,
- **Bregenzerach (Kennelbach),**
 $Q_{max} = 1350 \text{ m}^3/\text{s}$,
- **Dornbirnerach (Lauterach),**
 $Q_{max} = 230 \text{ m}^3/\text{s}$

Untersuchungszeitraum: 13. 08.- 23.09.2005
[Schick (2006), BodenseeOnline (2008)]

Darüber hinaus wurden durch die Hochwasserwelle neben Unmengen an Treibholz vor allem erhebliche Mengen an partikulären Inhaltsstoffen (Gletscherschluff, Erosionen aus Murenabgängen, zerstörten Verkehrswegen und Gebäuden, Geschiebematerial, ...) in den Bodensee eingetragen. Im Alpenrhein (Messstelle Diepoldsau, Rietbrücke) wurde vom schweizerischen Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG) am 24.08.2005 der höchste Wert mit über 3200 mg/l ermittelt (**Bild 3.27**).

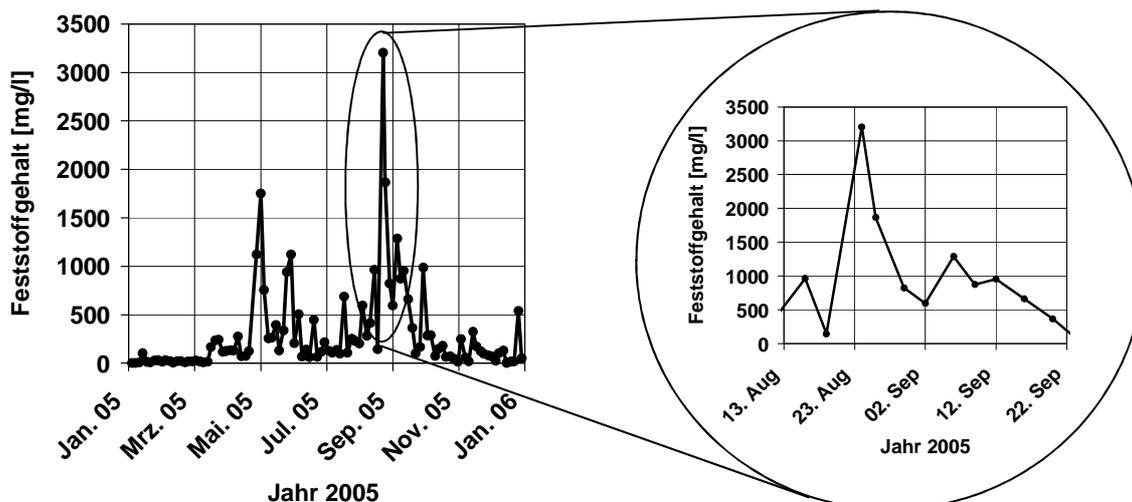


Bild 3.27:

Feststoffeintrag des Alpenrheins in den Bodensee im Jahr 2005 [Schick (2006), BWG (2006)]
Messstelle: Diepoldsau, Rietbrücke

Unter Berücksichtigung der Wasserführung lässt sich im Zeitraum vom 20.08. bis 10.09.2005 somit allein für den Alpenrhein die gewichtsbezogene Feststofffracht zu näherungsweise 1 Mio. Tonnen abschätzen. Bei einer angenommenen Dichte der partikulären Inhaltsstoffe von ca. $1,7 \text{ t/m}^3$ berechnet sich das Volumen der vom Rhein in den Bodensee verfrachteten Sinkstoffe zu fast 600.000 m^3 . Dies bedeutet, dass während des Starkregenereignisses zwischen 20 und 30% der mittleren Jahresmenge von 2 bis 3 Mio. m^3/a (Untersuchungszeitraum: 1911 bis 1999) über den Alpenrhein in den Bodensee eingebracht wurde. Ähnliche Aussagen lassen sich auch für die Bregenzer- und Dornbirnerach ableiten (mittlere Jahresmenge: $0,22 \text{ m}^3/\text{a}$ bis $0,47 \text{ m}^3/\text{a}$, Untersuchungszeitraum: 1931 - 1999) [Schick (2006)].

3.2.8 Grundwasserneubildung und -beschaffenheit im Trinkwasserversorgungsgebiet des Bodensees

Die Grundwasserneubildung im Trinkwasserversorgungsgebiet ist -ähnlich wie das Abflussregime der Zuflüsse für den Bodensee- wasserwirtschaftlich von großer Bedeutung. Sie stellt ein wesentliches Kriterium zur Beurteilung der „natürlichen Regenerationsfähigkeit“ der Grundwasserressourcen dar [Kämpf (2008), Schneider (2012), Schneider (2013)]. Da in Süddeutschland ca. $\frac{3}{4}$ des Trinkwassers aus Grundwasser gewonnen wird, ist die Kenntnis über mögliche längerfristige Entwicklungen der regionalen Grundwasserverhältnisse nicht nur für die Wasserversorgung aus dem Bodensee von besonderem Interesse (**Bild 3.28**) [KLIWA Heft 17 (2012)].

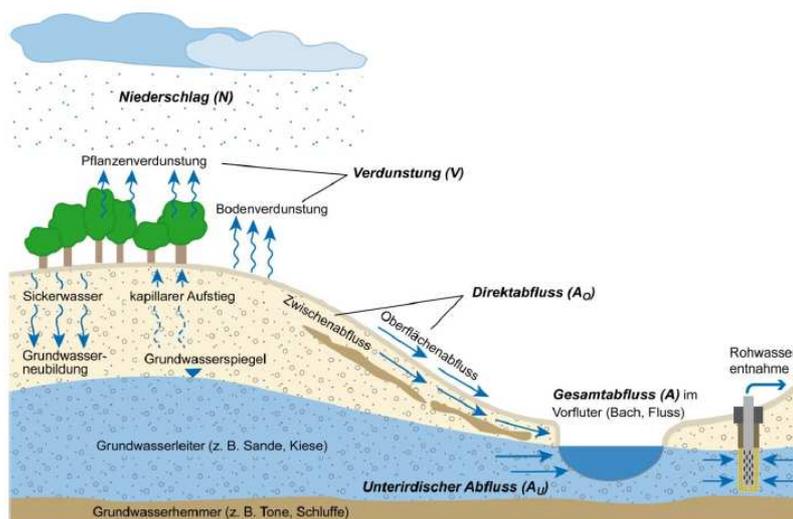


Bild 3.28:
Grundwasserhaushalt,
schematisch
[KLIWA Heft 17 (2012)]

Wie im Rahmen des KLIWA-Projektes gezeigt werden konnte, ist beispielsweise in Süddeutschland eine räumliche Differenzierung zu erkennen, die durch den Einfluss der regionalen klimatischen Verhältnisse (z.B. Niederschlagsverteilung), aber auch der neubildungsrelevanten Effekte des Bodens, der Landnutzung und der hydrogeologischen Gegebenheiten bedingt ist (**Bild 3.29**).

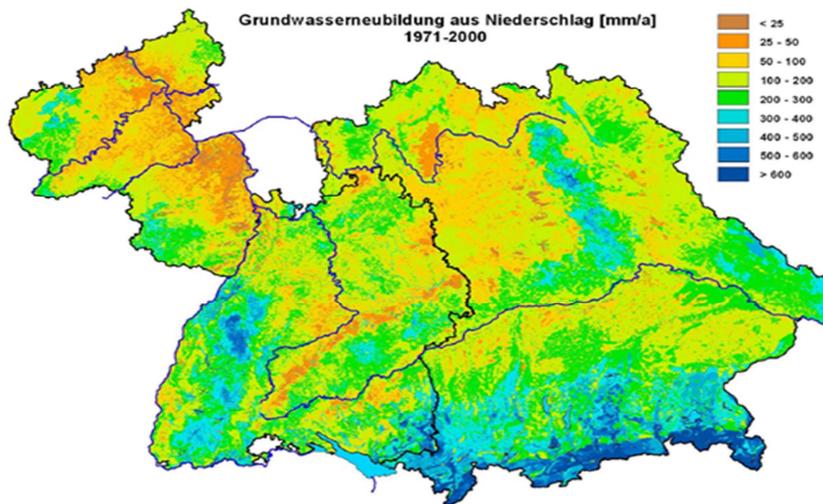


Bild 3.29:
30-jähriges Mittel der Grundwasserneubildung aus Niederschlag, ermittelt auf Basis der homogenisierten Messdaten für den Zeitraum 1971-2000 [KLIWA Heft 17 (2012)]
(alle Angaben in mm/a)

Vor allem die niederschlagsreichen Mittelgebirgsregionen des Schwarzwaldes zeichnen sich durch hohe Grundwasserneubildungsraten von über 250-500 mm/a aus. Hingegen weisen aufgrund ungünstiger Speichereigenschaften des anstehenden Gesteins u.a. das Albvorland oder der mittlere Neckarraum vergleichsweise geringe Grundwasserneubildungsraten auf.

Im Zusammenhang mit der Wassergüte ist außerdem zu beachten, dass bereits heute aufgrund anthropogener Aktivitäten bzw. klimatischer Rahmenbedingungen unerwünschte Auswirkungen auf die Grundwasserbeschaffenheit zu beobachten sind. So werden in Baden-Württemberg teilweise Beeinträchtigungen durch Pflanzenschutzmittel und deren Metabolite nachgewiesen [Grundwasserdatenbank (2013)]. Darüber hinaus sind im Falle von Starkregen-/Hochwasserereignissen vielerorts auch bakteriologische Auffälligkeiten oder erhöhte Konzentration an Trübstoffen im oberflächennahen Grundwasser wegen den damit einhergehenden Überschwemmungen von Gewinnungsanlagen oder der ungenügenden Schutzwirkung der Deckschichten zu beobachten.

3.3 Gewässerspezifische Beobachtungen, dargestellt am Beispiel des Bodensees und seiner Kompartimente

3.3.1 Allgemeines

Der Bodensee (**Bild 3.30**) ist mit einer maximalen Tiefe von 254 m, einer Oberfläche von ca. 535 km² und einem Gesamtvolumen von fast 50 km³ der größte Voralpensee am Nordrand der Alpen. Aufgrund seines alpin geprägten Einzugsgebietes (Kap. 3.2) wird seine Wasserbilanz bzw. sein Wasserstand daher überwiegend von den meteorologischen Verhältnissen in den Alpen und den damit verbundenen Abflussmengen des Alpenrheins, der Bregenzerach und Dornbirnerach bestimmt [IGKB(2004)].



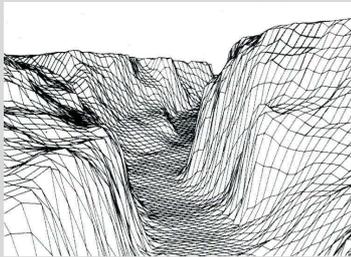
Seeteile:	Obersee, Überlingersee, Untersee
Fläche Einzugsgebiet:	ca. 11.000 km ²
größter Zufluss:	Alpenrhein
Mittlerer Durchfluss:	ca. 350 m ³ /s
Meereshöhe ü.N.N.:	ca. 395 m
Uferlänge, gesamt:	ca. 275 km
max. Längsausdehnung:	ca. 63 km
max. Breite:	ca. 13 km
max. Tiefe Obersee:	ca. 250 m
max. Tiefe Überlingersee:	ca. 150 m
Oberfläche gesamt:	ca. 535 km ²
Volumen:	ca. 48 km ³

Bild 3.30:

Der Bodensee - ein See, drei Anrainerstaaten (Deutschland, Österreich, Schweiz) und keine Hoheitsgrenzen auf dem Wasser (Kondominium) [IGKB (2004)]

Mit Ende der Hauptphase der alpinen Gebirgsfaltung war im Norden ein Vorlandbecken entstanden, in dem sich durch glaziale und fluviatile Erosionen im Laufe der Jahrtausende der heutige Bodensee-raum und der Bodensee selbst entwickelte. Ein „Ur-Bodensee“ existiert seit ca. 1,3 bis 0,9 Mio. Jahren, seine heutige Form erlangte er von etwa 15.000 bis 10.000 Jahren am Ende der Würm-Kaltzeit. Die ersten Hinweise einer Besiedelung stammen aus der Jungsteinzeit (ca. 7.000 bis 5.000 Jahre vor Chr.).

Neben seiner Bedeutung als Trinkwasserspeicher (**Bild 3.31**) ist der Bodensee vor allem ein komplexes Ökosystem, das in hohem Maße sensitiv auf externe Umwelteinflüsse reagiert [IGKB (2004), Ostendorp (2007)].



a) Das alpin geprägte Einzugsgebiet (mehr als 50% davon befinden sich in Regionen oberhalb 1500 m) trägt in nicht unerheblichem Maße dazu bei, dass das Wasser des Bodensees in physikalisch/chemischer Hinsicht eine Beschaffenheit und Güteparameter aufweist, die die strengen Grenzwerte der Trinkwasserverordnung 2001 (TrinkwV 2001) weit unterschreiten.

b) Die Morphologie des Bodensees (Steilufer, Tiefe) erlauben eine Wasserentnahme im Hypolimnion in Tiefen von 40 bis 60 m. Neben einer gleich bleibenden Wassertemperatur von 4 bis 6 °C ist in Folge der thermischen Schichtung lediglich zu Zeiten der Vollzirkulation (meist Ende Januar bis Anfang März) ein Eintrag von oberflächennahem Wasser zu erwarten. Außerdem wirkt der Bodensee aufgrund seines Tiefenprofils zusätzlich als Absetzbecken für partikuläre Wasserinhaltsstoffe, die durch die Zuflüsse eingetragen werden (Sedimentationsfalle).

c) Der Wasserdurchsatz von ca. 360 m³/s bedingt, dass die Wasserbilanz des Sees durch die Entnahme der Seewasserwerke praktisch nicht beeinflusst wird. Allein die natürliche Verdunstung ist etwa doppelt so groß wie die für Trinkwasserversorgung genutzte Wassermenge.

d) Die im Bodensee gespeicherte Wassermenge von nahezu 50 Mrd. m³ ist nahezu „unerschöpflich“. Darüber hinaus spielt der „Verdünnungseffekt“ im Zusammenhang mit dem Eintrag von unerwünschten Stoffen eine bedeutende Rolle.

Bild 3.31:

Der Bodensee ist einer der größten Trinkwasserspeicher Europas

Vier Gründe zeichnen ihn hierfür besonders aus:

- a) sein alpin geprägtes Einzugsgebiet [BWV (2013a)]
- b) seine Morphologie (Steilufer, Tiefe) [IGKB (2004)]
- c) seine Wasserbilanz [BWV (2013)]
- d) seine gespeicherte Wassermenge [BWV (2013)]

Die einzelnen Kompartimente sind dabei durch z.T. sich gegenseitig beeinflussenden Interaktionen und biotische bzw. abiotische Prozessabläufe gekennzeichnet (**Bild 3.32**).

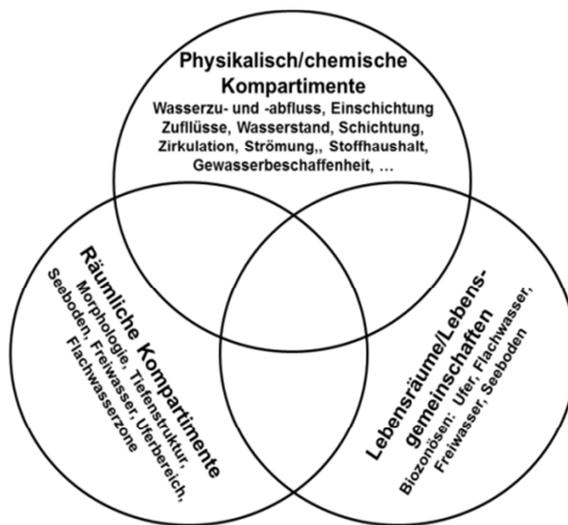


Bild 3.32:
Bodensee und seine Kompartimente [IGKB (2004)]

3.3.2 Wasserstand Bodensee, Beispiel Pegel Konstanz

Bezogen auf den Bodensee-Obersee/Überlingersee (Pegel Konstanz) zeigen die Datenauswertungen in der Zeitspanne von 1888 bis 2007, dass die mittleren jährlichen Bodensee-Wasserstände insgesamt eine fallende Tendenz aufweisen [LUBW (2011d), Wahl (2007), Ostendorp (2003a), Ostendorp (2003b), Ostendorp (2007), Siebert (2011), LUBW (2011c), AGBU (2006)]. Als wesentlicher Bruchpunkt wurde das Jahr 1941 ermittelt, weitere sprunghafte Veränderungen lassen sich aber auch für die Jahre 1909, 1964 und 1988 identifizieren (**Bild 3.334**).

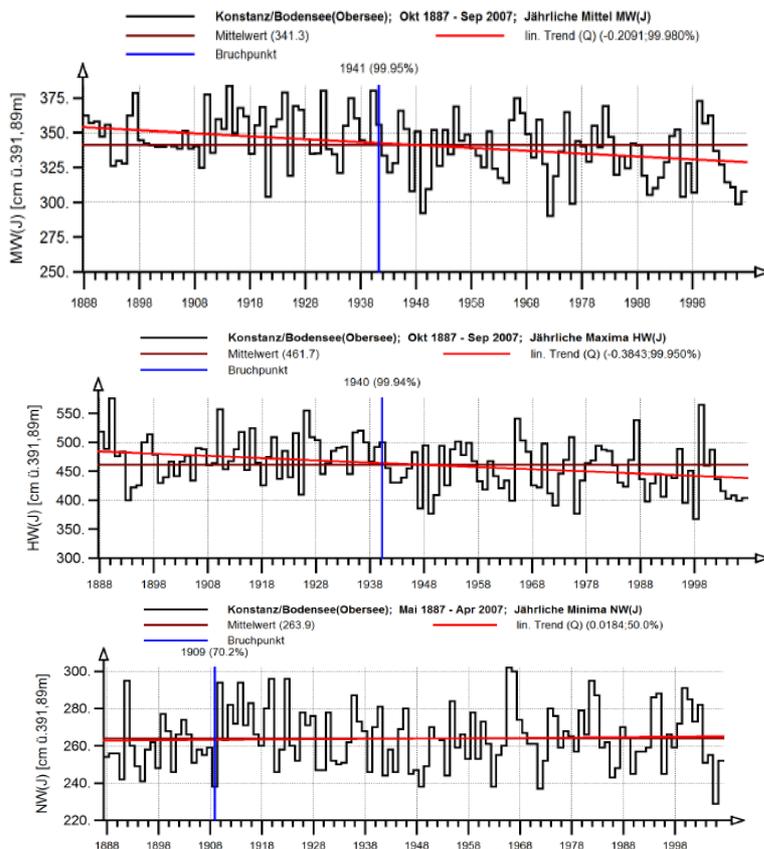


Bild3.33:
Wasserstände Bodensee, Pegel Konstanz [(LUBW (2011d)]
Oben: Jährliche Mittel
Mitte: Jährliche Maxima
Unten: Jährliche Minima

Zur Bewertung des saisonalen Verhaltens der Wasserstandswerte wurden neben den Langzeitanalysen auch die Jahresganglinien (z.B. Monatsmittelwerte,...) für die verschiedenen Teilzeitreihen, die auf statistischen Erhebungen und der Bruchpunkttermittlung basieren, miteinander verglichen (**Bild 3.34**). Dadurch konnten die o.g. Tendenzen insofern bestätigt werden, dass sich über den Beobachtungszeitraum seit 1888 die Höchstwerte im Sommer i.d.R. abgemindert und die niedrigen Wasserstände im Winter nahezu gleich geblieben sind.

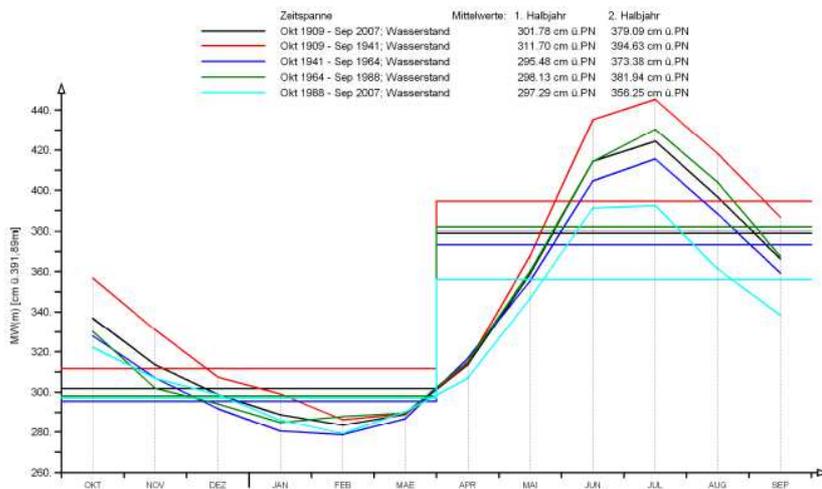


Bild 3.34: Jahresgang der mittleren monatlichen Wasserstände am Pegel Konstanz für die Gesamtzeitreihe (1910 bis 2007) und ausgewählte Teilzeitreihen (ermittelt über die Bruchpunkte in den Jahren 1941, 1964 und 1988 [LUBW (2011d)])

Extremwetterlagen führen hingegen zu temporär begrenzten Hoch- und Niedrigwasser (**Tabelle 3.1, Bild 3.35**) [Ostendorp (2003a), Ostendorp (2003b)].

Hochwasser			Niedrigwasser		
Jahr	max. Pegel Original, [cm]	Rang Original / trendbereinigt	Jahr	min. Pegel Original, [cm]	Rang Original / trendbereinigt
1817	623	1 / 1	1858	226	1 / 2
1890	576	2 / 3	1836	227	2 / 1
1821	568	3 / 5	1972	237	3 / 18
1990	564	4 / 2	1848	238	4 / 4
1876	561	5 / 4	1949	238	5 / 13
1910	557	6 / 6	1909	238	6 / 3
1926	555	7 / 7	1963	238	7 / 19
1851	549	8 / 8	1854	239	8 / 5
1855	548	9 / 11	1895	241	9 / 8
1849	547	10 / 12	1891	242	10 / 9

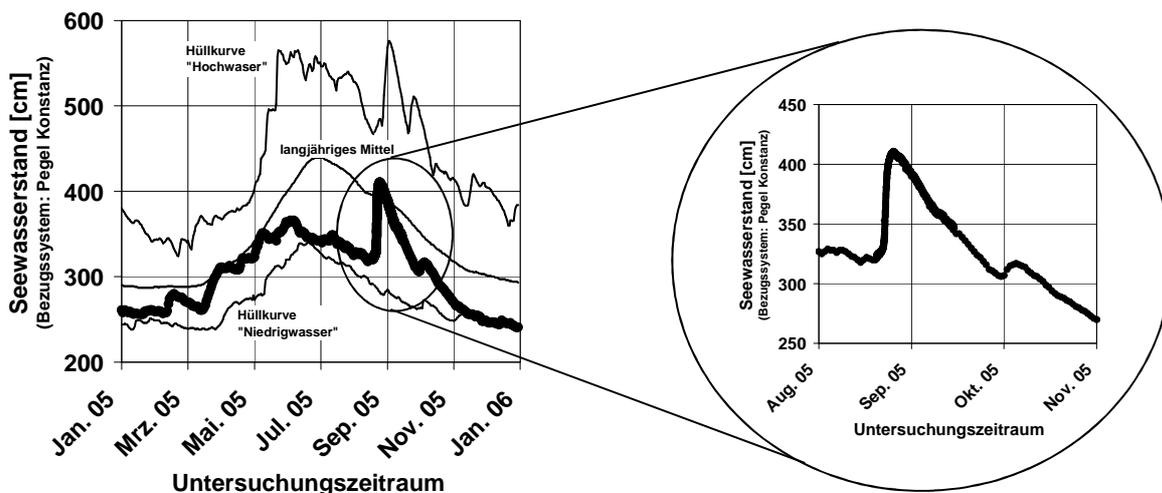
Tabelle 3.1: Die 10 größten Hoch- und Niedrigwasser-Extremereignisse am Bodensee (Pegel Konstanz) und ihre Rangfolge (angegeben auf der Basis der Original-Pegelreihe und der trendbereinigten Pegelreihe) [Ostendorp (2003a), Ostendorp (2003b)]



Bild 3.36: Extreme Wasserstände am Bodensee [Zintz (2009)]
Links: Niedrigwasser 2006, Beispiel Schussenmündung

Rechts: Hochwasser 1999, Beispiel Uferpromenade Friedrichshafen

Wie am Beispiel der Starkniederschlagsereignis im August 2005 gezeigt werden kann, ist im Falle extremer Zuflusswerte ein Anstieg des Wasserstandes um ca. 90 cm, von etwa 320 auf 410 cm (Bezugssystem Pegel Konstanz) binnen drei Tagen möglich (**Bild 3.36**). Bei einer Gesamtoberfläche des Bodensees von ca. 535 km² entspricht dies einem Wasservolumen von ca. 450 bis 500 Mio. m³ [BodenseeOnline (2008), Schick (2006)].

**Bild 3.36:**

Wasserstandsänderungen im Bodensee (Pegel Konstanz), dargestellt am Beispiel des Starkereignisses im August 2005 [BodenseeOnline (2008), Schick (2006)]

3.3.3 Erkenntnisse zu hydrodynamischen Vorgängen im Bodensee

Neben der Ermittlung und Beurteilung von physikalischen, chemischen und biologischen Aspekten ist der Bodensee seit Jahrhunderten auch Gegenstand zahlreicher hydrologischer bzw. hydrodynamischer Beobachtungen und wasserwirtschaftlicher Planungen [AWBR (2006)]. Beispielsweise wird sein Wasserstand am Pegel „Konstanz“ seit 1888 ununterbrochen gemessen, dokumentiert und ausgewertet. Doch die Untersuchungen der Seespiegelschwankungen reichen nicht aus, um in einem stehenden Gewässer wie dem Bodensee die komplexen Vorgänge der Wasserbewegungen charakterisieren zu können. Schon früh wurde erkannt, dass alle wesentlichen Prozessabläufe im freien Wasserkörper bzw. im Bereich der Ufer- und Flachwasserzone stattfinden. Aufgrund der geographischen, topographischen und morphologischen Gegebenheiten (**Bild 3.37**) sowie als Folge der physikalischen, meteorologischen und hydrologischen Einflüsse (Impuls-, Energie- und Massenaustausch über die Zuflüsse und der Atmosphäre, Temperatur, Wind, Niederschlag, Sonneneinstrahlung, ...) ergeben sich hierbei sowohl räumlich als auch zeitlich stark variierende und z.T. sich gegenseitig beeinflussende Schichtungs-, Strömungs- und Stofftransportvorgänge im See (**Bild 3.38**).

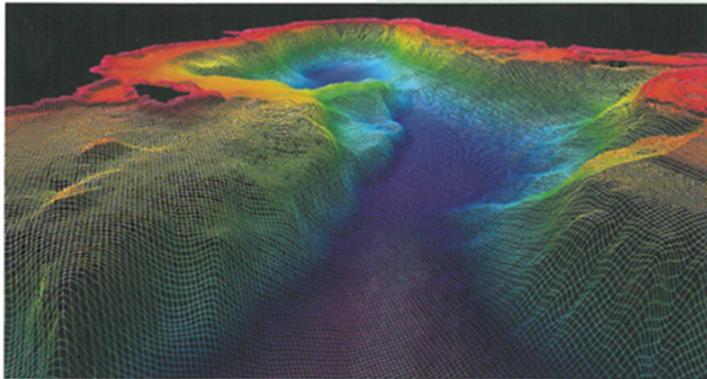


Bild 3.37:
Morphologie des Bodensees
 Dreidimensionale Darstellungen zeigen im Detail die Morphologie/Struktur des Seebodens⁵ und geben indirekt Aufschluss über seebodennahe Strömungen [Tiefenschärfe (2013), www.tiefenschärfe-bodensee.info (2013), IGKB (2012a) IGKB (2004)]

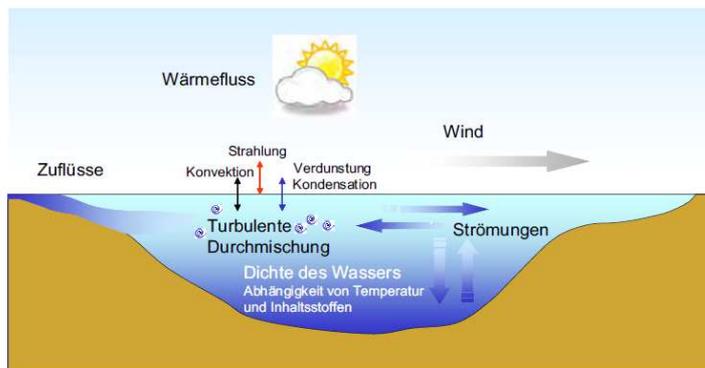


Bild 3.38:
Physikalische Prozesse, die den Impuls-, Energie- und Massenaustausch im Bodensee bestimmen
 [KLIWA Heft 13 (2009)]

Um die im Bodensee stattfindenden Prozessabläufe ganzheitlich charakterisieren zu können, bedarf es daher eines geeigneten interdisziplinären Ansatzes. Auf der Basis von mathematisch formulierbaren Sachverhalten (Simulationsmodelle) wurde in den Jahren 2005 bis 2008 ein Modellsystem „BodenseeOnline“ entwickelt, mit dem sich sowohl

- die hydraulischen Verhältnisse im geschichteten und ungeschichteten Zustand als auch
- denkbare Entwicklungen bezüglich der Wasserbeschaffenheit

in Abhängigkeit von den o.g. Einflussparametern zeitnah beschreiben und quantifizieren lassen. Vor allem im Zusammenhang mit der transparenten Darstellung von geogen, klimatisch und zivilisatorisch bedingten Auswirkungen auf die im Bodensee stattfindenden Prozessabläufe wurden neue Erkenntnisse und praxisbezogene Lösungsansätze aufgezeigt, die über den damaligen Stand des Wissens weit hinausgingen [BodenseeOnline (2008)].

⁵ Ziel des Projektes „Tiefenschärfe - Vermessung des Bodensees“ ist es, Wissenschaft und Wasserwirtschaft präzise Grundlagendaten zur Verfügung zu stellen und damit einen wichtigen Beitrag für einen vorsorgenden Gewässerschutz zu leisten [Tiefenschärfe (2013), www.tiefenschärfe-bodensee.info (2013)].

a) Beispiel: Einfluss des Windfeldes

Das großräumige dreidimensionale Strömungsverhalten im Bodensee wird wesentlich durch das Windfeld bestimmt. Durch die windinduzierte Verdriftung der oberflächennahen Wasserschichten (**Bild 3.39**) können beispielsweise im Sommer interne Schwingungen / Wellen (Auslenkung der Thermokline bis mehrere Zehnermeter) ausgelöst werden, bei denen komplexe Strömungen entstehen (**Bild 3.40**).

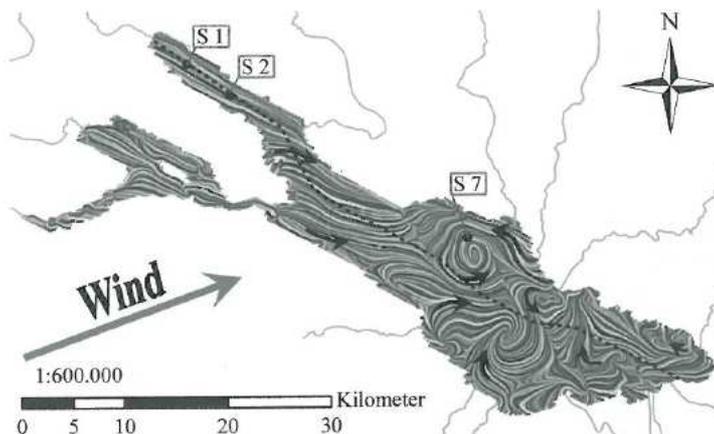


Bild 3.39:
Momentaufnahme der oberflächennahen Strömungen des Bodensees bei schwachem bis mäßigem Wind aus WSW [BodenseeOnline (2008)]

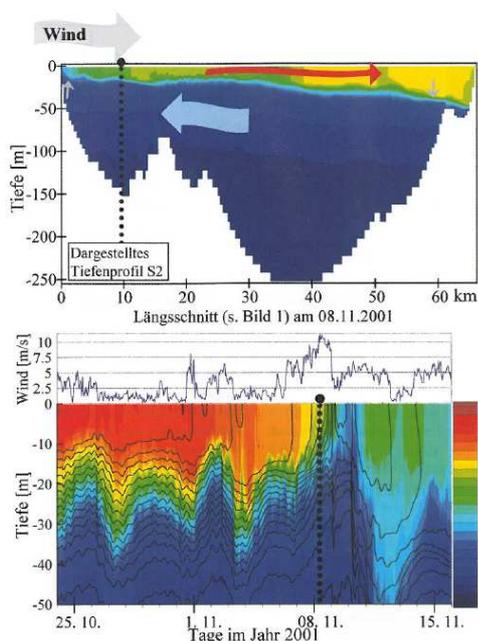


Bild 3.40:
Windinduzierte interne Schwingungen/Wellen [BodenseeOnline (2008)]
oben: berechnete Temperaturverteilung im Längsschnitt bei starkem Wind aus WSW, die Pfeile deuten die momentane Strömungsrichtung im Epi- und Hydrolimnion an
unten: gemessenes (Farbflächen) und berechnetes (Linien) Temperaturprofil über die Zeit am Messpunkt S2

b) Beispiel: Einschichtungsverhalten der Zuflüsse bei Extremereignissen

Während bei durchschnittlicher Wasserführung die Einschichtung der Zuflüsse vorwiegend durch die Temperatur des zufließenden Wassers und des Bodensees sowie der aktuellen und zurückliegenden meteorologischen Situation (Windrichtung und -stärke) bestimmt wird [Rossknecht (2003)], führt im Falle eines Extremereignisses die Dynamik der Hochwasserwelle und der extrem hohe An-

teil an Schwebstoffen dazu, dass eine Ausbreitung des Flusswasser als Suspensions-Dichtestrom auch unterhalb der Thermokline möglich ist (**Bild 3.41**).



Bild 3.41:
Einschichtung des Alpenrheins nach dem Starkregeneignis 2005 [BodenseeOnline (2008)]

Wie am Beispiel des Starkregeneignisses 2005 gezeigt werden konnte, sank das mit der Hochwasserwelle zufließende Alpenrheinwasser wegen seines Feststoffgehaltes bereits im Rheinbrech in die Tiefe ab und schob sich anschließend als flaches Band bevorzugt am Nordufer bzw. am Seeboden entlang nach Nordwesten vor (under flow). Dabei ist nicht auszuschließen, dass wenig verfestigte Sedimente am Seegrund aufgewirbelt werden bzw. unterseeische Hangrutschungen im nördlichen Uferbereich zwischen Kressbronn und Lindau oder Änderungen der Seebodenmorphologie resultieren. Zusätzlich zu der Verfrachtung von land- und flussbürtigen Feststoffmaterial kann es somit auch noch zu einer Umlagerung von bereits abgelagerten partikulären Inhaltsstoffen kommen [BodenseeOnline (2008), Wasserwirtschaft (AWBR (2006))].

c) Beispiel: Strömungsverhältnisse in der Ufer-/Flachwasserzone

Als Flachwasserzone oder Litoral wird die Zone bis zur Haldenkante in etwa 10 m Wassertiefe bezeichnet (**Bild 3.423**) Im Bodensee-Obersee liegen bedeutende Flachwasserzonen beispielsweise in der Friedrichshafener Bucht und nahe der Rheinmündung vor.



Bild 3.42:
Flachwasserzonen im Bodensee Gebiete mit weniger als 10 m Wassertiefe sind grün dargestellt [BodenseeOnline (2008)]

Im Zusammenhang mit der Tiefenwassererneuerung spielen die Flachwasserzonen eine besondere Rolle. Dies ist dadurch bedingt, dass Bereiche mit geringeren Wassertiefen bei kalter Witterung schneller abkühlen als das Freiwasser (**Bild 3.43**). Da das kalte Wasser eine höhere Dichte besitzt strömt es an der Sohle entlang in die Tiefe, wo es als kälteres und sauerstoffreiches Oberflächenwasser detektiert werden kann. Dieser Vorgang trägt vor allem in milden Wintern zur Tiefenwassererneuerung bei. Daher ist anzunehmen, dass das so genannten „Differential cooling“ [Bodensee-Online (2008)] oder der kalten Dichteströmungen [KLIWA Heft 11 (2007)] im Zuge der Klimaerwärmung noch größere Bedeutung zukommen wird.

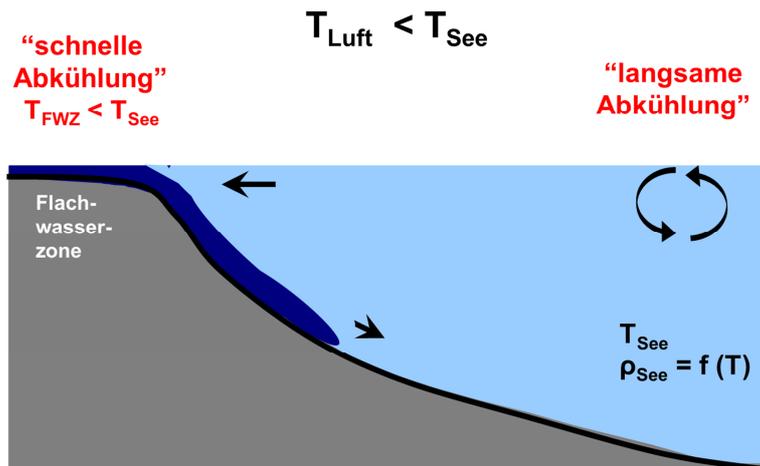


Bild 3.43:
Prinzip der Tiefenwassererneuerung durch Abkühlung der Flachwasserzone (Differential cooling) [Lang (2011), unveröffentlicht]

3.3.4 Schichtungs- und Zirkulationsverhalten

Das Schichtungs- und Zirkulationsverhalten des Bodensees wird vorrangig durch die Wassertemperatur bestimmt [IGKB (2004), IGKB (2013b), Zintz (2009)]. Während das Wasser des Bodensees (Obersee, Überlingersee) im Winter/Frühjahr in allen Tiefen weitgehend die gleiche Temperatur von etwa 4 °C aufweist, erwärmen sich mit ansteigender Sonneneinstrahlung die oberen Wasserschichten schneller als das Tiefenwasser. Dies führt zu einem Dichteunterschied, der eine Durchmischung des warmen Oberflächenwassers mit dem kühlen Tiefenwasser behindert (**Bild 3.44**). Es entsteht eine zunehmend stabilere Schichtung mit einer bis zu 20 m mächtigen Schicht, dem Epilimnion und einer bis zum Grund reichenden unteren Schicht, dem Hypolimnion. Beide sind durch einen Bereich mit einer deutlich wahrnehmbaren Temperaturänderung, der Sprungschicht (Metalimnion), getrennt. Mit nachlassender Einstrahlung kühlt das Epilimnion im Herbst wieder ab, bis schließlich der Temperaturunterschied ausgeglichen ist. Dadurch wird eine Durchmischung des Wasserkörpers und die Erneuerung des Tiefenwassers begünstigt [KLIWA Heft 11 (2007)], initiiert durch

- Vertikalzirkulation/Konvektion,
- windinduzierter Strömungen,
- seitlichen Einströmungen von dichterem kaltem Oberflächenwasser aus flacheren Randbereichen des Sees oder durch
- Einschichtung von Flusswasser.

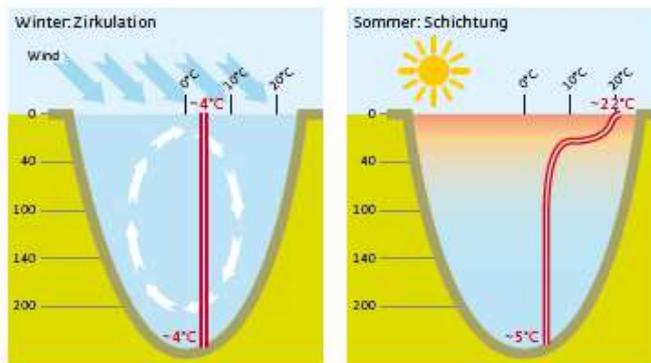


Bild 3.44:
Temperaturbedingte Schichtungs- und Durchmischungsvorgänge im Bodensee [Zintz (2009)]
 links: winterliche Durchmischung (Zirkulation)
 rechts: temperaturbedingte Schichtung

Aufgrund der steigenden Wassertemperaturen ist seit Mitte der 60er Jahre des vorigen Jahrhunderts eine zeitliche Verschiebung des vertikalen Wasseraustausches um mehr als 1 Monat zu beobachten. Ein Hinweis hierfür, liefert beispielsweise die Zeitreihe der jährlichen Messtermine mit der jeweils besten vertikalen Durchmischung. Es zeigt sich ein signifikanter Trend, der so interpretiert werden kann, dass die winterliche Durchmischung früher endet bzw. die thermische Schichtung eher einsetzt (**Bild 3.45**).

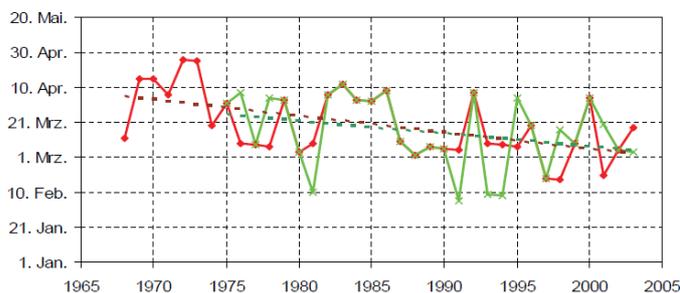


Bild 3.45:
Zeitreihen zum ermittelten Zeitpunkt der besten Durchmischung (rot: aus Orthophosphat-Werten berechnet, grün: aus Silikatwerten berechnet) [KLIWA Heft 11 (2007)]

Ein weiteres Indiz bzw. eine Bestätigung der beobachteten Phänomene lassen sich auch aus den Untersuchungen der Parameter Chlorophyll-a und Sauerstoff, welche in den oberen Wasserschichten in engem Zusammenhang mit dem Phytoplanktonwachstum stehen, ableiten. Beide Parameter wiesen trotz abnehmender Nährstoffgehalte des Sees in dem betrachteten Zeitraum von 1995 bis 2002 einen signifikant ansteigenden Trend in den Monaten März und April auf. Da sich das Phytoplankton erst im geschichteten See gut entwickeln kann, unterstützt diese Feststellung die Beobachtung einer früher einsetzenden thermischen Schichtung [KLIWA Heft 11 (2007)].

3.3.5 Beobachtete Entwicklungen zur Wasserbeschaffenheit

Das aus dem Hypolimnion zur Trinkwassergewinnung entnommene Wasser weist neben einer weitgehend gleichbleibend niedrigen Temperatur von ca. 4 bis 7 °C einen ausgewogenen Gehalt an ionogene Inhaltsstoffen (z.B. Calcium, Magnesium,

Natrium, Hydrogencarbonat, Sulfat, Chlorid) auf. Mit ca. 9°dH ist es gemäß Wasch- und Reinigungsmittelgesetz vom 01.02.2007 dem Härtebereich „mittel“ zuzuordnen. Zudem ist der Nitratwert von ca. 4,5 mg/L vergleichsweise gering und die Konzentrationen von Schwermetallen liegen lediglich im Submikrogrammbereich (< 1 µg/l) vor. Anthropogene organische Spurenstoffe (z.B. Pflanzenschutzmittel/Biozide, Arzneimittel, Röntgenkontrastmittel, Industriechemikalien, künstliche Zuckerersatzstoffe,...) sind nicht oder nur in geringsten Spuren nachweisbar. Auch die mikrobiologische Belastung des Bodenseewassers ist vergleichsweise als gering einzustufen (**Tabelle 3.2 bis Tabelle 3.4**).

Tabelle 3.2:

Ausgewählte mikrobiologische Parameter des Bodenseewassers aus 60 m Tiefe, Entnahmestelle des Zweckverbandes Bodensee-Wasserversorgung [BWV (2013)]

Parameter		Bodenseewasser aus 60 m Tiefe
Koloniezahl bei 20°C	in 1 mL	0 - 100, vereinzelt > 200
Koloniezahl bei 36 °C	in 1 mL	0 - 20, vereinzelt > 30
<i>E.coli</i> /coliforme Bakterien	in 100 mL	0 - 20, vereinzelt > 50
Enterokokken	in 100 mL	0 - 10, vereinzelt > 20
Clostridien	in 100 mL	0 - 5 , vereinzelt > 5

Tabelle 3.3:

Ausgewählte physikalisch/chemische Güteparameter des Bodenseewassers aus 60 m Tiefe, Entnahmestelle des Zweckverbandes Bodensee-Wasserversorgung [BWV (2013)]

Parameter		Bodenseewasser aus 60 m Tiefe
Temperatur ($\vartheta_{\text{Fassung}}$)	[°C]	4 - 7
Elektrische Leitfähigkeit (25 °C)	[µS/cm]	320 - 340
pH-Wert	[-]	7,9 - 8,1
Summe Erdalkali (Gesamthärte)	[mmol/L]	1,55 - 1,6
Natrium	[mg/L]	4 - 4,5
Kalium	[mg/L]	1,2 - 1,4
Calcium	[mg/L]	47 - 50
Magnesium	[mg/L]	7,7 - 8,2
Chlorid	[mg/L]	6,6 - 7
Nitrat	[mg/L]	4,4 - 4,6
Sulfat	[mg/L]	30 - 35
Sauerstoff	[mg/L]	8 - 11
Gelöster org. Kohlenstoff (DOC)	[mg/L]	1,0 - 1,4
Aluminium	[mg/L]	0,0045 - 0,008
Eisen	[mg/L]	0,004 - 0,006
Arsen	[mg/L]	0,001 - 0,0015
Blei	[mg/L]	< 0,00005
Quecksilber	[mg/L]	< 0,00005

Tabelle 3.4:
Quantifizierbare anthropogene organische Spurenstoffe im Bodenseewasser
(Überlinger Seeteil, 60 m Tiefe) [AWBR (2012b), AWBR (2013), BWV (2013)]

Parameter		Bodenseewasser aus 60 m Tiefe
Ibuprofen	[µg/L]	vereinzelter Nachweis
Clofibrinsäure	[µg/L]	vereinzelter Nachweis
Carbamazepin	[µg/L]	vereinzelter Nachweis <0,010 - 0,019
Metformin	[µg/L]	0,23 - 0,29
Amidotrizoessäure	[µg/L]	0,015 - 0,022
Iohexol	[µg/L]	0,015 - 0,022
Iopamidol	[µg/L]	0,025 - 0,035
Iomeprol	[µg/L]	0,025 - 0,035
N,N-Dimethylsulfamid	[µg/L]	0,05 - 0,11
Ethylendiamintetraacetat	[µg/L]	< 0,5 - 0,6
Perfluoroctylsulfonat	[µg/L]	0,003 - 0,006
Benzotriazol	[µg/L]	0,08 - 0,12
5-Methylbenzotriazol	[µg/L]	0,018 - 0,022
Acesulfam	[µg/L]	0,23 - 0,25
Cyclamat	[µg/L]	0,015 - 0,025

Hinsichtlich der zeitlichen Entwicklungen sind neben dem Temperaturanstieg der letzten Jahrzehnte eine Reihe von Konzentrationsänderungen dokumentiert, die bereits heute einen Trend erkennen lassen. Neben klimabedingten Ursachen sind hierfür aber auch zivilisatorische Einflüsse verantwortlich.

a) Änderung der Wassertemperatur

Vor allem ab Mitte der 80er Jahre des letzten Jahrhunderts ist die Wassertemperatur merklich angestiegen. Im Mittel sind die Wassertemperaturen an der Oberfläche des Sees heute rund 1°C wärmer als damals. Der Temperaturanstieg im Tiefenwasser fällt schwächer aus, ist jedoch ebenfalls nachweisbar (**Bild 3.46**).

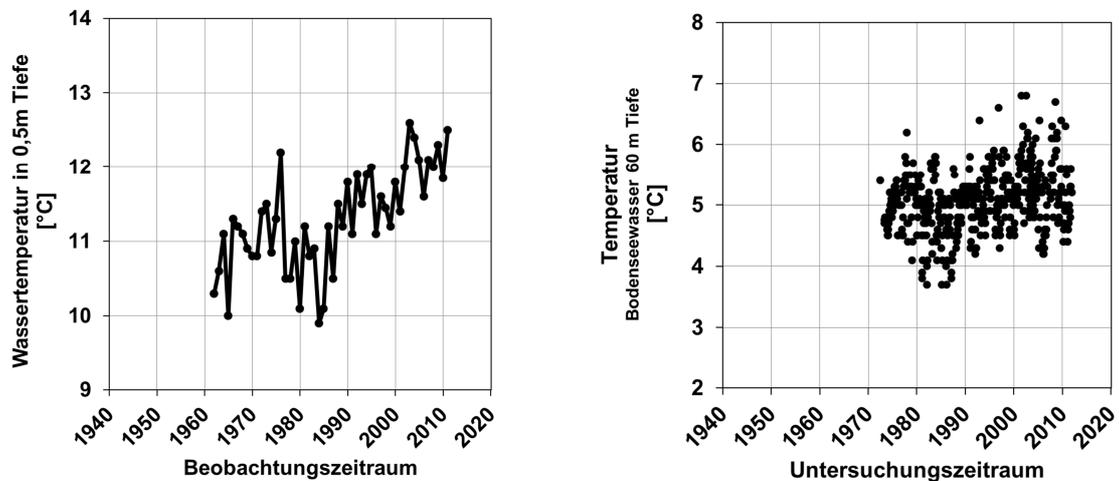


Bild 3.46:
Zeitlicher Verlauf der Temperatur im oberflächennahen Wasser in Obersee (Seemitte, Jahresmittelwerte) und in 60 m Tiefe (Überlinger Seeteil) [IGKB (2004), IGKB 2013b), BWV (2013)]

b) Veränderung der ionogenen Inhaltsstoffe

Unabhängig vom Klimawandel ist als Folge des Eintrages von gereinigten Abwässern aus Industrie und kommunalen Kläranlagen, den Abschwemmungen von bebauten und landwirtschaftlich/gärtnerisch genutzten Flächen, der Streusalzanwendung im Winter, der Auslaugung von Abfalldeponien sowie des atmosphärischen Schadstoffeintrags ein stetiger Anstieg von ionogenen Inhaltsstoffen im Bodenseewasser zu beobachten (**Bild 3.47**).

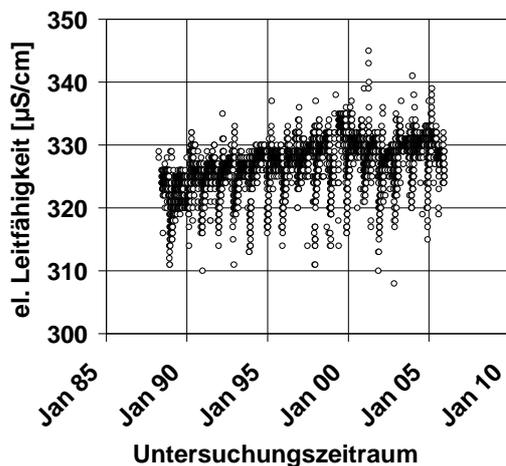


Bild 3.47:
Zeitliche Entwicklung der elektrischen Leitfähigkeit im Bodenseewasser, dargestellt am Beispiel des Seewasserwerks Nonnenhorn (Tagesmittelwerte, Bodenseewasser aus 60 m Tiefe) [AWBR (2006)]

Auch erhöhte sich die Nitratkonzentration beispielsweise im Wasser des Überlinger Seeteils (Entnahmestelle der BWV) von ca. 2,5 mg/l im Jahr 1958 auf den heutigen Wert von ca. 4,5 mg/L. Ebenso resultierte eine leichte Zunahme an Chlorid-Ionen (**Bild 3.48**). Analoge Aussagen lassen sich auch für das Wasser des Obersees ableiten [IGKB (2012b)].

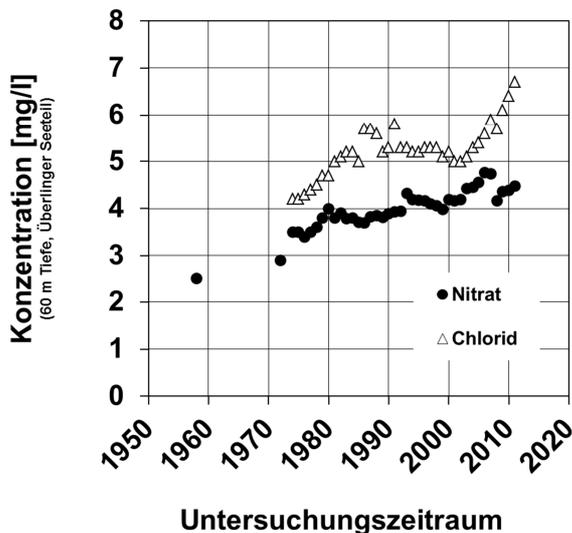


Bild 4.48:
Langzeitentwicklung der Nitrat- und Chloridkonzentration im Bodenseewasser aus 60 m Tiefe, dargestellt am Beispiel der Bodensee-Wasserversorgung [BWV (2013)] (Jahresmittelwerte)

c) Phosphatgehalt und Biomasse

Sowohl von der IGKB als auch von der AWBR wurde bereits in den frühen 1960er Jahren die übermäßige Zufuhr von Phosphat/Phosphor als die wesentliche Ursache für die zunehmende Eutrophierung des Sees und der damit einhergehenden unerwünschten Auswirkungen (verstärktes Algenwachstum in den lichtdurchfluteten Zonen, Verringerung des Sauerstoffgehaltes im Hypolimnion,...) erkannt. Dank der Initiierung einer Vielzahl an Gewässerschutzmaßnahmen und der flächendeckenden Abwasserbehandlung kann heute die Fragestellung des Eintrags an Pflanzennährstoffen als weitgehend gelöst angesehen werden (**Bild 3.49**).

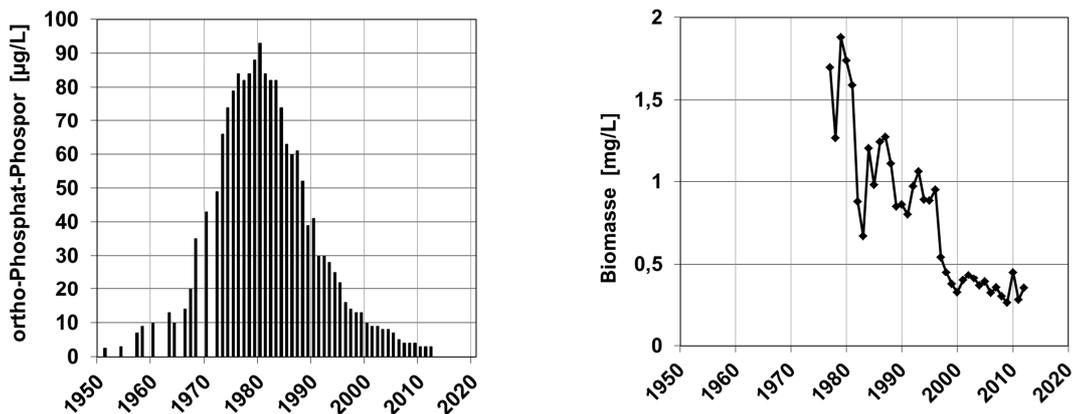


Bild 3.49:
Zeitlicher Verlauf der ortho-Phosphat-Phosphorgehalte zum Zeitpunkt der Vollzirkulation (links) und der Phytoplankton-Biomasse (0 – 20 m, Jahresmittelwerte, rechts) im Wasser des Überlinger Sees [BWV (2013)]

d) Sauerstoffkonzentration über Grund [IGKB (2013b)]

Der für die Sauerstoffregeneration in Seebodennähe wichtige Austausch zwischen Oberflächen- und Tiefenwasser ist maßgeblich durch die Temperaturverhältnisse in den Wintermonaten bestimmt. Im Idealfall kommt es in Folge der winterlichen Abkühlung zu einer vollständigen Durchmischung im Frühjahr. Anhand langjähriger Untersuchungsreihen ist jedoch erkennbar, dass sich die saisonale Tiefenwassererneuerung in den letzten 25 Jahren dadurch abgeschwächt hat, dass vor allem unmittelbar aufeinanderfolgende Jahre mit schwacher Durchmischung in letzter Zeit häufiger zu beobachten sind (**Bild 3.50**).

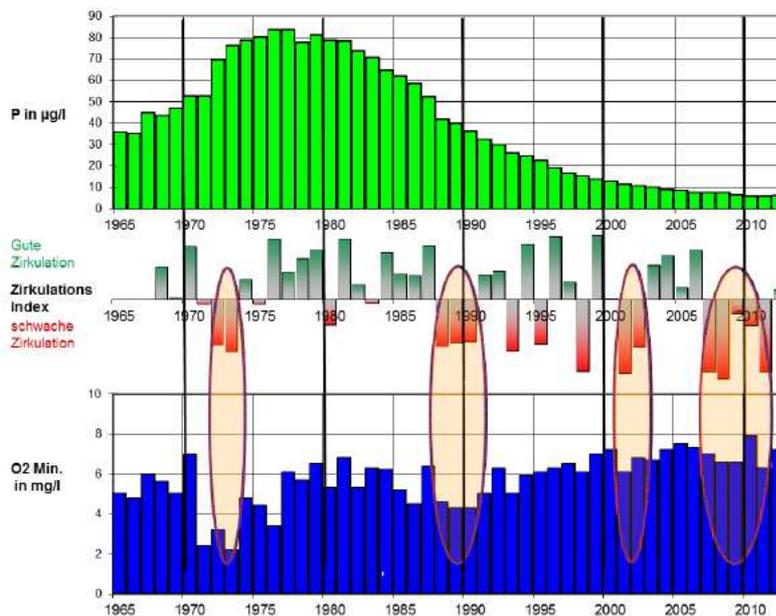


Bild 3.50:
 PO_4^{3-}/P -Konzentration
[IGKB (2013b)]
(Jahresmittelwerte, oben),
Zirkulationsindex (Mitte)
und minimaler Sauerstoff-
gehalt im Tiefenwasser des
Obersees 1 m über Grund
(unten), von 1965 bis 2012,
markiert sind die mehrjäh-
rigen Phasen unzureichen-
der Zirkulation

Hat eine Phase von mindestens zwei aufeinanderfolgenden schlechten Jahren in den 1970er Jahren bei einem P-Gehalt von 70 - 80 µg/L noch einen Sauerstoffrückgang auf 2 mg/L bewirkt, waren Ende der 1980er Jahre ($C_{\text{Phosphor}} = 35 - 40 \mu\text{g/L}$) schon bessere Sauerstoffwerte von 4 mg/L zu verzeichnen. Beim heutigen nährstoffarmen Zustand mit Phosphorgehalten von 6 bis 7 µg/L liegt selbst nach fünf aufeinanderfolgenden Jahren schwacher Zirkulation der Sauerstoffgehalt im Tiefenwasser stets über 6 mg/L. Für einen großen und tiefen Voralpensee wie dem Bodensee-Obersee ist eine gute Sauerstoffversorgung des Tiefenwassers über 6 mg/L besonders wichtig, damit sowohl für den Felchenlaich und Bodenlebewesen in der Tiefe des Sees genügend Sauerstoff vorhanden ist, als auch Rücklösungsprozesse von Nähr- und Schadstoffen aus dem Sediment unterbleiben.

e) Remobilisierungserscheinungen am Seegrund

Im Gegensatz zu den Vorgängen und Konzentrationsschwankungen, die durch den Tiefenwasseraustausch im Frühjahr geprägt sind, werden die stofflichen Veränderungen von Algenresten und organischen Substanzen in Seebodennähe in erster Linie durch mikrobielle Abbau- und Umsetzungsprozesse bestimmt. Dies führt zu einer allmählichen Abnahme der Sauerstoffkonzentration und zu einer messbaren Absenkung der Redoxpotenziale in Seebodennähe. Die meisten wasserunlöslichen Verbindungen, die in den Sedimenten gefunden werden, bleiben unter aeroben Verhältnissen dort auch irreversibel gebunden. Wird jedoch ein kritischer Redox-Wert unterschritten, sind unerwünschte Remobilisierungs- und Rücklösungserscheinungen nicht auszuschließen. U.a. können in den Sedimentoberflächen meist innerhalb weniger Tage erhebliche Mengen an Man-

gan(IV)-Verbindungen reduziert und als Mangan(II) in die bodennahen Wasserschichten freigesetzt werden (**Bild 3.52**). Die Migration von Mangan ist deutlich in den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts erkennbar [KLIWA Heft 11 (2007), Güde (2009)]. Mit zunehmender Oligotrophierung seit Anfang der neunziger Jahre hat sich dieser Vorgang spürbar abgeschwächt (**Bild 3.51**).

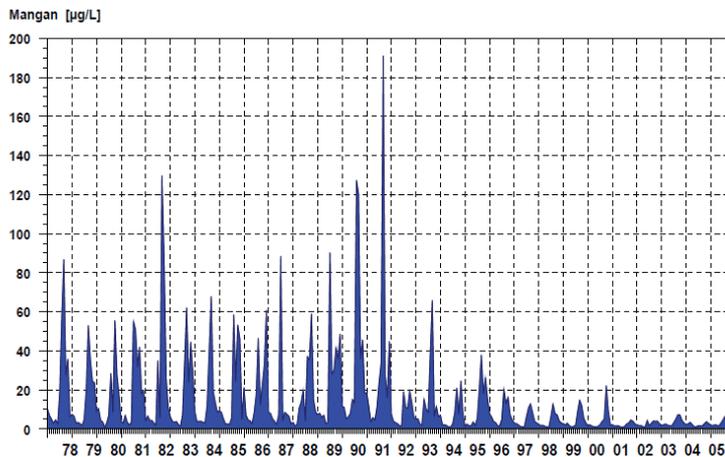


Bild 3.51:
Monatlich gemessene Mangankonzentration (gelöst und partikulär) 1 m über Grund in der Seemitte von 1978 bis 2005 [KLIWA Heft 11 (2007)]

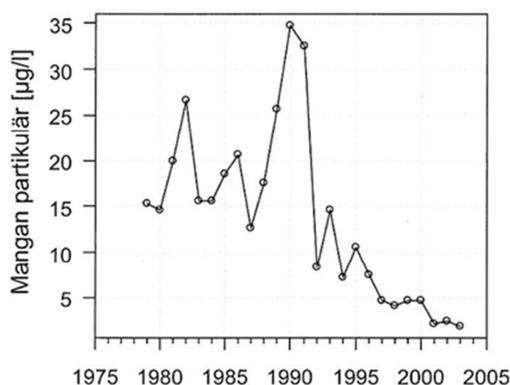


Bild 3.52:
Mangan Konzentration im Dezember ca. 1 m über Seegrund bei der Seemitestation als Indikator für die Redox- und Sauerstoff-Verhältnisse am Seeboden. Die hohen Manganwerte um 1989-1991 fallen mit sehr niedrigen Sauerstoffwerten im Hypolimnion zusammen, welche auf Grund hoher Zehrung und schlechter winterlicher vertikaler Durchmischung entstanden sind [KLIWA Heft 11 (2007)]

Ähnliche Aussagen lassen sich auch für Arsen und Phosphat ableiten (**Bild 3.53**). Bereits bei geringfügigen Abnahmen der Sauerstoffkonzentration im Tiefenwasser des Überlinger Seeteils wurden Änderungen der Arsen- und Phosphatgehalte im Freiwasserbereich von 60 m Tiefe beobachtet [Pieper (2001), Stabel (1988), BWV (2013)]. Während bei Sauerstoffkonzentrationen von ca. 10 mg/L die Arsengehalte weiter abnehmen, ist bei fallenden O₂-Werten auf ca. 8 mg/L (Ende der 80er Jahre) deutlich ein Anstieg der As- und ortho-PO₄³⁻/P-Konzentration zu erkennen. In den Jahren vor 1976, die vermutlich durch die höchsten Arsengehalte gekennzeichnet waren, liegen keine Messergebnisse vor.

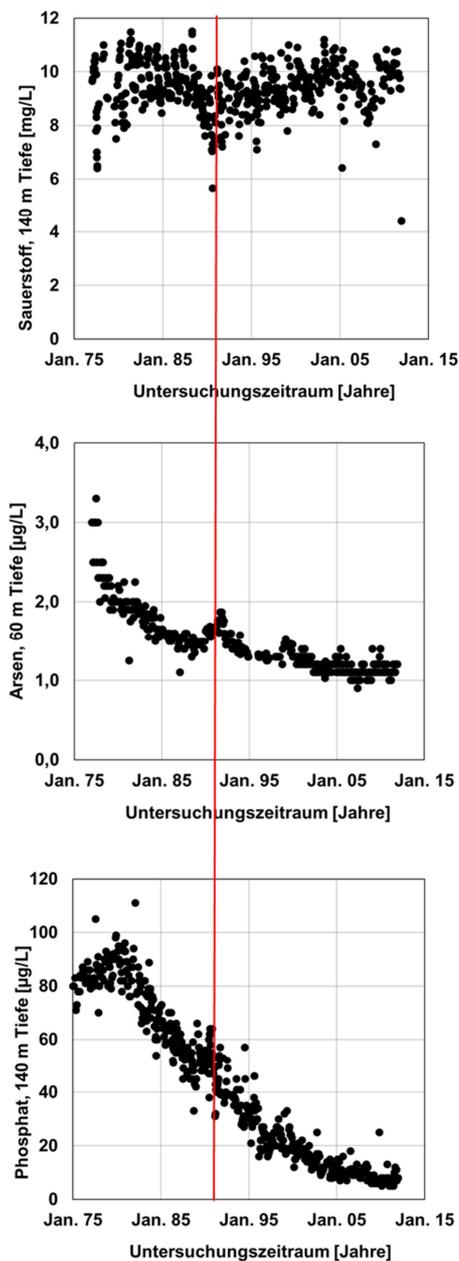


Bild 3.53:
 Änderung der Konzentration an Sauerstoff,
 Arsen und ortho-Phosphat/P im Tiefenwas-
 ser (60 m bzw. 140 m) des Überlinger See-
 teils [BWV (2013)]

f) Eintrag von anthropogen bedingten organischen Spurenstoffen

Aufgrund der sich stets ändernden Rahmenbedingungen sind es heute nicht mehr die „augenscheinlichen“ Verunreinigungen (Stichwort: Eutrophierung ab 1950 bis ca. 1980), die vorrangig Handlungsbedarf erfordern, sondern die zivilisatorischen Einflüsse und deren Auswirkungen. Speziell in diesem Zusammenhang ist vor allem erhöhte Aufmerksamkeit auf den Eintrag an z.T. biologisch nicht oder nur bedingt abbaubaren anthropogenen organischen Spurenstoffen unterschiedlichster Herkunft und Wirkung geboten. Ihr ubiquitäres Vorkommen in der Umwelt und den Gewässern spiegelt dabei die Bedürfnisse unserer hoch technisierten Gesellschaft wider (Stichwort: „menschlicher Fußabdruck“) (**Bild 3.54**).

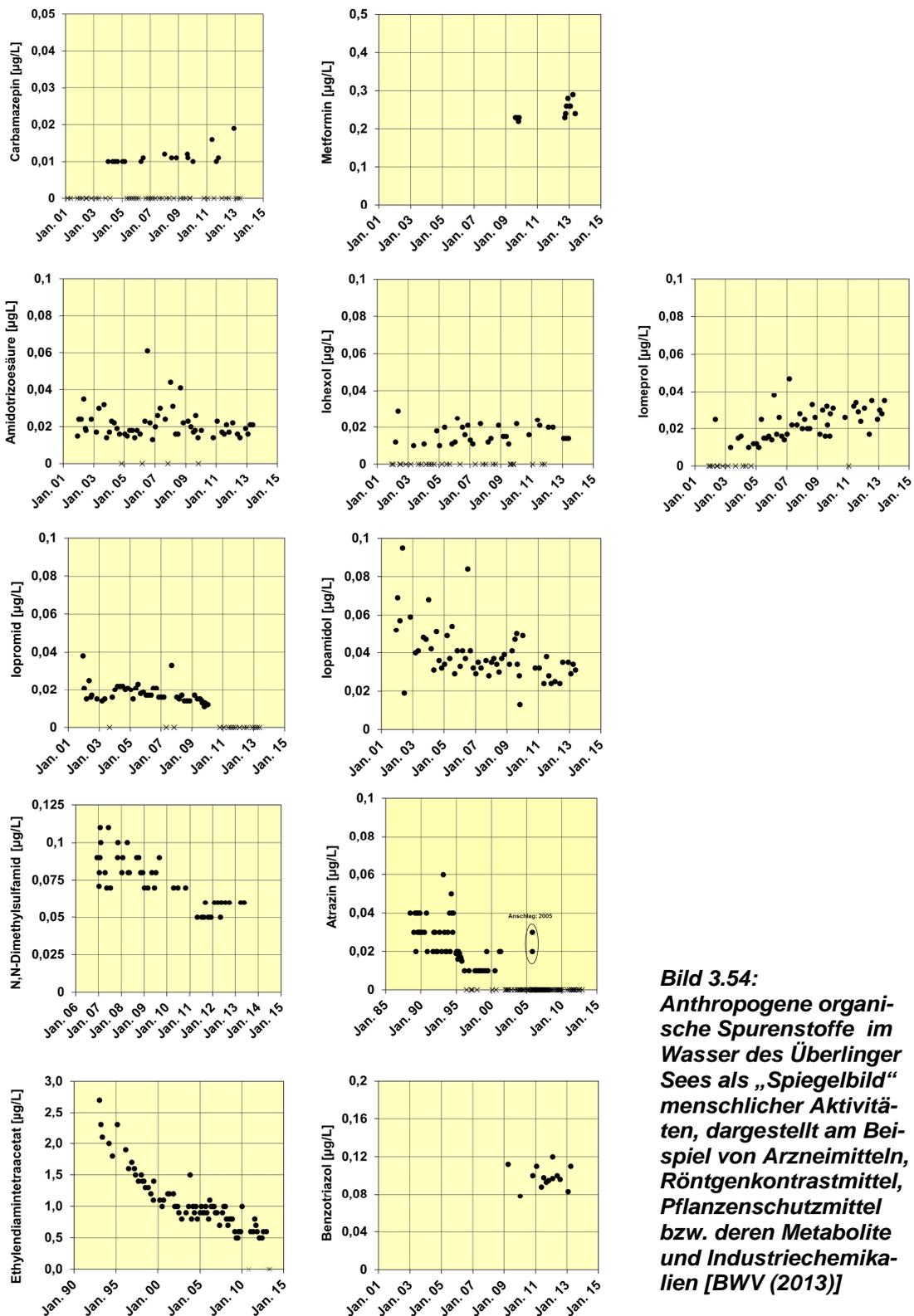


Bild 3.54:
 Anthropogene organische Spurenstoffe im Wasser des Überlinger Sees als „Spiegelbild“ menschlicher Aktivitäten, dargestellt am Beispiel von Arzneimitteln, Röntgenkontrastmitteln, Pflanzenschutzmitteln bzw. deren Metabolite und Industriechemikalien [BWV (2013)]

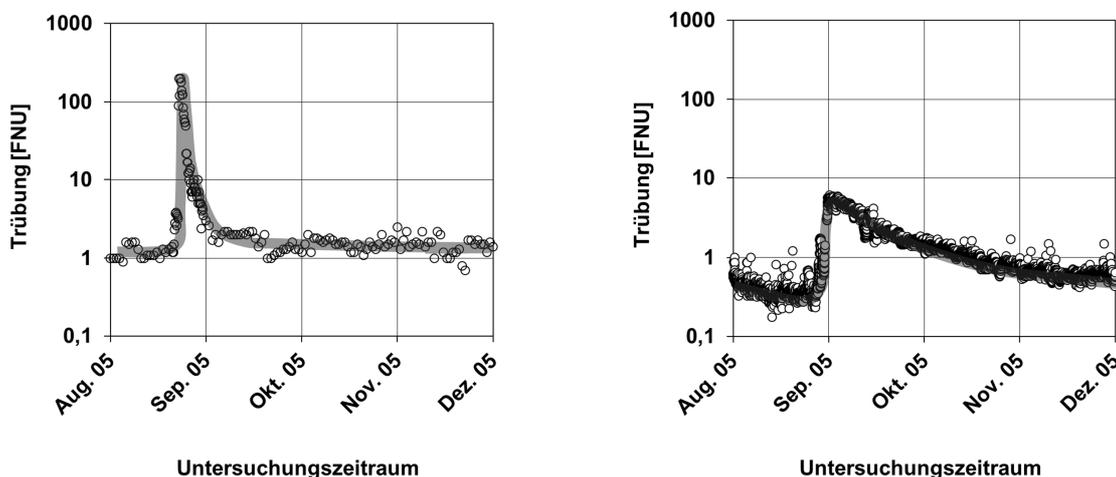
g) Eintrag unerwünschter Stoffe/Substanzen bei Hochwasser- und Starkregenereignissen

Vor allem extreme Niederschläge im alpinen Einzugsgebiet des Bodensees führen zu außergewöhnlichen Verhältnissen. Neben dem Eintrag von Unmengen an Treibholz (**Bild 3.55**) wurden dem Bodensee über die Zuflüsse auch erhöhte Frachten an partikulären Inhaltsstoffen (Trübe, Schwebstoffe,...) zugeführt.



Bild 3.55:
Eintrag von Tot- und Schwemmhholz in den Bodensee bei Starkregenereignissen und Hochwasser
[BWV (2013)]

In Abhängigkeit von den im See vorherrschenden Strömungsverhältnissen, den seeinternen Prozessen der Partikelverfrachtungen sowie der Sedimentationseigenschaften der Feststoffe resultierten dabei räumlich und zeitlich stark variierende Trübungen und hohe Partikelfrachten im Bodenseewasser (**Bild 3.56**), die hohe Anforderungen an die Trinkwassergewinnung und -aufbereitung stellten [AWBR (2006), BodenseeOnline (2008)].

**Bild 3.56:**

Trübung des Bodenseewassers nach dem Starkregenereignis August 2005, dargestellt am Beispiel des Seewasserwerkes Nonnenhorn und der Bodensee-Wasserversorgung [AWBR (2006), BodenseeOnline (2008)]

3.3.6 Beobachtete Auswirkungen der Klimaveränderung auf aquatische Lebensräume und -gemeinschaften im Freiwasser-, Flachwasser- und Uferbereich

Zusätzlich zu den bisher aufgezeigten gewässerspezifischen Beobachtungen zum Wasserstand, zu den hydrodynamischen Vorgängen einschließlich des Schichtungs- und Zirkulationsverhaltens sowie zur Wasserbeschaffenheit wurden in den letzten Jahrzehnten auch im Kontext mit der Klimaveränderung zunehmend Einflüsse auf das pelagiale und litorale Ökosystem des Bodensees beobachtet. Insbesondere die Erhöhung der Wassertemperatur spielt hierbei eine besondere Rolle [IGKB (2004), Hunziker (2011), Dienst (2008), Siebler (2006), Gander (200x)], Ostendorp (2007)]. Gemäß der van't Hoff'sche Regel⁶ laufen bei einer Temperaturerhöhung um 10°C chemische bzw. biochemische Reaktionen etwa doppelt bis viermal so schnell ab.

a) Freiwasser / Pelagial

Neben der physikalisch/chemischen Beschaffenheit ist das Freiwasser des Bodensees auch dadurch gekennzeichnet, dass es von einer Vielzahl an aktiv schwimmenden und schwebenden Organismen⁷ als Lebensraum genutzt wird. Insbesondere dem Phytoplankton als Primärproduzenten und dem Zooplankton als Primärkonsumenten kommt im Zusammenhang mit dem Stoffhaushalt des Sees eine Schlüsselrolle zu (**Bild 3.57**).

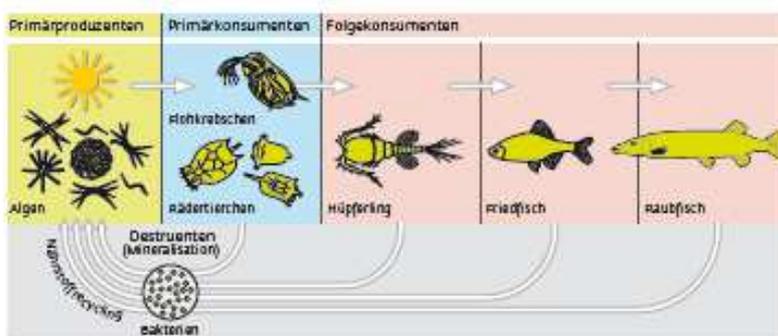


Bild 3.57:
Aquatische Lebensräume
und -gemeinschaften
[Zintz (2009)]

Die zeitliche Entwicklung der Algen, die weitgehend in den oberen 20 m der lichtdurchfluteten Zone stattfindet, hängt im Wesentlichen von der Nährstoffversorgung (Trophiegrad), der Temperatur, dem Lichtangebot und den Wechselwirkungen mit den anderen Biozöosen (z.B. Fressverluste durch Zooplankton) ab. Darüber hinaus ist die Biomasse an abgestorbenen und sedimentierten Algen zudem maßgeblich für die Sauerstoffkonzentration im Tiefenwasser verantwortlich.

⁶ auch als Reaktionsgeschwindigkeits-Temperatur-Regel (RGT-Regel) bekannt

⁷ Zu den schwebenden Organismen (Plankton) zählen die meist einzelligen Algen oder Zellverbände, das Zooplankton, die heterotrophen Einzeller sowie Mikroorganismen

Insgesamt zeigen die bisherigen Untersuchungen zum Vorkommen von Phytoplankton, dass sich die Artenzusammensetzung, die Menge sowie das Wachstumsverhalten der Algen seit Ende der 50ziger Jahre des vorigen Jahrhunderts erheblich verändert hat. Zwischenzeitlich werden vermehrt wieder Goldalgen (*Ochromonas sp.*) als Oligotrophierungsanzeiger gefunden, während z.B. die nährstoffliebende Art *Stephanodiscus hantzschii* seit etwa Mitte der 1990iger-Jahre zunehmend verschwunden ist. Aufgrund dieser Dominanz des Trophiegrades sind jedoch Aussagen zum unmittelbaren Einfluss der klimabedingten Temperaturerwärmung auf die Planktonentwicklung nur bedingt möglich. Darüber hinaus haben Untersuchungen gezeigt, dass durch die schnellere Erwärmung des Sees während des Frühjahrs die Geschwindigkeit des Populationswachstums von Wasserflöhen der Gattung *Daphnia* im Bodensee zugenommen hat [Ostendorp (2007)]. Da *Daphnia* als Filtrierer von Algen eine Schlüsselrolle im Nahrungsnetz des Sees einnimmt, hat dies auf viele Folgekonsumenten direkte oder indirekte Auswirkungen und weiterführende Konsequenzen. U.a. konnte beobachtet werden, dass dadurch der Zeitpunkt der Klarwasserphase⁸ [Ostendorp (2007)] im Vergleich zu den 70er Jahren bereits früher einsetzt. Dies kann darüber hinaus auch als Indiz einer zunehmend stabilisierten thermischen Schichtung des Wasserkörpers und einer erschwerten Tiefenwassererneuerung (Zirkulation) gewertet werden.

Am Beispiel des Zürichsees konnte gezeigt werden, dass aufgrund der klimabedingten Erwärmung der Wasseroberfläche nur bedingt eine Durchmischung im Winter erfolgt und ein Absinken der schädlichen Burgunderblutalge bis auf den Seegrund behindert wird (**Bild 3.58**). Dadurch bleiben immer mehr Cyanobakterien (*Planktothrix rubescens*) intakt mit der Folge eines verstärkten Algenwachstums im Frühjahr. Die wärmeren Temperaturen wirken daher den in den letzten Jahrzehnten erfolgreich im Zürichsee durchgeführten Sanierungen entgegen [Posch (2012)].

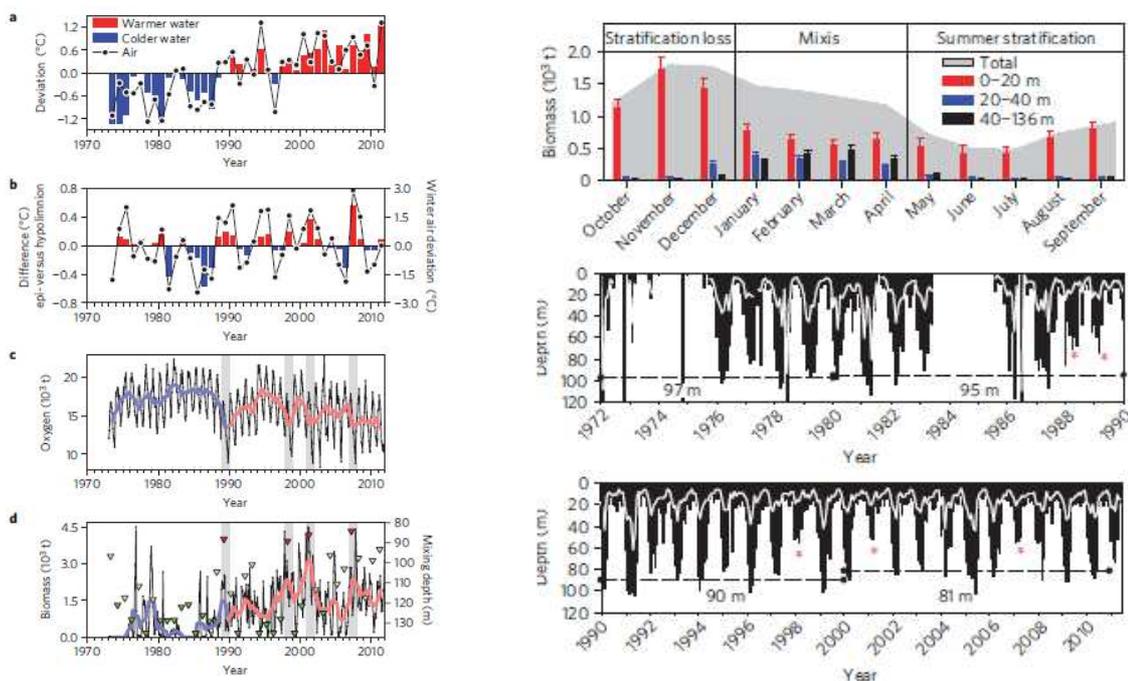


Bild 3.58:
Zusammenhang zwischen der Lufttemperatur und der thermischen Schichtung, der Sauerstoffkonzentration und der Biomasse an *P.ruebencens* sowie deren zeitliche und räumliche Verteilung im Zürichsee [Posch (2012)]

⁸ kurze Periode im Frühsommer, in der die Zooplankton-Populationsdichte so hoch ist, dass nahezu alle Algen abfiltriert werden.

b) Flachwasserbereich / Litoral

Im Ufer- und Flachwasserbereich finden komplexe Wechselwirkungen und ausgeprägte Austauschprozesse zwischen der Luft, dem Land und dem Wasser statt. Der gesamte Bereich ist lichtdurchflutet und beherbergt die mit Abstand größte Vielfalt an Biotopen und Biozönosen im Bodensee. Dabei ist sowohl die biologische Aktivität als auch der Stoffhaushalt von den jeweiligen Standortbedingungen wie z.B. der Luft- und Wassertemperatur, den Wasserstandsschwankungen, der Stärke des Wellenschlages, der Wärme- und Lichtverhältnisse sowie den Stoffeinträgen der Zuflüsse abhängig. Ferner besitzt das Litoral eine besondere Bedeutung im Zusammenhang mit der Selbstreinigungskraft des Sees und der Tiefenwassererneuerung (Differenzial cooling).

Untersuchungen der Arbeitsgemeinschaft Bodenseeufer (AGBU) haben gezeigt, dass im Zuge des beobachteten Temperaturanstieges bereits Veränderungen bei der Ufervegetation festzustellen sind. Beispielsweise hat sich das wärmeliebende „Mittlere Nixenkraut, *Najas intermedia*“ in den letzten Jahrzehnten vom Untersee über die seichte südliche Mainau-Bucht bis in den Obersee ausgebreitet. Darüber hinaus reagieren als ortsgebundene Organismen die seenahen Ufervegetationen besonders empfindlich auf extreme Wasserstände. Während bei dem Extremhochwasser von 1999 über 20 Prozent des aquatischen Schilfröhrichts am baden-württembergischen Ufer abgestorben sind, ermöglichen Niedrigwasserphasen die Ansiedlung von neuen Pflanzenarten, wie z.B. 2006/2007, als erstmals am unmittelbaren Bodenseeufer der Zungen-Hahnenfuss (*Ranunculus lingua*) und der Shuttleworth-Rohrkolben (*Typha shuttleworthii*) vor dem Schilfröhricht des Wollmatinger Rieds entdeckt worden sind [Ostendorp (2007), Dienst (2008)].

Aber nicht nur bei der Vegetation sondern auch im aquatischen Tierreich wurden in der Vergangenheit immer wieder Veränderungen festgestellt. Dabei ist die zunehmend beschleunigte Einschleppung, Verbreitung und Etablierung sogenannter expansiver Arten und Neozoen im Bodensee vorrangig auf die Globalisierung des Warenaustauschs und die Mobilität im Reiseverkehr, die Erweiterung des Binnenschiffahrtsnetzes nach Osteuropa und das Aussetzen von exotischen Aquarientieren zurückzuführen. Noch stammen alle aquatischen Neozoen, die sich in mitteleuropäischen Binnengewässern erfolgreich vermehren können, aus Gebieten der gemäßigten Klimazonen (**Bild 3.59**). Ein direkter Zusammenhang mit der Klimaerwärmung lässt sich derzeit noch nicht erkennen [Ostendorp (2007), LUBW (200x), Dienst (2008), Siebler (2006), ANEBO (2005, ANEBO (2013), www.neozoen-bodensee.de, IGKB (2008a), Gessner (2009), Gewässerfachstellen (2008), Kramer (2006), Schneider (2010)].



Bild 3.59:
Eintrag von Neozoen
Grobgerippte Körbchenmuschel (*Corbicula fluminea*)
Großer Höckerflohkrebs (*Dikerogammarus villosus*)
Donau-Schwebgarnele (*Limnomysis benedeni*)
 [IGKB (2006b), IGKB (2008a), Ostendorp (2007), ANEBO (2005), ANEBO (2013)]

Nach der Einwanderung und rasanten Ausbreitung der Dreikant- oder Zebramuschel (*Dreissena polymorpha*) in den 1960er-Jahren wurden ab 2002 auch der Große Höckerflohkrebs (*Dikerogammarus villosus*), die Grobgerippte Körbchenmuschel (*Corbicula fluminea*) und die Donau-Schwebgarnele (*Limnomysis benedeni*) sowie der Aufrechte Flohkrebs (*Crangonyx pseudogracilis*)

eingeschleppt. Ob sich die Neuankömmlinge als harmlos oder doch als unangenehme Invasoren entwickeln, wird sich erst in den kommenden Jahren zeigen. Schon jetzt zeichnet sich jedoch ab, dass die Neuankömmlinge aufgrund ihrer z.T. aggressiven Ausbreitungstendenzen entlang des Seeufers wesentlichen Einfluss auf das Ökosystem nehmen.

3.4 Abschließende Bemerkungen

Wie die ausgewerteten Literaturbeiträge zeigen, wirkt sich die zunehmende Erderwärmung auch im Bodenseeraum und dessen Einzugs- und Trinkwasserversorgungsgebiets in mannigfaltiger Weise aus. Im Einzelnen werden vor allem seit Mitte des 19. Jahrhunderts u.a. folgende zeitliche Entwicklungen und Sachverhalte beobachtet:

- Anstieg der Lufttemperatur im Jahresmittel um ca. 1 °C, im Alpenraum über 1,5 °C
- Temperaturanstieg im Winterhalbjahr höher als im Sommerhalbjahr
- Rückgang der Frosttage, $v < 0^{\circ}\text{C}$
- deutliche Zunahme der Sommertage, $v > 25^{\circ}\text{C}$
- Intensität und Häufigkeit der Niederschläge gebietspezifisch, d.h. zeitlich und räumlich unterschiedlich
- Zunahme von Westwetterlagen im Winter, Zunahme von Hochdruckwetterlagen im Sommer (i.d.R. feuchtere Winter, trockenere Sommer, im Jahresmittel weitgehend unverändert)
- Zunahme der Intensität und Häufigkeit von Extremereignissen (Starkniederschläge, Hochwasser, Trockenheit, Niedrigwasser, Sturm,)
- Auftauen von Permafrostgebieten und Abschmelzen der Gletscher
- Anstieg der Schneefallgrenze und Abnahme des Schneebedeckungsgrades
- Änderung des Abflussregime von Fließgewässern, i.d.R. Abnahme der Wassermenge im Sommer, Zunahme im Winter
- Grundwasserneubildung abhängig von regionalen Verhältnissen (Niederschlagsverteilung, hydrogeologischen Gegebenheiten, Landnutzung,....)
- Leicht abnehmende Wasserstände des Bodensees
- Klimabedingte Einflüsse auf hydrodynamische Vorgängen im Bodensee (z.B. Schichtungs- und Zirkulationsverhalten)
- Änderung einzelner Wassergüteparameter, z.B. Anstieg der Wassertemperatur, ...
- Beeinflussung der aquatischen Lebensräume und -gemeinschaften im Freiwasser-, Flachwasser- und Uferbereich des Bodensees

Insgesamt ist unter den derzeitigen Rahmenbedingungen davon auszugehen, dass die aufgezeigten Umweltauswirkungen sich fortsetzen werden. Die dabei zu erwartenden Trends und Entwicklungen werden ausführlich im nachfolgenden Kapitel 4 erörtert.

4.0 Erwartete Auswirkungen¹ der Klimaveränderungen

4.1 Allgemeines

Wie die auf die Anrainerstaaten des Bodensees bezogenen Untersuchungen zum Thema „Klimawandel“ zeigen, sind die klimabedingten Umweltauswirkungen sowohl in der Bodenseeregion als auch im Ökosystem „Bodensee“ bereits heute deutlich wahrnehmbar. Während die Erkenntnisse und Schlussfolgerungen dabei vor allem aus Wetteraufzeichnungen, Messdaten oder daraus abgeleiteten Kenngrößen ermittelt wurden, lassen sich die in Zukunft zu erwartenden Entwicklungen nur aus Szenarien und Prognosen abschätzen. Dazu bedarf es entsprechender Klima-, Wasserhaushalts- sowie Strömungs- und Stofftransportmodelle, die unter Berücksichtigung der gegebenen Unsicherheiten aus den verschiedenen Klimaszenarien zumindest näherungsweise Trendaussagen über die denkbaren meteorologischen und hydrologischen Verhältnisse im Einzugs- bzw. Trinkwasserversorgungsgebiet bzw. über die im Bodensee stattfindenden Prozessabläufe erlauben.

In Kap. 4.2 wird anhand ausgewählter Literaturangaben auf die prognostizierten langfristigen Witterungsverhältnisse und deren „landseitige“ Effekte im Einzelnen eingegangen. Hingegen beruhen die Darstellungen der im Bodensee vorhergesagten Wechselwirkungen (Kap. 4.3) vorwiegend auf Aussagen, die sich sowohl auf die Auswertungen der in der Vergangenheit beobachteten Zusammenhänge als auch auf erste Simulationsergebnisse stützen, die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ermittelt wurden.

4.2 Meteorologische und hydrologische Auswirkungen im Einzugs- und Trinkwasserversorgungsgebiet des Bodensees

Nach allen bislang vorliegenden Erkenntnissen ist davon auszugehen, dass sich analog dem weltweiten Trend die Temperaturerhöhung auch im Einzugs- und Trinkwasserversorgungsgebiet des Bodensees fortsetzen wird [z.B. Graßl (2000), Gander (2009), OcCC (2007), OcCC (2008), Jacob (2008), Jacob (2009), DAV (2010), ProClim (2005), CH2011 (2011a), KLIWA Heft 9 (2006) KLIWA Heft 10 (2007), LW (2006), LUBW (2013)]. Wie aus den vorliegenden Prognosen abgeleitet werden

¹ Mit dem Begriff „Auswirkungen“ werden im Sinne der vorliegenden Literaturstudie beobachtete Primäreffekte des Klimawandels oder Prognoseaussagen zu den im Einzugs- und Trinkwasserversorgungsgebiet bzw. im Bodensee und seiner Kompartimente erwarteten Prozessabläufe bezeichnet.

kann, wird bis Mitte des 21. Jahrhunderts die Umgebungstemperatur in allen Regionen vom heutigen Referenzzustand abweichen (**Bild 4.1 bis Bild 4.6**).

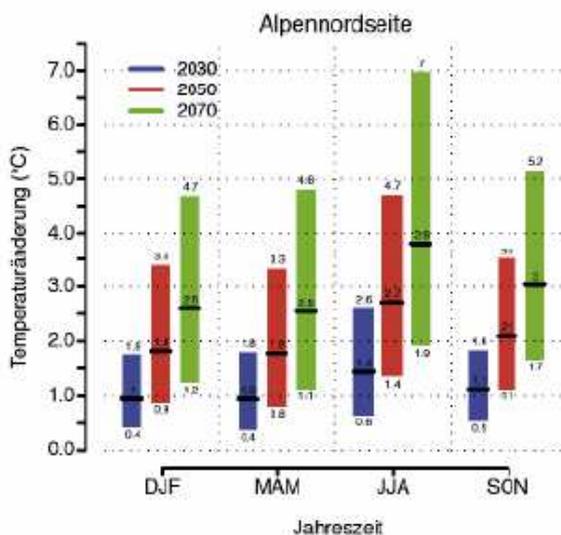


Bild 4.2:
Änderung der mittleren saisonalen Temperatur für die Alpennordseite
 [KLIWA Heft 10, Städler (2007)]

Die Balken zeigen die Unsicherheiten und die Linien die jeweils beste Schätzung der Änderung. Die Änderungen sind dargestellt für die Perioden 2020-2040 (blau), 2040-2060 (rot), 2060-2080 (grün) gegenüber dem Referenzzustand von 1980-2000.

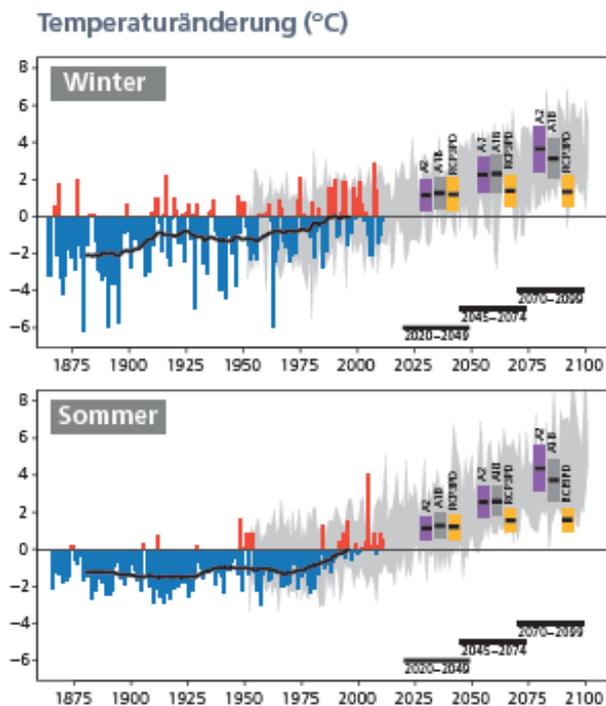


Bild 4.3:
Änderungen der saisonalen Temperatur, dargestellt am Beispiel der Nordschweiz
 [CH2011 (2011)]

Die Änderungen beziehen sich auf den Referenzzeitraum 1980 - 2000. Die dünnen farbigen Balken zeigen die jährlichen Abweichungen vom gemessenen Durchschnitt, die dicken schwarzen Linien sind die entsprechenden über 30 Jahre geglätteten Durchschnittswerte. Die graue Schattierung gibt die Spannweite der jährlichen Abweichungen an, wie sie die Klimamodelle für das A1B Szenario prognostizieren. Die dicken farbigen Balken zeigen die besten Schätzungen der Projektionen in die Zukunft und den damit verbundenen Unsicherheitsbereich für ausgewählte Zeiträume von 30 Jahren und für drei verschiedene Szenarien von Treibhausgasemissionen.

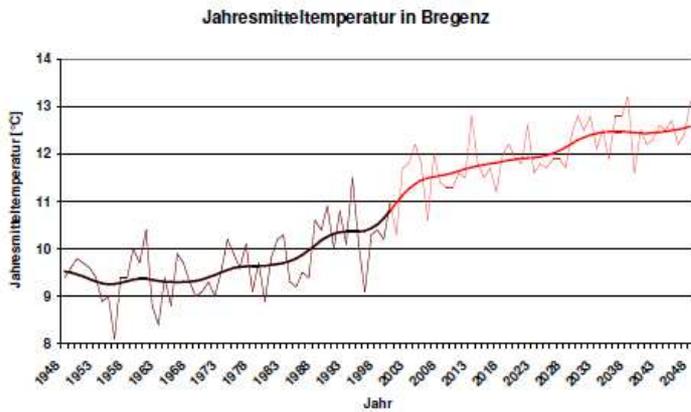


Bild 4.4:
Lufttemperatur in Bregenz,
Beobachtung und Prognose
[wwf (2007)]

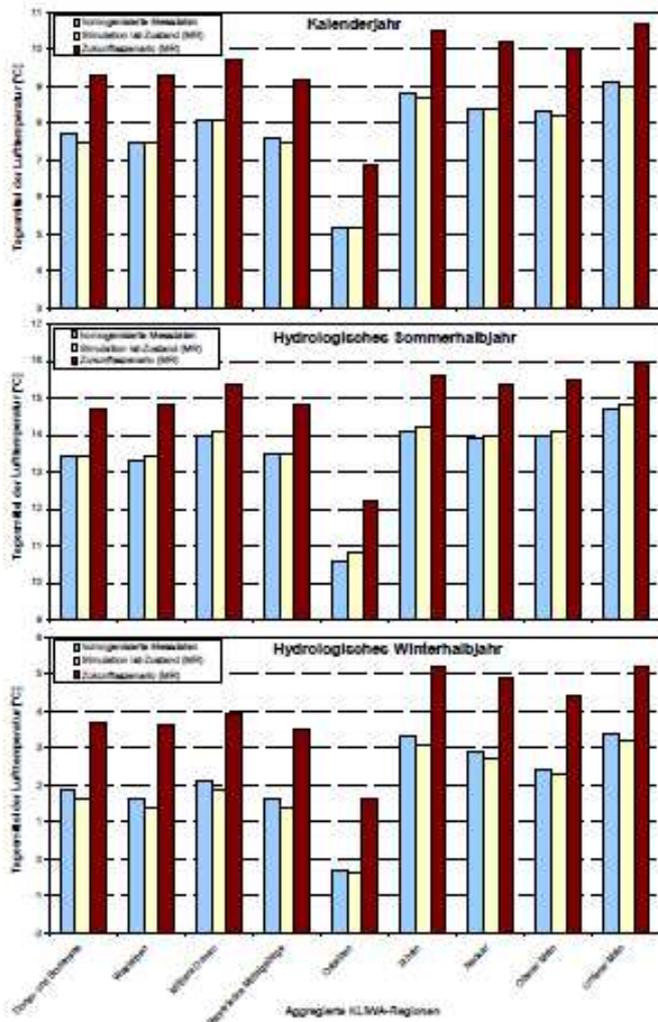


Bild 4.5:
Regionenspezifische Prognosen
zur mittleren Lufttemperatur in
Süddeutschland mittels MR-
Modell (Kalenderjahr, Sommer-
und Winterhalbjahr) [KLIWA Heft
9 (2006)]
Referenzzustand: 1971 – 2000
Zukunftsszenario: 2021 - 2050

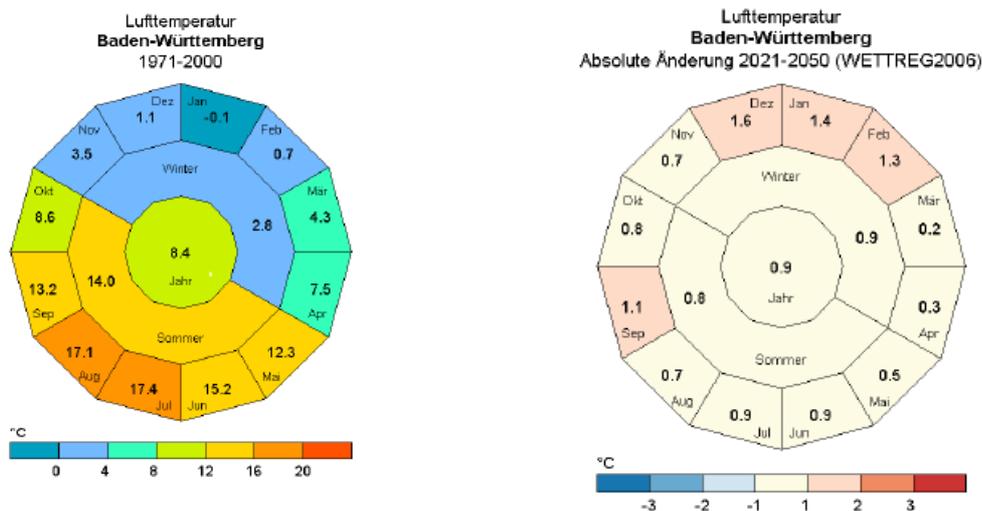


Bild 4.6: Lufttemperatur in Baden-Württemberg und deren prognostizierte Änderung [KLIWA Heft 17 (2012)]
 links: Referenzzustand: 1971 - 2000
 rechts: Prognosezeitraum: 2012 - 2050

In Abhängigkeit der angenommenen Szenarien und örtlichen Gegebenheiten werden die mittleren Jahrestemperaturen bzw. die Temperaturen im Sommer- bzw. im Winterhalbjahr dabei in der Größenordnung zwischen >1,5 °C und 4°C bis 2100 ansteigen, entsprechend erhöht sich auch die Anzahl der heißen Tage ($T_{max} > 30^{\circ}C$) bzw. verringert sich die Anzahl der Eis- und Frosttage ($T_{min} < 0^{\circ}C$) (**Bild 4.7**).

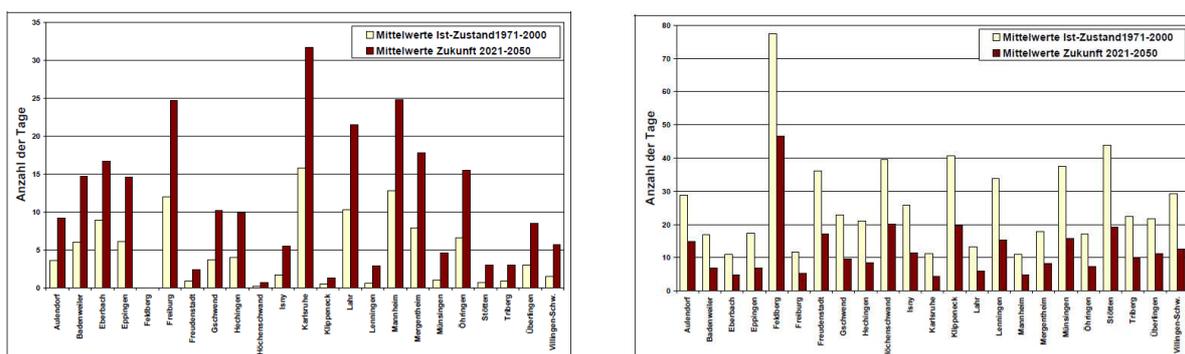


Bild 4.7: Anzahl der bisherigen und künftigen heißen Tage mit Temperaturen über 30°C (links) bzw. Eistagen mit Temperaturen unter 0°C (rechts) pro Jahr in Baden-Württemberg [KLIWA Heft 9 (2006)]

Ebenso werden sich auch die Schneeverhältnisse in mannigfaltiger Weise verändern. Beispielsweise ist langfristig in den betroffenen Gebieten ein allmählicher Anstieg der Schneefallgrenze um mehr als 500 m bzw. eine Verkürzung der Schneedeckendauer um ca. 20 Tage (**Bild 4.8**) bei gleichzeitiger Verlängerung der Regenperiode im Herbst und Frühjahr zu erwarten.

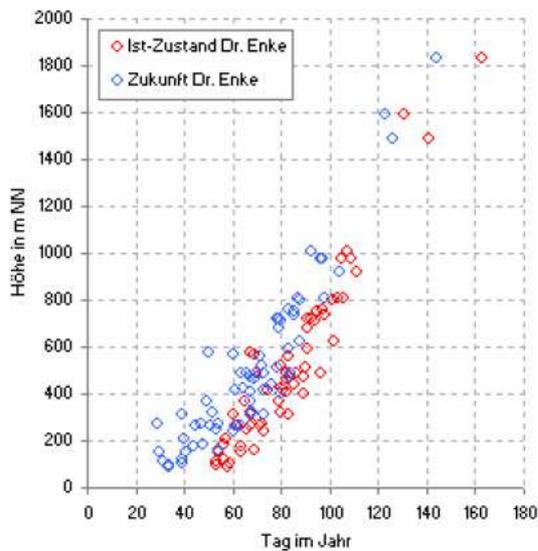


Bild 4.8:
 Dauer der Schneedecke in Abhängigkeit von der geographischen Höhenlage, dargestellt am Beispiel Süddeutschland [KLIWA Heft 9 (2006)]

Insbesondere der Alpenraum ist hiervon stark betroffen. Aufgrund der o.g. Sachverhalte ist daher langfristig mit einer Abnahme der in Form von Schnee speicherbaren Wasseräquivalente und somit mit einem deutlichen Rückgang der Schmelzwassermengen im Frühjahr zu rechnen (**Bild 4.9**).

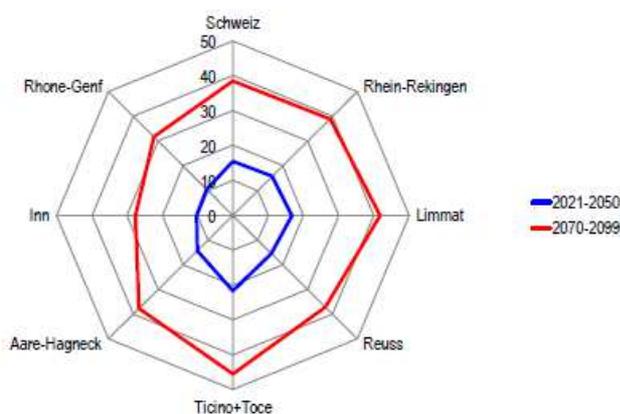


Bild 4.9:
 Prozentuale Abnahmen der schneebedingten Schmelzwassermengen im Frühjahr, dargestellt am Beispiel verschiedener Einzugsgebiete in der Schweiz [BAFU (2012c)]

Im alpinen Einzugsgebiet des Bodensees führen diese Entwicklungen außerdem dazu, dass es bis Mitte/Ende des 21. Jahrhunderts zu einem weitgehenden Verlust der heute noch vorhandenen Gletscher mit einem gespeicherten Wasservolumen von ca. 10 Mrd. m³ kommen wird (**Bild 4.10** und **Bild 4.11**) [Haubner (2002), Hamberger (2012), DAV (2010), IGKB (2007a), Formayer (2001), Formayer (2008), cipra (2009), cipra (2011), KHR (2006), Schädler (2006), BUWAL (2004b), Kromp-Kolb (2009), Flessner (2009), Kinzelbach (2007), BAFU (2006)].

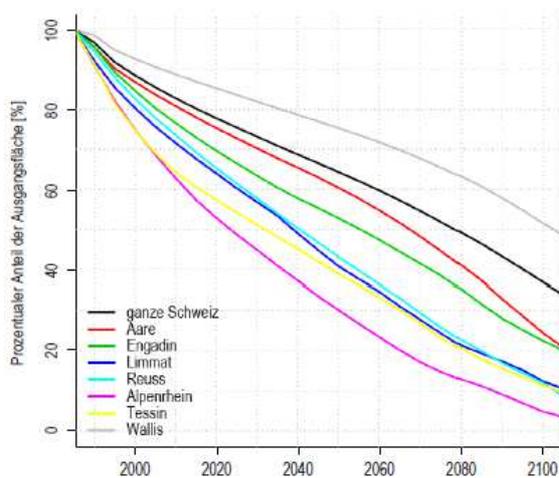


Bild 4.10:
Relative Flächenänderungen von Gletschern
in verschiedenen Einzugsgebieten
Modellierungszeitraum: 1985 bis 2100
[BAFU (2012c)]

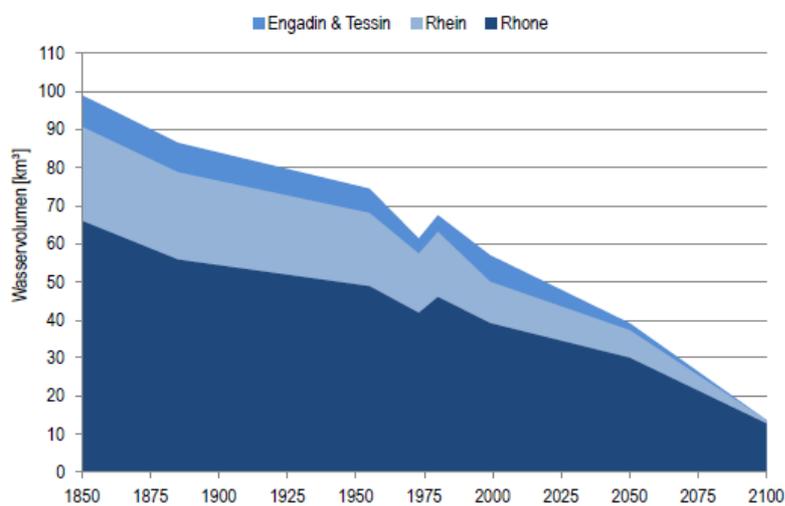


Bild 4.11:
Entwicklung der in den
Schweizer Gletschern ge-
speicherten Wasservolumen
(u.a. im Rheineinzugsgebiet)
seit Ende der kleinen Eiszeit
[BAFU (2012c)]

Unter der Annahme, dass das gesamte Eis in den nächsten 50 bis 100 Jahren schmilzt, resultiert ein Schmelzwasserabfluss von ca. 0,2 Mrd. m³ in das Rheineinzugsgebiet, der in Bezug auf das zukünftige Wasserdargebot für die Trinkwasserversorgung jedoch nur eine untergeordnete Rolle spielt (**Tabelle 4.1**).

Tabelle 4.1:
Gletschervolumen im Rheineinzugsgebiet sowie des Bodensees

Gletschervolumen im Rheineinzugsgebiet	[Mrd. m ³]	ca. 10
Wasservolumen Bodensee	[Mrd. m ³]	ca. 48
Mittlerer Jahresdurchfluss	[Mrd. m ³ /a]	ca. 11
davon Gletscherwasser, bezogen auf 50 bis 100 Jahre	[Mrd. m ³ /a]	ca. 0,1 - 0,2
Mittlere jährliche Verdunstung Seeoberfläche	[Mrd. m ³ /a]	ca. 0,28
Wasserentnahme Seewasserwerke	[Mrd. m ³ /a]	Ca. 0,17

Darüber hinaus werden als Folge des Temperaturanstieges der Atmosphäre mittelfristig weltweit die Permafrostgebiete weiter auftauen, was zu einer zusätzlichen Erhöhung des Methangehaltes in der Atmosphäre führen wird [UBA (2006)]. Sind hochalpine Bereiche betroffen (**Bild 4.12**), ist insbesondere bei Wetterlagen mit Starkniederschlägen verstärkt mit Hangrutschungen sowie Muren-, Schlamm- und Schneelawinenabgängen und damit zu einem verstärkten Eintrag von Trübstoffen und Totholz in den Bodensee zu rechnen.

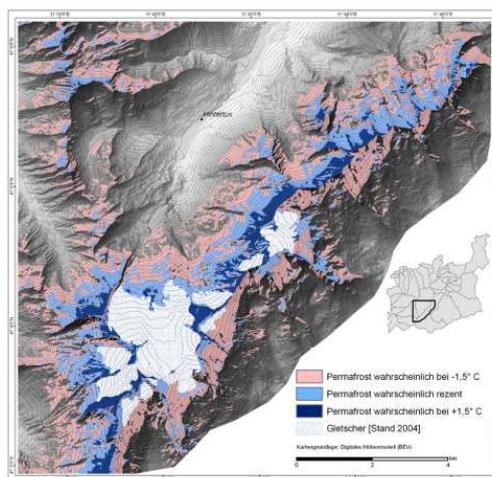


Bild 4.12:
Entwicklung der Permafrostgebiete bei unterschiedlichen klimatischen Rahmenbedingungen, dargestellt am Beispiel des hinteren Tuxer Tal
Referenzzustand: Gletscherstand 2004
[Kromp-Kolb (2008)]

Neben den Auswirkungen des Klimawandels, die vorwiegend auf die Temperaturerhöhung zurückzuführen sind, werden durch die zukünftigen Witterungsverhältnisse auch die Bilanzgrößen zum Wasserhaushalt wie z.B. Niederschlagsmenge und deren innerjährliche Verteilung, Intensität, Häufigkeit, Verdunstungsrate, der direkte und unterirdische Abfluss sowie die Grundwasserneubildung beeinflusst. Das Ausmaß wird dabei sowohl räumlich als auch saisonal unterschiedlich ausgeprägt sein (**Bild 4.13 bis Bild 4.17**) [z.B. Schädler (2008), Schädler (2006), Livingstone 2010,

Leibundgut (2010), www.zgis.at (2013), www.alpwaterscarce.eu (2013), EEA (2009), Formayer (2004), Kromp-Kolb (2008), Naef (2010), Rickenmann (2010), Kohs (2007) OcCC (2007), OcCC (2008), Jacob (2008), Jacob (2009), ProClim (2005), CH2011 (2011a), KLIWA Heft 9 (2006) KLIWA Heft 10 (2007)].

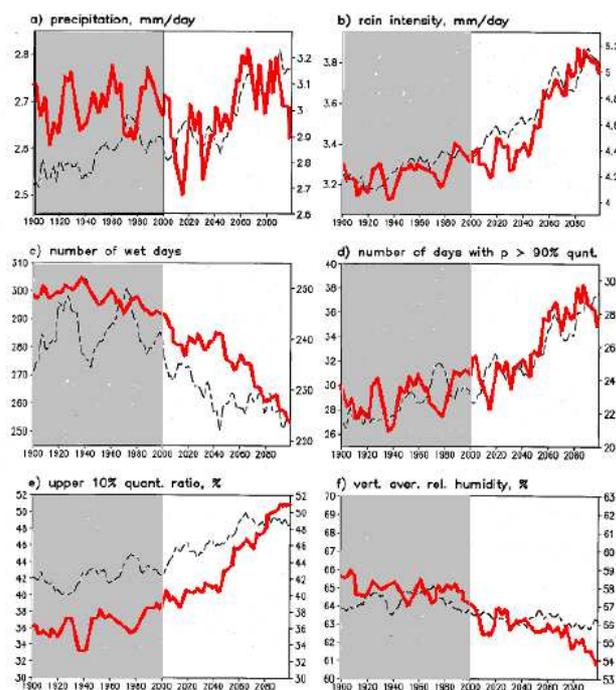


Bild 4.13:
Niederschlagsprognosen für Mitteleuropa (rote Linie), abgeleitet mit dem Modell „GCM-ECHAM4“ bis 2100. [Formayer (2004)]
Grau: historische Werte
Weiß: Prognosen

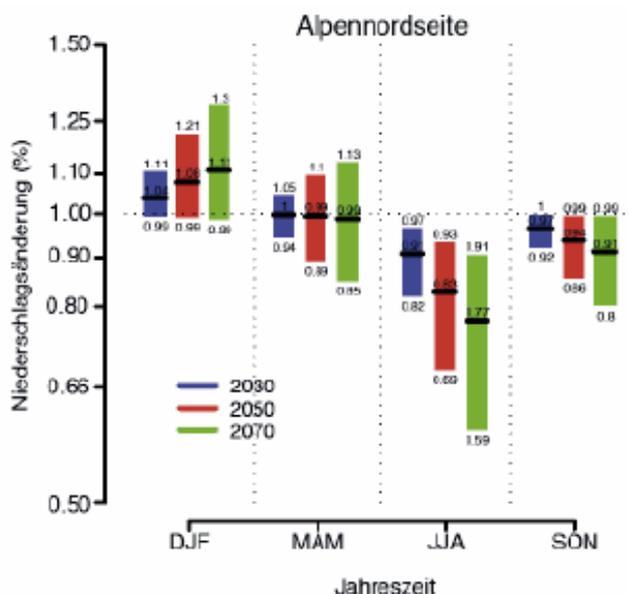


Bild 4.14:
Änderung des mittleren saisonalen Niederschlags für die Alpen Nordseite [KLIWA Heft 10 (2007)]
Die Balken zeigen die Unsicherheiten und die Linien die jeweils beste Schätzung der Änderung. Die Änderungen sind dargestellt für die Perioden 2020- 2040 (blau), 2040-2060 (rot), 2060 - 2080 (grün) gegenüber dem Referenzzustand von 1980 - 2000.

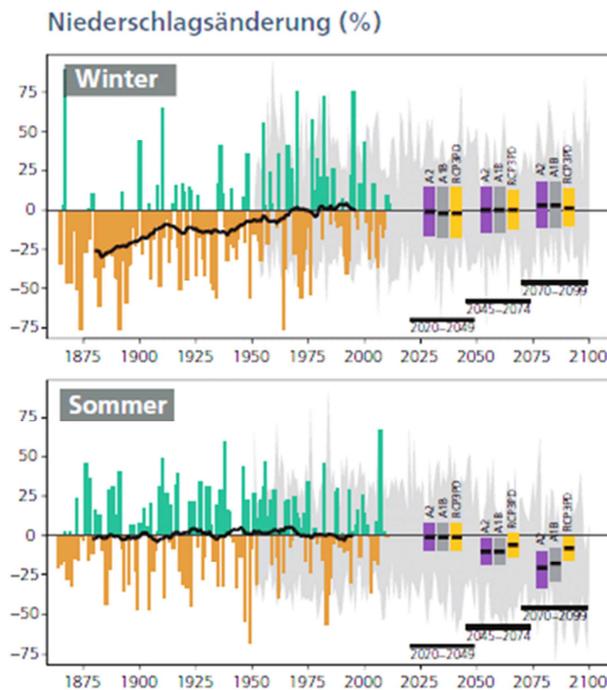


Bild 4.15:
Änderungen des saisonalen Niederschlages, dargestellt am Beispiel der Nordostschweiz [CH2011 (2011)]
 Die Änderungen beziehen sich auf den Referenzzeitraum 1980 - 2000. Die dünnen farbigen Balken zeigen die jährlichen Abweichungen vom gemessenen Durchschnitt, die dicken schwarzen Linien sind die entsprechenden über 30 Jahre geglätteten Durchschnittswerte. Die graue Schattierung gibt die Spannweite der jährlichen Abweichungen an, wie sie die Klimamodelle für das A1B Szenario prognostizieren. Die dicken farbigen Balken zeigen die besten Schätzungen der Projektionen in die Zukunft und den damit verbundenen Unsicherheitsbereich für ausgewählte Zeiträume von 30 Jahren und für drei verschiedene Szenarien von Treibhausgasemissionen.

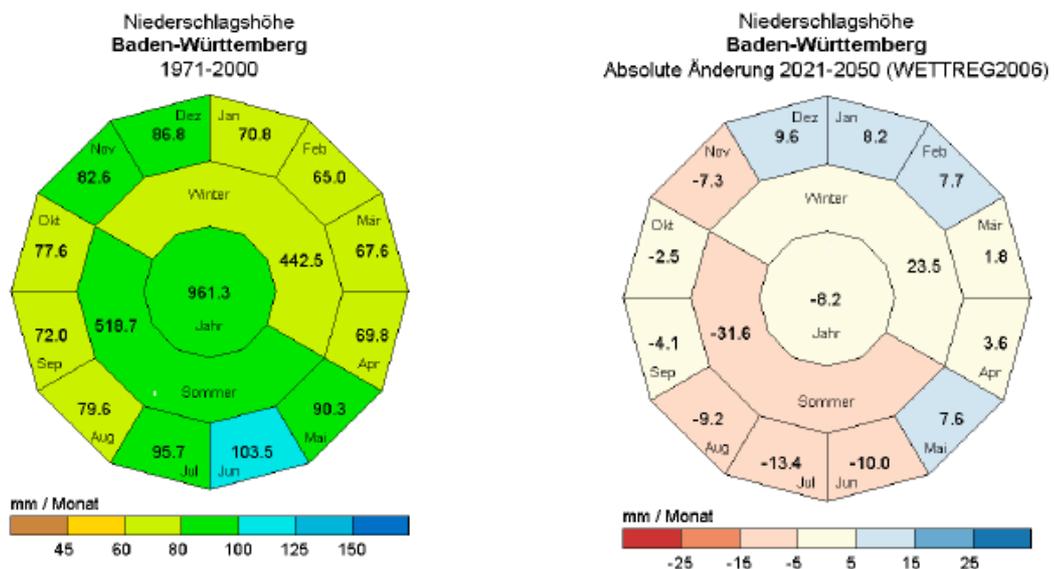


Bild 4.16:
Niederschlagshöhe in Baden-Württemberg und deren prognostizierte Änderung [KLIWA Heft 17 (2012)]
 Links: Referenzzustand: 1971 - 2000
 Rechts: Prognosezeitraum: 2012 - 2050

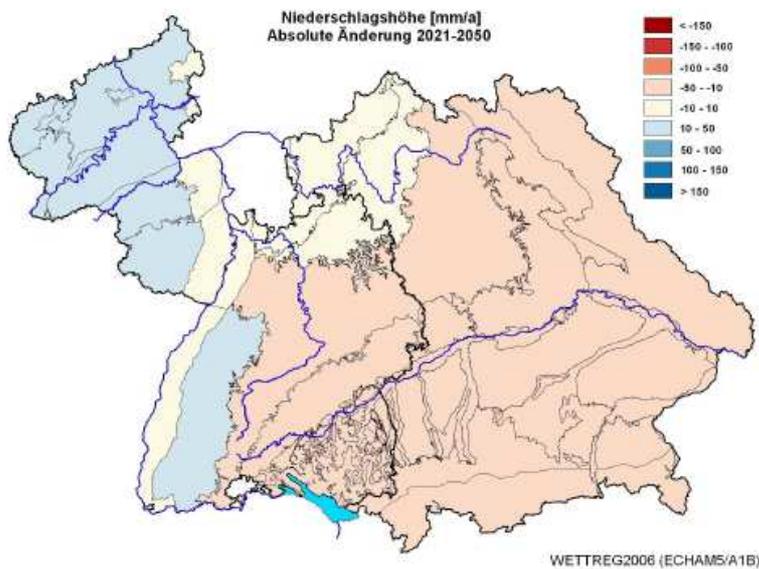


Bild 4.17:
Mittlere Änderung der Niederschlagshöhe in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten in Süddeutschland
[KLIWA Heft 17 (2012)]
 Referenzzeitraum: 1971-2000
 und Prognosezeitraum: 2021-2050
 Modellsimulation: WETT-REG2006 (ECHAM5/A1B)

Wie die Untersuchungen zeigen, ist davon auszugehen, dass sich im Großraum „Mitteleuropa“ die Jahresniederschlagssumme bis 2100 nicht wesentlich verändern wird. Bei einer Differenzierung ist jedoch zu erkennen, dass je nach örtlichen Gegebenheiten z.T. erhebliche Unterschiede resultieren können. Bezogen auf das Einzugs- und Trinkwasserverteilungsgebiet des Bodensees deuten die Ergebnisse darauf hin, dass langfristig insgesamt eine geringe Abnahme der Gesamtjahresniederschläge zu erwarten ist, die insbesondere durch die innerjährliche Verschiebung der Niederschlagsverteilung bedingt ist. Während im Winter mit einer Zunahme zu rechnen ist, werden im Sommer die Niederschläge z.T. signifikant abnehmen. Aus aktuellen Untersuchungsergebnissen lässt sich beispielweise ableiten, dass bereits heute ein Anstieg von „kritischen“ Großwetterlagen zu erkennen ist, die vor allem im Sommer zu langanhaltenden Trocken- und Niedrigwasserperioden führen (vgl. Kap. 3.2.2). Entsprechenden Simulationsberechnungen zufolge wird sich dieser Trend auch in Zukunft fortsetzen [KLIWA Heft 18 (2012), Schneider (2013)]. Gleichzeitig ist aber auch zu befürchten, dass extreme Unwetter, verbunden mit Starkregenniederschlägen, Hochwasserereignissen und Stürmen in ihrer Häufigkeit und Intensität zunehmen. Wie die Ergebnisse von NiedSim² zeigen, wird aufgrund einer verstärkten Konvektion bei hohen Temperaturen das niederschlagsfähige Wasser länger in der Atmosphäre gehalten und fällt dann umso plötzlicher zu Boden [LUBW (2012), Bardossy (2010)]. Dadurch werden Ereignisse, die Überschwemmungen im Einzugs- und Trinkwasserversorgungsgebiet aber auch in der Bodenseeregion zur Folge haben, wahrscheinlicher.

² „NiedSim“ ist ein von der LUBW finanziertes Simulationsprogramm, mit dem synthetische Regenreihen zur Verfügung gestellt werden [Bardossy (2010)]

Als Folge der skizzierten Sachverhalte werden sich bis Mitte/Ende des 21. Jahrhunderts deutliche Änderungen im Abflussregime von Fließgewässern (**Bild 4.18**) einstellen.

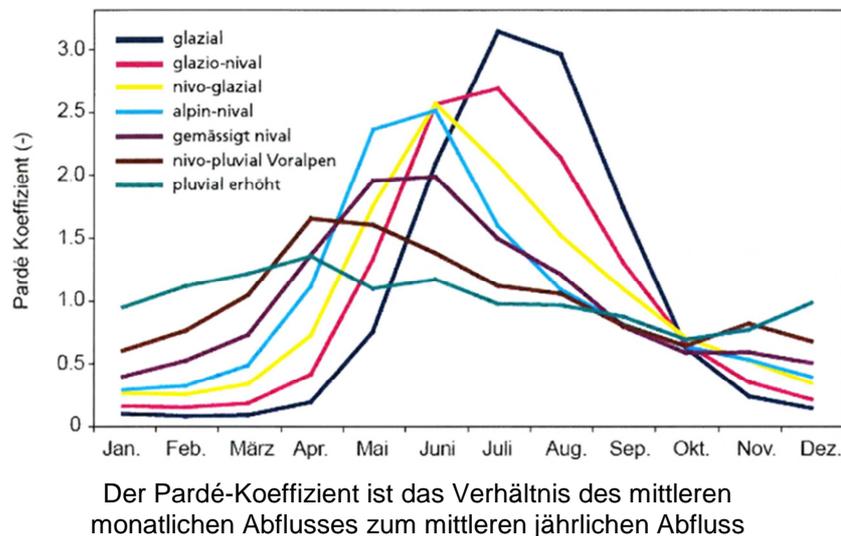


Bild 4.18:
Mittlere Abflussregimes von schweizerischen Einzugsgebieten mit unterschiedlicher Höhenlage [KLIWA Heft 10 (2007)]
Erläuterungen siehe Fußnote³

Die heute im alpinen Einzugsgebiet des Bodensee bekannten Regime mit ihrem charakteristischen Jahresgang eines Abflussmaximums im Sommer und eines Abflussminimums im Winter werden mittel- bis langfristig zurückgedrängt, vielmehr ist zukünftig mit einer Zunahme der südalpinen Verhältnisse zu rechnen. D.h. bei einem nahezu gleichbleibenden Jahresgesamtabfluss ist ein Abflussmaximum im Winter und einem deutlichen Minimum im Juni/Juli bis August/September zu erwarten (**Bild 4.19**) [BAFU (2012c)].

³ Ausgehend von der Häufigkeit, Intensität und Art der Niederschläge sowie dem Speichervermögen des Untergrundes und der Oberflächengewässer lassen sich verschiedene Typen von Fließgewässern unterscheiden, die unterschiedliche jahreszeitliche Abflussmuster aufweisen. Fließgewässer in hochalpinen Lagen, die hauptsächlich durch das Abschmelzen von Schnee und Gletschern gespeist werden („glazial“) weisen die größten Abflussschwankungen (bis Faktor 30) auf. Am geringsten sind die Veränderungen bei Fließgewässern wie z.B. in unteren und mittleren Höhenlagen (Süddeutschland), die überwiegend vom Regen abhängig sind („pluvial“).

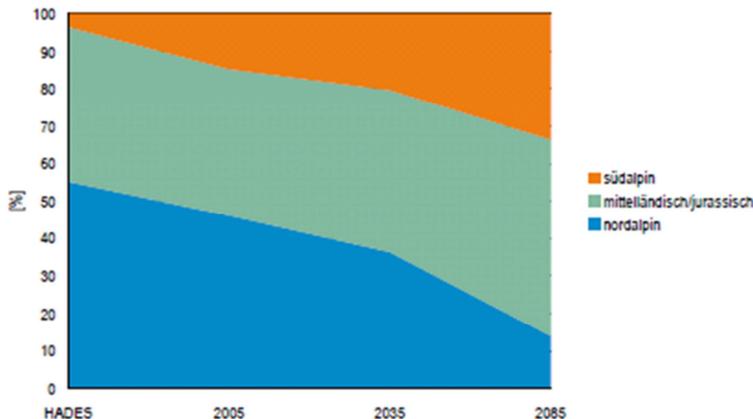


Bild 4.19:
Klimabedingte Veränderungen der Abflussregime in der Schweiz [BAFU (2012c)]

In der Periode von 1950 bis 1980 (mit HADES bezeichnet) sind über 50% der Einzugsgebiete dem nordalpinen und nur 5% südalpinen Regimetyp zugeordnet. Bereits bis heute zeigten sich Veränderungen, die bis zum Ende des 21. Jahrhunderts dazu führen, dass auch in den nördlichen Alpenregionen vermehrt Fließgewässer vorhanden sind, die ein sommerliches Abflussminimum aufweisen.

Wie an den prognostizierten Abflussverhältnissen der Schussen gezeigt werden kann, lassen sich die für die Alpenregionen abgeleiteten Schlussfolgerungen auch auf das Einzugsgebiet des Bodensees am nördlichen Seeufer übertragen (**Bild 4.20**).

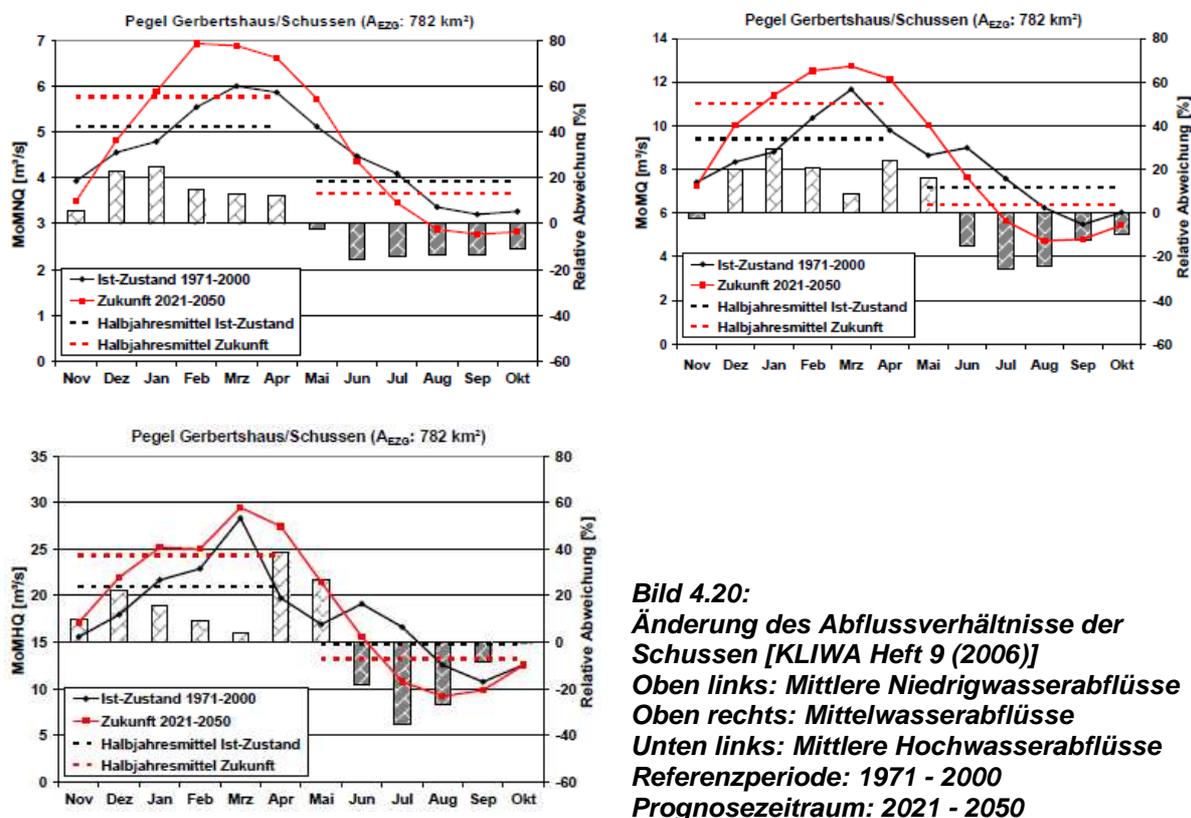


Bild 4.20:
Änderung des Abflussverhältnisse der Schussen [KLIWA Heft 9 (2006)]
Oben links: Mittlere Niedrigwasserabflüsse
Oben rechts: Mittelwasserabflüsse
Unten links: Mittlere Hochwasserabflüsse
Referenzperiode: 1971 - 2000
Prognosezeitraum: 2021 - 2050

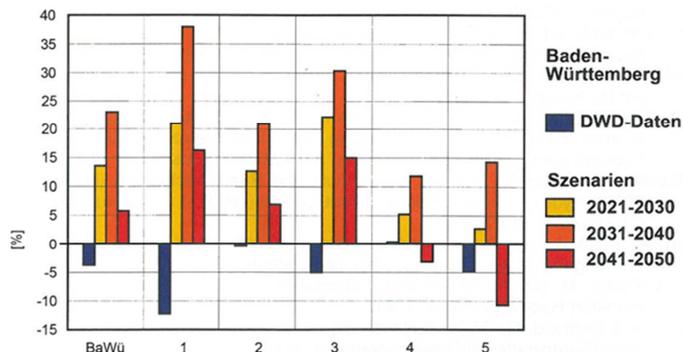
Auch hier ist eine innerjährliche Veränderung der Abflussmengen „Sommer – Winter“, die sich gegenseitig weitgehend kompensieren, deutlich zu erkennen. Aufgrund der Niedrigwasserführung sind vor allem im Sommer Einschränkungen hinsichtlich der Verfügbarkeit von Fließgewässern nicht auszuschließen.

Insgesamt werden somit am Bodensee meteorologische und hydrologische Rahmenbedingungen resultieren, die dazu beitragen, dass im Mittel i.d.R. im Sommer weniger und im Winter mehr Wasser dem Bodensee zufließt, gleichzeitig aber auch zunehmend saisonale und temporäre Schwankungen (Niedrigwasser vs. Hochwasser) auftreten können. Dies ist vor allem auf langanhaltende Trocken- und Hitzeperioden oder extreme Starkregenereignisse, die veränderten Niederschlagsverhältnisse (Menge, Dauer, Art) im Einzugsgebiet sowie auf die anthropogenen Einflüsse (u.a. jahreszeitlich angepasster Betrieb der Wasserspeicherbecken zur Energiegewinnung) zurückzuführen.

Alle bisherigen Betrachtungen bezogen sich auf das Wasserdargebot des Bodensees. Für die Wasserversorgungsunternehmen sind aber auch klimabedingte Einflüsse von Bedeutung, die sich auf die Trinkwasserabgabe auswirken. Im Kontext des Klimawandels spielen hierbei die Prozessabläufe und Bilanzgrößen, die zur Grundwasserneubildung beitragen eine herausragende Rolle.

Wie beispielsweise die Untersuchungen in Süddeutschland zeigen, werden in Zukunft wegen den meteorologischen, hydrologischen, geologischen und nutzungsspezifischen Unterschieden in Baden-Württemberg (z.B. Niederschlagsverteilung, Verdunstung, Sickerwasser, oberflächen- und unterirdische Abflussraten, Kiese, Sande, Festgestein, Wald, landwirtschaftliche Nutzung,) in den verschiedenen Regionen unterschiedliche Grundwasserneubildungsraten resultieren (**Bild 4.21** bis **Bild 4.23**).

In Abhängigkeit von den örtlichen Gegebenheiten werden sowohl zu- als auch abnehmende Entwicklungen vorausgesagt. I.d.R. wird die winterliche Zunahme die Abnahme im Sommer kompensieren. Umgekehrt ist vor allem nach längeren Trocken- und Hitzeperioden und bei sensibel reagierenden Quellschüttungen bzw. wenig ergebnisreichen Grundwasservorkommen in den Festgesteinsbereichen mit einer Verringerung des lokalen Wasserdargebotes zu rechnen. Als Folge der ausbleibenden „Verdünnung“ und gleichzeitigem vermehrten Einsatz von Dünger und Pflanzenschutzmittel in der Landwirtschaft kann so die Konzentration an unerwünschten anthropogen bedingten Stoffen im Grundwasser ansteigen. Andererseits ist im Fall von Starkregen-/Hochwasserereignissen zu beachten, dass wegen den damit einhergehenden Überschwemmungen von Gewinnungsanlagen oder der ungenügenden Schutzwirkung der Deckschichten vielerorts Beeinträchtigungen (z.B. bakteriologische Auffälligkeiten, erhöhte Konzentration an Trübstoffen,...) im oberflächennahen Grundwasser nachzuweisen sind. Welche Aspekte hierbei besonders zu beachten sind, ist Gegenstand eines aktuellen in der Schweiz durchgeführten Forschungsvorhabens [Livingstone (2010)].



(1) Oberrheingraben, (2) Schwarzwald, (3) Gäuplatten des Keuperberglandes und der Muschelkalkregion im Nordosten, (4) Schwäbische Alb, (5) Oberschwaben

Bild 4.21:
Prozentuale Änderungen der regionenspezifischen Grundwasserneubildung gegenüber dem Referenzzustand 1971-2000 [KLIWA Heft 10 (2007)]

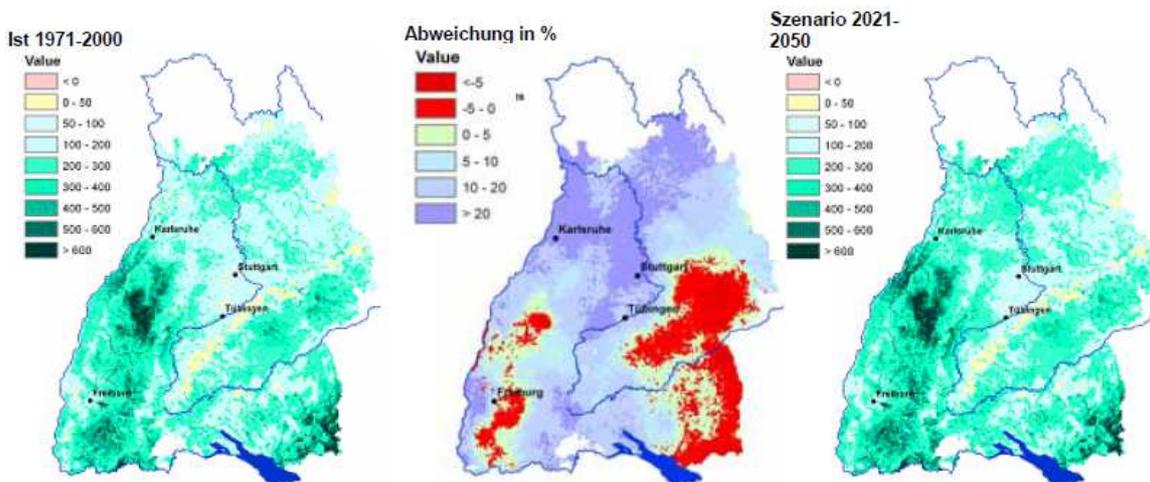


Bild 4.22:
Änderungen der regionenspezifischen Grundwasserneubildung gegenüber dem Istzustand 1971-2000 [KLIWA Heft 10 (2007)]

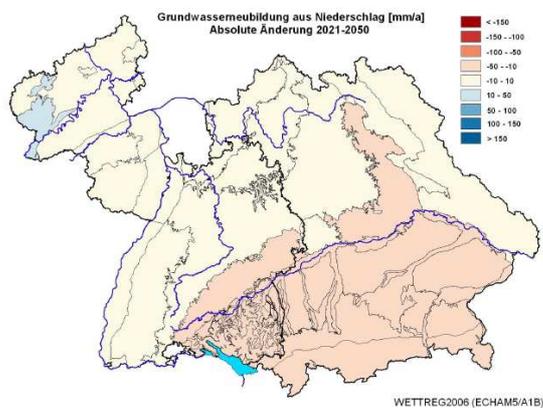


Bild 4.23:
Mittlere Änderung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten in Süddeutschland [KLIWA Heft 17 (2012)]

Referenzzeitraum: 1971-2000
Prognosezeitraum: 2021-2050
WETTREG2006, ECHAM5/A1B

4.3 Gewässerspezifische Auswirkungen, dargestellt am Beispiel des Bodensees und seiner Kompartimente

Neben den „landseitig“ beobachteten Umweltauswirkungen werden durch den Klimawandel auch gewässerspezifische Gegebenheiten des Bodensees maßgeblich beeinflusst. In **Tabelle 4.1** sind die dabei zu beachtenden Aspekte stichwortartig zusammengefasst.

Tabelle 4.1:
Ausgewählte Beispiele der Auswirkungen des Klimawandels auf den Bodensee und seiner Kompartimente

„äußere Störgrößen“ Meteorologie/Hydrologie Einzugsgebiet	Gletscherschmelze, Auftauen hochalpiner Permafrostgebiete, Anstieg Schneefallgrenze, Umverteilung der Niederschlagsmengen vom Sommer in das Winterhalbjahr (räumlich und zeitlich unterschiedlich ausgeprägt) Zunahme von Extremereignissen (Trocken-/Hitzeperioden, Starkniederschläge/Hochwasser mit vermehrten Stoffeinträgen)
Zuflussregime Wasserstand Wasserdargebot	Räumlich und zeitlich stark schwankende Wasserführung der Zuflüsse Vergleichmäßigung tagesbezogener Wasserstände (Jahresganglinie) Gesamtwasserdargebot nahezu gleichbleibend
Freiwasserkörper, Flachwasser und Uferbereich	Stabilere Schichtungsverhältnisse, ggf. Ausbleiben der Vollzirkulation Änderung hydrodynamischer Vorgänge (Einschichtungsverhalten Zuflüsse, Strömungs- und Stofftransportvorgänge im Freiwasser und Flachwasser-/Uferbereich sowie am Seegrund) Mögliche Änderungen der Wasserbeschaffenheit (Erhöhung Wassertemperatur, Eintrag von partikulären und gelösten Stoffen, Änderung der temperaturabhängigen bio-/chemischen Wechselwirkungen) Ökologische Auswirkungen (Einfluss auf aquatische Lebensräume und -gemeinschaften, z.B. Änderungen des Artenspektrums von Mikroorganismen, Kleinorganismen, tierische und pflanzliche Organismen oder Ausbreitung Neozoen und Neophyten)
Seeform, Seeboden/Sediment	Änderung der Morphologie/Struktur des Sees Milieuänderung in Seebodennähe (Sauerstoffkonzentration, Remobilisierungerscheinungen, Aufwirbelungen und Verlagerung partikulärer Stoffe)

Die Wasserbilanz des Bodensees wird neben der Verdunstung, der unmittelbaren Niederschlagsmenge auf den See, dem Zufluss aus dem Karstgebiet der oberen Donau, der Gletscherschmelze und den Überleitungen aus bzw. in Fremdeinzugsgebiete (z.B. Inn-III, Seez-Tamina) vor allem von den Niederschlagsverhältnissen in seinem Einzugsgebiet und dem natürlichen Abfluss in den Seerhein (Konstanzer Schwelle) bzw. in den Hochrhein in der Nähe von Stein am Rhein (Eschenzer Horn) bestimmt [IGKB (2004)]. Mittel- bis langfristig wird sich daher bei einem nahezu gleichbleibendem jährlichen Gesamtabfluss der Bodenseezuflüsse die bisher charakteristische Schwankung des mittleren Bodenseewasserstandes dahingehend verschieben, dass sich ein weitgehend jahreszeitlich unabhängiger Jahresverlauf ergibt (**Bild 4.24**).

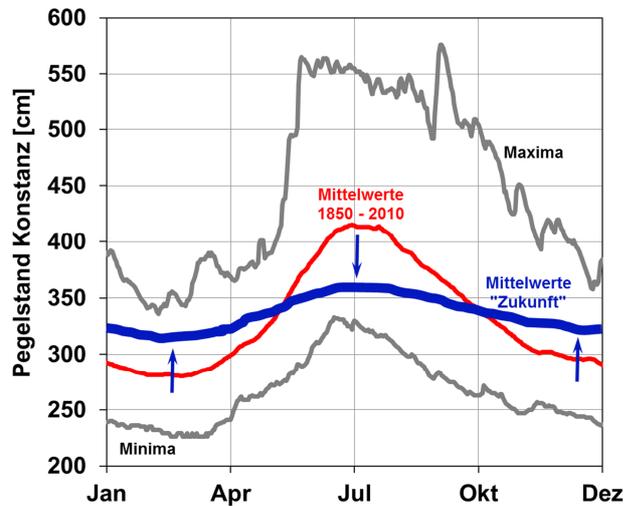


Bild 4.24:
Prognostizierte Veränderung des mittleren Wasserstandes im Bodensee
 [www.bodensee-hochwasser.info]

Maxima, Mittelwerte, Minima:
 berechnet aus Tagesmittelwerten 1850 – 2010

Mittelwerte „Zukunft“: qualifizierte Schätzung

Während heute der Wasserstand im Mittel um maximal ca. 1,5 m im Jahresverlauf schwankt [Schlichtherle (2006)], ist davon auszugehen, dass zukünftig im Sommer mit niedrigeren, im Winter dagegen mit höheren mittleren Pegelständen zu rechnen ist [Wahl (2007a), Wahl (2007b)]. Als Indizien hierfür können

- die veränderten Niederschlagsverhältnisse im Einzugsgebiet und die damit verbundene jahreszeitliche Verschiebung der Abflussverhältnisse der Bodenseezuflüsse vom Sommer- in das Winterhalbjahr,
- die höheren Verdunstungsraten bei steigenden Temperaturen sowie
- der saisonal angepasste Betrieb der Speicherbecken

herangezogen werden. Nicht vorhersehbare Extremereignisse können jedoch jederzeit dazu führen, dass sowohl die bisher beobachteten Maximal- als auch die Minimalwerte für mehrere Tage/Wochen über- bzw. unterschritten werden (**Bild 4.25**) [Ostendorp (2003a), Ostendorp (2003b), Ostendorp (2007)]. In solchen Fällen kann der Wasserstand innerhalb weniger Stunden stark ansteigen, wie u.a. das Beispiel „Starkregenereignis August 2005“ (Kap 3.3.2) deutlich gezeigt hat [AWBR (2006)].



Bild 4.25:
Medienberichte zum Bodenseewasserstand [BWV (2013)]

Ferner werden sich die Zuflüsse bei solchen Hochwasserereignissen nicht mehr in der Thermokline einschichten, sondern das Wasser wird vielmehr direkt im Mündungsbereich aufgrund der hohen Frachten an partikulären Inhaltsstoffen⁴ bis auf die Seesohle absinken [Wasserwirtschaft (2008), BodenseeOnline (2008), Eder (2008a)]. Dort breitet es sich über längere Strecken aus und vermischt sich heterogen mit dem Tiefenwasser. Im Fall extremer Hochwasserereignisse ($H_{\text{extrem}} > 560$ cm, Pegel Konstanz) ist außerdem mit großflächigen Überschwemmungen im Uferbereich des Sees, Sedimentation- bzw. Erosionserscheinungen von partikulären Inhaltsstoffen im Bereich der Hang-/Haldenkante und des Seebodens (Rutschungen, Aufwirbelungen,...) ebenso wie mit großflächigen Behinderungen durch Treib-/Totholz zu rechnen. Nicht zuletzt ist zu erwarten, dass bei ansteigender Anzahl und Intensität an Extremereignissen auch verstärkt unerwünschte Stoffe/Substanzen und Mikroorganismen aus punktuellen und diffusen Quellen in den Bodensee eingetragen werden. Während bei Trockenwetterlagen die atmosphärischen Verfrachtungen überwiegen, sind im Falle von Starkregenereignissen vor allem die Abschwemmungen aus der Landwirtschaft sowie das überlaufende Wasser aus den Abwasserreinigungsanlagen und Regenrückhaltebecken als Emissionsquellen anzusehen. Ob und inwieweit durch derartige Belastungsstöße das derzeit niedrige mikrobiologische Belastungsniveau des Bodensees verändert wird, ist nur schwer vorauszusagen.

In Bezug auf die Änderung weiterer Güteparameter ist anzunehmen, dass die bereits in Kap. 3.3.5 aufgezeigten Veränderungen und Entwicklungen sich unter den zu erwartenden Rahmenbedingungen fortsetzen werden (**Bild 4.26**).

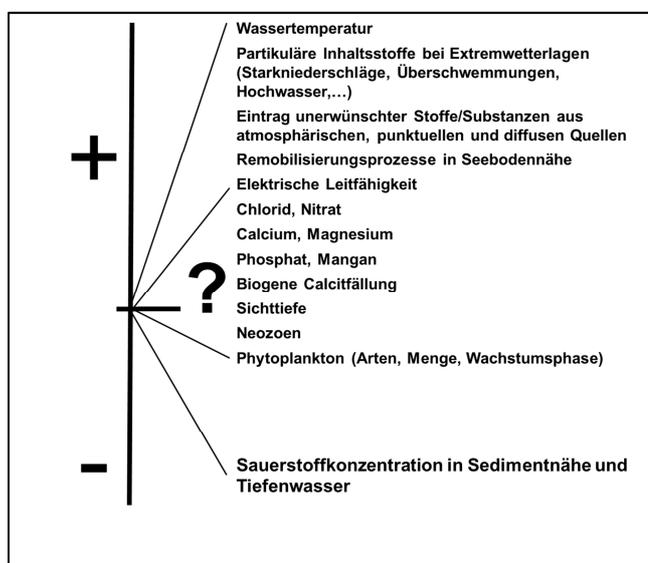


Bild 4.26:
Klimabedingte, denkbare Veränderungen der Wasserbeschaffenheit (schematisch)

⁴ Anmerkung: Bei extremen Niederschlagsereignissen können aufgrund von Abschwemmungen aus Landflächen bzw. der Mobilisierung von im Flussbett abgelagerten Sedimenten innerhalb weniger Tage mehr als 1 Mio. Tonnen Feststoffe unterschiedlicher Größe und Dichte in den Bodensee eingetragen werden

Hält beispielsweise der in den letzten 30 Jahren ermittelte Temperaturtrend an, ist mittelfristig mit thermischen Schichtungsverhältnissen im Bodensee zu rechnen, die im Vergleich zu heute eine noch stabilere Ausprägung aufweisen und noch länger andauern können [Böhringer (2008), IGKB (2007), Roßknecht (2003), Wahl (2007a), Wahl (2007b), Roßknecht (2007), KLIWA Heft 13 (2009), Kipfer (2010), Holzner u.a. (2009), IGKB (2013), Kipfer (2008), Livingstone (2004), Ostendorp (2007)]. Da eine Erneuerung des Tiefenwassers neben gewässerspezifischen und windinduzierten Ereignissen (**Bild 4.27**) maßgeblich durch die Temperaturverhältnisse im Winter bestimmt wird, sind zukünftig Zeitabschnitte von mehreren Jahren zu besorgen, die durch eine unzureichende vertikale Durchmischung gekennzeichnet sind.

Die am Bodensee vorherrschenden Luftbewegungen sind eine der treibenden Kräfte für die Ausbildung von Strömungen in Seen. Sie sind gekennzeichnet durch die Windgeschwindigkeit/-stärke und Windrichtung.

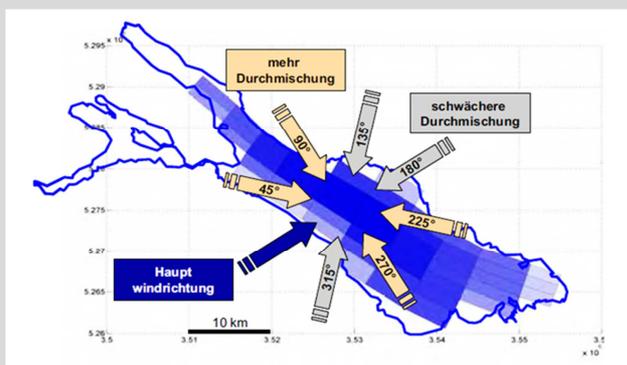
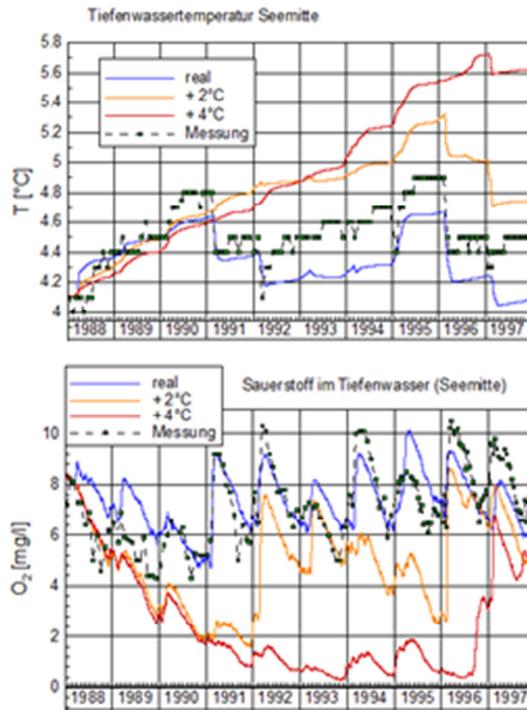


Bild: 4.27:
Schematische Darstellung der Hauptwindrichtung und deren Einfluss auf die vertikale Durchmischung des Seewassers [KLIWA Heft 13 (2009)]

Untersuchungen und Simulationen von Wahl [KLIWA Heft 13 (2009)] zeigen u.a., dass eine Drehung der Hauptwindrichtung zur Längsachse des Sees hin im Mittel zu einer eher erhöhten vertikalen Durchmischung führt. Hingegen scheint sich bei Wind aus Nord bis Nord-Ost bzw. aus Süd bis Süd-West der windinduzierte Eintrag von oberflächennahem Wasser in tiefere Schichten abzuschwächen. Darüber hinaus wirkt sich auch eine Veränderung der Windstärke auf die Strömungen und den Wärmefluss aus. Beispielsweise begünstigen höhere Windgeschwindigkeiten u.a. wegen der stärkeren Auskühlung und dem erhöhten Impulseintrag die winterliche vertikale Zirkulation. Im Sommer und Herbst sind mögliche Auswirkungen auf das Epi- und Metalimnion beschränkt.

Unter ungünstigen Rahmenbedingungen können dadurch mehrjährig Sauerstoffkonzentrationen von ≤ 3 mg/L in Seebodennähe resultieren, die hinsichtlich der Bodenlebewesen, des Felchenlaichs sowie der Remobilisierungsprozesse von Nähr- und Schadstoffen aus dem Sediment als kritisch zu bezeichnen sind [IGKB (2013b)]. In ersten Berechnungen im Rahmen des F&E-Vorhabens „KlimBo“ ließen sich die o.g. Sachverhalte plausibel nachvollziehen [Lang (2012)]. Neben der Tiefenwassertemperatur wurden dabei sowohl die typischen saisonalen Verläufe der Sauerstoffkonzentration („Sägezahnkurven“) als auch die Variabilität in der Tiefenwassererneuerung

und die damit verbundenen unterschiedlich stark ausgeprägten Anstiege der Sauerstoffkonzentration weitgehend realitätsnah abgebildet (**Bild 4.28**).



**Vergleich Messwerte und Simulation
Temperaturanstieg, Sauerstoffzehrung am Seegrund**

**Bild
Sauerstoffkonzentration in Sedimentnähe
Vergleich Messwerte mit Simulationsergebnissen
[Lang (2011)]**

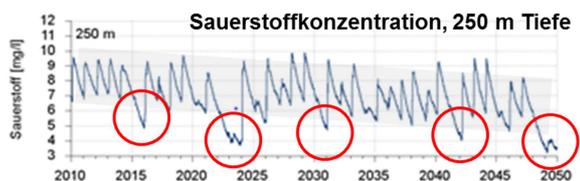
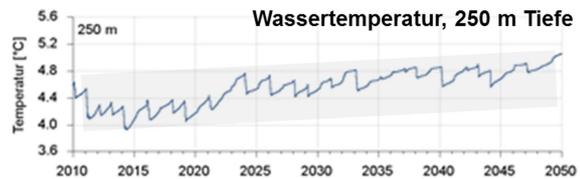


Bild 4.28:
Erwartete zukünftige Entwicklungen – Erste Simulationsrechnungen im Rahmen des Forschungsvorhabens „KlimBo“ [Lang (2012)]
Beispiele: Anzahl an Tagen mit Oberflächentemperaturen > 22 °C, Wassertemperatur in 250 m Tiefe, Sauerstoffkonzentration in 250 m Tiefe

Daher ist im Falle, dass zukünftig in Seebodennähe vermehrt sauerstoffarme oder gar anaerobe Verhältnisse resultieren, mit unerwünschten Remobilisierungs- und Rücklösungserscheinungen zu rechnen.

Eine Temperaturerhöhung wirkt sich aber auch dahingehend aus, dass innerhalb biochemischer Systeme die Reaktionsgeschwindigkeit erhöht wird. Im Freiwasser können beispielsweise im Falle eines massenhaften Auftretens von Algen („Algenblüte“) derart hohe photosynthetische Aktivitäten resultieren, dass tagsüber die CO_2 -Konzentration deutlich verringert und aufgrund des damit verbundenen pH-Wert-Anstiegs der Zustand der Calcitsättigung verschoben wird. Demzufolge kann es in oberflächennahen Wasserschichten zu biogenen Calcit ausfällungen kommen, die zu einem autochthonen Partikeltransport in das Tiefenwasser beitragen [Kempke (2008)]. Sollten derartige Ereignisse verstärkt im Bereich des Seerheins stattfinden, sind langfristig sogar Sedimenterhöhungen denkbar, die u.U. den Wasserpegelstand des Bodensees zusätzlich beeinflussen könnten.

Darüber hinaus sind bei zunehmend wärmerem Wasser auch Änderungen innerhalb der aquatische Lebensräume und -gemeinschaften denkbar (**Bild 4.29**) [BUWAL (2004), Wahl (2007a), Wahl (2007b), Roßknecht (2007), [KLIWA Heft 10 (2006), KLIWA Heft 11 (2007), AWEL-IBK (2007), ISF (2009), Kempke (2008), IKSR (2013), Dienst (2008)].

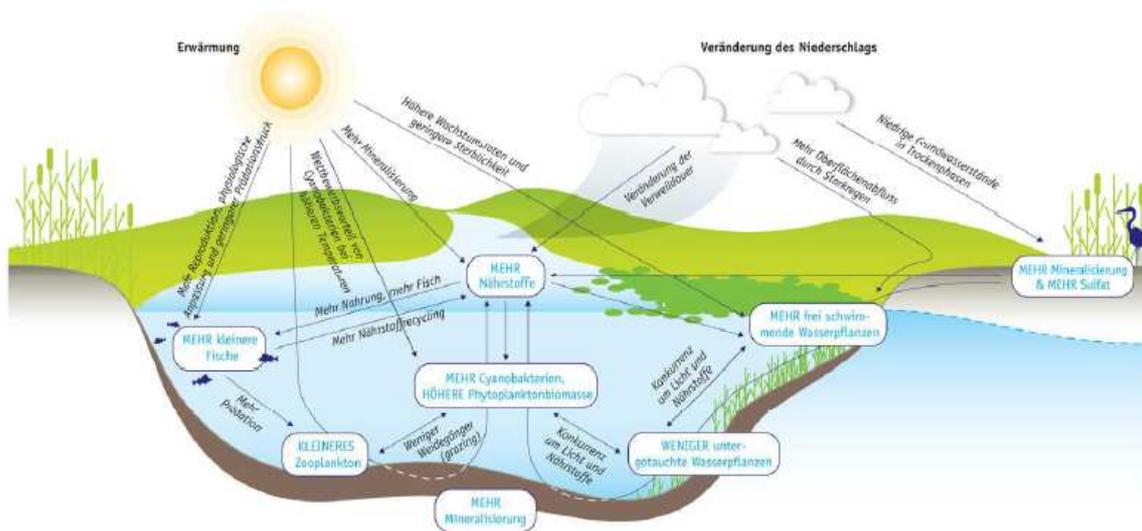


Bild 4.29:
Auswirkungen des Klimawandels auf aquatische Ökosysteme [IKSR (2013)]

Eine höhere Wassertemperatur kann u.a. dazu führen, dass eine starke Zunahme sowohl des Phytoplanktons als auch der Makrophyten resultieren. Vor allem wärme-liebende Arten vermehren sich stark. Neben der Verkrautung der Gewässer ist u.a. auch die Gefahr einer starken Zunahme von Blaualgen (Cyanobakterien) nicht auszuschließen. Folglich können zusätzlich unerwünschte Geruchs- und Geschmacksstoffe gebildet und/oder Algen-, bakterielle Exo- und Endotoxine freigesetzt werden. Ebenso ist es möglich, dass sich die Erwärmung des Seewassers auf die Wachstumsphasen der einzelnen Organismen (Phytoplankton, Zooplankton, Folgekonsumenten) auswirkt. Je nach Reaktion der verschiedenen Arten ist im günstigsten Fall eine Verschiebung der bisherigen Interaktionen in Richtung Frühjahr oder als worst-case-Szenario eine Entkopplung und gravierende Störung der heute funktionierenden Fraßketten denkbar [Ostendorp (2007)]. Darüber hinaus kann im Bodensee die Zusammensetzung der Lebensgemeinschaften, die Biodiversität und Artenvielfalt zukünftig dahingehend beeinflusst werden, dass sich Mikroorganismen (z.B. Bakterien,...), wasserbürtige Krankheitserreger, Kleinorganismen (z.B. Nematoden,...), tierische Organismen (Fische,...) oder bislang nicht „heimischer“ Tiere und Pflanzen (Neozoen und -phyten) vermehrt ausbreiten und/oder ansiedeln, die eine höhere Resilienz gegenüber den erwarteten Bedingungen aufweisen [Preuß (2011), ANEBO (2005), ANEBO (2010), Gewässerschutzfachstellen (2008), LUBW (200x), Ostendorp (2006), Ostendorp (2008), Wendler (2013)]. Obwohl in vielen Fällen der Klimawandel derartige Effekte meist nur begünstigt, kann am Beispiel der Quagga-Muschel die daraus resultierenden möglichen Folgen für die Wasserversorgungsunternehmen anschaulich dargestellt werden (**Bild 4.30, Bild 4.31**) [Werner (2012), Schöll (2012)].

Zu guter Letzt gewinnen im Kontext des Klimawandels aber auch terrestrische Ausbreitungsphänomene für die Trinkwasserversorgung zunehmend an Bedeutung. Da die meisten Pflanzenschädlinge, insbesondere Schadinsekten als wechselwarme Tiere stark von der Umgebungstemperatur abhängig sind, ist zu vermuten, dass das bereits heute zu beobachtende Aufkommen in Zukunft weiter zunehmen wird [Kromp-Kolb (2008), Klimamoro (2011), Haakh (2008)]. Um sowohl ökologische als auch ökonomische Schäden durch Schädlingsbefall zu verringern bzw. zu vermeiden, ist zu erwarten, dass es im Bereich der Landwirtschaft entsprechende Pflanzenschutzempfehlungen erarbeitet werden, die u.a. auch den Einsatz von biozid wirksamen Stoffen und Substanzen vorsehen. Dies hat zur Folge, dass ggf. in Zukunft mit steigenden Eintragungsmengen von unerwünschten Spurenstoffen in die aquatischen Systeme zu rechnen ist. Außerdem wird durch die Erhöhung der Durchschnittstemperaturen die Einschleppung von Krankheitserregern begünstigt, die bislang in den gemäßigten Zonen nicht vorkommen [UMID (2009), Löbermann (2012), Schneider (2010), Stark (2009), BMU (2003), Ostendorp (2007)]. Dadurch können nicht nur auf regionaler Ebene Erkrankungen (z.B. Infektionen, Allergien und Asthma) zunehmen, die das Wohlbefinden und die Gesundheit des Menschen z.T. signifikant beeinträchtigen. Unter ungünstigen Bedingungen kann es in verstärktem Maße zu krankheitsbedingten Ausfällen von Mitarbeitern der Wasserversorgungsunternehmen oder sogar zu Epidemien bzw. Pandemien kommen.

Die Quagga-Muschel (*Dreissena rostriformis bugensis*) wurde wegen ihrem Farbmuster nach einer ausgestorbenen, nur teilweise gestreiften Zebra-Art, dem Quagga, benannt (**Bild 4.30**). Sie stammt ursprünglich aus dem nordwestlichen Bereich des Schwarzen und Kaspischen Meers und deren Zuflüsse. Mitte der 80er Jahre des vorigen Jahrhunderts wurde sie erstmals in den USA und 2006 in Mitteleuropa (Niederlande) entdeckt. Sie verbreitet sich -i.d.R. durch Wanderboote- nicht nur sehr schnell (Bild 4.31), sondern erreicht lokal rasch hohe Abundanzen. Dass eine Verschleppung in den Bodensee nur noch eine Frage der Zeit sein wird, legt der Fund von Quaggamuscheln am Rumpf von Segelbooten aus Bootshäfen am Oberrhein nahe.



Bild 4.30:
Quagga-Muschel
[Werner (2012), Gewässerschutzstelle (2008)]



Bild 4.31:
Nachweis von *Dreissena rostriformis bugensis*
in Deutschland [Schöll 2012]

Da hinsichtlich der chemischen Wasserbeschaffenheit kaum Unterschiede zwischen der Quagga-Muschel und der bereits vorhandenen Zebra-Muschel (*Dreissena polymorpha*) bestehen, die Quagga-Muschel sich jedoch zusätzlich mit ihrer Eierabgabe gut an Kaltwasserbedingungen (5-6°C) und große Wassertiefen (ca. 150 m) anpassen kann, ist im Bodensee eine strömungsbedingte Ausbreitung der Larven (ca. 40 µm < D < 300 µm) und einer massen- und dauerhafte Besiedelung im Tiefenwasser denkbar. Durch die Fähigkeit, sich auch an Entnahmeverrichtungen und in Rohren mehrlagig anhaften zu können, sind gravierende Auswirkungen auf die Wassergewinnung zu besorgen. Es gilt daher, frühzeitig entsprechende Konzepte und Präventionsmaßnahmen zu erarbeiten, um mögliche Beeinträchtigungen soweit wie möglich zu minimieren.

4.4 Abschließende Bemerkungen

Die bisher vorliegenden Hinweise über die erwarteten Entwicklungen deuten darauf hin, dass die bereits heute in der Bodenseeregion beobachteten Umweltauswirkungen des Klimawandels grundsätzlich auf zukünftige Verhältnisse übertragen werden können. Im Rahmen eines Esemble-Ansatzes wurden beispielsweise für Baden-Württemberg die Ergebnisse verschiedener regionaler Klimaprojektionen ausgewertet [LUBW (2013)]. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse sind in **Tabelle 4.2** in Form von Klimasignalen/Kennzahlen zusammengefasst.

Tabelle 4.2:
Zukünftige Klimaentwicklungen in Baden-Württemberg – Ergebnisse der Auswertung regionaler Klimaprojektionen (Esemble-Ansatz) [LUBW (2013)]

Klimaparameter	Referenz-Zustand (1971-2000)	Nahe Zukunft (2021-2050) Änderung gegenüber Referenzzustand	Ferne Zukunft (2071-2100) Änderung gegenüber Referenzzustand	Klimasignal			
				Streuung	Stärke	Richtungssicherheit	
Umgebungstemperatur	[°C]	8,4	0,7 ... 2,1	1,9 ... 4,2	Gering	Hoch	Hoch
Anzahl Sommertage (T _{max} > 25°C)	[d]	30,2	1,6 ... 22,2	11,3 ... 54,1	Mäßig	Hoch	Hoch
Anzahl Tropentage (T _{max} > 30°C)	[d]	4,0	0,4 ... 13,8	1,5 ... 35,6	Hoch	Hoch	hoch
Anzahl Tropennächte (T _{min} > 20°C)	[d]	0,1	0,0 ... 9,0	0,7 ... 22,4	Hoch	Hoch	Hoch
Anzahl Frosttage (T _{min} < 0°)	[d]	97,0	-31,3 ... -14,3	-55,2 ... -32,7	Gering	Hoch	Hoch
Anzahl Eistage (T _{max} < 0°C)	[d]	23,4	-17,5 ... -4,1	-27,4 ... -6,1	Mäßig	Hoch	Hoch
Letzter Frost (Tage seit Jahresbeginn)	[d]	114	-12,7 ... -1,7	-28,6 ... -8,1	Mäßig	Hoch	Hoch
Anzahl Heiztage (T _{max} < 15°C)	[°C]	287	-28,5 ... -2,6	-61,5 ... -32,2	Gering	Hoch	Hoch
Vegetationsbeginn (Tage seit Jahresbeginn)	[d]	90,9	-8,7 ... -2,5	-20,7 ... -8,3	Mäßig	Hoch	Hoch
Niederschlagssumme (Jahresmittel)	[mm]	949	-4,6% ... 9,8%	-10,4% ... 12,6%	Hoch	Gering	Gering
Niederschlagssumme (Hydrol. Winter, Nov. - April)	[mm]	443	-1,8% ... 24,1%	-4,2% ... 26,1%	Hoch	Hoch	Mäßig
Niederschlagssumme (Hydrol. Sommer, Mai - Okt.)	[mm]	512	-7,0% ... 5,8%	-21,3% ... 4,3%	Hoch	Mäßig	Mäßig
Niederschlagssumme Frühjahr (März - Mai)	[mm]	225	-8,5% ... 15,3%	-7,0% ... 27,4%	Hoch	Hoch	Mäßig
Niederschlagssumme Vegetationsperiode (Mai - Sept.)	[mm]	435	-14,0% ... 6,3%	-23,1% ... 4,1%	Hoch	Mäßig	Mäßig
Anzahl Tage ohne Niederschlag (Trockentage)	[d]	227	-8,3 ... 11,0	-11,3 ... 30,4	Hoch	Gering	Mäßig
Anzahl Trockentage in der Vegetationsperiode (Mai - Sept.)	[d]	3,6	-0,1 ... 0,6	0,0 ... 1,6	Mäßig	Mäßig	Mäßig
Dauer der längsten Trockenperiode	[d]	20,7	-2,3 ... 2,4	-1,0 ... 6,9	Hoch	Gering	Mäßig
Anzahl Tage mit Starkniederschlägen (N > 25 mm/d)	[d]	3,6	-0,3 ... 1,2	-0,7 ... 2,2	Mäßig	Hoch	Mäßig
Max. Niederschlagssumme an einem Tag (Starkniederschlagshöhe)	[mm]	40,7	-2,6% ... 15,4%	-7,2% ... 37,9%	Hoch	Mäßig	Mäßig
Summe Globalstrahlung (spezifische Solarleistung)	[kWh/m²]	1038	-39,8 ... 45,9	-66,8 ... 119,9	Hoch	Gering	Gering
Globalstrahlung (Minimale Tageswerte)	[W/m²]	20,1	-1,3 ... 0,4	-1,7 ... 1,9	-	-	-
Globalstrahlung (Maximale Tageswerte)	[W/m²]	315	-3,5 ... 7,1	-6,8 ... 6,7	Hoch	Gering	Gering
Windgeschwindigkeit (Mittelwert aller Tageswerte)	[m/s]	2,0	-0,1 ... 0,1	-0,2 ... 0,1	Gering	Gering	Hoch
Windgeschwindigkeit (Maximaler Tageswert)	[m/s]	8,7	-0,4 ... 0,9	-0,3 ... 0,8	Mäßig	Gering	Hoch
Anzahl Windtage (W > 8 m/s)	[m/s]	1,7	-0,9 ... 2,1	-3,1 ... 1,7	Hoch	Gering	Gering

Speziell für die Trinkwasserversorgung sind hierbei vor allem die möglichen Veränderungen im Hinblick auf

- die innerjährliche Verschiebung der Niederschläge im Einzugsgebiet (Menge, Dauer, Art),
 - die Häufung und Intensität von Extremereignissen (langanhaltende Trockenperioden, Starkniederschläge)
 - die Abflussverhältnisse der Bodenseezuflüsse,
 - die Grundwasserneubildungsraten im Trinkwasserversorgungsgebiet,
 - der Bodenseewasserstände,
 - das Schichtungs- und Zirkulationsverhalten,
 - die Wasserbeschaffenheit sowie
 - die Ausbreitung und Ansiedlung von Neozoen und Schadorganismen
- von besonderer Bedeutung.

Wie im nachfolgenden Kapitel gezeigt wird, können unter den gegebenen standort-spezifischen Rahmenbedingungen weitere Sekundäreffekte und Folgen resultieren, die im Hinblick auf die Trinkwasserbeschaffenheit und Versorgungssicherheit zu berücksichtigen sind.

5.0 Der Klimawandel und die Folgen für die Trinkwasserversorgung

Nutzungsspezifische Aspekte

5.1 Allgemeines

Im Vergleich zu den globalen Entwicklungen sind nach dem aktuellen Kenntnisstand in Deutschland eher moderate Umweltauswirkungen im Zusammenhang mit

- den meteorologischen und hydrologischen Verhältnisse (z.B. Temperatur, Wind, Niederschlag, Abflussregime von Fließgewässern, Grundwasserneubildung,...) sowie
- gewässerspezifischen Vorgängen und Prozessabläufen (z.B. Wasserstand, Hydrodynamik, Wasserbeschaffenheit, Ökologie,...)

zu erwarten. Neben diesen unmittelbaren Einflüssen auf das Einzugs- und Trinkwasserversorgungsgebiet bzw. auf den Bodensee und seine Kompartimente resultieren zusätzlich noch direkt bzw. indirekt nachweisbare Sekundärfolgen, die speziell vor dem Hintergrund der Trinkwasserversorgung aus dem Bodensee zu berücksichtigen sind (**Bild 5.1**). Hierbei handelt es sich vorwiegend um nutzungsspezifische, technische und sozio-ökonomische Aspekte, die eng mit der Verfügbarkeit und Beschaffenheit des Bodensee- und Trinkwassers bzw. der Versorgungssicherheit (Gewinnung, Aufbereitung, Verteilung/Speicherung) und -infrastruktur verbunden sind [Akademie-Engelsberg (2008), AWEL/IBK (2007), BAFU (2007a), BAFU (2007b), BDEW (2008b), BDEW (2010), BDEW (2011), BDEW (2012), BMU (2003), BMU (2012d), Bunse (2009), BWV (2013), Castell-Exner (2010), Cornelius (2007), DVGW (2007), DVGW (2009a), DVGW (2011), Eisenmenger (2006), epd (2012), EUWID (2011), Gander (2009), Günther (2012), Haakh (2009a), Haakh (2009b), Haakh (2009c), Hofmann (2012), IBA (2011), IGKB (2004), IRR (2011a), IRR (2011b), IRR (2012a), IRR (2012b), Kempfert (2007), Kinzelbach (2007), Kröhner (2010), Kunz (2005), Landtag Baden-Württemberg (2009), Liebscher (1991), Livingstone (2010), Löbermann (2012), LUBW (2011), Mai (2008), Merkel (2008), MunichRe (2009), NFP 61 (2010), Petry (2009), Preuß (2011a), Preuß (2011b), Prognos (2010), Raith (2004), Regionalverband (2009a), Ruegg (2008), Schonmuth (2010), Sorge (2013a), Städler (2006), Stark (2009), Statistisches Bundesamt (2006), Statistisches Bundesamt (2009), Südkurier (2003b), Tichler (2007), UBA (2008a), UBA (2011b), UBA (2012d), UBA (2012g), UFZ (2011), UMBW (2004), UMID (2009), Wasserbilanz-Bodensee (2011a), Wasserbilanz-Bodensee (2011b), Wasserwirtschaft (2010), Wricke (2007), www.DIN.de (2013), www.dstgb.de (2013), www.dvgw.de (2013), www.oevgw.at (2013), www.statistik.baden-wuerttemberg.de(2013), www.svgw.ch (2013)].

Bereits 1894/1895 wurde von den Städten Romanshorn und St. Gallen die ersten Seewasserwerke in Betrieb genommen. Heute werden von den insgesamt 16 öffentlichen Wasserversorgungsunternehmen und für eine industrielle Nutzung dem See jährlich etwa 170-180 Mio. m³ Wasser in Tiefen zwischen 40 und 60 m entnommen, davon etwa 135 Mio. m³ durch den Zweckverband Bodensee-Wasserversorgung. Insgesamt werden über 4 bis 5 Mio. Menschen in den Kantonen Thurgau und St. Gallen sowie in Baden-Württemberg und Bayern mit Trinkwasser aus dem Bodensee versorgt [BWV (2013), AWBR (2013)]. Die Seewasserwerke sind alle Mitglieder der Arbeitsgemeinschaft Wasserwerke Bodensee-Rhein (AWBR). Seit ihrer Gründung am 07. Juni 1968 setzt sie sich unter Berücksichtigung ökologischer, zivilisatorischer und wirtschaftlicher Aspekte dafür ein, dass die lebensnotwendigen Wasservorkommen hinreichend und nachhaltig geschützt werden und dass auch in Zukunft jederzeit einwandfreies Trinkwasser mit natürlichen Aufbereitungsverfahren gewonnen und in ausreichender Menge an die Bevölkerung abgegeben werden kann. Als „Bindeglied“ zwischen den Versorgungsunternehmen, der Politik und der Öffentlichkeit nutzt sie dabei die Vorteile und Stärken einer international tätigen Organisation aus. Die AWBR ist eine ehrenamtlich tätige Gemeinschaft, die durch Mitgliederbeiträge finanziert wird und ausschließlich gemeinnützigen Zwecken dient.

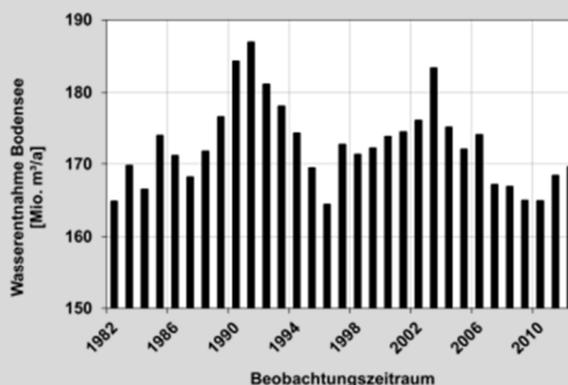
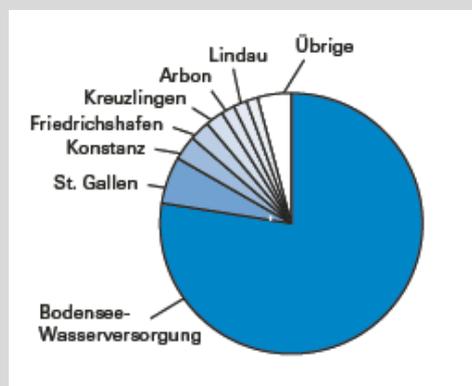


Bild 5.1:
Trinkwasserversorgung aus dem Bodensee

Die nachfolgenden Ausführungen (Kap. 5.2 bis 5.5) zielen daher darauf ab, im Sinne einer Übersichtsrecherche diejenigen Komponenten im System „Klimawandel - Trinkwasserversorgung“ aufzuzeigen, die aufgrund der standortspezifischen Rahmenbedingungen und vorhandenen Gestaltungsmöglichkeiten hiervon in unterschiedlicher Art und Weise betroffen sein können.

5.2 Ansatz des „vernetzten Denkens“

Um im Einzelfall komplexe Systeme und deren vielschichtige Zusammenhänge selbst bei hohen „Unsicherheiten“ mit wenigen aber relevanten Ordnungsparametern auf das „Wesentliche“ zurückführen und somit auch im Gesamten erfassen zu können, hat es sich u.a. als geeignet erwiesen, einen Ansatz auszuwählen, wie er beispielweise bei *Vester (2012)* beschrieben ist. Die Betrachtungsweise des „vernetzten Denkens“ verlangt jedoch, dass sich durch die Datenreduktion das Systemverhalten auch wirklichkeitsnah interpretieren lässt. Folglich sind bereits im ersten Schritt dahingehend Grundregeln zu beachten, dass

- neben der Berücksichtigung von Literaturangaben eine Befragung und Diskussion (Brainstorming) mit Fachexperten angestrebt,
- das zu betrachtende System „Klimawandel - Trinkwasserversorgung“ unter Berücksichtigung von „äußeren Störgrößen“ wie Wandelprozesse im Sinne der übergeordneten Zielsetzung beschrieben bzw. visualisiert sowie
- die jeweiligen Schlüsselvariablen stets auf ihre objektive und subjektive Systemrelevanz überprüft und die zu erwartenden Wechselwirkungen kritisch hinterfragt werden (**Bild 5.2**).

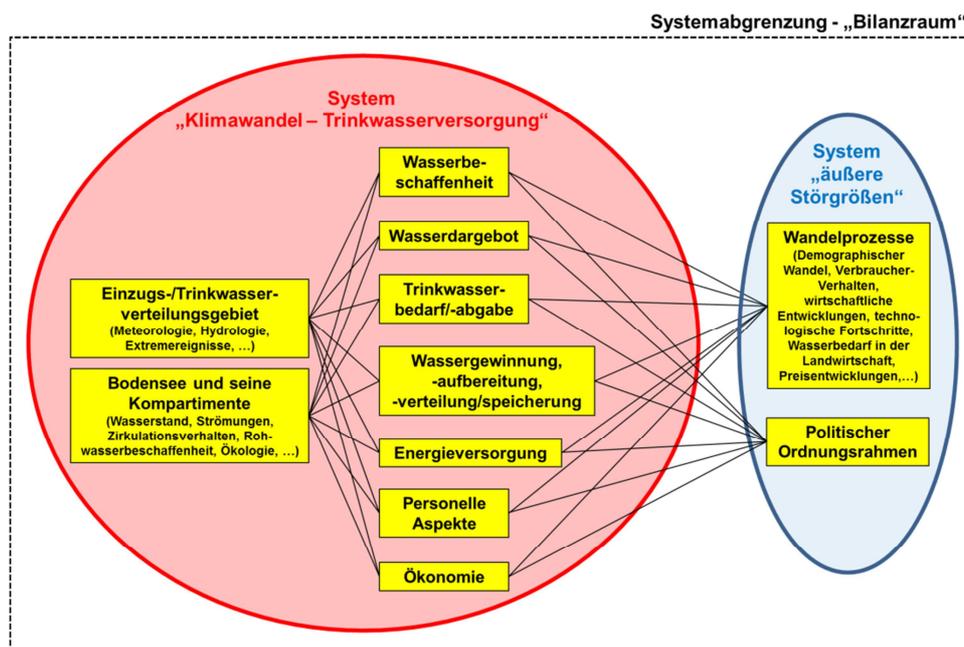


Bild 5.2:

Visualisierung von Zusammenhängen im Gesamtsystem „Klimawandel – Trinkwasserversorgung – „äußere“ Störgrößen“

Erkennung und Identifizierung von „Betroffenheiten“ durch Vernetzung systemrelevanter Schlüsselkomponenten [Vester (2012)]

Bereits die Erstellung eines orientierenden „Systembildes“ mit wenigen, aber systemrelevanten „Schlüsselkomponenten“ trägt somit dazu bei, in Form von „Ursache-

Wirkung-Beziehungen“ zu denken, die jeweiligen Abhängigkeiten und Interaktionen zu identifizieren und einer differenzierten Analyse -wie sie im nachfolgenden näher beschrieben wird- zu unterziehen.

5.3 Beschaffenheit des Bodenseewassers und landseitig genutzter Ressourcen

Wie eingehend in Kap. 3 und 4 erörtert, ist unter Berücksichtigung der räumlichen Bodensee-Kompartimente, den jahreszeitlich schwankenden Umweltbedingungen sowie den komplexen seeinternen Strömungsvorgängen eine klimabedingte Änderung der Beschaffenheit des Bodenseewassers zu erwarten, die beispielsweise auf

- eine Erhöhung der Wassertemperatur,
- eine Verschiebung der Zirkulations- und Schichtungszuständen hin zu stabileren Verhältnissen,
- eine beschränkte Tiefenwassererneuerung und damit einhergehende Auswirkungen auf die Vorgänge in Sedimentnähe (z.B. Sauerstoffarmut, Remobilisierung),
- ein vermehrter Eintrag von unerwünschten Inhaltsstoffen (gelöst und partikulär) bei Extremereignissen,
- bislang nicht beobachtete ökologische Prozessabläufe (ggf. verstärktes Algenwachstum, Bildung von Geruch- und Geschmackstoffen...) oder
- die Verbreitung von „nicht heimischen“ Organismenarten

zurückzuführen sind. Da nicht nur das Hypo- und Metalimnion sondern vielmehr auch das Tiefenwasser im Epilimnion hiervon betroffen ist, sind temporäre begrenzte bzw. langfristige Veränderungen auch im Entnahmebereich der Seewasserwerke (i.d.R. 40 m bis 60 m Tiefe) nicht auszuschließen. Insbesondere ist bei Starkregenereignissen, Hangrutschungen, Hochwasser, landseitigen Abschwemmungen oder Überlastungen von Kläranlagen/Regenüberlaufbecken im Einzugsgebiet verstärkt mit

- einem erhöhten Transport an partikulären Stoffen und einer erhöhten Konzentration an anthropogenen organischen Stoffen [Hofmann (2012)] sowie
- mit mikrobiologischen Auffälligkeiten

zu rechnen. Ggf. langfristige Änderungen der Wasserbeschaffenheit (Temperaturanstieg, Nährstoffe, Sauerstoffarmut, ...) bzw. die Ansiedelung von unerwünschten Neozoen (z.B. Quagga-Muschel) können zusätzlich dazu führen, dass u.a. die technischen Anlagen der Gewinnung, Aufbereitung und Verteilung/Speicherung auch direkt betroffen sind. Dies bedeutet, dass ggf. eine entsprechende Anpassung an die geänderten Rahmenbedingungen erfolgen muss.

Darüber hinaus können aber auch die landseitig zur Trinkwasserversorgung genutzten Ressourcen (z.B. Uferfiltrat, Grundwasser, Quellen, ...) im Einzugs- und Trinkwasserversorgungsgebiet durch den Klimawandel nicht nur quanti- sondern auch qualitativ beeinträchtigt werden. So kann bei einer Erhöhung der Wassertemperatur insbesondere bei der Verteilung des Wassers in urbanen Gebieten die Einhaltung

der 25°C Grenze erschwert sein und ggf. eine veränderte mikrobiologische und geschmackliche Zusammensetzung resultieren. Darüber hinaus kann es beispielsweise bei langanhaltenden Trocken- und Hitzeperioden als Folge der ausbleibenden „Verdünnung“ und gleichzeitigem vermehrten Einsatz von Dünger und Pflanzenschutzmitteln in der Landwirtschaft auch zum Anstieg der Konzentration an unerwünschten Stoffen (Nährstoffe, anthropogene Spurenstoffe, ...) und ggf. pathogenen Keimen kommen [Livingstone (2010), Haakh (2009a), DVGW (2009a)]. Andererseits ist auch im Falle von Starkregen-/Hochwasserereignissen zu beachten, dass wegen den damit einhergehenden Überschwemmungen von Gewinnungsanlagen oder der ungenügenden Schutzwirkung der Deckschichten vielerorts Beeinträchtigungen (z.B. bakteriologischen Auffälligkeiten, erhöhte Konzentration an Trübstoffen,...) im oberflächennahen Grundwasser nachzuweisen sind. Dies wird insofern begünstigt, dass nach langen Trockenperioden eine Verschlechterung des Boden-Filtereffekts nicht auszuschließen ist. Dies bedeutet, dass in Abhängigkeit von den hydrologischen Verhältnissen die örtlichen Ressourcen bei Extremereignissen wegen Qualitätsbeeinträchtigungen nur noch bedingt zur Verfügung stehen.

5.4 Versorgungssicherheit

5.4.1 Wasserdargebot

Treffen die Klimaprojektionen bezüglich der Wasserbilanz im Einzugsgebiet des Bodensees zu, dass zwar eine Umverteilung der Niederschlagsmengen vom Sommer in das Winterhalbjahr stattfindet, aber mittel- bis langfristig das Zu- und Abflussregime (Gesamtwassermenge) nahezu gleichbleibt (vgl. Kap. 4.2), sind unter Berücksichtigung

- der Speicherkapazität des Bodensees,
- des noch vorhandenen Gletschervolumens im Einzugsgebiet,
- der Niederschlagsmenge auf die Seeoberfläche,
- den Überleitungen aus den Fremdeinzugsgebieten sowie
- der Verdunstung

(Tabelle 5.1) keine Einschränkungen für die Seewasserwerke hinsichtlich des Wasserdargebotes zu erwarten.

Tabelle 5.1:

Wasserbilanzgrößen des Bodensees und seines Einzugsgebietes [IGKB (2004), Wasserbilanz-Bodensee (2011a), Wasserbilanz (2011b), LUBW (2011d), BAFU (2012c)]

Wasserbilanzgrößen	Einheit	Jahresmittelwerte
Wasserinhalt Bodensee	[m ³]	ca. 48,4 ... 48,6 * 10 ⁹
Gletschervolumen im Einzugsgebiet	[m ³]	ca. 10 * 10 ⁹
Mittlerer Zufluss über alle Zuflüsse	[m ³ /a]	ca. 10,6 ... 10,9 * 10 ⁹
davon Gletscherwasser bis ca. 2050 (Abschätzung)	[m ³ /a]	ca. 0,1 ... 0,2 * 10 ⁹
Niederschläge Seeoberfläche	[m ³ /a]	ca. 0,39 ... 0,45 * 10 ⁹
Überleitung aus Fremdeinzugsgebieten zur Energiegewinnung	[m ³ /a]	ca. 0,22 ... 0,25 * 10 ⁹
Verdunstung Seeoberfläche	[m ³ /a]	ca. 0,29 ... 0,34 * 10 ⁹
Mittlerer Abfluss Seerhein	[m ³ /a]	ca. 10,6 ... 10,98 * 10 ⁹

Werden auch in Zukunft durch die insgesamt 17 Seewasserwerke weiterhin ca. 0,17 Mrd. m³ pro Jahr zu Trinkwasserzwecken entnommen (**Bild 5.3**), entspricht dies lediglich etwa 1,5 % des Wasserdurchflusses durch den See oder etwa der Hälfte der natürlichen Verdunstung.

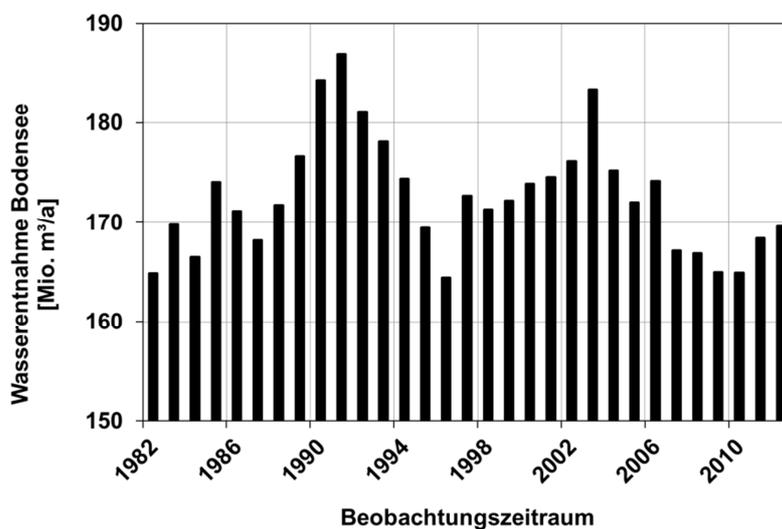


Bild 5.3:
Wasserentnahme zu Trinkwasserzwecken, dargestellt am Beispiel der Seewasserwerke [AWBR (2013)]

Außerdem wird die trinkwasserbezogene Entnahme durch die Wassermengen, die durch die Donauversickerung ($Q = \text{ca. } 8 \text{ m}^3/\text{s}$) sowie die aus Fremdeinzugsgebieten zur Energiegewinnung übergeleitet werden, mehr als kompensiert. Beispielsweise werden aus dem Inn-III- und Seez-Tamina-Gebiet etwa 7 bis 8 m³/s (Jahresmenge: ca. 0,25 Mrd. m³/a) umgeleitet [LUBW (2011d)].

Auch spielt -wie in Kap. 4.2 gezeigt wurde- der jährliche Schmelzwasserabfluss der Gletscher mit 0,1 bis 0,2 Mrd. m³/a auf die mittlere Wasserzuführung zum Bodensee von ca. 11,5 Mrd. m³/a nur eine untergeordnete Rolle. Selbst in länger anhaltenden Trocken- und Hitzeperioden wie im Sommer 2003 ist somit das Wasserdargebot aus dem Bodensee gesichert.

Im Zusammenhang mit den landseitig genutzten Wasserressourcen ist nach den bisherigen Erkenntnissen davon auszugehen, dass Grund- und Quellwasser im Trinkwasserversorgungsgebiet des Bodensees in ähnlichem Ausmaß wie heute zur Verfügung steht bzw. mit lediglich moderaten Veränderungen zu rechnen ist. U.a. hängt das saisonale Wasserdargebot von den z.T. kleinräumig sich auswirkenden Wasserbilanzgrößen und regionalen/örtlichen verfügbaren Wasservorkommen ab. Ob und inwieweit dadurch jedoch kritische Situationen für die örtliche Versorgung entstehen, ist u.a. davon abhängig, wie flexibel die Wasserversorgungsunternehmen auf solche Änderungen reagieren können. Eine im Sommer verringerte Grundwasserneubildung führt beispielsweise nicht nur zu abnehmenden Wasservorkommen, die sinkenden Grundwasserspiegel sind darüber hinaus auch durch geringere Vordrucke gekennzeichnet, die ggf. zu Funktionsstörungen (z.B. Kavitationserscheinungen bei Brunnenpumpen) oder im Extremfall zum Trockenfallen von Brunnen führen. Umgekehrt ist im Falle feuchter werdender Winterhalbjahre i.d.R. mit steigenden mittleren Grundwasserständen zu rechnen, was u.U. im „worst-case“ eine Vernässung des Bodens zur Folge haben kann. Bei Hochwässern und Überflutungen sich zudem Schäden an Bauwerken (z.B. Brunnenschacht, Rohrkeller, Pumpenstation,...) nicht auszuschließen.

Vor allem die zunehmend erwarteten Extremereignisse können außerdem dazu führen, dass die Wasserressourcen in quantitativer Hinsicht beeinflusst werden. So ist nach längeren Trocken- und Hitzeperioden wegen sinkenden Grundwasserständen insbesondere bei sensibel reagierenden Quellschüttungen und wenig ergiebigen Grundwasservorkommen in den Festgesteinsbereichen mit einer z.T. deutlich nachweisbaren Verringerung des Wasserdargebotes zu rechnen. Auch bei der Gewinnung von Uferfiltrat sind bei niedrigen Wasserständen der Fließgewässer rückläufige Tendenzen hinsichtlich der Wasserverfügbarkeit nicht auszuschließen. Zusätzlich ist zu erwarten, dass die verbleibenden Wassermengen den Wasserversorgungsunternehmen trotz Spitzenbedarf aufgrund konkurrierender Nutzungen, z.B. landwirtschaftliche Bewässerung nicht mehr in vollem Umfange zur Verfügung stehen.

Wie bereits in Kap. 4.2 erwähnt, können aber auch Starkregen- oder Hochwasserereignisse zu ortsspezifischen Verhältnissen führen, die aufgrund von Qualitätsbeeinträchtigungen (z.B. bakteriologischen Auffälligkeiten, erhöhte Konzentration an Trübstoffen,...) eine Außerbetriebnahme der meist oberflächennahen Ressourcen erfordern. Dies bedeutet, dass einzelne Wasserversorgungsunternehmen, die ihr Wasser aus Grundwasservorkommen, Quellen oder Uferfiltrat gewinnen, im Zusammenhang mit dem verfügbaren Wasserdargebot bzw. wegen den erforderlichen Restriktionen bei Wassermangel oder Qualitätsbeeinträchtigungen vor große Herausforderungen gestellt sind.

Obwohl im Einzelnen „Härtefälle“ zu erwarten sind, ist insgesamt davon auszugehen, dass bei den Versorgungsstrukturen, wie sie heute in den Anrainerstaaten des Bodensees vorherrschen, die Grundversorgung der Bevölkerung sowohl in der Bodenseeregion als auch im süddeutschen Raum zumindest in den nächsten Dekaden als gewährleistet angesehen werden kann.

5.4.2 Trinkwasserbedarf, Trinkwasserabgabe der Seewasserwerke

Wie wollen wir bzw. wie werden wir im Jahre 2050 leben? Diese Fragen lassen sich sicherlich nur spekulativ beantworten. Nicht nur die weltweiten und internationalen Einflüsse wie beispielsweise die Globalisierung der Weltmärkte, der weltweite Güter-, Waren-, und Personenverkehr oder kriegerische Auseinandersetzungen und Terrorismus haben vielfältige Auswirkungen auf unsere zukünftigen Entwicklungen, sondern auch die auf nationaler bzw. regionaler Ebene wirkenden „Wandelprozesse“ spielen in unseren Alltag in den nächsten Jahrzehnten im Allgemeinen bzw. bei Abschätzung des Bedarfs an Trinkwasser für „morgen“ im Besonderen eine zentrale Rolle (**Bild 5.4**) [DVGW (2009a), DVGW (2009b), DVGW (2009c), DVGW (2010), EAWAG (2009)].



Bild 5.4:
„Wandelprozesse“ und
„äußere Einflussfaktoren“, die bei der Abschätzung des Trinkwasserbedarfs für „morgen“ zu berücksichtigen sind [BWV (2013)]

Aufgrund der Komplexität und der Vielzahl an Unsicherheiten können Prognosen über die in den nächsten Jahrzehnten zur Verfügung zu stellenden Trinkwassermengen nur unter Vorbehalt abgeleitet werden. Die nachfolgenden Aussagen sind daher nicht als „punktgenaue“ Vorhersagen sondern lediglich als Orientierungshilfen zu sehen, die -basierend auf dem heutigen Kenntnisstand- plausibel erscheinen. Bei einer

Übertragung auf den jeweiligen Anwendungsfall bzw. im Rahmen einer weitergehenden Wasserbedarfsprognose sind die Überlegungen daher nochmals kritisch zu hinterfragen.

Verbraucherspezifisches Verhalten

Entsprechend dem bisherigen Verbraucherverhalten in Deutschland (**Bild 5.5**) ist auch in Baden-Württemberg und der Bodenseeregion mit einem stagnierenden bzw. rückläufigen „Pro-Kopf-Verbrauch“ zu rechnen. In den letzten 15 Jahren ist der Wassergebrauch um ca. 15% zurückgegangen, derzeit beträgt er etwa 120 – 125 Liter pro Person und pro Tag. Als Ursachen hierfür ist das allgemeine „Wassersparen“ (u.a. vermehrte Regen- und Brauchwassernutzung) und der Einsatz von verbrauchsarmen Haushaltsgeräte (z.B. Wasch- und Spülmaschinen, Sparduschköpfe,...) zu nennen [BDEW (2008a), BDEW (2010), BDEW (2011), BDEW (2012)]. Aufgrund der hohen Fixkosten bei den Wasserversorgungsunternehmen führt dies jedoch langfristig zu keiner finanziellen Entlastung des Endverbrauchers. Darüber hinaus bedarf es ggf. zusätzlich erhöhter technischer Anforderungen (z.B. Steuerung/Regelung der Aufbereitungsanlagen, vermehrt Spülungen im Verteilsystem, ...), um die hygienisch einwandfreie Wasserbeschaffenheit sowie die Versorgungssicherheit gewährleisten zu können. Dadurch sind auch finanziell keine Anreize vorhanden, die wieder zu einem höheren Wassergebrauch beitragen würden.

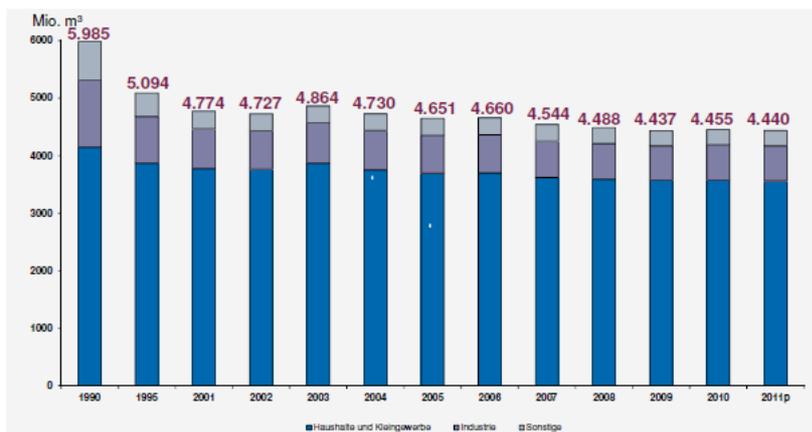


Bild 5.5:
Entwicklung der Wasserabgabe an die Verbraucher in seit 1990 [BDEW (2012)]

Demographie

Der demographische Wandel mit seinen rückläufigen Geburtenraten und einer zunehmenden Alterung der Bevölkerung (**Bild 5.6**) führt nicht nur zu Verschiebungen in der Bevölkerungsstruktur, sondern auch zu gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Veränderungen [Kröhner (2010), Mai (2008), Schön-muth (2010), Wricke (2007), Statistisches Bundesamt (2006), Statistisches Bundesamt (2009), Eisenmenger (2006), Cornelius (2007)]. Baden-Württemberg hat die demographische Wende bereits seit Beginn dieses Jahrhunderts hinter sich, seitdem leben mehr ältere Menschen im Lande als jüngere. Auch das Bevölkerungswachstum wird sich künftig in dem bisherigen Maße nicht mehr fortsetzen. Bedingt durch die verhältnismäßig geringen Geburten- bzw. höheren Sterberaten sowie den erwarteten Netto-Zuwanderungen von lediglich 20.000 bis 30.000 Personen pro Jahr ist auf mittlere bzw. längerfristige Sicht eher mit einer rückläufigen Bevölkerungsentwicklung zu rechnen. Je nach Landkreis sind gegenüber heute Rückgänge um mehr als 5% bis 2030 zu erwarten, der Landesdurchschnitt soll ca. 3,5% betragen ((**Bild 5.7**).

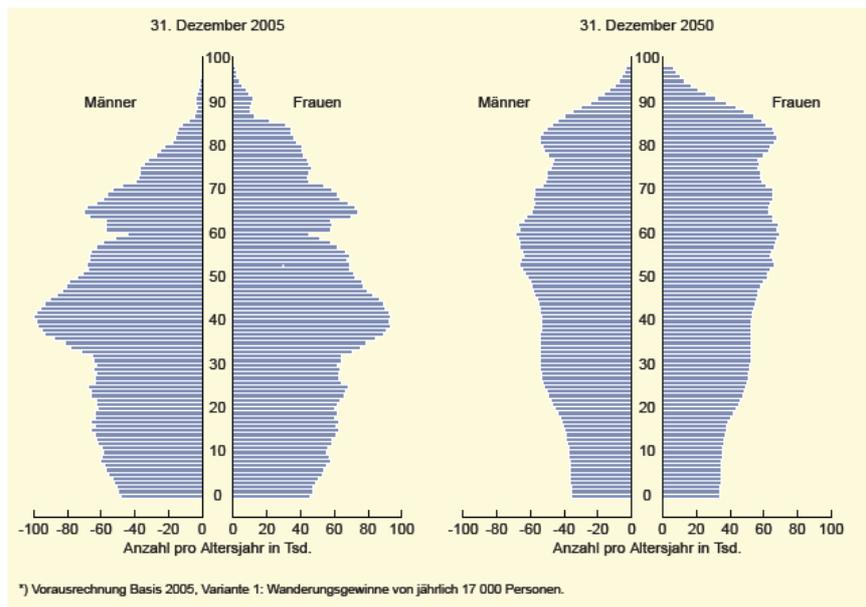


Bild 5.6:
Altersaufbau der Bevölkerung in Baden-Württemberg
Vergleichszeitraum:
2005 - 2050
[Cornelius (2007)]

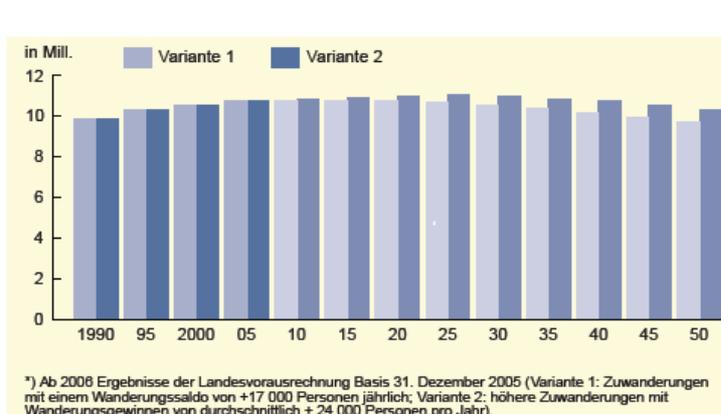


Bild 5.7:
Prognostizierte Bevölkerungsentwicklung in Baden-Württemberg bis 2030 bzw. 2050
[Cornelius (2007), www.stala.bwl.de (2013)]

Aus der prognostizierten Bevölkerungsentwicklung lässt sich somit zum heutigen Zeitpunkt großflächig keine maßgebliche Steigerung des Wasserbedarfs in dem betrachteten Gesamtgebiet ableiten. Auf regionaler/lokaler Ebene der Bodenseeregion und dessen unmittelbarem Uferbereich ist wegen deren Attraktivität ein Anstieg der Bevölkerungsanzahl und damit eine leicht steigende Trinkwasserabgabe nicht auszuschließen.

Industrielle/wirtschaftliche Entwicklungen

Im 19. Jahrhundert war Baden-Württemberg noch eine Region, die den Menschen nicht genug bot, um zu überleben. Das hat sich zwischenzeitlich grundlegend geändert. Heute zählt der Südwesten gemäß einer Umfrage des Institutes Prognos (2010) zu den Bundesländern, die die größten Zukunftschancen besitzen (**Bild 5.8**).

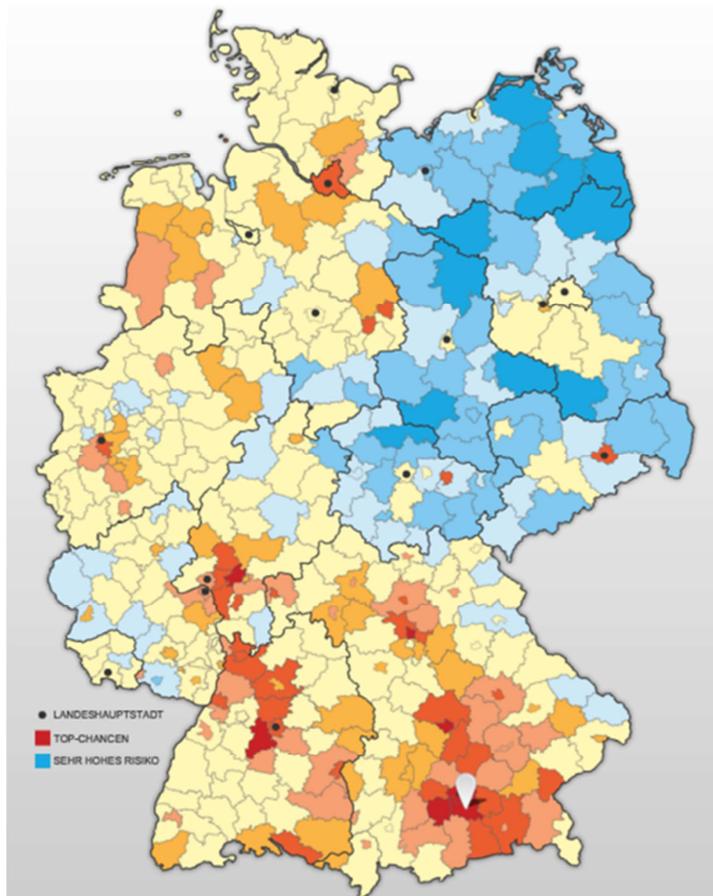


Bild 5.8:
Zukunftsatlas 2010: Der aus 29 Indikatoren gebildete Zukunftsindex zeigt dabei die regionale Verteilung der Chancen und Risiken innerhalb Deutschlands [Prognos (2010)]

Die einzelnen Standortstärken sind dabei vor allem auf die gewachsenen traditionellen Strukturen der „Tüftler und Denker“ mit mehr als 120 Patentanmeldungen pro 100.000 Einwohner sowie auf die Erfolgsfaktoren „leistungsfähige Industrien, innovationsführende Unternehmen, neuen high-Technologien, starke Forschungslandschaft, moderne Arbeitsplätze für hochqualifizierte Fachkräfte“ zurückzuführen. Doch der Wirtschaftsstandort „Südwest“ ist wegen seiner hohen Exportquote nicht unabhängig von den internationalen und nationalen wirtschaftlichen Entwicklungen. Jeder zweite Euro wird im „Ausland“ verdient. Gleichzeitig ist Baden-Württemberg aber auch durch ländliche Gebiete geprägt, wie z.B. den Schwarzwald oder den Odenwald. Vor diesem Hintergrund sind vermutlich im Norden des Trinkwasserversorgungsgebietes weiterhin strukturelle Fortschritte, im Umland des Bodensees und dem mittleren Neckarraum eher eine Konsolidierung auf höchstem Maße zu erwarten. Abgesehen von lokalen Ausnahmen ist bei einhergehenden Wassersparmaßnahmen somit mit einem sinkenden Bedarf an Trinkwasser, das durch die regionalen und überregionalen Wasserversorgungsunternehmen zur Verfügung zu stellen ist, auszugehen.

Wasserbedarf in der Landwirtschaft und gärtnerisch genutzten Flächen

Die Bewässerung von landwirtschaftlichen Kulturen wird dazu eingesetzt, um das Wachstum der Pflanzen zu fördern und fehlenden Regen zu ersetzen. Für die landwirtschaftliche Produktion bzw. den Anbau von Nahrungs-, Futter- und Rohstoffpflanzen spielt die Wasserverfügbarkeit eine entscheidende Rolle. Sie ist abhängig von den meteorologischen/klimatischen Verhältnissen, insbesondere von der Niederschlagsmenge, deren zeitlicher und räumlicher Verteilung sowie vom Speichervermögen des Bodens. Der Wasserbedarf wird aber auch von den angebauten Kulturen und der Effizienz der Bewässerungstechnik bestimmt. Während in Europa der landwirtschaftliche Sektor heute etwa 35% -bezogen auf den Gesamtbedarf- verbraucht, ist der Anteil, der für die Bewässerungszwecke in Deutschland verwendet wird, bislang noch verhältnismäßig gering. In Baden-Württemberg wurden im Jahr 2009 beispielsweise -je nach Region- zwischen <1% und >20% der landwirtschaftlich oder gärtnerisch genutzten Flächen auch tatsächlich bewässert [www.statistik.baden-wuerttemberg.de (2012)]. Doch unter der Annahme eines zunehmenden Temperaturanstieges, verbunden mit verstärkt auftretenden Trocken- und Hitzetagen sowie gleichzeitiger Abnahme der Sommerniederschläge wird sich ein stetig steigender landwirtschaftlicher Bewässerungsbedarf während der Vegetationsperiode ergeben (**Bild 5.9**).



Bild 5.9:
Landwirtschaftliche Bewässerung – Beispiel einer konkurrierenden Nutzung zur Trinkwasserversorgung, insbesondere bei langanhaltenden Trocken- und Hitzeperioden [www.q-s.de (2013)]

Insbesondere bei einer weiteren Intensivierung der Landwirtschaft und ggf. noch extensiv bewirtschafteten Flächen können auf lokaler Ebene Engpässe resultieren, in denen das örtliche Wasservorkommen (Oberflächen- Grund- und Quellwasser) zur Deckung der Nachfrage aller Nutzer (z.B. Haushalte, Landwirtschaft, Industrie, Gewerbe) nicht mehr ausreicht. Die Nutzungskonflikte werden sich dadurch verschärfen. Es ist daher nicht auszuschließen, dass zukünftig Restriktionen und Einschränkungen für die Wasserversorgungsunternehmen zu besorgen sind.

Technologische Fortschritte bzw. Innovationen zur Wassergewinnung, -aufbereitung und Verteilung/Speicherung

Es besteht allgemein Konsens darüber, dass eine eingeschränkte Verfügbarkeit von hygienisch einwandfreiem Wasser hohe gesundheitliche Risiken birgt und sich nachteilig auf die sozioökonomische Entwicklung einer Gesellschaft auswirkt. Vor dem Hintergrund der zukünftigen Herausforderungen einer qualitativen Beeinträchtigung der Gewässer (z.B. Nährstoffe, anthropogene Spurenstoffe, ...), der demographischen Veränderungen und dem Klimawandel kommt daher den innovativen Technologien der Wasserwirtschaft eine herausragende Bedeutung zu. Zum einen bergen die bisher angewandten konventionellen Infrastrukturen der Gewinnung, Aufbereitung und Verteilung/Speicherung weiteres Entwicklungs- und Optimierungspotenzial und zum anderen erhöhen die technologischen

Fortschritte die Anwendungschancen von flexiblen Lösungsansätzen. Durch die technologischen Weiterentwicklungen werden beispielsweise Möglichkeiten geschaffen, energie- und ressourceneffiziente Gesamtkonzepte zu planen und umzusetzen. Im Bereich der Versorgungswirtschaft wird daher die Tendenz begünstigt, verstärkt die örtlichen Wasservorkommen unter Einsatz „moderner“ Aufbereitungsverfahren (z.B. Membranverfahren, **Bild 5.10**) zu nutzen. Dies bedingt jedoch, dass dadurch bei den überregionalen Wasserversorgungsunternehmen wie dem Zweckverband Bodensee-Wasserversorgung die mittlere Wasserabgabe (Grundlast) ggf. verringert wird.

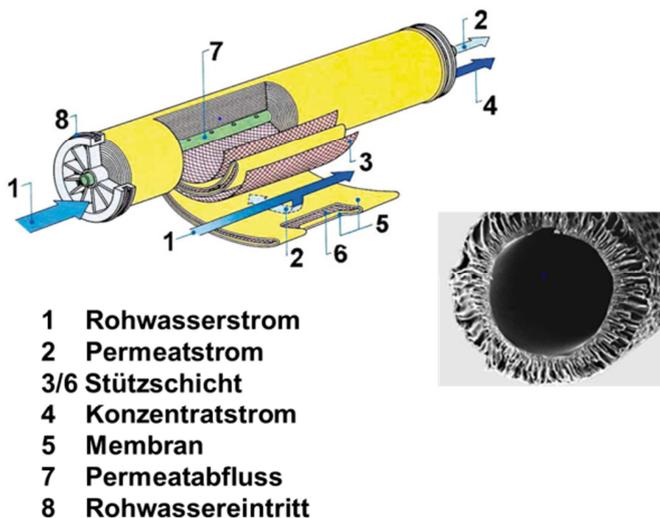


Bild 5.10:
Entwicklungen von innovativen Aufbereitungsverfahren, dargestellt am Beispiel der Membranfiltration
[www.wvg-muehlbach.de (2013), www.hydrogroup.com (2013)]

Preisentwicklungen

Die meist kommunal geführten Wasserversorgungsunternehmen in Deutschland sorgen nicht nur für eine zuverlässige und qualitativ hochwertige Trinkwasserversorgung, sie arbeiten auch kosteneffizient. Gemäß einer Studie des Deutschen Städte- und Gemeindebundes (DStGB) zahlte im Jahr 2012 jeder Bürger im Durchschnitt lediglich 24 Cent pro Tag für sein Trinkwasser¹. Pro Person beliefen sich damit die Trinkwasserkosten auf ca. 86 Euro pro Jahr oder ca. 0,4%, bezogen auf das verfügbare durchschnittliche Einkommen der Haushalte. Auch blieb die durchschnittliche Preisanstiegsrate mit jährlich ca. 1% bislang stets unterhalb der Inflationsrate [www.dstgb.de (2013)]. Doch vor dem Hintergrund der in Zukunft anstehenden Herausforderungen sind steigende Kosten und Preisanstiege nicht auszuschließen. Ob und inwieweit dadurch die Wasserabgabe der Trinkwasserversorgungsunternehmen am Bodensee beeinflusst wird, ist jedoch nur schwer zu beantworten. U.a. ist vorstellbar, dass die zunehmenden technischen und finanziellen Mehraufwendungen, die höheren Energie-/Strombezugskosten oder wegfallende Befreiungstatbestände (z.B. Umlage gemäß Erneuerbare Energie-Gesetz, EEG) beim Verbraucher einen Anreiz für weitere Wassereinsparungen darstellen oder die Suche nach ggf. individuellen Alternativlösungen (z.B. Regenwassernutzung) begünstigen. Insgesamt sind die Unternehmen somit weiterhin aufgefordert, ihre Ziele so auszurichten, dass nicht die Gewinnmaximierung sondern vielmehr die Leitgedanken eines nachhaltigen Umganges mit nicht erneuerbaren Ressourcen sowie die hohe Versorgungssicherheit und eine hohe Trinkwasserqualität verbunden mit sozialverträglichen Preisen ihr Handeln bestimmen.

¹ Die auftretenden regional unterschiedlichen finanziellen Belastungen können u.a. durch die unterschiedlichen „Standortbedingungen“ wie beispielsweise die unterschiedliche Beschaffenheit der Wasservorkommen, die jeweilige Geländetopographie und den damit verbundenen Aufwand beim Bau und Betrieb der technischen Anlagen erklärt werden.

Institutionelle und politische Vorgaben

Wasser ist einer der wertvollsten „Rohstoff“ den unsere Umwelt bereitstellt. Der sorgsame Umgang und die nachhaltige Nutzung von Wasser ist daher als eine fundamentale gesamtgesellschaftliche Aufgabe anzusehen [Landtag Baden-Württemberg (2009)]. Hierbei gilt das Gebot, die vorhandenen Wasservorkommen und Gewässer als natürliche Lebensräume und Wasserressource für nachfolgende Generationen zu erhalten und wirksam zu schützen. Um insbesondere in den hoch entwickelten und dicht besiedelten Industrieländern sowohl für Unternehmen als auch für Konsumenten verlässliche und orientierende Rahmenbedingungen anbieten zu können, bedarf es auf internationaler, nationaler und lokaler/regionaler Ebene abgestimmter rechtlicher Grundlagen bzw. institutioneller/politischer Vorgaben. In den Anrainerstaaten des Bodensees sind dabei vor allem die übergeordneten Anforderungen der Europäischen Union, die nationalen Rahmengesetzgebungen und aufgrund der föderalen Strukturen die rechtlichen Regelungen/Verordnungen der Länder/Kantone sowie die jeweiligen kommunalen Vorgaben zu berücksichtigen. Je nach Ziel- und Prioritätensetzung können demzufolge auch entsprechende Kriterien festgeschrieben werden, die maßgeblich die Versorgung mit Trinkwasser beeinflussen. U.a. kann prinzipiell über ökonomische Elemente (z.B. aktive Preisgestaltung, Abschaffung von Subventionen...) oder über regulative Maßnahmen (z.B. Mengenbegrenzung, Vorrang der ortsnahen Wassergewinnung vor einer überregionalen Wasserversorgung) steuernd eingegriffen werden.

Unter Berücksichtigung der oben skizzierten Wandelprozesse sowie den prognostizierten Auswirkungen und Folgen der Klimaveränderung (u.a. Temperaturanstieg, vermehrt Hitzetage mit Tagestemperaturen über 30°C, länger anhaltende Trockenperioden, Starkniederschläge, Hochwasser und Überschwemmungen, mikrobiologische Beeinträchtigung der Grundwasservorkommen, ...) deuten alle bislang vorliegenden Hinweise darauf hin, dass nach derzeitigem Kenntnisstand vor allem überregional tätige Wasserversorgungsunternehmen zukünftig eher mit rückläufigen mittleren Tagesabgabemengen (Grundlast) und in verstärktem Maße mit nicht vorhersehbaren, temporär beschränkten, jedoch ausgeprägten Spitzenabgaben konfrontiert sind (**Bild 5.11**). Dadurch können „Jahresspitzenfaktoren der Tagesabgabe“² [DVGW-W410 (2008)] resultieren, die einen Wert von über 1,5 aufweisen.

² Quotient aus maximaler Tagesabgabe dividiert durch mittlere Jahresabgabe

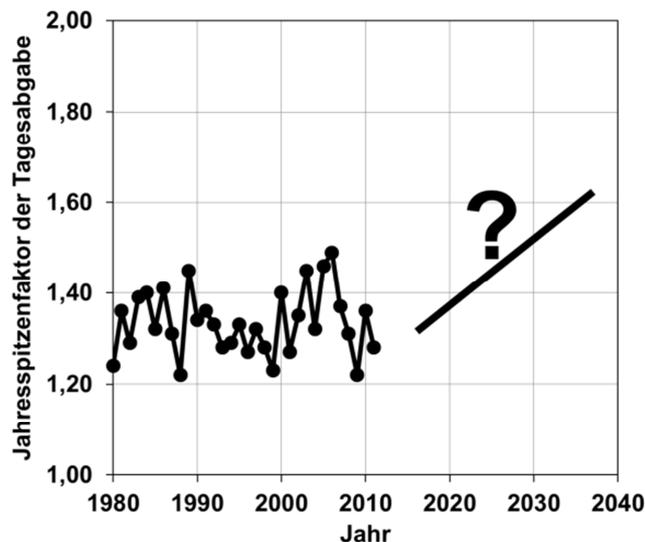


Bild 5.11:
Zeitlicher Verlauf der „Jahresspitzenfaktoren der Tagesabgabe“, dargestellt am Beispiel der Bodensee-Wasserversorgung [BWV (2013)]

Dies bedeutet, dass Versorgungssituationen wie sie beispielsweise im Sommer 2003 infolge langanhaltender Hitze- und Trockenperiode auftraten, somit zukünftig u.U. häufiger oder sogar regelmäßig vorkommen können (**Bild 5.12** und **Bild 5.13**) [Raith (2004), Südkurier (2003a), Südkurier (2003b)].

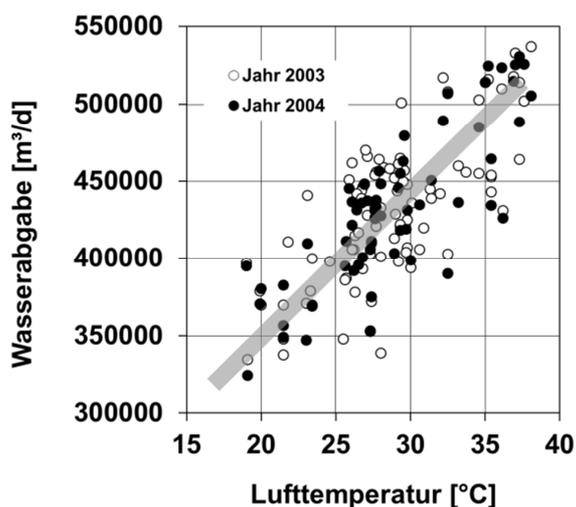
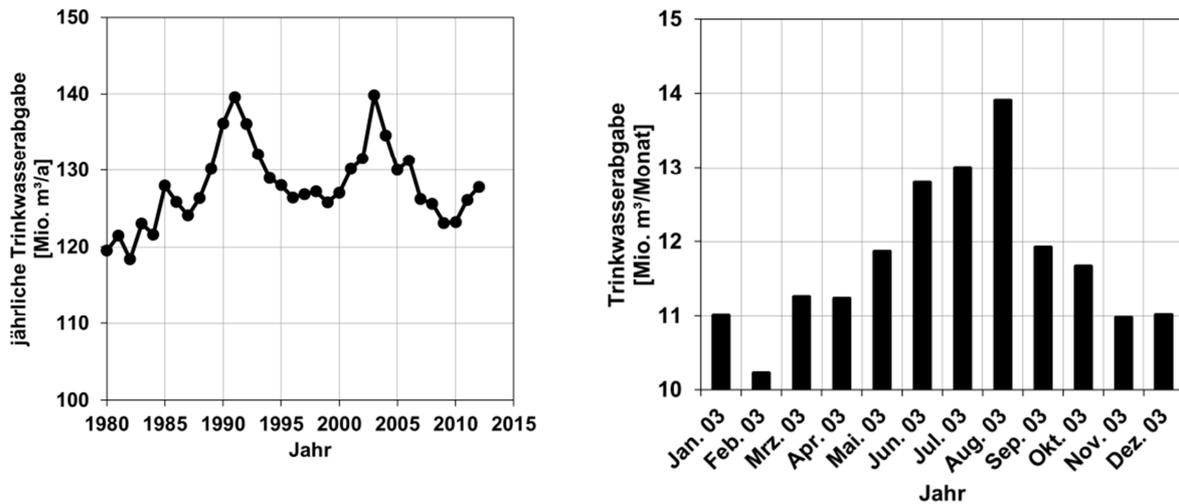


Bild 5.12:
Funktionaler Zusammenhang zwischen Lufttemperatur (Stuttgart) und Trinkwasserabgabe, dargestellt am Beispiel der Bodensee-Wasserversorgung für die Jahre 2003, 2004 [BWV (2013)]

**Bild 5.13:**

Jährliche Wasserabgabe, dargestellt am Beispiel der Bodensee-Wasserversorgung [BWV (2013)]

links: Abgabe an Trinkwasser (Jahresmittelwerte) seit 1980 bis 2012

rechts: Jahresverlauf 2003, bislang die höchsten Tages-, Monats- und Jahresabgaben

Ein aktuelles Beispiel aus dem Jahre 2013, das die Trinkwasserabgabe in Abhängigkeit von der Lufttemperatur (Stuttgart) zeigt, ist in **Bild 5.14** dargestellt.

Insbesondere in Regionen, die durch ein entsprechendes Siedlungsaufkommen und ökonomisches Wachstum bei gleichzeitig hohen Verdunstungs- und geringen Niederschlagsraten gekennzeichnet sind (z.B. mittlerer Neckarraum), kann sich unter derartigen Wetterbedingungen sowohl in den Privathaushalten als auch in der Industrie und Landwirtschaft der Wasserbedarf über einen Zeitraum von bis zu mehreren Wochen deutlich erhöhen. Zusätzlich können weitere Belastungsspitzen dadurch auftreten, dass eine verstärkte Nachfrage nach Trinkwasser durch diejenigen Mitbürger erfolgt, die unter „Normalbedingungen“ auf eine Regenwassernutzungsanlage zurückgreifen. So folgte beispielsweise die Wasserabgabe der Bodensee-Wasserversorgung in dem betrachteten Zeitraum exakt dem Anstieg und der ausgeprägten Spitzen der Tagestemperaturen, was innerhalb weniger Tagen einen Anstieg der Abgabe um 25% bedeutete.

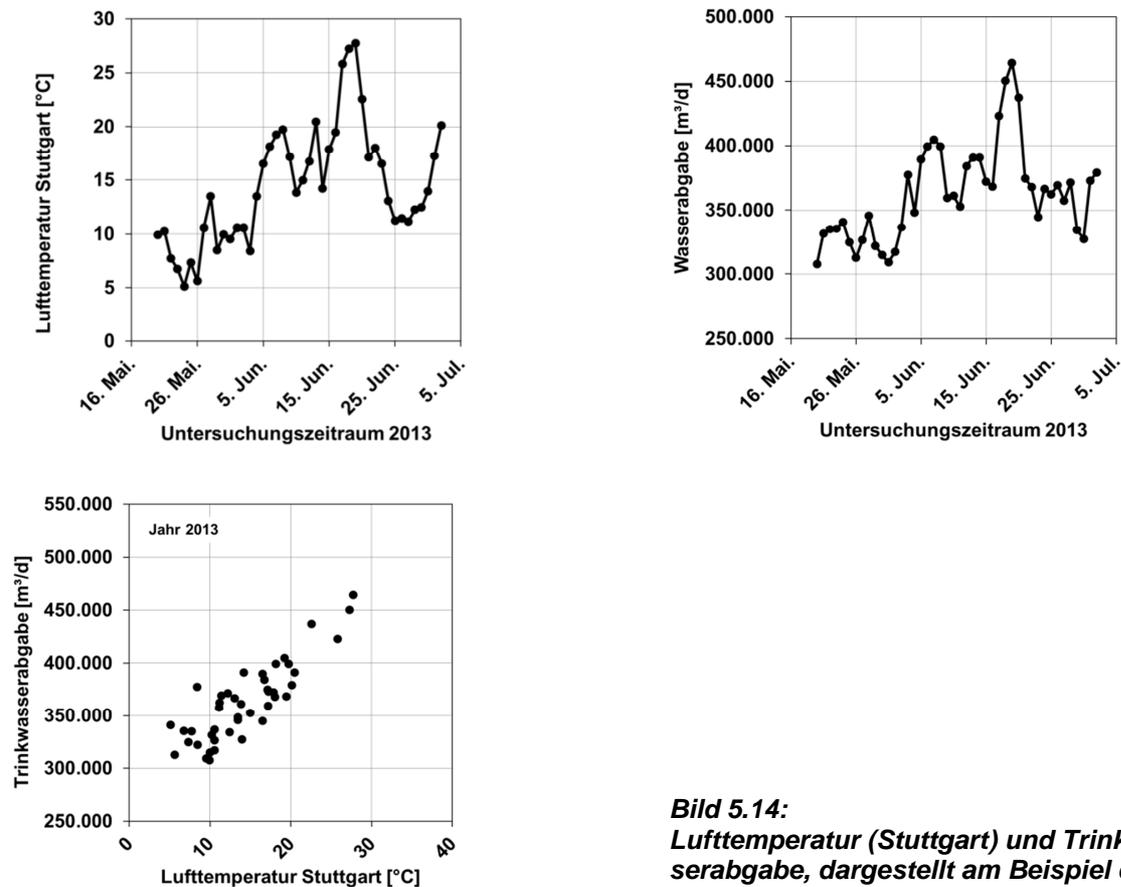


Bild 5.14:
 Lufttemperatur (Stuttgart) und Trinkwasserabgabe, dargestellt am Beispiel der Bodensee-Wasserversorgung und dem ausgewählten Zeitraum „Mitte Mai bis Anfang Juli 2013“ [BWV (2013)]

Die Struktur der Wasserversorgung in Baden-Württemberg ist von einer sehr hohen Versorgungssicherheit und -kapazität gekennzeichnet. Diese wird u.a. durch den vielfach vorgenommenen Ausbau der Fern- und Eigenwasserversorgung erreicht. Da bei örtlichen Wasserversorgungen i.d.R. auf oberflächennahe Grundwasservorkommen, auf Uferfiltrat oder Quellwasserfassung zurückgegriffen wird, kann es speziell bei den überregional tätigen Wasserversorgungsverbänden nach Starkregenereignissen, Hochwasser oder Überschwemmungen wegen Qualitätsbeeinträchtigung der Eigenvorkommen zu einer zeitversetzten, erhöhten Trinkwasserabgabe bei den betroffenen Verbandsmitglieder kommen (**Bild 5.15**). Solche Wetterextreme zeigen deutlich, dass in den wasserarmen, aber gleichzeitig dicht besiedelten und industrialisierten Ballungsräumen Baden-Württembergs eine zuverlässige und leistungsstarke Fernwasserversorgung unverzichtbar ist und es im Rahmen einer zukunftsorientierten Trinkwasserversorgung bei allen Wasserversorgungsunternehmen einer angemessenen Prüfung der anstehenden Strategieentscheidungen über Planungen und Maßnahmen zur Betriebsoptimierung bzw. zur Dimensionierung/Erneuerung von technischen Anlagen der Wassergewinnung, der Aufbereitung und Verteilung/Speicherung

bedarf. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse und gewählten Lösungsansätze sollten so flexibel sein, dass sie jederzeit auf sich weiter ändernde Rahmenbedingungen angepasst werden können [Landtag Baden-Württemberg (2009), Wasserwirtschaft (2010), IBA (2011)].

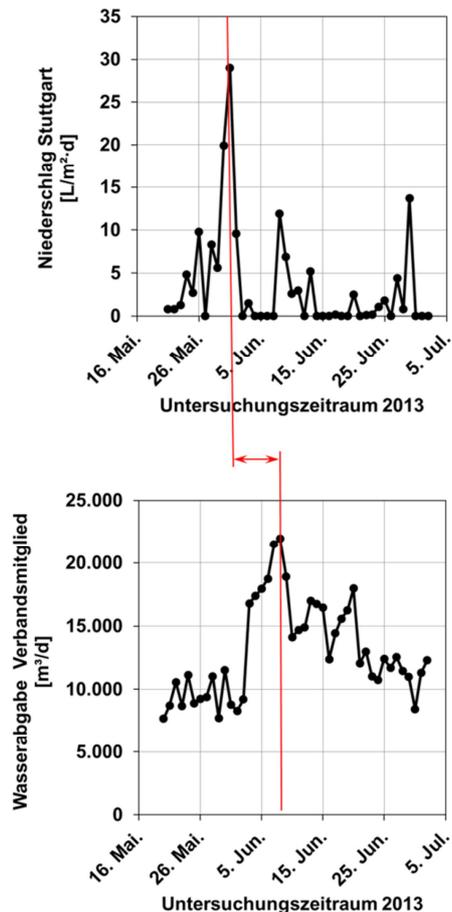


Bild 5.15:
Anstieg der Trinkwasserabgabe infolge Starkniederschlägen und den damit verbundenen Beeinträchtigungen von Grundwasservorkommen in Süddeutschland, dargestellt am Beispiel der Bodensee-Wasserversorgung [BWV (2013)]
Oben: Niederschläge Stuttgart
Unten: zeitversetzte Spitzenabgabe bei Verbandsmitglied A

5.4.3 Technische Versorgungsstruktur

a) Wassergewinnung

Die Seewasserwerke entnehmen Bodenseewasser aus einer Tiefe von 40 bis 60 m. Die Entnahmeleitungen, die unterschiedlich weit in den See hinausreichen, haben einen Durchmesser bis DN 1600 und sind i.d.R. mit Kugelgelenken ausgestattet, so dass die Unebenheiten des Seebodens im Bereich der Wyssse und Halde weitgehend spannungslos ausgeglichen werden können. Die Entnahmeköpfe, die i.d.R. ca. 10 m über Grund durch ein Turmgerüst gehalten werden, sind dabei so aufgebaut, dass einerseits günstige hydraulische Verhältnisse und geringe Energieverluste beim Wassereintritt resultieren, andererseits aber auch sichergestellt ist, dass keine grö-

ßeren partikulären Inhaltsstoffe (z.B. Fische,...) eindringen können. Den meist unterhalb des Wasserspiegels liegenden Rohwasserpumpen ist i.d.R. ein Einlaufbehälter vorgeschaltet.

Im Zusammenhang mit der Klimaveränderung ist vor allem zu beachten, dass sowohl Hochwasser- als auch Niedrigwasserstände bei den Seewasserwerken zu Betriebseinschränkungen oder gar zu Zerstörungen von technischen und baulichen Anlagenteilen führen können. Speziell im Falle von Extremniederschlägen im alpinen Einzugsgebiet des Bodensees geht die Internationale Rheinregulierung (IRR) davon aus, dass zukünftig mit steigenden Hochwasserabflüssen zu rechnen ist und dass nachteilige Auswirkungen im Alpenrheintal ohne weitergehende Vorsorge-/Schutzmaßnahmen nicht auszuschließen sind (**Bild 5.16**).



Bild: 5.16:
Überflutungsflächen durch lokale Schwachstellen [IRR (2011a), IRR (2011b), IRR (2012a), IRR (2012b)]

So wird das Schadenspotenzial bei einem Hochwasser mit einer Abflussmenge von größer $3.100 \text{ m}^3/\text{s}$ auf mehrere Mrd. Euro geschätzt. Seitens Österreichs und der Schweiz wird es daher als erforderlich angesehen, die Abflusskapazität des Alpenrheins künftig auf $4.300 \text{ m}^3/\text{s}$ innerhalb der internationalen Flussstrecken von km 65 (Illmündung) bis km 91 (Zufluss Bodensee) zu erhöhen. Die IRR wurde daher im Jahre 2009/2010 damit beauftragt, für den betroffenen Bereich ein Hochwasserschutzkonzept einschließlich der technischen Lösungsansätze aufzuzeigen [IRR (2011a), IRR (2011b), IRR (2012a), IRR (2012b)]. Die Wasserversorgungsunternehmen zeigen dabei grundsätzlich Verständnis für die vorwiegend auf Siedlungs- und Wirtschaftsentwicklungen basierenden Überlegungen. Der betroffene Bereich ist jedoch nicht nur ein ausgewiesener Kultur-, Wohn- und Wirtschaftsraum. Vielmehr stellt der Bodensee als größter Trinkwasserspeicher Europas ebenso wie das bedeutende Grundwasservorkommen im Alpenrheintal auch eine zentrale Lebensgrundla-

ge für über 5 Mio. Menschen in der Schweiz, Österreich und Deutschland dar. Es gilt daher, im Rahmen des nachhaltigen Hochwasserschutzkonzeptes „Rhein - Erholung und Sicherheit (RHESI)“ alle Auswirkungen der geplanten Erhöhung der Abflusskapazität des Alpenrheins auf 4.300 m³/s auf die Trinkwasserversorgung zu berücksichtigen (**Bild 5.17**).

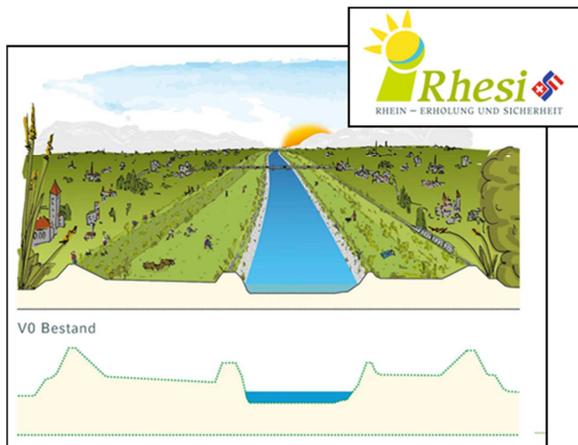


Bild 5.17:
Hochwasserschutzkonzept „Rhein - Erholung und Sicherheit (RHESI)“ [IRR (2011a), IRR (2011b), IRR (2012a), IRR (2012b)]

Seitens der Internationalen Rheinregulierung ist geplant, die Abflusskapazität des Alpenrheins von derzeit 3.100 m³/s auf 4.300 m³/s innerhalb der internationalen Flussstrecken von km 65 (Illmündung) bis km 91 (Zufluss Bodensee) zu erhöhen

Neben der Vermeidung von Schäden und Freisetzung von anthropogen bedingten Schadstoffen, die bei einer Überflutung des unteren Rheintals mit seiner hohen Siedlungs- und Industriedichte resultieren würden, sind die durchzuführenden Maßnahmen des zukünftigen Hochwasserschutzes so zu gestalten, dass keine nachteiligen Folgen auf die Trinkwassergewinnung im Alpenrheintal (u.a. Überflutung von Gewinnungsanlagen, Veränderungen des Grundwasserspiegels,...) und am Bodensee (u.a. möglichen Überschwemmungen der Werksgebiete der Seewasserwerke, Beeinflussung des Bodenseewassers im Hypolimnion, ...) zu besorgen sind. Vor allem sind offene Fragen zeitnah abzuklären, im Rahmen einer Risikobeurteilung die mit den geplanten Veränderungen verbundenen Folgen abzuschätzen und im Falle unvermeidbarer Beeinträchtigungen entsprechende Gegenmaßnahmen und Regelungen festzulegen.

Andererseits können -ebenso wie bei der Entnahme von Grundwasser aus Brunnen-schächten [EUWID (2011), Livingstone (2010)]- auch durch Niedrigwasserstände unerwünschte Folgeerscheinungen resultieren. Insbesondere bei entsprechend hohen Reibungswiderständen in den Entnahmeleitungen ist es mit abnehmendem Wasservordruck nur bedingt möglich, die maximale Förderleistung der Rohwasserpumpen zu gewährleisten (**Bild 5.18**).



Bild 5.18:
Rohwasserförderung,
dargestellt am Beispiel
der Bodensee-Wasser-
versorgung [BWV (2013)]

Zudem ist bei länger anhaltenden Niedrigwasserphasen eine erhöhte Anfälligkeit der Pumpen gegenüber Kavitationserscheinungen nicht auszuschließen. Die jeweiligen Schwellenwerte, bei denen mit signifikanten Beeinträchtigungen zu rechnen ist, sind dabei von den jeweiligen wasserwerksspezifischen Gegebenheiten (u.a. geodätische Höhendifferenz zwischen den Rohwasserpumpen und des Bodenseewasserspiegels, Länge/Durchmesser und Beschaffenheit der Innenwandflächen der Entnahmeleitung, Ablagerungen,...) abhängig.

Eine weitere mögliche Beeinträchtigung der Wasserentnahme kann u.U. auch dadurch erfolgen, dass jederzeit auch unabhängig vom Klimawandel bislang nicht heimische Organismen wie z.B. die Quagga-Muschel über Wanderboote, Schiffe und Aquaristik in den Bodensee eingeschleppt werden können. Aufgrund ihrer spezifischen Fähigkeiten zur Reproduzierbarkeit sowie zur Anhaftung an technischen Bauwerken sind Besiedelungen sowohl an den Außenseiten des Entnahmekopfes als auch an den Innenwänden der Rohwasserleitungen bis zu den ersten Aufbereitungsstufen und ggf. den Spülwasserleitungen der Mikrosiebe nicht auszuschließen. Es ist daher unabdingbar, bereits heute in entsprechenden Forschungsprojekten weitergehende Erkenntnisse zu erarbeiten und denkbare Präventionsmaßnahmen aufzuzeigen. Ob und inwieweit es jedoch möglich sein wird, z.B. durch

- regelmäßige „Freiland“-Beobachtungen (Monitoring),
- rechtsverbindliche Vorgaben zur Verhinderung/Verzögerung der Einschleppung von Quagga-Muscheln (z.B. Reinigung von Wanderbooten,...) und
- technischen Lösungsansätzen (z.B. Möglichkeiten zur mechanischen Reinigung der Entnahmeverrichtungen, ggf. chemische Desinfektion,...)

Betriebsstörungen zu vermeiden bzw. zu minimieren, ist mit dem heutigen Wissensstand [Werner (2012)] nicht abschätzbar.

b) Wasseraufbereitung

Trinkwasser muss nach den geltenden Rechtsvorschriften so beschaffen sein, dass durch seinen Genuss oder Gebrauch eine Beeinträchtigung der menschlichen Gesundheit nicht zu besorgen ist. Daher wird neben der Einhaltung von mikrobiologischen und physikalisch/chemischen Qualitätskriterien gemäß § 5, Abs. 5 der Trinkwasserverordnung 2001 in der aktuell gültigen Fassung gefordert, dass bei Feststellung oder Annahme von mikrobiologischen Belastungen des Rohwassers eine Aufbereitung, erforderlichenfalls unter Einschluss einer Desinfektion, nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik erfolgen muss. Zusätzlich sind zur Einhaltung aller betrieblichen und sicherheitsrelevanten Belange die in § 17 definierten Anforderungen an Anlagen für die Gewinnung, Aufbereitung oder Verteilung von Trinkwasser sowie die in den technischen Regelwerken und Normen festgelegten Hinweise, Empfehlungen und Arbeitsschutzvorschriften zu berücksichtigen [z.B. www.dvgw.de, www.svgw.ch, www.oevgw.at, www.DIN.de].

Um all diesen Anforderungen und Ansprüchen gerecht zu werden, reichte bislang eine Aufbereitung des Bodenseewassers aus, die vorrangig auf

- eine weitgehende Abtrennung der partikulären Inhaltsstoffe (z.B. Mikrosiebung, Vorfiltration, Zweischichtfiltration, Fe(III)- bzw. Al(III)-Salz-unterstützte Filtration),
- eine sichere Abtötung/Inaktivierung von Krankheitserregern (z.B. Ozonung, Chlorung, Chlordioxid, UV-Desinfektion) sowie
- eine effektive Entfernung bzw. einen biologischen Abbau unerwünschter Inhaltsstoffe (Zugabe von Pulverkohle im Bedarfsfall, Aktivkohlefilter)

ausgerichtet ist (**Bild 5.19**).

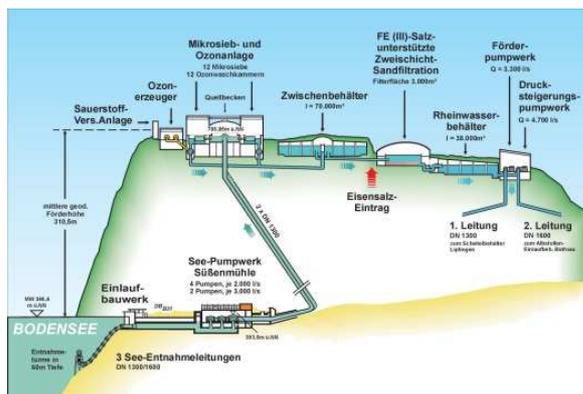


Bild 5.19:
Aufbereitung von Bodenseewasser, dargestellt am Beispiel der Bodensee-Wasserversorgung [BWV (2013)]
 links: Prinzipskizze
 rechts: Aufbereitungsanlage auf dem „Sipplinger Berg“

Welche Verfahrenskombinationen und Prozess-/Betriebsbedingungen unter den sich ändernden Rahmenbedingungen der Klimaveränderung zukünftig anzuwenden sind, ist neben der Beschaffenheit des im Hypolimnion entnommenen Wassers vor allem auch von den spezifischen und individuellen Eigenschaften der auszuwählenden Aufbereitungsverfahren (z.B. Energieeffizienz, Zuverlässigkeit/Betriebssicherheit, Flexibilität, Anfall und Entsorgung von Betriebsrückständen, Wirtschaftlichkeit) abhängig. U.a. ist nicht auszuschließen, dass

- die bei Hochwasserereignissen resultierenden Frachteinträge an partikulären und gelösten Stoffen,
- die zu erwartende Änderung der thermischen Schichtungs-, Zirkulations- und Strömungsverhältnisse und die damit verbundene Tiefenwassererneuerung,
- die denkbare Ausbreitung bislang nicht „heimischer“ Tiere und Pflanzen sowie
- die zunehmenden zivilisatorischen Einflüsse (z.B. anthropogene Spurenstoffe)

zu langfristigen Entwicklungen führen, die eine entsprechende Anpassung und Optimierung der heutigen Verfahrenskombinationen oder gar eine Ergänzung durch innovative Technologien (z.B. Einsatz von Membranverfahren, Aktivkohle) erforderlich machen. Insgesamt ist zu erwarten, dass umwelt- und ressourcenschonende Verfahren zunehmend an Bedeutung gewinnen werden, die es ermöglichen, wie bislang³ ohne Unterbrechung für mehr als 5 Mio. Menschen Trinkwasser aus dem Bodensee in hygienisch einwandfreier Beschaffenheit, in ausreichender Menge und Druck bereitzustellen.

c) Wasserverteilung/-speicherung

Neben der Wassergewinnung, -aufbereitung und der regelmäßigen Qualitätskontrolle stellt die Verteilung und Speicherung des Trinkwassers die vierte Kernaufgabe eines Wasserversorgungsunternehmens dar. Um auch während des Transports des Trinkwassers den größtmöglichen Schutz gegenüber Beeinträchtigungen gewährleisten zu können, ist daher bereits bei Aufbau und Montage der Fern-, Haupt-, Versorgungs- und Anschlussleitungen sowie der Wasserspeicher/Hochbehälter auf eine entsprechende Anlagenkonzeption, eine sach- und fachgerechte Überdeckung der Leitungen [UM-BW (2004)] und durchdachte Detaillösungen zu achten (**Bild 5.20**). Insofern werden bei den Wasserversorgungsunternehmen am Bodensee auch nur Rohrwerkstoffe, Beschichtungsmaterialien und Armaturen eingesetzt, die allen Anforderungen in hygienischer, technischer und betrieblicher Hinsicht gerecht werden.

³ Die Entscheidung zum Bau der ältesten Seewasserwerke „Romanshorn“ und „Riet“ in Goldach fielen im Jahre 1893. Wenige Jahre später nahmen sie ihren Betrieb auf.



Bild 5.20:
Wasserverteilung und -speicherung, dargestellt am Beispiel der Bodensee-Wasserversorgung [BWV (2013)]

Links: Einlaufkonstruktion Behälter „Bütttau“

Rechts: Hochbehälter „Rohr“ in Stuttgart

Bei der Bodensee-Wasserversorgung, die ihre Verbandsmitglieder in Baden-Württemberg über ein weitverzweigtes, insgesamt ca. 1700 km langes Verteilsystem versorgt, weisen die Rohre dabei Nennweiten zwischen DN 100 mm und DN 2250 mm auf. Mit den 34 Hochbehältern steht zusätzlich ein Speichervolumen mit einem Gesamtfassungsvermögen von ca. 500.000 m³ zur Verfügung.

Um die geforderte Wassergüte, die Sicherheit und Verfügbarkeit der einzelnen Anlagenkomponenten auch während des Betriebes gewährleisten zu können, bedarf es darüber hinaus aber auch einer präventiven Instandhaltung, die vor allem Maßnahmen zur Inspektion, Wartung und Instandsetzung beinhaltet (**Tabelle 5.2**). Die zustandsorientierte Instandhaltungsstrategie garantiert hierbei i.d.R. den effektivsten und wirtschaftlichsten Mitteleinsatz.

Tabelle 5.2:
Begriffe der Instandhaltung [www.wikipedia 2013]

Inspektion	Maßnahmen zur Feststellung und Beurteilung des Istzustandes einer Betrachtungseinheit einschließlich der Bestimmung der Ursachen der Abnutzung und dem Ableiten der notwendigen Konsequenzen für eine künftige Nutzung
Wartung	Maßnahmen zur Verzögerung des Abbaus des vorhandenen Abnutzungsvorrats
Instandsetzung	Maßnahmen zur Rückführung einer Betrachtungseinheit in den funktionsfähigen Zustand, mit Ausnahme von Verbesserungen

U.a. ist im Falle von Extremereignissen damit zu rechnen, dass es bei Rohren, deren Stabilität bereits durch Korrosionsprozesse verringert ist, bei erhöhten Wasserabgaben (Stichwort: Spitzenabgabe) zu einem verstärkten Auftreten von Rohrbrüchen und vermehrten Schadens- und Wasserverlusten kommen kann (**Bild 5.21**).



Bild 5.21:
Beispiel eines Rohrschadens
mit einhergehenden Wasser-
verlusten [BWV (2013)]

Während in Hitzeperioden der Boden unter Abnahme seines Volumens („Schrumpfung“) und Setzungen austrocknet, wird bei langanhaltenden Niederschlägen oder Starkregen der Boden dagegen derart vernässt, dass bei ungünstigen Untergrundverhältnissen die Wahrscheinlichkeit von Bodenverschiebungen oder Hangrutschungen zunimmt. In beiden Fällen lassen sich infolge der geänderten Kraftverteilungen Veränderungen in den Bettungs- und Lagerungsbedingungen beobachten, die höhere Biege-Zug-Spannungen im Rohrwerkstoff, Muffenaustriebe oder Undichtigkeiten an nicht-längskraftschlüssigen Verbindungen hervorrufen. Die damit einhergehenden Schadensbilder (z.B. Quer- oder Schalenbrüche bei Grauguss) sind zwar nicht neu, sie können aber infolge der in Zukunft öfters zu erwartenden Druckschwankungen gehäuft auftreten [Sorge (2013a)]. Ferner ist es nicht auszuschließen, dass bei extremen Wetterereignissen auch einzelne Abschnitte des Versorgungssystems und des Trinkwassernetzes durch Hochwasser oder Freilegen der Leitungen und Dükern gar zerstört werden.

Da die Nutzungsdauer von Rohrleitungen neben den verwendeten Rohrmaterialien (z.B. Grauguss, Stahl, zementgebundene Werkstoffe, Polymerwerkstoffe,...) u.a. auch von der Boden- und Wassertemperatur sowie dem Durchsatzverhalten und den damit verbundenen mechanischen Belastungen (Druckschwankungen, Materialabtrag,...) abhängt, ist es gemäß thermodynamischer und reaktionskinetischer Gesetzmäßigkeiten theoretisch möglich, dass durch die klimabedingten Temperaturerhöhungen und den Veränderungen der hydrologischen Größen die Korrosionswahrscheinlichkeit der Rohrleitungen beeinflusst wird. Bislang liegen jedoch noch keine Hinweise vor, die auf signifikant nachteilige Effekte im Zusammenhang mit den korrosionschemischen Wechselwirkungen im System „Wasser - Rohrmaterial - Boden“ hindeuten [Sorge (2013a)]. Andererseits ist aber bei der Betrachtung von Verteilsystemen in Ortsnetzen festzustellen, dass im Falle lang anhaltender Hitzeperioden durch den hohen Versiegelungsgrad sowie der Wärmeaufnahme und -speicherkapazität urbaner Verdichtungsräume vor allem in Versorgungsbereichen mit geringer oder gar stagnierender Wasserabgabe sogenannte Wärmeinseln ent-

stehen können [UBA (2012d)]. Bereits heute können in entsprechenden Leitungsabschnitten im zur Verteilung gelangenden Trinkwasser Temperaturen von über 20°C nachgewiesen werden. In Abhängigkeit von dem hygienischen Zustand der Rohrleitungen, der Beschaffenheit des Trinkwassers einschließlich des verfügbaren Desinfektionspotenzials sowie der Standzeit sind daher unter ungünstigen Bedingungen (z.B. Stagnation, Endstränge, Konzentration an mikrobiologisch verwertbaren organischen Stoffen,...) zumindest lokal/örtlich und zeitlich begrenzte mikrobiologische Auffälligkeiten durch Aufkeimungserscheinungen oder Biofilmbablösungen nicht auszuschließen [Petry (2009)].

Aber nicht nur im Hinblick auf die Wasserbeschaffenheit und auf die erdverlegten Rohrleitungen sind verstärkt unerwünschte Beeinträchtigungen möglich, extreme Trockenheit/Hitze, Niederschläge oder Stürme können auch an Hochbauten Betriebsstörungen und Infrastrukturschäden (z.B. Gefahr der Überhitzung von Aggregaten und Pumpen, Überschwemmung/Überflutung von Pumpen/Wasserspeichern, Abdeckung von Dächern, Zerstörung von Stromleitungen, Infrastruktur zur Steuerung und Regelung, ...) nach sich ziehen.

d) Steuerung/Regelung/Fernwirktechnik und Kommunikationssysteme

Um für den Endverbraucher eine gesicherte Wasserversorgung betreiben zu können, sind sämtliche Prozesse der zentralen Wasserversorgung -beginnend bei der Wassergewinnung bis zur Wasserverteilung- zu messen, steuern, regeln und zu dokumentieren (EMSR-Technik). So werden i.d.R. von allen relevanten Anlagenteilen wie z.B. Wasserstände in Hochbehältern, Durchflüsse oder Drücke in Rohrleitungen sowie Schalt- und Betriebspunkte von Pumpen in dezentralen Steuerungen (SPS) verarbeitet und anschließend in einer zentralen Schaltwarte im Prozessleitsystem von hochqualifizierten Mitarbeitern entsprechend überwacht und verarbeitet (**Bild 5.22**).



Bild 5.22:
Fernwirktechniken, Prozessleitsystem und zentrale Schaltwarten, dargestellt am Beispiel der Bodensee-Wasserversorgung, Stuttgart [BWV (2013)]

Zusammen mit den dezentralen Betriebsstellen können Störungen zeitnah erkannt und ggf. behoben werden. Sind in Zukunft vermehrt Unwetter zu erwarten, bei denen Unterbrechungen der Energieversorgung bzw. sogar längerfristige Stromausfälle nicht auszuschließen sind, ist jedoch die Übertragung der Messwerte bzw. deren Auswertung in die Leitwarte nicht mehr gewährleistet, ist mit Sekundärfolgen mit erheblichem Ausmaß zu rechnen. Daher sind solche Systeme, ebenfalls wie die Informations- und Kommunikationstechnologien in der Wasserversorgung z.B. durch Anbindung an Ersatzstromeinrichtungen entsprechend abzusichern.

5.5 Strom- und Energieversorgung

Die Versorgungssicherheit der Wasserversorgungsunternehmen wird nicht nur von den vorhandenen technischen Anlagenkomponenten und deren Betriebszuständen bestimmt, die Bereitstellung von Trinkwasser ist auch entscheidend von einer sicheren Energie-/Stromversorgung abhängig. Daher gehört seit langem der schonende Umgang den endlichen Ressourcen sowie die Energieeffizienz verbunden mit der Identifizierung von Optimierungspotenzialen und Durchführung von Maßnahmen zu Energieeinsparungen zu den zentralen Themen der Versorgungswirtschaft. In diesem Zusammenhang gewinnt die Energiebereitstellung aus regenerativen/erneuerbaren Energien (u.a. Wasserkraft, Windenergie, solare Strahlung, Erdwärme und nachwachsende Rohstoffe) zunehmend an Bedeutung [AWEL/IBK (2007)]. Der rasant steigende Anteil stellt jedoch die Betreiber von Stromnetzen vor neue Herausforderungen. Um auch in Zukunft eine bedarfsgerechte Bereitstellung und zeitliche Verfügbarkeit von Strom gewährleisten zu können, sind neben dem zügigen „intelligenten“ Ausbau von Stromnetzen vor allem die hohen Anforderungen an das flächenhafte Energiemanagement (z.B. Ausgleich von Lastschwankungen, Energiespeicherung, vermehrt dezentrale Stromeinspeisungen,...) zu berücksichtigen [UBA (2011b)]. Als Folge der Klimaveränderung ist zu erwarten, dass im Winter eher weniger Energie zum Heizen, im Sommer aber mehr für Kühlzwecke verbraucht wird.

Vor diesem Hintergrund ist davon auszugehen, dass mit voranschreitendem Klimawandel der Nutzungsdruck auf die im Einzugsgebiet des Bodensees vorhandenen Speicherkraftwerke (**Bild 5.23**) weiterhin hoch sein wird. Dies bedeutet, dass auch zukünftig mit einer entsprechenden Bewirtschaftung der Speicherbecken zu rechnen ist, die i.d.R. von Mai bis September durch eine Rückhaltung bzw. im November bis Februar durch eine verstärkte Abgabe von Wasser gekennzeichnet ist.

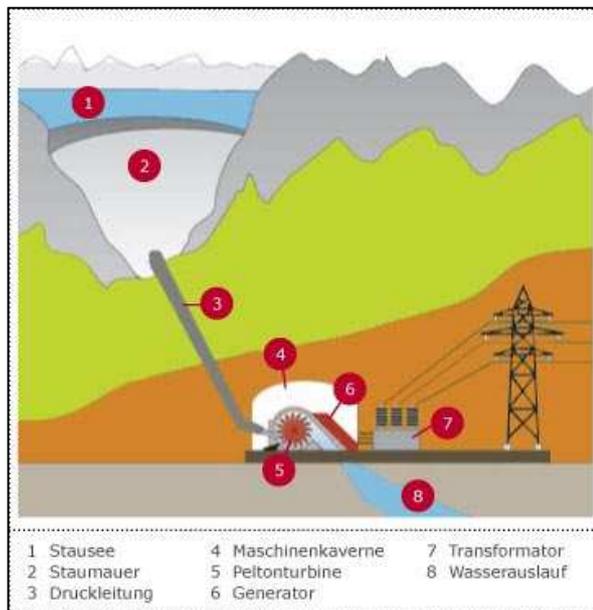


Bild 5.23:
Speicherkraftwerk, Prinzipskizze
 [www.solaratlas.htwk-leipzig.de
 (2013)]

Darüber hinaus ist neben den tagesrhythmischen Feststoffaufwirbelungen in den Fließgewässern („Schwall- und Sunk-Betrieb“) vor allem bei der Entsorgung der in den Speicherbecken abgelagerten Sedimenten in Zukunft vermehrt mit Einträgen an partikulären und gelösten Inhaltsstoffen in den Bodensee zu rechnen.

Unter extremen Witterungsbedingungen sind aber auch Beeinträchtigungen der Stabilität der Energieversorgung in den Bereichen der Erzeugung, Übertragung und Nachfrage nicht auszuschließen. So kann es beispielsweise in Niedrigwasserperioden und bei Hitzeperioden zu Einschränkungen und Leistungsminderungen bei thermischen Kraftwerken an Flüssen kommen. Je heißer die Sommer werden, desto weniger Wasser führen die Flüsse und desto wärmer ist ihr Wasser. Neben einer nur noch begrenzt wirksamen Kühlung können u.a. auch die wegen ökologischen Auswirkungen in den Wärmelastplänen festgeschriebenen Anforderungen der Kühlwasserentnahme (z.B. maximale Entnahmemenge, maximale Temperatur des rückgeführten Wassers, ...) nicht mehr eingehalten werden. Zudem kann die Energieversorgung neben technischer Störungen (Materialermüdung, Spannungsüberlastungen,...) vor allem auch durch extreme Naturereignisse wie Stürme, Blitzeinschläge, Brände, Überschwemmungen, Hagel, Eislasten beeinträchtigt werden, Stromengpässe, kurzzeitige Unterbrechungen der Stromversorgung oder gar länger anhaltende Stromausfälle („Black-out“) sind möglich.

Neben den technischen Anlagen zur Gewinnung, Aufbereitung und Verteilung/Speicherung sind hierbei die Infrastruktur der Informations-, Daten- und Kommunikationstechnologie (Telefon, Fax, Handy, Funk,...) sowie u.U. auch die Zulieferer von Zusatz- und Aufbereitungsstoffen (z.B. Sauerstoff, Flockungsmittel, Chlor,...) betroffen. Außerdem sind bei einer Angebotsverknappung an Energie sprunghaft ansteigende Energiepreise nicht auszuschließen. Insbesondere dann, wenn ein er-

höherer Strombedarf im Sommer für Kühlzwecke (Ventilatoren, Kühlaggregate, Klimaanlage, ...) mit einem verringerten Elektrizitätsdargebot zusammentreffen. Ebenfalls finanzielle Mehraufwendungen können dadurch resultieren, dass infolge klimabedingter Limitierungen bei den Primärenergieträgern oder Versorgungsengpässen die Preise steigen.

5.6 Sozio-ökonomische Fragestellungen

5.6.1 Einflüsse der Klimaänderung auf das menschliche Wohlbefinden und die Gesundheit

Der prognostizierte Klimawandel ist in Mitteleuropa mit vielfältigen Gesundheitsrisiken völlig neuer Größenordnungen und Qualität verbunden [UBA (2008), UMID (2009), Löbermann (2012), Preuß (2011), Stark (2009), Regionalverband (2009)]. Potenzielle Gefährdungen für die menschliche Gesundheit resultieren dabei einerseits aus dem Anstieg der Häufigkeit und/oder Intensität von extremen Wetterereignissen (Hitzewellen, Überschwemmungen) und andererseits durch die Änderungen in der Verbreitung und den Aktivitätsmustern von Krankheitserregern und deren Zwischenwirten.

So können beispielsweise Mitarbeiter als Folge von Unwettern direkt betroffen sein. U.a. führen Unfälle oder der Einsatz als Hilfskräfte dazu, dass den Wasserversorgungsunternehmen zumindest temporär weniger Personal für technische, administrative und organisatorische Aufgaben zur Verfügung steht (**Bild 5.24**).



Bild 5.24:
Motivierte und zufriedene Mitarbeiter/innen als einer der wichtigsten Erfolgsfaktoren eines Wasserversorgungsunternehmens [Bild (2013)]

Zudem können länger anhaltende Wärmebelastungen über Tage, die durch extreme Hitze, hohe relative Luftfeuchtigkeit und geringe Windgeschwindigkeiten charakterisiert sind, Flüssigkeitsmangel, Hitzschlag, Herzinfarkt, Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Nierenversagen und Stoffwechselstörungen zur Folge haben. Im Extremsommer 2003 starben allein in Deutschland beispielsweise mehrere tausend Menschen an derartigen Symptomen. Ebenso ist ein weiterer Anstieg allergischer Erkrankungen und Atemwegsproblemen aufgrund hoher Ozonkonzentrationen in bodennahen Schichten sowie einer veränderten Pollenzusammensetzung/-verteilung und biogener Aeroallergene (z.B. Emissionen von thermophilen Schadinsekten) wahrscheinlich [epd (2012)]. Nicht zuletzt ist vor allem bei sensiblen Menschen das Wohlbefinden bei Umgebungstemperaturen von über 26 °C z.T. beeinträchtigt (Kreislaufbeschwerden, Schwindel, erhöhter Puls, Kopfschmerzen,...). Trifft dies auch auf Mitarbeiter/innen der Wasserversorgungsunternehmen zu, ist deren Konzentrationsfähigkeit eingeschränkt und es können vermehrt Fehler auftreten.

Setzen sich zudem die bereits beobachteten Tendenzen einer verstärkten Ausbreitung von endemischen Krankheitserregern (z.B. Borrelien, FSME-Viren) bzw. die Ansiedlung bislang „nicht heimischer“ humanpathogener Schädlinge fort [BMU (2003), Löbermann (2012), Preuß (2011a), Preuß (2011b)], ist im worst-case-Fall einer Epidemie oder gar Pandemie ein Ausfall der nahezu gesamten Mitarbeiterbelegschaft vorstellbar. Es gibt bereits heute Anzeichen dafür, dass aufgrund der klimabedingten Änderung von ökologischen Faktoren, dem natürlichen Vogelflug sowie dem zunehmenden globalen Personen-, Tier- und Güterverkehr auch in Deutschland Ausbrüche von Infektionskrankheiten möglich sein könnten, deren Verbreitung bislang auf tropische und subtropische Regionen beschränkt war (Beispiel: „Vogelgrippe“ - Influenzaviren A/H5N1 oder asiatische Tigermücke (**Bild 5.25**). Treten zudem Resistenzbildungen gegenüber Antibiotika auf, ist auch mit einer eingeschränkten Therapiebarkeit zu rechnen.



Bild 5.25:
Asiatische Tigermücke – *Aedes albopictus*
[UMID (2009)]

Neben der Übertragung von Krankheitserregern durch landgebundene Vektoren (z.B. Mücken, Zecken, Nager,...) ist auch eine orale Aufnahme von pathogenen Mikroorganismen über den Wasserpfad denkbar.

5.6.2 Ökonomie

Weltweit rechnen Rück- und Risikoversicherer wie z.B. MunichRe AG wegen der zunehmenden wetterbedingten Umweltkatastrophen mit finanziellen Aufwendungen von jährlich dreistelligen Milliardenbeträgen [*MunichRe (2009), Kempfert (2007)*]. Europaweit werden -abhängig von der zukünftigen Entwicklung der Treibhausgasemissionen- die jährlichen Schadenskosten durch Klimawandel auf jährlich rund 20 Milliarden Euro in den 2020er Jahren, 90 bis 150 Milliarden in den 2050er Jahren und zwischen 600 und 2.500 Milliarden Euro in den 2080ern eingeschätzt [*UBA (2012g)*]. Dass die klimabedingten Änderungen auch für die Schweiz [*BAFU 2007a), BAFU (2007b)*], Österreich [*Tichler (2007)*], das Einzugsgebiet und die Bodenseeregion ökonomische Folgen nach sich ziehen, zeigen die Überlegungen zu den geplanten Ausbaumaßnahmen des Alpenrheins auf der internationalen Rheinstrecke (Kap. 5.3.3). Schweizerische und österreichische Experten gehen davon aus, dass im Falle eines entsprechenden Hochwasserereignisses ohne weitergehende Vorsorgemaßnahmen ein Gesamtschadenspotenzial im betroffenen Gebiet in Höhe von mehreren Milliarden Euro resultieren würde [*IRR (2011a), IRR (2011b), IRR (2012a), IRR (2012b)*]. Entsprechende Erhebungen zu den monetären Auswirkungen hinsichtlich möglicher Überschwemmungen im Uferbereich des Bodensees sind dabei bislang nicht einbezogen.

Nicht nur die Seewasserwerke stehen daher zunehmend vor der Aufgabe, die Folgen extremer Wetterereignisse sowie die Auswirkungen der Klimaänderungen in ihren zukünftigen Entscheidungen zu berücksichtigen. Wegen ihrer längeren Umsetzungs- und Finanzierungsphase bedürfen dabei vor allem die investiven Maßnahmen einer frühzeitigen und sorgfältigen Planung. Ferner sind praktikable Ansätze erforderlich, mit denen offene Fragenstellungen zur Priorisierung und Finanzierung der jeweiligen Anpassungsmaßnahmen ebenso wie Fragestellungen zur Preisgestaltung beantwortet werden können. Bislang liegen jedoch diesbezüglich nur bedingt auswertbare Daten vor [*EAWAG (2009)*].

Um zumindest eine erste orientierende Einschätzung vornehmen zu können, wird daher angenommen, dass der bisherige spezifische Investitionsbedarf der deutschen Wasserversorgungsunternehmen⁴ von ca. 0,4 bis 0,5 Euro/m³ auf die zukünftigen Verhältnisse übertragbar und in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts mit klimabedingten Mehrkosten zwischen 1% und 10% zu rechnen ist. Unter diesen Hypothesen lassen sich aus heutigen Gesichtspunkten die finanziellen Zusatzbelastungen in einer Größenordnung im unteren einstelligen Cent/Kubikmeter-Bereich ableiten, die durch die Auswirkungen und Folgen der zu erwartenden Witterungsverhältnisse verursacht werden können. Zu ähnlichen Erkenntnissen kommt auch das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - Department Ökonomie, das eine Studie zur Abschätzung von Anpassungskosten in ausgewählten Sektoren in Sachsen-Anhalt durchge-

⁴ Gesamtinvestitionen 2010: 2,0 bis 2,5 Mrd. Euro; Trinkwasserabgabe 2010: 5,2 Mrd. m³, Kostenanteil: Gewinnung/Aufbereitung ca. 10-20%, Kostenanteil: Verteilung/Speicherung: ca. 60-70% [*BDEW (2012): Kennzahlen - Wasserfakten, www.bdew.de*]

führt hat [UFZ (2011)]. Ausgangspunkt war dabei die Überlegung, zunächst im Rahmen von Experteninterviews aus dem Portfolio der theoretisch denkbaren Anpassungsmaßnahmen diejenigen zu ermitteln, die bis zum Jahr 2050 in Sachsen-Anhalt von Bedeutung sein werden. Danach konnte am Beispiel eines ausgewählten Wasserversorgers mit einer Wasserabgabe von ca. 19,2 Mio. m³/a gezeigt werden, dass finanzielle Zusatzaufwendungen in Höhe von ca. 60.000,-- bis 120.000,-- Euro pro Jahr zu erwarten sind.

Aufgrund der bestehenden Unsicherheiten/Unwägbarkeiten können in Einzelfällen, insbesondere wenn

- hohe Elementarschäden an relevanten Anlagenteilen (Rohwasserpumpen, Hauptleitungen,...) zu beklagen sind,
- weitergehende Aufbereitungsstufen oder
- aufwendige Instandhaltungsmaßnahmen erforderlich werden,

die tatsächlich entstehenden Kosten von den o.g. Werten erheblich abweichen. Da zudem die Betriebs- und Investitionskosten maßgeblich durch die weitgehend klimunabhängigen Wandelprozesse (z.B. verbraucherspezifisches Verhalten, Demographie, industrielle und wirtschaftliche Entwicklungen, technologische Fortschritte sowie institutionelle und politische Vorgaben) beeinflusst werden, sind die o.g. Aussagen zu den klimabedingten Anpassungskosten daher stets kritisch zu überprüfen. Dabei sollte aber nicht die Frage „Wie viel müssen wir zukünftig für unser Trinkwasser bezahlen?“ im Vordergrund stehen, sondern vielmehr die Einsicht entscheidend sein, wie viel uns allen hygienisch einwandfreies Trinkwasser in Zukunft wert ist, das jederzeit in ausreichender Menge und Druck bis an den Zapfhahn des Verbrauchers geliefert wird.

5.7 Abschließende Bemerkungen

Das Klima ändert sich. Dies hat nicht nur Auswirkungen auf die Umwelt zur Folge, sondern auch die einzelnen Komponenten der Trinkwasserversorgung in unterschiedlicher Art und Weise sind davon betroffen. Wie mit dem Ansatz des „vernetzten Denkens“ gezeigt werden konnte, lassen sich die im System „Klimawandel - Trinkwasserversorgung - „äußere“ Störgrößen“ erkennbaren Zusammenhänge bzw. „Ursache-Wirkungs-Beziehungen“ mit wenigen, aber relevanten „Schlüsselkomponenten“ auf das Wesentliche zurückführen. Insbesondere die nutzungsspezifischen, technischen und sozio-ökonomischen Aspekte, die eng mit der Verfügbarkeit und Beschaffenheit des Bodensee- und Trinkwassers bzw. der Versorgungssicherheit und -infrastruktur verbunden sind, stehen dabei im Mittelpunkt des Interesses. Um jedoch „Entscheidungen unter Unsicherheiten“ und den zunehmenden wirtschaftlichen Zwängen treffen zu können, reicht die Kenntnis der Betroffenheit alleine nicht aus, vielmehr sind weitergehende Systembetrachtungen, insbesondere zur Vulnerabilität bzw. Gefährdungsabschätzung (Risiko) erforderlich. Mit den dabei zu berücksichtigenden Überlegungen befasst sich das nachfolgende Kapitel.

6.0 Systemanalyse

Überlegungen zur Sensitivität, Exposition, Vulnerabilität und Risikomanagement

6.1 Allgemeines

Wie in den vorhergehenden Ausführungen gezeigt wurde, handelt es sich bei den Wechselwirkungen, die das aktuelle und zukünftige Wettergeschehen prägen, in physikalisch/chemischer Hinsicht um äußerst komplexe und heterogene Prozesse. Zudem wird erwartet, dass im Rahmen des Klimawandels die Variabilität und die Vielfalt der zukünftig zu erwartenden Witterungsbedingungen weiter zunehmen werden. Angesichts einer zunehmend „komplexeren Welt“ wird es immer schwieriger, diese in ihrer Gesamtheit zu erfassen. Es ist daher nicht verwunderlich, dass trotz aller Fortschritte im Bereich der Computertechnologie und damit der immer schnelleren Erweiterung der Wissensbasis die heutigen Möglichkeiten der Klimaprojektion noch stark eingeschränkt sind. Wie bereits in Kap. 2 „Stand des Wissens“ skizziert wurde, lassen sich vielfach lediglich Einschätzungen oder Wahrscheinlichkeitsaussagen ableiten. Die Unsicherheiten und Unwägbarkeiten basieren dabei vorwiegend auf

- Wissenslücken oder fehlender/unsicherer Informationsbasis,
- prinzipiellen Grenzen der Vorhersagbarkeit von in der Zukunft stattfindenden Ereignissen, u.a. hervorgerufen durch unvorhersehbare Naturkatastrophen oder durch den lange zu betrachtenden Zeithorizont des Klimawandels (i.d.R. bis Ende des 21. Jahrhunderts)
- der beschränkten Nachbildungs-/Simulationsmöglichkeit der klimarelevanten Prozessabläufe durch computerunterstützte Klimamodelle
- der Vielzahl der zu berücksichtigenden Einflussgrößen.

Um trotz oder gerade wegen der aufgezeigten Grenzen zumindest aus heutiger Sicht plausible Aussagen über mögliche Klimaschutzstrategien und Anpassungsmaßnahmen ableiten zu können, gilt es, im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtungsweise die kritischen Parameter und die Eigendynamik im System „Klimawandel - Trinkwasserversorgung aus dem Bodensee“ nicht nur zu identifizieren, sondern auch zu priorisieren und -auf dem heutigen Stand des Wissens- zu beurteilen (**Bild 6.1**).



Bild 6.1:
Prinzipieller Ablauf einer System-
analyse (in Anlehnung an [BMVBS
(2011)]

Basierend auf der Frage der Betroffenheit (Kap. 5) bietet sich hierzu der Einsatz von systematisch-strukturierenden Methoden an, mit denen beispielsweise im Rahmen von qualitativen d.h. intuitiv-beschreibenden oder halb-quantitativen Denkansätzen (Kap. 6.2) zumindest näherungsweise aufgezeigt werden kann, wie sich Änderungen der „beeinflussenden, unabhängigen“ Eingangsgrößen (Input) eines Systems auf die „beeinflussbaren, abhängigen“ Ausgangsgrößen (Output) auswirken. Durch diese Vorgehensweise lassen sich in einem komplexen System u.a. „Ursache-Wirkungs-Beziehungen“ ansatzweise identifizieren und darstellen. Ziel ist es, transparente und nachvollziehbare Kriterien abzuleiten, die beispielsweise zur Beantwortung folgender Fragen herangezogen werden können:

- welche Klimaauswirkungen besonders auf die Komponenten der Wasserversorgung einwirken oder umgekehrt
- welche Komponenten der Wasserversorgung reagieren besonders „empfindlich“ auf geänderte Rahmenbedingungen und zukünftig zu erwartende zivilisatorische Einflüsse,
- wie verletzlich sind diese ohne Gegenmaßnahmen (Kap. 6.3) oder
- welche Chancen/Risiken (Kap. 6.4) resultieren hieraus für die Wasserwerke.

Die einzelnen Überlegungen bauen dabei aufeinander auf (**Tabelle 6.1**). Werden zusätzlich die denkbaren Anpassungsstrategien/Handlungsoptionen (Kap. 7) sowie die äußeren Rahmenbedingungen/Wandelprozesse mitberücksichtigt, lässt sich somit das System „Klimawandel - Trinkwasserversorgung“ zumindest ansatzweise im Sinne einer Gesamtbeurteilung durch „Muster mit Unschärfen“ charakterisieren (**Bild 6.2**).

Alle nachfolgenden Überlegungen und Ausführungen basieren dabei vorwiegend auf den bei *BMVBS (2011)*, *Brauch (2004)*, *BWV (2013)*, *DIN/ISO/EN 31000 (2011)*, *gfs (1993)*, *Haakh (2009a)*, *Haakh (2009b)*, *Haakh (2009c)*, *IPCC (2001)*, *IPCC (2007)*, *KlimaMoro (2011)*, *KlimaMoro (2013a)*, *KlimaMoro (2013b)*, *Mahammadzadeh (2013)*, *Mayer (2007)*, *UBA (2005a)*, *UBA (2005b)*, *UBA (2005c)*, *UBA (2012c)*, *UBA (2013)*, *Umweltamt Wien (2010)*, *Vester (2012)*, *Wang (2012)*, *Weis (2011)*, *www.clip.eu (2013)*, *www.klimalotse.anpassung.net (2013)*, *www.klima-scout.de (2013)* publizierten Anregungen und Denkansätzen.

Tabelle 6.1:
Systemanalyse – Gesamtüberblick

	Systemanalyse	Fragen	Ziele
Erkenntnisgewinn 	Betroffenheit	Welche Komponenten und Gesichtspunkte sind für das zu betrachtende System relevant?	Erarbeitung von Schlüsselkomponenten“, Systemgrenze definieren
	Exposition Sensitivität Vulnerabilität	Wie sind die einzelnen Komponenten miteinander „verknüpft“, welche Einwirkungen sind zu erwarten, wie empfindlich reagieren die einzelnen Komponenten auf Veränderungen, wie verletzlich sind die einzelnen Variablen?	Priorisierung, welche Systemkomponenten sind besonders auffällig und anfällig für Veränderungen, Zuordnung von Systemeigenschaften
	Risikomanagement	Mit welcher Eintrittswahrscheinlichkeit und mit welchem Schadensausmaß ist bei einer Änderung von Systemvariablen zu rechnen?	Ermittlung des Handlungsbedarfs bei einzelnen Systemkomponenten und dessen Dringlichkeit

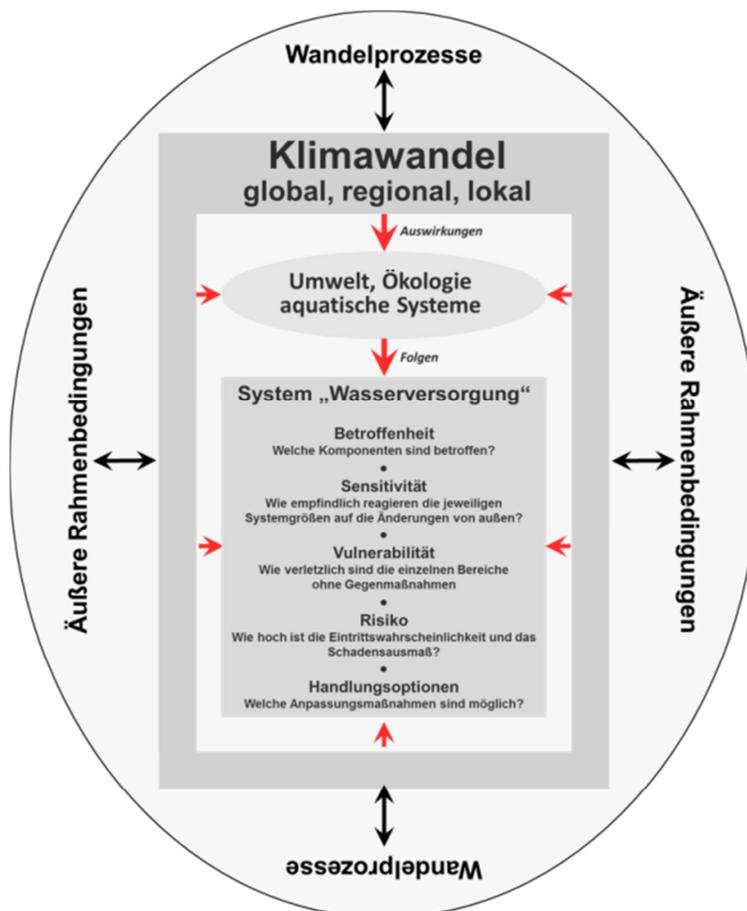


Bild 6.2:
**System „Klimawandel
 und Trinkwasserversor-
 gung“ einschließlich äu-
 ßerer „Rahmenbedingun-
 gen“ [Schick (2013b)]**

6.2 Allgemeine Überlegungen zum methodischen Vorgehen

Natürliche, wie auch vom Menschen beeinflusste Systeme sind dadurch gekennzeichnet, dass es selbst bei der Vielzahl an Einzelwissen und -informationen es bislang nicht einfach ist, deren Komplexität und funktionale Zusammenhänge ganzheitlich zu erfassen. Um die damit verbundenen, vielfach ineinandergreifenden Abläufe und Vorgänge von offenen und dynamischen Systemen zu begreifen, reichen isolierte Einzelbetrachtungen nicht aus. Es sind vielmehr pragmatische plausible und nachvollziehbare Lösungsansätze erforderlich, die auch umgesetzt werden können. Im Rahmen der vorliegenden Literaturstudie bot es sich bei den nachfolgenden Überlegungen zur Sensitivität, Exposition, Vulnerabilität und des Risikomanagements an, den bereits bei der Ermittlung der „Betroffenheit“ (Kap. 5) angewandten Ansatz des „vernetzten Denkens“ von Vester (2012) konsequent fortzuführen. Dabei ist es jedoch für die praktische Anwendbarkeit geboten, einen entsprechend „handhabbaren“ Detaillierungsgrad zu wählen und die Systemvariablen auf eine überschaubare Anzahl von maximal 30 Größen zu beschränken ohne entscheidende Grundaspekte zu vernachlässigen bzw. eine Über- bzw. Unterbewertung wesentlicher Systemgrößen vorzunehmen. Um dies gewährleisten zu können, ist eine rekursive, d.h. eine sich

mehrfach „selbst korrigierende“ Vorgehensweise anzuraten, indem die einzelnen Einflussgrößen immer wieder kritisch hinterfragt und ggf. sukzessiv überarbeitet werden. Als Ergebnis dieses Prozesses lassen sich schließlich in Form einer sogenannten „Einflussmatrix“ das Ausmaß und die Ausprägung der jeweiligen Interaktionen durch eine semiquantitative Beschreibung, d.h. durch die Vergabe von Bewertungsziffern von 0 (keine Einschätzung möglich) bis 3 (starke/hohe/überproportionale Abhängigkeit) abschätzen (**Bild 6.3**).

Annahmen, Szenarien, Projektionen Wirkung von ↓ auf →	Output Auswirkungen/Folgen für System			Aktivsumme „System“
Input Einwirkungen von „Variablen“	---	0	3	3
	0	---	2	2
	3	1	---	4
Passivsumme „Variable“	3	1	5	

Bild 6.3:
Ermittlung der „Ursachen-
Wirkungs-Beziehungen“ anhand
einer Einflussmatrix (Ausschnitt)
[in Anlehnung an Vester (2012)]

Bereits aus der resultierenden Aktivsumme (= Summe aller Bewertungskennzahlen in einer Zeile, Input) bzw. der Passivsumme (= Summe aller Bewertungskennzahlen in einer Spalte, Output) lassen sich erste Aussagen darüber ableiten, welche Input-Variablen in der Lage sind, auf die jeweiligen „output“-Schlüsselkomponenten einwirken bzw. welche Parameter durch „Störgrößen“ signifikant geändert werden können. Durch die Generierung weiterer Kennzahlen wie z.B. der Produktbildung aus der Aktivsumme mal Passivsumme bzw. der Ermittlung des Quotienten der Aktivsumme durch Passivsumme ist es möglich, die einzelnen Systemvariablen zusätzlich im Hinblick auf ihre Vulnerabilität zu charakterisieren. Während das Produkt die „treibenden, beschleunigenden, kritischen“ oder die „puffernden, stabilisierend wirkenden, nicht am System teilnehmenden“ Merkmale einer Variablen beschreiben, spiegelt der Quotient hingegen den „aktiven, agierenden, dominanten“ oder „reagierenden, reaktiven“ Charakter einer Variablen wider (**Bild 6.4**). In Abhängigkeit des jeweiligen Kennzahlenwertes ist somit eine Zuordnung der einzelnen Systemfaktoren zumindest tendenziell möglich.

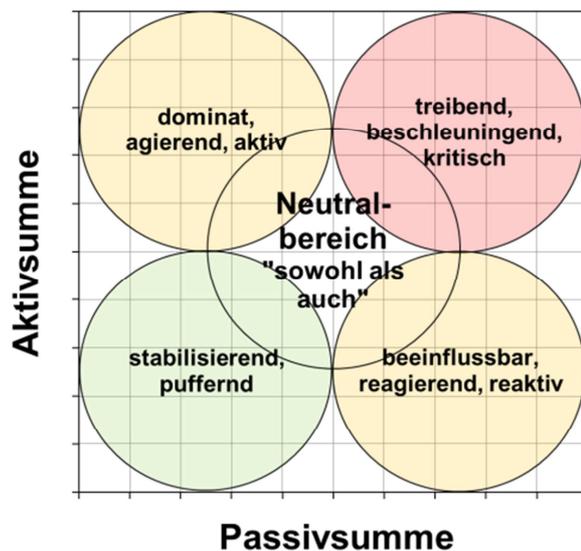


Bild 6.4:
Zuordnung von Variablen und deren Eigenschaften innerhalb eines Systems – Abschätzung von Trends, die Übergänge sind dabei „fließend“ [Vester (2012)]

Demzufolge ist bei der Beschreibung bzw. zur Beurteilung des Systems „Klimawandel - Trinkwasserversorgung“ darauf zu achten, von welcher „Seite“ bzw. von welchem „Blickwinkel“ aus die Betrachtung erfolgt. Um zu verdeutlichen, wie dies zu verstehen ist, wird auf das i.d.R. bekannte Beispiel des Kommunikationsmodells „Sender - Empfänger“ verwiesen (**Bild 6.5**). Dadurch kann anschaulich gezeigt werden, dass die jeweilige „Betrachtungsrichtung“ hinsichtlich der Beurteilung von Systemgrößen von besonderer Bedeutung ist.

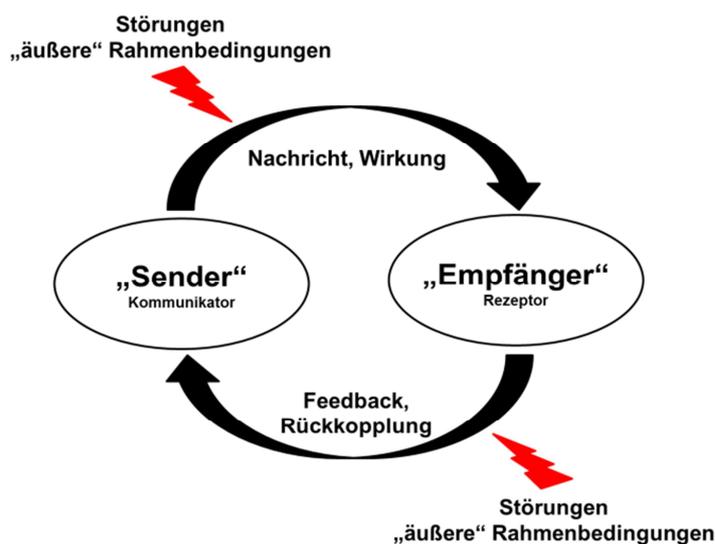


Bild 6.5:
Beispiel: Kommunikationsmodell „Sender - Empfänger“ [BWV (2013)]

6.3 Exposition-, Sensitivitäts- und Vulnerabilitätsabschätzung, dargestellt am Beispiel der Bodensee-Wasserversorgung

Die Auswirkungen des Klimawandels für Mensch und Umwelt sind bestimmt von drei Faktoren:

- der Ausprägung der Klima- und Wetterereignisse,
- dem Vorhandensein von Menschen oder Vermögenswerten in gefährdeten Bereichen (Exposition) und deren Empfindlichkeit (Sensitivität) sowie
- der Verletzlichkeit der Systeme, die z. B. von den sozio-ökonomischen Bedingungen abhängt (Vulnerabilität).

Im Hinblick auf die Bewertung von Auswirkungen und Folgen der Klimaveränderung rückte das „Exposition - Sensitivität - Vulnerabilität - Konzept“ in den letzten Jahren zunehmend in den Mittelpunkt der Klimaschutz- und -anpassungsstrategie [Umweltamt Wien (2010), KlimaMoro (2011)]. U.a. hat der Weltklimarat in seinen letzten beiden Sachstandsberichten 2001 und 2007 den Fokus stetig von einem auswirkungs-/folgenorientierten hin zu einem vulnerabilitätsbezogenen Bewertungsansatz verlagert. Derzeit gibt es jedoch noch keine einheitliche, d.h. allgemein akzeptierte Definition zu „Einwirkungen - Empfindlichkeit – Verletzlichkeit/Verwundbarkeit“, die für alle Anwendungszwecke gleichermaßen geeignet wäre. Im Sinne dieser Literaturstudie wurde daher auf folgende Definition zurückgegriffen:

Die **Vulnerabilität** definiert im vorliegenden Falle, inwieweit ein System für nachteilige Auswirkungen/Folgen der Klimaänderung einschließlich der Klimaschwankungen und Klimaextreme anfällig ist bzw. nicht fähig ist, diese zu bewältigen. Gemäß den Angaben des IPCC leitet sich die Verletzlichkeit aus der linearen Verknüpfung der Exposition und der Sensitivität des betroffenen Systems sowie deren Anpassungskapazität ab [IPCC (2007c)]. Im Gegensatz zu dieser Festlegung werden im vorliegenden Fall mögliche Handlungsoptionen/Anpassungsoptionen zunächst nicht mit einbezogen. Die **Exposition** bezieht sich dabei auf Klimaparameter (z.B. Temperatur, Niederschlag,...), mit denen die zeitliche Entwicklung charakterisiert werden kann (z.B. Mittelwerte, Extremwerte, Variabilität, Abweichung, Schwankungsbreite, ...). Die Exposition ist demnach das in der jeweiligen Region resultierende „Ausmaß“ des globalen Temperaturanstiegs. Durch eine abschätzende Beschreibung in Form von qualitativen Begriffen wird versucht, die zu erwartende „Gesamtheit aller Einwirkungen und deren Intensität/Stärke/Größe“ im Vergleich zu einem gegebenen Referenzzustand zu erfassen. Mit dem Begriff der **Sensitivität** wird hingegen die „Ausprägung“ charakterisiert, inwieweit Änderungen bei den Eingangsbedingungen ein Ergebnis direkt oder indirekt beeinflussen können, d.h. wie empfindlich einzelne Systemkomponenten beispielsweise auf „äußere Störgrößen“ reagieren. Die Systemveränderung kann dabei sowohl positive als auch negative Auswirkungen/Folgen haben. Exposition, Sensitivität und Vulnerabilität sind dynamische Größen. Sie sind regional und im zeitlichen Verlauf sehr unterschiedlich und von vielen Faktoren abhängig, u. a. von ökologischen, sozio-ökonomischen, demographischen, kulturellen, institutionellen und politischen Bedingungen.

Bei einer klassischen Sensitivitäts-/Expositionsanalyse wird i.d.R. die Bedeutung eines einzelnen Parameters innerhalb eines Systems dadurch beurteilt, dass die funktionalen Zusammenhänge modelltheoretisch durch mathematisch-numerische Algorithmen abgebildet, schrittweise die einzelnen „Input“-Größen variiert und die dabei

resultierenden Änderungen z.B. in Form von Sensitivitätsindexen ermittelt werden. Dies setzt jedoch voraus, dass die innerhalb des Systems ablaufenden Prozesse durch quantitative Modellansätze wirklichkeitstreu beschreibbar sind. Da - wie bereits mehrfach erwähnt - vor allem die projizierten Klimaentwicklungen mit großen Unsicherheiten behaftet sind, wurde im Rahmen der vorliegenden Literaturstudie von dieser Vorgehensweise Abstand genommen und eine allgemeine, qualitative/semi-quantitative Herangehensweise gewählt. Die Bewertung bzw. intuitive Charakterisierung der Sensitivität und Exposition basiert dabei neben der Auswertung von Literaturangaben vor allem auf den Einschätzungen von Mitarbeitern der Wasserversorgungsunternehmen und wasserwirtschaftlichen Institutionen gemäß der Klassifikation

- 0 = nach derzeitigem Wissensstand nicht einschätzbar/auswertbar
oder kein Einfluss
- 1 = wenig/gering/schwach
- 2 = mäßig/mittel
- 3 = hoch/stark/viel

Besonders ist bei der Anwendung der in Kap. 6.2 skizzierten Vorgehensweise darauf zu achten, dass die Argumentationen für jeden Betroffenen nachvollziehbar, klar formulierbar und plausibel sind. Mit einem solchen Ansatz lassen sich zwar keine „absolut und wissenschaftlich fundierten“ Aussagen erzielen, gleichwohl ergeben sich jedoch unter Berücksichtigung der „Betroffenheit“ (Kap. 5) in Form einer Gesamtübersicht erste orientierende Trends und Anhaltspunkte über die auffälligen und damit möglicherweise sensiblen Systemgrößen. Im Sinne einer „qualifizierten Schätzung“ reicht dies völlig aus, um für die planerische Praxis mit hinreichender Genauigkeit Kriterien abzuleiten, die die relevanten Ursache-Wirkungs-Beziehungen der „Schlüsselvariablen“ im System „Klimawandel - Trinkwasserversorgung“ charakterisieren.

Konkret kann im vorliegenden Fall zur Beschreibung der gegenseitigen Beeinflussungen der Auswirkungen der Klimaveränderung auf die Umwelt bzw. der Folgen auf die Wasserversorgung auf die in den Kapiteln 3 bis 5 erarbeiteten Zusammenhänge und Erkenntnisse zurückgegriffen werden. Als unabhängige bzw. abhängige Systemvariablen lassen sich dabei die in **Tabelle 6.2** zusammengefassten Schlüsselkomponenten ableiten. Die zusätzlich angegebenen „Indikatoren, Merkmale, Teilaspekte“ dienen der weiteren Präzisierung und detaillierteren Beschreibung.

Insgesamt wurden im vorliegenden Fall 23 Komponenten als systemrelevant eingestuft, die grob in die Kategorien

- klimabedingte Auswirkungen auf die Umwelt
- Folgen für die Wasserversorgung
- äußere Rahmenbedingungen

unterteilt werden können. Daraus lassen sich Einflussmatrizes zur halbquantitativen Erfassung der Exposition- und Sensitivität sowie der Vulnerabilität entwickeln (**Tabelle 6.3** bis **Tabelle 6.5**). Die Mittelwerte ($n = 3$) der daraus resultierenden Aktiv- und Passivsumme sind in **Tabelle 6.6** zusammengefasst.

Tabelle 6.2:
Unabhängige und abhängige Variable und relevante Schlüsselkomponenten im System
„Klimawandel - Trinkwasserversorgung am Beispiel des Bodensee“

	Nr.	Systemvariable Schlüsselkomponenten	Indikatoren, Merkmale, Stressfaktoren, Teilaspekte
Auswirkungen der Klimaänderung auf Umwelt	1	Einzugsgebiet Meteorologie	Lufttemperatur, Luftdruck, Wind, Sonnenschein, Strahlung
	2	Einzugsgebiet Hydrologie	Niederschlag, Gletscherschmelze, Auftauen von Permafrostgebieten, Schneebedeckung, Abflussregime Zuflüsse
	3	Einzugsgebiet Extremereignisse	Trockenheit, Niedrigwasser, Starkniederschläge, Hochwasser
	4	Trinkwasserversorgungsgebiet Meteorologie	Lufttemperatur, Wind, Sonnenschein, Strahlung
	5	Trinkwasserversorgungsgebiet Hydrologie	Grundwasserneubildung, Grundwasserbeschaffenheit, Abflussregime Fließgewässer
	6	Trinkwasserversorgungsgebiet Extremereignisse	Klimavariabilität (Häufigkeit, Intensität, Dauer), Trockenheit, Niedrigwasser, Starkniederschläge, Hochwasser
	7	Bodensee Wasserdargebot	Hydrologie Einzugsgebiet, Verdunstung, Wasserentnahme
	8	Bodensee Wasserstand	Langjähriger Verlauf, innerjährige Ganglinie, Verdunstung, Extremereignisse
	9	Bodensee Strömungen	Horizontaler und vertikaler Wasseraustausch und Stofftransport, Tiefenwassererneuerung, interne Wellen, Strömungen in der Flachwasser- und Uferzone, Strömungen am Seegrund
	10	Bodensee Einschichtung Zuflüsse	Thermokline, dichteabhängige Einschichtung
	11	Bodensee Schichtung/Zirkulation	Thermische Stabilität, Sauerstoffverteilung, physikalisch/chemische Vorgänge in Freiwasserzone, Remobilisierungsercheinungen in Sedimentnähe
	12	Bodensee Wasserbeschaffenheit	Wassertemperatur, thermische Nutzung Seewasser, Eintrag von partikulären Inhalts-, Nähr- und anthropogenen Spurenstoffen, Sauerstoff am Seegrund
	13	Bodensee Ökologie	Biogene Calcitfällung, Phyto- und Zooplankton, Neozoen
Folgen für Wasser-versorgungsunternehmen	14	Wassergewinnung	Wasserstand, Rohwasserbeschaffenheit, Fördermenge
	15	Wasseraufbereitung	Rohwasserbeschaffenheit, technische Aufbereitungsanlagen, Wasserdurchsatz
	16	Trinkwasserbeschaffenheit	Wasserbeschaffenheit Bodensee, Aufbereitungsstufen
	17	Trinkwasserbedarf/-abgabe	Trockenheit, Starkniederschläge, Grundwasserneubildung, Wandelprozesse, Grundlast, Spitzenbedarf
	18	Trinkwasserverteilung/-speicherung	Auswirkungen Meteorologie, Hydrologie und Extremereignisse im Einzugs- und Trinkwasserversorgungsgebiet, Wandelprozesse, Grundlast, Spitzenbedarf
	19	Energieversorgung	Technische Anlagen, Wassergewinnung, -aufbereitung, -verteilung/-speicherung, Datenverarbeitung, Kommunikation
	20	Personelle Aspekte	Wohlbefinden, Wetterfähigkeit, Gesundheitsrisiken, Einschleppen von Krankheitserregern, Unfälle durch Extremereignisse, Mortalität
	21	Ökonomie	Klimabedingte Mehrkosten (Investitionen/laufender Betrieb), Versicherungsschutz
äußere Rahmenbedingungen	22	Politischer Ordnungsrahmen	Europäische Vorgaben, nationale Gesetzgebung des Bundes, Landesvorgaben Baden-Württemberg, kommunale Interessen, Verbandspolitik, Technische Regeln
	23	Wandelprozesse	Demographischer Wandel, Verbraucherverhalten, industrielle/wirtschaftliche Entwicklungen, technologische Fortschritte/Innovation, Wasserbedarf in der Landwirtschaft, Schädigungsdruck, Preisentwicklungen

Tabelle 6.3:
Expositionsabschätzung im System „Klimawandel – Trinkwasserversorgung“ in Form einer Einflussmatrix, dargestellt am Beispiel des Beurteiler A

Frage: Sind durch den Einfluss/Einwirkung der jeweiligen „Input“-Größe („Sender, Treiber“) auf den entsprechenden „Output“-Rezeptor („Empfänger“) zukünftige Abweichungen (positiv oder negativ) im Vergleich zu dem heutigen „Referenzzustand“ zu erwarten und wenn ja, wie wird die damit verbundene „Intensität/Stärke/Größe/Schwankungsbreite/Varianz,...“ eingeschätzt

0 = keine Einschätzung möglich oder kein Einfluss, 1 = gering; 2 = mittel, 3 = hoch
 maximal mögliche Aktivsumme_{Exp}: 3 * 22 = 66; maximal mögliche Passivsumme_{Exp}: 3 * 22 = 66

Schlüsselkomponenten Wirkung von ↓ auf →		"Output"																							Aktivsumme
		1 Einzugsgebiet Meteorologie	2 Einzugsgebiet Hydrologie	3 Einzugsgebiet Extremereignisse	4 Versorgungsgebiet Meteorologie	5 Versorgungsgebiet Hydrologie	6 Versorgungsgebiet Extremereignisse	7 Bodensee Wasserdargebot	8 Bodensee Wasserstand	9 Bodensee Strömungen	10 Bodensee Einschichtung Zuflüsse	11 Bodensee Schichtung/Zirkulation	12 Bodensee Wasserbeschaffenheit	13 Bodensee Ökologie	14 Wassergewinnung	15 Wasseraufbereitung	16 Trinkwasserbeschaffenheit	17 Trinkwasserbedarf/-abgabe	18 Trinkwasserverteilung/-speicherung	19 Energieversorgung	20 Personelle Aspekte	21 Ökonomie	22 Politischer Ordnungsrahmen	23 äußere Wandelprozesse	
"Input"	1 Einzugsgebiet Meteorologie		1	3	0	0	2	0	0	0	0	3	1	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	13
	2 Einzugsgebiet Hydrologie	1		3	0	0	3	0	3	2	3	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18
	3 Einzugsgebiet Extremereignisse	3	3		2	3	2	0	3	3	3	2	2	1	2	1	0	0	0	1	0	2	0	0	33
	4 Versorgungsgebiet Meteorologie	0	0	1		1	3	0	0	0	0	2	0	0	0	0	3	3	1	2	0	0	0	0	16
	5 Versorgungsgebiet Hydrologie	0	0	0	1		3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	10
	6 Versorgungsgebiet Extremereignisse	0	0	1	3	3		0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	2	2	0	0	0	20
	7 Bodensee Wasserdargebot	0	0	0	0	0	0		1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	5
	8 Bodensee Wasserstand	0	0	0	0	0	0	0		1	0	1	0	0	2	1	0	0	0	1	0	1	0	2	9
	9 Bodensee Strömungen	0	0	0	0	0	0	0	0		3	3	3	2	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	16
	10 Bodensee Einschichtung Zuflüsse	0	0	0	0	0	0	0	0	0		3	3	2	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	12
	11 Bodensee Schichtung/Zirkulation	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3		3	3	1	3	1	0	0	0	0	0	0	0	17
	12 Bodensee Wasserbeschaffenheit	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	3		2	1	3	3	2	1	1	0	0	1	3	24
	13 Bodensee Ökologie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3		2	1	1	1	0	0	0	0	0	1	9
	14 Wassergewinnung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		3	3	3	3	3	3	3	1	1	23
	15 Wasseraufbereitung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		3	3	3	3	3	3	0	1	19
	16 Trinkwasserbeschaffenheit	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		3	3	3	3	3	0	2	12
	17 Trinkwasserbedarf/-abgabe	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3		3	3	3	3	0	3	18
	18 Trinkwasserverteilung/-speicherung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	3	2		3	3	2	0	1	20
	19 Energieversorgung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3		3	3	3	3	27
	20 Personelle Aspekte	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3		2	0	0	20
	21 Ökonomie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	1	1	1	2	1	1	1		1	1	14
	22 Politischer Ordnungsrahmen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	32
	23 äußere Wandelprozesse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	33
Passivsumme	4	4	8	6	7	13	0	7	10	15	18	24	22	28	30	32	35	34	31	30	31	9	22		

Tabelle 6.4:
Sensitivitätsabschätzung im System „Klimawandel – Trinkwasserversorgung“ in Form einer Einflussmatrix, dargestellt am Beispiel des Beurteiler A

Frage: Können bereits kleinste Änderungen der jeweiligen „Input“-Größe („Sender, Treiber“) den entsprechenden „Output“-Rezeptor („Empfänger“) beeinflussen und wenn ja, wie wird die damit verbundene „Empfindlichkeit“ eingestuft

0 = keine Einschätzung möglich oder kein Einfluss, 1 = gering; 2 = mittel, 3 = hoch

maximal mögliche Aktivsumme_{Sen}: 3 * 22 = 66; maximal mögliche Passivsumme_{Sen}: 3 * 22 = 66

Schlüsselkomponenten Wirkung von ↓ auf →		"Output"																							Aktivsumme	
		1 Einzugsgebiet Meteorologie	2 Einzugsgebiet Hydrologie	3 Einzugsgebiet Extremereignisse	4 Versorgungsgebiet Meteorologie	5 Versorgungsgebiet Hydrologie	6 Versorgungsgebiet Extremereignisse	7 Bodensee Wasserdargebot	8 Bodensee Wasserstand	9 Bodensee Strömungen	10 Bodensee Einschlachtung Zuflüsse	11 Bodensee Schichtung/Zirkulation	12 Bodensee Wasserbeschaffenheit	13 Bodensee Ökologie	14 Wassergewinnung	15 Wasseraufbereitung	16 Trinkwasserbeschaffenheit	17 Trinkwasserbedarf/-abgabe	18 Trinkwasserverteilung/-speicherung	19 Energieversorgung	20 Personelle Aspekte	21 Ökonomie	22 Politischer Ordnungsrahmen	23 äußere Wandelprozesse		
"Input"	1 Einzugsgebiet Meteorologie	0	1	3	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	11
	2 Einzugsgebiet Hydrologie	0	0	3	0	1	0	1	3	3	3	3	3	1	2	1	1	0	0	1	1	1	0	1	29	
	3 Einzugsgebiet Extremereignisse	3	3	0	1	1	1	1	3	3	3	3	3	1	3	3	1	2	0	1	1	3	0	1	41	
	4 Versorgungsgebiet Meteorologie	2	1	1	0	2	2	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	3	3	1	1	1	0	1	20	
	5 Versorgungsgebiet Hydrologie	0	0	1	1	0	3	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	3	3	1	1	1	0	1	17	
	6 Versorgungsgebiet Extremereignisse	1	3	1	3	3	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	3	3	1	1	3	0	1	26	
	7 Bodensee Wasserdargebot	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	
	8 Bodensee Wasserstand	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0	2	0	1	10	
	9 Bodensee Strömungen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	3	1	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	12	
	10 Bodensee Einschlachtung Zuflüsse	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	1	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	11	
	11 Bodensee Schichtung/Zirkulation	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	3	1	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	15	
	12 Bodensee Wasserbeschaffenheit	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	3	3	3	1	0	0	0	0	0	0	2	15	
	13 Bodensee Ökologie	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	3	1	1	0	0	0	2	0	2	16	
	14 Wassergewinnung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	1	3	1	3	2	3	0	1	17
	15 Wasseraufbereitung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3	3	3	2	2	3	0	1	18	
	16 Trinkwasserbeschaffenheit	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3	3	1	2	3	3	2	18	
	17 Trinkwasserbedarf/-abgabe	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	0	3	3	3	3	3	2	26	
	18 Trinkwasserverteilung/-speicherung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	3	3	0	3	2	3	0	2	20	
	19 Energieversorgung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	0	2	3	1	3	24	
	20 Personelle Aspekte	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	3	3	3	1	0	3	1	0	18	
	21 Ökonomie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	2	3	3	3	0	1	3	0	23	
	22 Politischer Ordnungsrahmen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	3	2	3	2	3	0	3	22	
	23 äußere Wandelprozesse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	3	2	3	3	3	3	3	3	0	28	
Passivsumme	6	9	9	6	8	6	4	11	19	13	9	18	11	39	34	30	39	33	27	28	40	12	29			

Tabelle 6.5:
Vulnerabilitätsabschätzung im System „Klimawandel - Trinkwasserversorgung“ in Form einer Einflussmatrix, dargestellt am Beispiel des Beurteilers A

Die Verletzlichkeit der jeweiligen Systemkomponenten ergibt sich aus der linearen Verknüpfung der entsprechenden Exposition und Sensitivität

Maximal mögliche Aktivsumme_{Var} = 3*3*22 = 198

Maximal mögliche Passivsumme_{Var} = 3*3*22 = 198

Vulnerabilität																								
Schlüsselkomponenten Wirkung von ↓ auf →	"Output"																							
	1 Einzugsgebiet Meteorologie	2 Einzugsgebiet Hydrologie	3 Einzugsgebiet Extremereignisse	4 Versorgungsgebiet Meteorologie	5 Versorgungsgebiet Hydrologie	6 Versorgungsgebiet Extremereignisse	7 Bodensee Wasserdargebot	8 Bodensee Wasserstand	9 Bodensee Strömungen	10 Bodensee Einschichtung Zuflüsse	11 Bodensee Schichtung/Zirkulation	12 Bodensee Wasserbeschaffenheit	13 Bodensee Ökologie	14 Wassergewinnung	15 Wasseraufbereitung	16 Trinkwasserbeschaffenheit	17 Trinkwasserbedarf/-abgabe	18 Trinkwasserverteilung/-speicherung	19 Energieversorgung	20 Personelle Aspekte	21 Ökonomie	22 Politischer Ordnungsrahmen	23 äußere Wandelprozesse	Aktivsumme
1 Einzugsgebiet Meteorologie	0	1	9	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	15
2 Einzugsgebiet Hydrologie	0	0	9	0	0	0	1	9	6	9	3	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	41
3 Einzugsgebiet Extremereignisse	9	9	0	2	3	2	1	9	9	9	6	6	1	6	3	0	0	0	1	0	6	0	0	82
4 Versorgungsgebiet Meteorologie	0	0	1	0	2	6	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	9	9	1	2	0	0	0	32
5 Versorgungsgebiet Hydrologie	0	0	0	1	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	9	0	0	0	0	0	0	28
6 Versorgungsgebiet Extremereignisse	0	0	1	9	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	9	3	2	6	0	0	0	48
7 Bodensee Wasserdargebot	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2
8 Bodensee Wasserstand	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	2	0	2	0	11
9 Bodensee Strömungen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	9	2	9	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	27
10 Bodensee Einschichtung Zuflüsse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	2	4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	17
11 Bodensee Schichtung/Zirkulation	0	0	0	0	0	0	0	9	9	0	9	3	3	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	37
12 Bodensee Wasserbeschaffenheit	0	0	0	0	0	0	0	2	3	0	0	6	3	9	3	0	0	0	0	0	0	0	3	29
13 Bodensee Ökologie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	6	3	1	1	0	0	0	0	0	0	1	21
14 Wassergewinnung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	3	9	3	9	6	9	0	1	49
15 Wasseraufbereitung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	9	9	6	6	9	0	1	49
16 Trinkwasserbeschaffenheit	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	6	1	6	9	0	2	27
17 Trinkwasserbedarf/-abgabe	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	9	9	9	9	9	0	6	51
18 Trinkwasserverteilung/-speicherung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	9	6	0	6	6	6	0	2	0	46
19 Energieversorgung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	9	9	9	9	0	6	9	3	6	0	69
20 Personelle Aspekte	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	9	9	9	9	3	0	6	0	0	0	48
21 Ökonomie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	2	6	3	3	0	0	1	3	0	26
22 Politischer Ordnungsrahmen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	6	9	9	6	9	4	9	0	6	0	61
23 äußere Wandelprozesse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	9	6	4	9	9	9	1	1	9	0	0	58
Passivsumme	9	10	20	12	14	17	3	19	27	30	17	45	16	67	65	70	97	90	63	55	81	13	34	

Tabelle 6.6:**Mittelwerte der Aktiv- und Passivsumme der Vulnerabilität, Beurteiler A bis C**Maximal mögliche Aktivsumme_{Var} = 3*3*22 = 198Maximal mögliche Passivsumme_{Var} = 3*3*22 = 198

Aktivsumme					Passivsumme				
	Vulnerabilität					Vulnerabilität			
	Beurteiler A	Beurteiler B	Beurteiler C	Mittelwert		Beurteiler A	Beurteiler B	Beurteiler C	Mittelwert
Einzugsgebiet Meteorologie	15	52	8	25,0	Einzugsgebiet Meteorologie	9	2	0	3,7
Einzugsgebiet Hydrologie	41	31	21	31,0	Einzugsgebiet Hydrologie	10	12	0	7,3
Einzugsgebiet Extremereignisse	82	63	52	65,7	Einzugsgebiet Extremereignisse	20	11	0	10,3
Versorgungsgebiet Meteorologie	32	28	8	22,7	Versorgungsgebiet Meteorologie	12	1	0	4,3
Versorgungsgebiet Hydrologie	28	15	6	16,3	Versorgungsgebiet Hydrologie	14	11	0	8,3
Versorgungsgebiet Extremereignisse	48	40	21	36,3	Versorgungsgebiet Extremereignisse	17	11	0	9,3
Bodensee Wasserdargebot	2	7	0	3,0	Bodensee Wasserdargebot	3	3	3	3,0
Bodensee Wasserstand	11	14	3	9,3	Bodensee Wasserstand	19	12	17	16,0
Bodensee Strömungen	27	16	9	17,3	Bodensee Strömungen	27	16	20	21,0
Bodensee Einschichtung Zuflüsse	17	10	7	11,3	Bodensee Einschichtung Zuflüsse	30	16	19	21,7
Bodensee Schichtung/Zirkulation	37	18	18	24,3	Bodensee Schichtung/Zirkulation	17	21	14	17,3
Bodensee Wasserbeschaffenheit	32	11	20	21,0	Bodensee Wasserbeschaffenheit	45	21	20	28,7
Bodensee Ökologie	22	5	4	10,3	Bodensee Ökologie	21	22	8	17,0
Wassergewinnung	49	11	16	25,3	Wassergewinnung	67	46	45	52,7
Wasseraufbereitung	49	18	19	28,7	Wasseraufbereitung	68	42	74	61,3
Trinkwasserbeschaffenheit	29	14	3	15,3	Trinkwasserbeschaffenheit	72	21	49	47,3
Trinkwasserbedarf/-abgabe	51	28	21	33,3	Trinkwasserbedarf/-abgabe	97	31	50	59,3
Trinkwasserverteilung/-speicherung	46	8	14	22,7	Trinkwasserverteilung/-speicherung	90	28	42	53,3
Energieversorgung	72	39	52	54,3	Energieversorgung	63	49	24	45,3
Personelle Aspekte	48	6	33	29,0	Personelle Aspekte	63	27	21	37,0
Ökonomie	26	20	23	23,0	Ökonomie	89	48	22	53,0
Politischer Ordnungsrahmen	64	25	50	46,3	Politischer Ordnungsrahmen	13	33	8	18,0
äußere Wandelprozesse	84	11	36	43,7	äußere Wandelprozesse	46	6	8	20,0

Wie bereits aus der Aktiv- bzw. Passivsumme der jeweiligen Variablen zu erkennen ist, reagieren die einzelnen Bereiche der Trinkwasserversorgung in unterschiedlicher Art und Weise auf die klimabedingten Veränderungen bzw. werden durch diese beeinflusst (**Bild 6.6**).

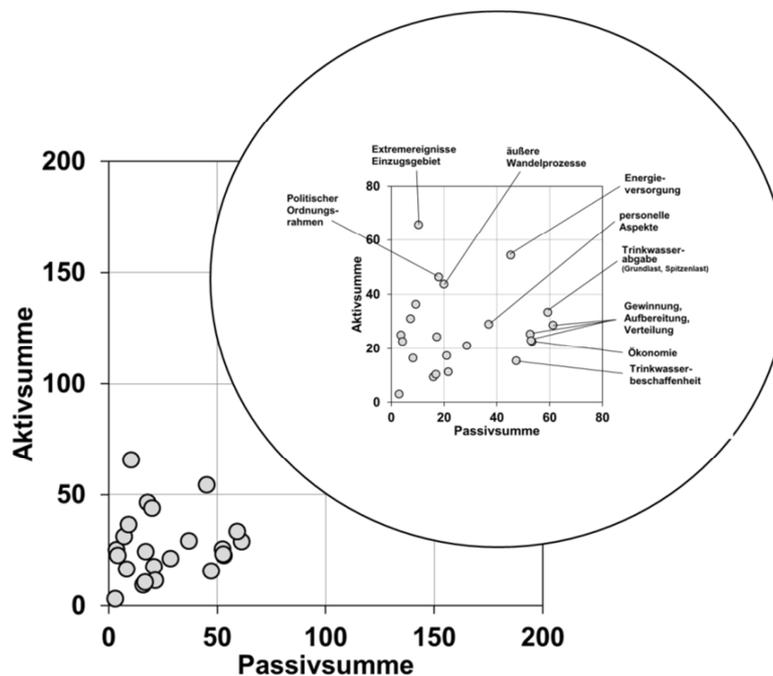


Bild 6.6:

Gesamtüberblick „Aktivsumme - Passivsumme“

Eine beurteilende Zuordnung der Eigenschaften der einzelnen Systemkomponenten (vergrößerter Ausschnitt) erfolgte gemäß den Angaben in Kap. 6.2

Maximal mögliche Aktivsumme_{Var} = 3*3*22 = 198

Maximal mögliche Passivsumme_{Var} = 3*3*22 = 198

U.a. zeigen die Auswertungen, dass alle Schlüsselkomponenten der Wasserversorgung von dem Klimawandel in nicht allzu hohem Maße (alle Werte < 100) betroffen sind. Bezogen auf die „Aktivseite“ ist davon auszugehen, dass vor allem die klimabedingten „Treiber“ wie Extremereignisse aber auch die „äußeren“ Rahmenbedingungen (z.B. politischer Ordnungsrahmen, Wandelprozesse) hierbei auf die nutzungsspezifischen Aspekte der Wasserversorgung im Sinne der Vulnerabilität einwirken. Dies bedeutet, dass selbst bei kleinsten Änderungen der o.g. „input“-Größen spürbare Reaktionen innerhalb des Systems „Wasserversorgung“ nicht auszuschließen sind. Umgekehrt ist auf der „Passivseite“, d.h. bei den abhängigen Variablen („Empfängern“) vor allem bei der Energieversorgung, der Versorgungssicherheit (Gewinnung, Aufbereitung, Verteilung/Speicherung, Trinkwasserabgabe), Fragen zur Wasserbeschaffenheit sowie den personellen und finanziellen Aspekten Aufmerksamkeit geboten.

Die Produktbildung aus „Aktivsumme mal Passivsumme“ (**Bild 6.7**) bestätigt diese Einschätzung.

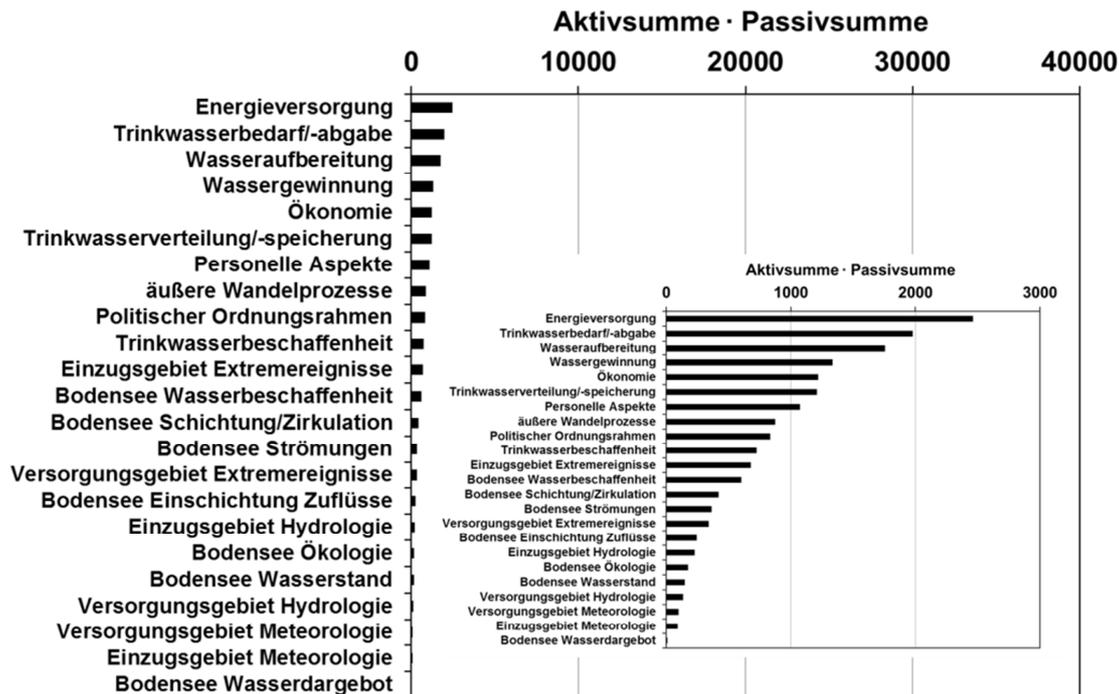


Bild 6.7:

Priorisierung der einzelnen Komponenten des Systems „Klimawandel – Trinkwasserversorgung“ hinsichtlich ihrer Vulnerabilität

Abschätzung der Vulnerabilität - je größer der Wert ist, desto „auffälliger“ ist die betreffende Komponente innerhalb des Systems (maximal mögliche Punkteanzahl: $198 \cdot 198 = 39.204$).

Insgesamt zeigt sich, dass zwar ein Einfluss des Klimawandels auf die Wasserversorgung zu erkennen ist, es aber angesichts der geringen Kennwerten < 2.500 keine Hinweise bislang vorliegen, die auf äußerst kritische Systemzustände deuten. Alle Variablen sind weitgehend als „puffernd, stabilisierend wirkend“ zu bezeichnen.

Auch hier resultieren sowohl bei den Folgen für die Trinkwasserversorgung als auch bei den Auswirkungen des Klimawandels auf die Umwelt lediglich Punktezahlen von etwa 2.500 von maximal 39.204 möglichen. Demzufolge können alle Systemvariablen weitgehend durch die Begriffe „puffernd, stabilisierend wirkend“ charakterisiert werden.

Wie anhand der „Prioritätenliste“ abgeleitet werden kann, ist gemäß den gewählten Kategorien deutlich ein Verteilungsmuster im Hinblick auf die „Beteiligung“ der jeweiligen Variablen am Systemgeschehen zu erkennen. Hierbei weisen die nutzungsspezifischen Aspekte der Wasserversorgung („Empfänger“) im Vergleich zu den umweltbedingten Auswirkungen des Klimawandels („Treiber, Sender“) verhältnismäßig hohe Werte auf. Ursache hierfür sind vorwiegend die „Gesamtheit aller Einwirkungen“ sowie die jeweils zu berücksichtigenden „Rückkopplungseffekte“. Entsprechend den gewonnenen Erkenntnissen reagieren vor allem die zukünftige Energieversorgung, die Trinkwasserabgabe (Grundlast/Spitzenlast) und die Komponenten der Wasser-

gewinnung und -aufbereitung am auffälligsten gegenüber den klimabedingten Veränderungen. In der zweiten Gruppe sind im Hinblick auf die Vulnerabilität die Ökonomie, die personellen Aspekte sowie die Wandelprozesse, der politische Ordnungsrahmen sowie die Trinkwasserverteilung/-speicherung und die Trinkwasserbeschaffenheit betroffen. Im Zusammenhang mit den Auswirkungen der Klimaveränderung auf die Umwelt resultierten dagegen i.d.R. Werte von < 1000 . Die geringe Punktzahl ist dabei vor allem der Tatsache geschuldet, dass im Rahmen einer auf die Wasserversorgung ausgerichteten Gesamtbetrachtung sich die ausgewählten technischen und sozio-ökonomischen Systemvariablen nur bedingt im Sinne einer Rückkopplung auf die hydrodynamischen und meteorologischen Verhältnisse im Einzugs- und Versorgungsgebiet bzw. auf die ökologischen und hydrologischen Wechselwirkungen im Bodensee auswirken. Bei der Aggregation, d.h. im Rahmen der Summen- und Produktbildung, spielt neben den Bewertungsziffern (0 bis 3) insbesondere die „Anzahl“ der gegenseitig sich beeinflussenden Faktoren eine bedeutende Rolle. Wie oben skizziert ist auch in der dritten Kategorie somit ein Verteilungsmuster dahingehend zu erkennen, dass insbesondere die extremen Wetterbedingungen sowie die Einschichtungsvorgänge der Zuflüsse eher einen Einfluss auf die Trinkwasserversorgung ausüben als die Ökologie des Bodensees sowie die klimabedingten Veränderungen im Einzugs- und Versorgungsgebiet. Das Wasserdargebot weist die geringste Vulnerabilität gegenüber dem Klimawandel auf.

Insgesamt konnten somit durch die Überlegungen zur Vulnerabilität die wesentlichen „Akteure“, die klimatischen Einflussfaktoren sowie die spezifischen Besonderheiten der Wasserversorgungsunternehmen am Bodensee benannt, priorisiert und zumindest teilweise charakterisiert werden. Bislang sind hieraus keine kritischen Systemzustände abzuleiten. Um darüber hinaus auch Aussagen zur Erarbeitung von Vorsorgemaßnahmen und deren Dringlichkeit machen zu können, bedarf es jedoch der zusätzlichen Durchführung eines sogenannten „Risikomanagements“. Mit den dabei zu berücksichtigenden Aspekten befasst sich das nachfolgende Kapitel.

6.4 Präventives Risikomanagement

Vor allem das rasante Wachstum der Weltbevölkerung, die Verknappung von Rohstoffen und der immer deutlich spürbar werdende Klimawandel stellen uns alle vor große Herausforderungen. Um den Blick für die zu erwartenden Entwicklungen zu öffnen, bedarf es daher zunehmend prozessbehafteter Gesamtbetrachtungen, mit denen flexible und angemessene Antworten auf die zu erwartenden Veränderungen und Unsicherheiten aufgezeigt werden können. Eine der zentralen Aufgaben von staatlichen Institutionen/Kommunen im Allgemeinen und von Wasserversorgungsunternehmen im Besonderen besteht somit darin, neben der frühzeitigen Erfassung und Wahrnehmung zukünftiger Trends vor allem die damit verbundenen Chancen zu nutzen und Risiken zu umgehen sowie nachhaltige/längerfristige Perspektiven und Strategien für die Zukunft zu entwickeln. Aufbauend auf den Vulnerabilitätsüberlegungen

bietet es sich somit an, auch die zu erwartenden „Chancen/Risiken“ mit in den Entscheidungsprozess einzubeziehen.

Im erweiterten Sinne eines präventiven Risikomanagements werden hierbei das jeweils resultierende Maß für den statistischen Erwartungswert (Eintrittswahrscheinlichkeit) eines personellen, materiellen oder finanziellen Schadens und dessen „Schwere“ für einen ausgewählten Zeitraum identifiziert, analysiert, bewertet, minimiert und überwacht (**Bild 6.8**). Ziel dabei ist es, Kriterien zu erarbeiten, die den erforderlichen Handlungsbedarf von vorsorgenden Maßnahmen zur Risikoverringerung und deren Dringlichkeit aufzuzeigen [Wang (2012), DIN/ISO/EN 31000 (2011), gfs (1993), Brauch (2004), Mayer (2007)].

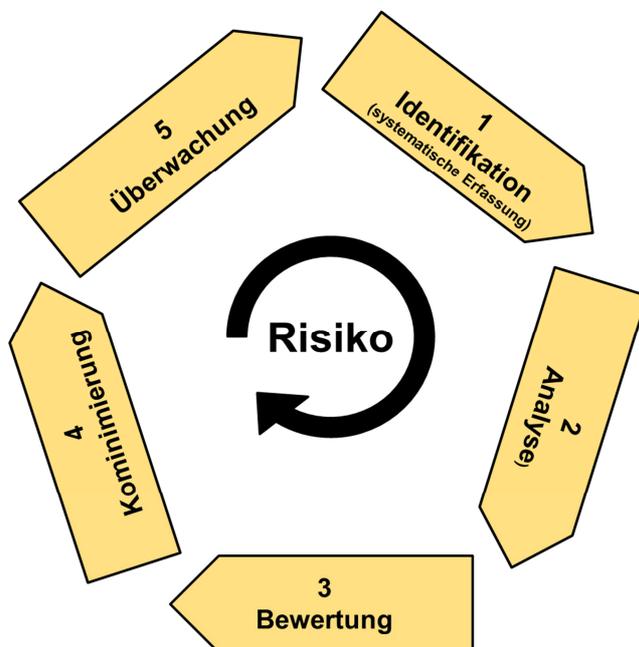


Bild 6.8:
Prozesszyklus Risikomanagement:
„Identifikation, Analyse, Bewertung,
Minimierung und Überwachung“
[BWV (2013)]

Nach dem klassischen Ansatz wird als „Risiko“ das Produkt aus „Eintrittswahrscheinlichkeit“ und „Schadensausmaß“ definiert. Somit grenzt sich das Risiko von den Begriffen der „Gefahr“ und „Unwissenheit“ dahingehend ab, dass

- bei einer „Gefahr“ ein nicht beeinflusster Ablauf oder Verhalten mit hinreichender/hohere Wahrscheinlichkeit zu einem Schaden mit ausreichend bekannten Auswirkungen führt und
- bei der „Unwissenheit“ weder der statistische Erwartungswert noch die Schadensschwere bzw. -umfang charakterisierbar sind.

Analog der in Kap. 6.2 erörterten Vorgehensweise können somit die Risiken ebenfalls in einer zweidimensionalen Matrix erfasst werden. Um die Risikoanalyse möglichst objektiv durchzuführen, sind neben den Unwägbarkeiten des Klimawandels darüber hinaus noch einige psychologische Aspekte zu berücksichtigen [UBA (2013), *www.klimalotse.anpassung.net* (2013), UBA (2012c)]:

- Menschen überschätzen häufig jene Risiken, denen persönliche Erfahrungen zugrunde liegen
- Menschen ignorieren Informationen, die mit ihrem „Abbild der Wirklichkeit“ nicht übereinstimmen
- Menschen neigen dazu, sich selbst für weniger gefährdet zu halten als vergleichbare Personen
- Menschen vernachlässigen oft langfristige Folgen und Auswirkungen, die keine hohe Dringlichkeit besitzen.

In der Regel werden daher zur Einschätzung der Risiken und deren zeitlicher und räumlicher Dimensionen vielfach nur qualitative Skalen im Sinne einer „qualifizierten Schätzung“ (0 = nicht abschätzbar, 1 = geringes Risiko, 2 = mittleres Risiko, 3 = hohes Risiko) verwendet. Auch wird -wie bei der Erfassung der Vulnerabilität- empfohlen, mehrstufig und selbstreflektierend unter Nutzung von Expertenwissen und Literaturangaben vorzugehen. Um die klimabedingten Risiken, denen die Wasserversorgung ausgesetzt ist, im einzelnen abschätzen zu können, ist es außerdem sinnvoll, bei den relevanten „aktiven/unabhängigen“ bzw. „passiven/abhängigen“ Systemgrößen den Detaillierungsgrad zu erhöhen. Hierzu werden die „Schlüsselkomponenten“ jeweils um ausgewählte „Indikatoren/Merkmale/Teilaspekte“ erweitert, ohne dabei den Gesamtüberblick zu verlieren.

Unter diesen Voraussetzungen ergaben sich für den betrachteten Zeithorizont bis 2050 für die Seewasserwerke am Bodensee die in **Tabelle 6.7** bis **Tabelle 6.8** zusammengefassten Schadensausmaße bzw. Eintrittswahrscheinlichkeiten. Unterteilt in die einzelnen Systemvariablen sind die daraus resultierenden Risiken in **Tabelle 6.9** (Beispiel: Einzelbewertung) und **Tabelle 6.10** (Mittelwertbildung) bzw. **Bild 6.9** und **Bild 6.10** dargestellt.

Tabelle 6.7:
Abschätzung des Schadensausmaßes (personell, materiell, finanziell, Image), dargestellt am Beispiel des Beurteilers A

Frage: Sind durch den Einfluss/Einwirkung der jeweiligen „Input“-Größe Schädigungen (personell, materiell, finanziell, öffentlichkeitswirksam) bei den entsprechenden „Output“-Rezeptoren („Empfänger“) in dem betrachteten Zeithorizont bis 2050 zu erwarten und wenn ja, wie hoch wird das Ausmaß oder die „Schwere“ eingeschätzt (0 = keine Einschätzung möglich oder kein Einfluss, 1 = gering; 2 = mittel, 3 = hoch), Maximal möglicher Index „Schadensausmaß“ = 3*45 = 135

Indikatoren, Merkmale, Teilaspekte		Schadensausmaß															Index "Input"		
		"Output"										Energie	Personal	Ökonomie					
		Wasser- dargebot	Trinkwas- serabgabe	Beschaf- fenheit	Ge- winnung	Auf- bereitung	Ver- teilung	Wasser- durchsatz	technische Aufbereitungs- gestufen	Schleusen/Schäden Hochbauten	Schleusen/Schäden Verteilernetz				Stromausfall	Wohlfühlindex Mitarbeiter		Gesundheit Mitarbeiter	Mehrkosten Investitionen
Wasservolumen Bodensee	Durchfluss Bodensee	Grundlast	Spitzenlast	Trinkwasser Ausgang Wasserwerk	Trinkwasser Verteilung	Vordruck Bodensee	Fördermenge Bodensee	Wasserdurchsatz	technische Aufbereitungs- gestufen	Schleusen/Schäden Hochbauten	Schleusen/Schäden Verteilernetz	Stromausfall	Wohlfühlindex Mitarbeiter	Gesundheit Mitarbeiter	Mehrkosten Investitionen	Mehrkosten Betrieb			
Meteorologie	Temperatur, Jahresmittel	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	1
	Temperatur, Sommerhalbjahr	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	0	1
	Temperatur, Winterhalbjahr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0
	Sommertageheiße Tage (Temp. > 30°C)	0	0	1	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0
	Tropennächte (Temp. > 20°C)	0	0	1	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	3	2	0	0	0
	Frost-/Eistage (Temp. < 0°C)	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	2	2	1	1	2	2	1	1
	Schneebedeckung Versorgungsgebiet	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Hydrologie	Auftauen Permafrost Gletscherschmelze, Alpenrordseite	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	Niederschlagsmenge Einzugs- und Versorgungsgebiet, Jahresmittel	1	1	1	2	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Niederschlagsmenge Einzugs- und Versorgungsgebiet, Sommerhalbjahr	1	1	1	2	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Niederschlagsmenge Einzugs- und Versorgungsgebiet, Winterhalbjahr	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Zufluss Bodensee, Jahresmittel	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Zufluss Bodensee Sommerhalbjahr	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Zufluss Bodensee Winterhalbjahr	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Verdunstung, Jahresmittel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Grundwasserneubildung Versorgungsgebiet, Jahresmittel	0	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Klimavariabilität (Häufigkeit, Intensität, Dauer)	1	1	0	2	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1
Extreme Ereignisse	extreme Trockenheit, Einzugs- und Trinkwasserversorgungsgebiet	1	1	2	3	1	1	2	2	1	1	1	2	2	1	2	1	0	1
	Extremniederschläge, Einzugs- und Trinkwasserversorgungsgebiet	1	1	1	3	2	1	1	1	1	1	1	2	2	3	1	1	2	1
	Extremwindereignisse Einzugs- und Versorgungsgebiet	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	2	3	0	0	2	1
	extreme Niedrigwasserstände Bodensee	0	0	1	3	0	0	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	extreme Hochwasserstände Bodensee	0	0	1	2	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	1
	"Input" Strömungen, Stofftransport	Einschichtung Zuflüsse	0	0	0	0	1	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
vertikaler Stofftransport		0	0	0	0	3	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1
thermische Schichtung		0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Tiefenwassererneuerung, Zirkulation		0	0	0	0	2	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Beschaffenheit Rohwasser	Konzentration partikuläre Inhaltsstoffe, Tiefenwasser	0	0	0	0	1	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	1
	Konzentration Nährstoffe, Tiefenwasser	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
	Konzentration Schwermetalle, Tiefenwasser	0	0	0	0	1	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	1
	Konzentration Sauerstoff, Tiefenwasser	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Konzentration anthropogene Spurenstoffe, Tiefenwasser	0	0	0	0	2	2	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	1	2
	Konzentration Geruch- und Geschmacksstoffe, Tiefenwasser	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
	Konzentration Mikroorganismen, Tiefenwasser	0	0	0	0	2	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	2
	Ökologie	Eintrag von Neophyten	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
Eintrag von Neozoen		0	0	1	2	0	0	3	3	0	1	1	0	0	0	0	0	2	2
äußere Rahmenbedingungen	temperaturabhängige Prozesse im See	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Europäische, nationale Gesetzgebung, Landesvorgaben Baden-Württemberg	0	0	2	2	1	1	0	0	2	2	0	0	2	2	0	0	2	2
	Verbandspolitik, kommunale Interessen	0	0	2	2	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1
	Technische Regeln	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1
	Demographischer Wandel	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Verbraucherverhalten	0	0	2	2	1	1	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	industrielle/wirtschaftliche Entwicklungen	0	0	2	2	0	0	0	1	1	0	0	0	2	2	0	0	1	1
	technologische Fortschritte/Innovationen	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	konkurrierende Wassernutzungen, z.B. Wasserverbrauch Landwirtschaft	0	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Preisentwicklung insgesamt	0	0	2	2	0	0	0	2	2	1	1	1	1	1	1	0	2	2	
Index "Output"	10	10	29	42	25	25	15	15	10	28	11	10	14	14	19	13	23	30	

Tabelle 6.9:

Risikoabschätzung im System „Klimawandel - Trinkwasserversorgung“ in Form einer Einflussmatrix, dargestellt am Beispiel des Beurteilers A

Das Risiko der jeweiligen Systemkomponenten ergibt sich aus der linearen Verknüpfung des entsprechenden Schadensausmaßes und der Eintrittswahrscheinlichkeit

Maximal mögliche Summe „Risiko - Output“ = 3*3*45 = 405

Indikatoren, Merkmale, Teilaspekte Wirkung von ↓ auf →		"Output"																	Index "Input"	
		Wasser-dargebot		Trinkwasserabgabe		Beschaffenheit		Gewinnung		Aufbereitung		Verteilung		Energie		Personal		Ökonomie		
		Mischschlamm Bodensee	Durchfluss	Grundlast	Spitzenlast	Trinkwasser Abgang Wasserverk	Trinkwasser Verteilung	Vorrück Bodensee	Fördermenge	Wasserdurchsatz	technische Ausbreitungsstufen	SchadungsSchäden an Pipelines	SchadungsSchäden am Verteilungssystem	Stromerzeugung	Stromausfall	Wohlbefinden Mitarbeiter	Gesundheit Mitarbeiter	Mehrkosten Investitionen	Mehrkosten Betrieb	
Meteorologie	Temperatur, Jahresmittel	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	0	1	17
	Temperatur, Sommerhalbjahr	0	0	0	2	1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	9	6	0	1	23
	Temperatur, Winterhalbjahr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	4
	Sommertage/helle Tage (Temp. > 20°C)	0	0	1	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	8
	Tropennächte (Temp. > 20°C)	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	0	0	8
	Frost-/Eistage (Temp. < 0°C)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	1	1	2	2	1	1	16
Hydrologie	Schneebedeckung Versorgungsgebiet	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Auftauen Permafrost Gletscherschmelze, Alpennordseite	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Niederschlagsmenge Einzugs- und Versorgungsgebiet, Jahresmittel	1	1	1	4	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11
	Niederschlagsmenge Einzugs- und Versorgungsgebiet, Sommerhalbjahr	0	1	1	4	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
	Niederschlagsmenge Einzugs- und Versorgungsgebiet, Winterhalbjahr	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	Zufluss Bodensee, Jahresmittel	1	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
Extreme Ereignisse	Zufluss Bodensee Sommerhalbjahr	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	
	Zufluss Bodensee Winterhalbjahr	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	
	Verdunstung, Jahresmittel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Grundwasserneubildung Versorgungsgebiet, Jahresmittel	0	0	4	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
	Klimavariabilität (Häufigkeit, Intensität, Dauer)	0	1	0	4	1	1	1	0	0	1	1	1	2	2	1	1	0	1	18
	extreme Trockenheit, Einzugs-, Trinkwasserversorgungsgebiet	1	1	4	6	0	0	4	4	2	1	1	2	4	2	4	2	0	1	39
Stromungen, Stofftransport	Extremniederschläge, Einzugs-, Trinkwasserversorgungsgebiet	1	1	1	9	2	1	1	1	1	1	2	6	9	1	1	4	1	44	
	Extremwindergebnisse Einzugs- und Versorgungsgebiet	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	6	9	0	0	4	22	
	extreme Niedrigwasserstände Bodensee	0	0	1	9	0	0	9	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	22
	extreme Hochwasserstände Bodensee	0	0	1	6	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	4	1	16
	Einschichtung Zuflüsse	0	0	0	0	1	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	5
	vertikaler Stofftransport	0	0	0	0	3	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	7
Beschaffenheit Rohwasser	thermische Schichtung	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
	Tiefenwassererneuerung, Zirkulation	0	0	0	0	2	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	4	
	Konzentration partikuläre Inhaltsstoffe, Tiefenwasser	0	0	0	0	1	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	6	
	Konzentration Nährstoffe, Tiefenwasser	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	
	Konzentration Schwermetalle, Tiefenwasser	0	0	0	0	1	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	6	
	Konzentration Sauerstoff, Tiefenwasser	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Ökologie	Konzentration anthropogene Spurenstoffe, Tiefenwasser	0	0	0	0	4	4	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	6	4	24
	Konzentration Geruch- und Geschmacksstoffe, Tiefenwasser	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	2
	Konzentration Mikroorganismen, Tiefenwasser	0	0	0	0	2	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	2	8
	Eintrag von Neophyten	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	3
	Eintrag von Neozoen	0	0	1	4	0	0	9	9	0	1	1	0	0	0	0	0	4	4	33
	temperaturabhängige Prozesse im See	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
äußere Rahmenbedingungen	Europäische, nationale Gesetzgebung, Landesvorgaben Baden-Württemberg	0	0	4	4	1	1	0	0	2	2	0	0	4	4	0	0	4	4	30
	Verbandspolitik, kommunale Interessen	0	0	4	4	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	14
	Technische Regeln	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	3
	Demographischer Wandel	0	0	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
	Verbraucherverhalten	0	0	4	4	1	1	0	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18
	Industrielle/wirtschaftliche Entwicklungen	0	0	4	4	0	0	1	1	0	0	0	0	4	4	0	0	1	1	20
Index "Output"	technologische Fortschritte/Innovationen	0	0	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
	konkurrierende Wassernutzungen, z.B. Wasserverbrauch Landwirtschaft	0	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
Preisentwicklung insgesamt		0	0	4	4	0	0	4	4	1	1	1	1	1	1	1	0	2	2	26

Tabelle 6.10:**Risikoabschätzung im System „Klimawandel - Trinkwasserversorgung“****Mittelwertbildung (n = 5 Beurteiler)**

Das Risiko der jeweiligen Systemkomponenten ergibt sich aus der linearen Verknüpfung des entsprechenden Schadensausmaßes und der Eintrittswahrscheinlichkeit

Maximal mögliche Summe „Risiko - Output“ = $3 \cdot 3 \cdot 45 = 405$

	Risiko					Mittelwert
	Beurteiler A	Beurteiler B	Beurteiler C	Beurteiler D	Beurteiler E	
Spitzenlast	86	56	18	88	39	57
Mehrkosten Betrieb	37	50	13	118	64	56
Aufbereitung, Wirksamkeit technische Anlagen	31	34	42	111	20	48
Mehrkosten Investitionen	36	14	3	79	52	37
Beschaffenheit Trinkwasser, Ausgang Wasserwerk	24	32	27	94	6	37
Grundlast	45	16	15	71	10	31
Stromausfall	32	15	0	69	37	31
Wassergewinnung, Wasserstand Bodensee	32	14	0	81	16	29
Beschaffenheit Trinkwasser, Verteilsystem	28	25	0	80	6	28
Stromengpässe	29	18	0	76	15	28
Wohlbefinden Mitarbeiter	30	34	0	57	4	25
Wassergewinnung, Fördermenge	27	8	0	76	7	24
Durchfluss Bodensee (Beschaffenheit, Dargebot)	9	31	2	62	13	23
Aufbereitung, Wasserdurchsatz	15	2	0	85	8	22
Störungen/Schäden Hochbauten	13	11	0	67	5	19
Gesundheit Mitarbeiter	22	18	0	55	1	19
Störungen/Schäden Verteilsystem	12	12	0	63	1	18
Wasservolumen Bodensee (Wasserdargebot)	4	10	0	45	13	14

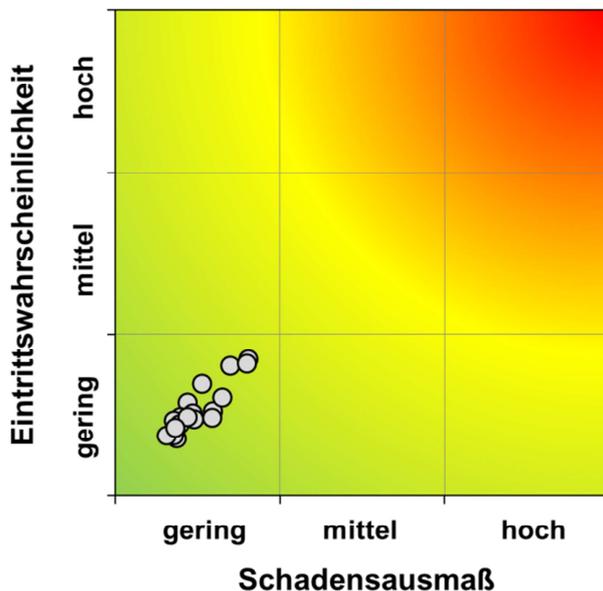


Bild 6.9:
Risikoabschätzung „Klimawandel - Trinkwasserversorgung“ - Schadensausmaß vs. Eintrittswahrscheinlichkeit (Mittelwerte aus n = 5 Beurteiler)
 Maximal mögliche Summe „Schadensausmaß“: $3 * 45 = 135$
 Maximal mögliche Summe „Eintrittswahrscheinlichkeit“: $3 * 45 = 135$

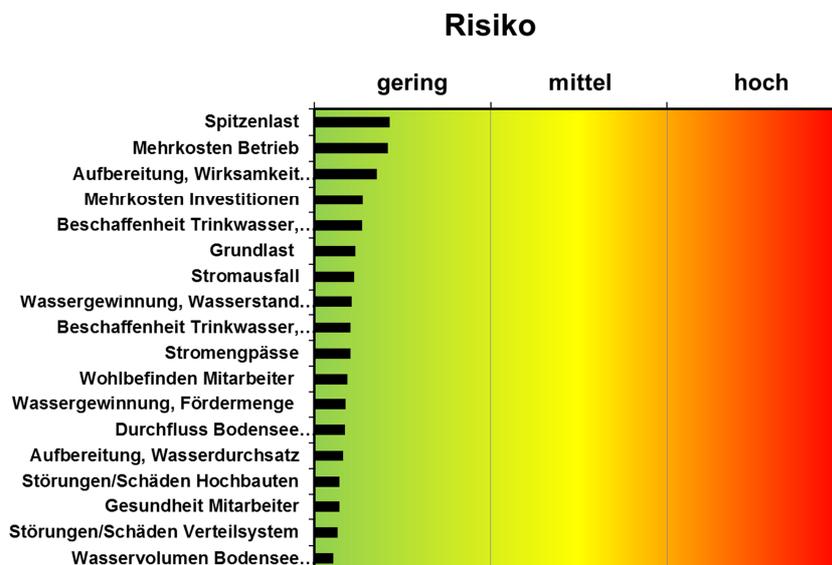


Bild 6.10:
Risikoabschätzung „Klimawandel - Trinkwasserversorgung“ - Risikoabschätzung „top-ten-Liste“ (Mittelwerte aus n = 5 Beurteiler)
 Maximal mögliche Summe „Risiko -Output“: $3 * 3 * 45 = 405$

Entsprechend den Ergebnissen der Risikoanalyse ist davon auszugehen, dass weder akuter noch dringender Handlungsbedarf geboten erscheint. Keine der „Schlüsselkomponenten“ oder Systemindikatoren sind im Sinne des Risikos als „äußerst kritisch“ einzustufen. D.h. das zukünftige Risiko als Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß wird gegenüber den heutigen Rahmenbedingungen durch die zukünftig bis 2050 zu erwartenden Auswirkungen / Folgen der Klimaänderung nicht signifikant erhöht. Dies bedeutet aber nicht, dass der Einfluss der Klimaveränderung vernachlässigt werden darf. Beispielsweise ist im „Normalfall“ mit betrieblichen Mehrkosten, insbesondere wegen den zu erwartenden Abgabemengen (Grundlast – Spitzenlast) und der dadurch erforderlichen Anpassung der betrieblichen Prozessparameter (z.B. Zugabe an Aufbereitungstoffen, Häufigkeit der Filterspülung,...) zu rechnen. Ferner sind bei extremen Wetterlagen auch Schäden in beträchtlichem Ausmaß nicht vollständig auszuschließen. Wie bereits in Kap. 5 ausführlich erörtert, können klimabedingte Extremniederschläge, die im Einzelfall mit außergewöhnlichen Hochwässern und Überschwemmungen einhergehen, zu nicht vorhersehbaren Beeinträchtigungen sowohl der Wasserbeschaffenheit als auch der technischen Anlagen der Wassergewinnung, -aufbereitung und -verteilung/-speicherung (u.a. Betriebsstörungen/Schäden an Pumpen und Aufbereitungstechniken, Freilegung / Zerstörung von Versorgungsleitungen und Dükern,...) führen. Neben Versorgungsengpässen oder -ausfällen sind zur Wiederherstellung der Funktions- und Lieferfähigkeit Maßnahmen, die ggf. hohe investive Kosten zur Folge haben, notwendig. Die Verantwortlichen der Wasserversorgungsunternehmen sind daher angehalten, sich den hieraus resultierenden Anforderungen zu stellen. Hierbei sind vor allem im Zusammenhang mit

- der Trinkwasserabgabe (insbesondere Spitzenlast, Flexibilität der technischen Anlagen),
- der Wasseraufbereitung (Anpassung / Optimierung von Verfahrenstechniken) und Wassergewinnung (Pumpenvordruck, Fördermenge)
- der Wasserbeschaffenheit (Rohwasser, Trinkwasser am Wasserwerksausgang und im Verteilsystem)
- der Energieversorgung (Stromausfälle und -engpässe)
- der Trinkwasserverteilung (kritische Stellen im Versorgungssystem) sowie
- sozio-ökonomischen Aspekten (Wohlbefinden und Gesundheit der Mitarbeiter, klimabedingte finanzielle Mehraufwendungen, Versicherungsschutz gegenüber Elementarschäden)

präventive Maßnahmen zu empfehlen.

6.5 Abschließende Bemerkungen

Die Systemanalysen und Überlegungen zur Vulnerabilität und des Risikomanagements bilden eine wesentliche Basis für die Beurteilung der Klimaauswirkungen bzw. stellen einen zentralen Bestandteil zur Erarbeitung von präventiven bzw. adaptiven Lösungsansätzen dar. Mit anderen Worten: die Verfügbarkeit und der Zugang zu transparenten, nachvollziehbaren und möglichst „belastbaren“ Abschätzungen der

zukünftigen Entwicklungen ist eine wesentliche Voraussetzung für angemessenes Handeln. Nur wenn u.a. bekannt ist, welche Komponenten im System „Klimawandel – Trinkwasserversorgung“ betroffen sind, in welcher Art und Weise diese im Sinne der „Verletzlichkeit“ beeinflusst werden und mit welchem Schadensausmaß und Eintrittswahrscheinlichkeit hierbei zu rechnen ist, können ggf. erforderliche Gegenmaßnahmen ergriffen werden. An die Ableitung solcher Entscheidungs- und Planungsgrundlagen, für die es bislang noch keine abgestimmten und standardisierten Vorgehensweisen gibt, werden daher hohe Anforderungen gestellt. Hier bietet es sich an, systematisch-strukturierende Methoden wie beispielsweise den Ansatz des „vernetzten Denkens“ von Vester (2012) oder das Risikomanagement auf die jeweils zu betrachtenden Anwendungsfälle zu übertragen, um Antworten auf die eingangs gestellten Fragen zu erhalten. Dabei ist sicherzustellen, dass die Systemanalysen als eigener Diskussionsprozess verstanden werden, in den alle beteiligten „Akteure“ und Fachexperten eingebunden sind. Ziel ist es, Kriterien abzuleiten, mit denen das System „Klimawandel - Trinkwasserversorgung“ zumindest ansatzweise im Sinne einer Gesamtbeurteilung durch „Muster mit Unschärfen“ charakterisiert werden kann.

Insgesamt konnte mit der gewählten Vorgehensweise gezeigt werden, dass ein deutlicher Einfluss der Klimaveränderung zu erkennen ist, bislang jedoch keine Hinweise vorliegen, die auf einen akuten und dringenden Handlungsbedarf seitens der Wasserversorgungsunternehmen in naher Zukunft hindeuten. Dennoch sind die Verantwortlichen der Wasserversorgungsunternehmen am Bodensee aufgefordert, sich bereits heute aktiv und sachlich mit dem Thema „Klimawandel und deren Folgen“ auseinanderzusetzen und frühzeitig entsprechende Anpassungsstrategien bzw. Handlungsoptionen zu erarbeiten. Wie im nachfolgenden Kapitel 7.0 gezeigt wird, gilt es dabei, in Abhängigkeit von den politischen, sozialen und finanziellen Gestaltungsmöglichkeiten sowie den standortspezifischen Rahmenbedingungen Bewährtes zu erhalten und mit Augenmaß in den nächsten Jahren/Jahrzehnten fortzuentwickeln und umzusetzen. Hierbei sind neben allen relevanten Aspekten des Klimawandels vor allem auch die Wandelprozesse frühzeitig in die systematische Gesamtbetrachtung zur Planung und Betrieb der zukünftigen Versorgungsstruktur mit einzubinden.

7.0 Mögliche Anpassungsstrategien

Empfehlungen und Handlungsoptionen für die Wasserversorgungsunternehmen

7.1 Allgemeines

Seit der internationalen Anerkennung des globalen Klimawandels als „grundlegende Herausforderung der Menschheit“ im Jahre 1990, steht die Erarbeitung der Maßnahmen zur Verringerung der deutlich sichtbaren Auswirkungen und Folgen innerhalb der Staatengemeinschaften zunehmend im Fokus. Als Teil der auf den Prinzipien der Vorsorge und Nachhaltigkeit ausgerichteten Umweltschutzprogramme stützt sich die europäische Klimapolitik dabei i.d.R. auf die zwei integrativ zu betrachtenden Eckpunkte der Prävention/Mitigation und der Anpassung/Adaption [ECCP (2010), UBA (2012a), UBA (2011b)].

Um den damit verbundenen Anforderungen gerecht zu werden, haben beispielsweise auch die Anrainerstaaten des Bodensees umfassende Klimaschutzmaßnahmen initiiert, mit denen im jeweiligen nationalen Maßstab versucht wird, insbesondere eine zuverlässige, umwelt- und klimaverträgliche Energieversorgung mit dem Ziel einer deutlichen Verringerung des Treibhausgases CO₂ aufzubauen [BMU (2008), BMU (2009b), BMU (2010a), BMU (2012b), BMU (2012c), IBK (2005), BAFU (2010b), Lebensministerium (2007), ZfU (2012), Stecker (2012)]. Als eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe spielen hierbei vor allem Handlungsoptionen zur Energieeinsparung (z.B. Industrie, Landwirtschaft, private Haushalte, Gebäudesanierung, Verkehr, ...) sowie zur Steigerung der Energieeffizienz (Einsatz und die verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien (Wasserkraft, Solarenergie, Windkraft, thermische Nutzung von Bodenseewasser,...) eine große Bedeutung.

Da die Klimaveränderung und ihre Auswirkungen/Folgen trotz all der bisherigen Anstrengungen zum Klimaschutz und CO₂-Verringerung nicht mehr zu stoppen ist, sondern vielmehr nur noch abgemildert werden kann, gewinnen als zweite Säule der Klimapolitik Initiativen zur Anpassung an den unvermeidlichen Klimawandel zunehmend an Bedeutung [z.B. UFZ (2012), BMU (2012b), BMU (2012c), Lebensministerium (2007), Lebensministerium (2011a), Lebensministerium (2011b), Kronberger (2011), OcCC (2008), BAFU (2012a), BAFU (2012d)]. Derartige Anpassungsstrategien stellen im Rahmen eines integralen Ansatzes übergeordnete, nationale Handlungsrahmen dar, die sich an den Prinzipien

- der wissenschaftlichen Erkenntnisse,
- der zeitlichen und räumlichen Flexibilität,
- der Vorsorge und Nachhaltigkeit,
- der Subsidiarität und Verhältnismäßigkeit sowie
- der Offenheit, Kooperation und Partnerschaft orientieren.

Wie bereits an mehreren Stellen dieser Literaturrecherche ausgeführt, sind die bislang verfügbaren Daten zu den einzelnen Auswirkungen/Folgen auf Umwelt- und Gesellschaftssysteme einschließlich des Wasserhaushaltes mit z.T. großen Unwägbarkeiten behaftet. Daher müssen sich die Verantwortlichen der Wasserversorgungsunternehmen weiterhin darauf einstellen, dass auch in Zukunft „Entscheidungen unter Unsicherheit“ für Zeithorizonte von über 50 Jahren in allen Belangen der Wertschöpfungskette „Ressource - Gewinnung - Aufbereitung - Verteilung/ Speicherung“ zu treffen sind. Die Erkenntnisse, die aus einer frühzeitig durchzuführenden standortspezifischen Systemanalyse und der kritischen Überprüfung aller systemrelevanten Größen gewonnen werden können, besitzen hierbei nicht nur ein wissenschaftliches Interesse, sie bilden mit ihrer Transparenz und Nachvollziehbarkeit vielmehr die Grundlagen für die Planung und Umsetzung der praxisbezogenen Belange einer zukunftsorientierten Trinkwasserversorgung. Gleichzeitig wird aus den Überlegungen zur Vulnerabilität und dem Risikomanagement deutlich, dass die zu erwartenden, teilweise gegensätzlich verlaufenden Klimaentwicklungen und zivilisatorischen Einflüsse einen nicht einfachen Abwägungsprozess bei der Erarbeitung von system- und standortbezogenen Anpassungsstrategien erforderlich machen. Nicht zuletzt wegen der individuellen Einschätzungen bedarf es daher pragmatischer, d.h. dynamischer, flexibler und partizipativer Handlungsansätze, die auf mögliche Fortschritte und Weiterentwicklungen jederzeit angepasst werden können. Dies bedeutet, dass vor allem auf dem Ansatz des „flexiblen und schnellen Reagierens“ so genannte „vorteilsausnutzende Maßnahmen“ („win-win“) oder „Maßnahmen ohne Reue“ („no/low-regret“) zu erarbeiten und umzusetzen sind [z.B. LUBW (2006), EU-WID(2013), Petry (2009), Castell-Exner (2010), Ruegg (2012), LAWA (2010)], die auch dann einen „Mehrwert“ aufweisen, wenn die projizierten Entwicklungen des zukünftigen Klimas nicht oder nur in geringerer Ausprägung mit den tatsächlichen übereinstimmen (**Tabelle 7.1**).

Um über die bisherigen Aktivitäten hinaus die Entscheidungsträger der Wasserwirtschaft zu ermutigen, sich aktiv in die derzeit laufenden Diskussionen einzubringen, wird nachfolgend auf die regionalspezifischen Adaptionmaßnahmen/Handlungsoptionen im Zusammenhang mit den trinkwasserrelevanten Aktionsfelder

- des vorsorgender Gewässerschutzes (Kap. 7.2),
 - der Qualitätssicherung - Überwachung der Wasserbeschaffenheit (Kap. 7.3)
 - der Versorgungssicherheit - Technische Belange der Wassergewinnung, -aufbereitung und -verteilung/-speicherung (Kap. 7.4),
 - der Energie- und Stromversorgung sowie von IT- und Kommunikationssystemen (Kap. 7.5),
 - der Forschung und Kenntniserweiterung (Kap. 7.6),
 - des Katastrophen- und Notfallmanagements (Kap. 7.7),
 - der Kommunikation und Zusammenarbeit mit Dritten (Kap. 7.8),
 - der personellen Aspekte (Kap. 7.9),
 - des politischen Ordnungsrahmens (Kap. 7.10) sowie
 - ökonomischer Gesichtspunkte (Kap. 7.11)
- näher eingegangen.

Table 7.1:
Rahmenbedingungen und Kriterien, die bei der Erarbeitung von Handlungsempfehlungen zu berücksichtigen sind

Kriterien	Bemerkungen/Fragen/Beispiele
Bedeutung/Relevanz	Jenen Handlungsempfehlungen ist der Vorrang einzuräumen, die unabhängig von der Klimaveränderung einen Vorteil bringen („win-win“) bzw. keine Nachteile hervorrufen („no-regret“). Der umweltbezogene, gesellschaftliche und wirtschaftliche Nutzen (z.B. positive Auswirkungen auf die Umwelt und Wasserversorgung, Nachhaltigkeit, ...) ist hierbei ausschlaggebend.
Betroffenheit	Welche Systemkomponenten sind durch die vorgeschlagenen Handlungsoptionen betroffen und wie werden diese beeinflusst
Flexibilität bzw. Reversibilität	Die Anpassungsmaßnahmen sind wegen den bestehenden Unsicherheiten flexibel zu gestalten, sodass sie den veränderten Gegebenheiten leicht angepasst bzw. rückgängig gemacht werden können.
Dringlichkeit	Ist eine dringende Umsetzung erforderlich oder sind die Anpassungsmaßnahmen zeitversetzt umzusetzen.
Wechselwirkungen zu anderen Handlungsoptionen	Bei der Erarbeitung von Anpassungsmaßnahmen ist zu prüfen, ob und inwieweit sich diese auf andere Handlungsoptionen auswirken bzw. Synergien aufweisen.
Umsetzbarkeit	Unter welchem personellen, materiellen und finanziellen Aufwand sind die vorgeschlagenen Maßnahmen umsetzbar

7.2 Vorsorgender Gewässerschutz

Der Bodensee ist mit seinen 50 Mrd. m³ Rauminhalt und einer Oberfläche von 535 km² der größte Voralpensee nördlich der Alpen. Die drei Anrainerstaaten Deutschland, Schweiz und Österreich teilen sich dabei die Hoheitsrechte ohne feste Grenzen auf dem See (Kondominium) mit Ausnahme der Konstanzer Bucht. Um unter diesen Rahmenbedingungen den Beeinträchtigungen des Sees durch anthropogene Ein-

flüsse entgegen wirken zu können, bedurfte bzw. bedarf es im gesamten Einzugsgebiet sowie am Bodensee selbst international koordinierter Gewässerschutzmaßnahmen. Bis heute wurde beispielsweise von den Anrainern mehr als 4 Mrd. Euro in Projekte investiert, die dem vorsorgenden Ressourcenschutz dienen [IGKB (2004)]. Neben den Aktivitäten der in der IGKB zusammengeschlossenen Ländern Baden-Württemberg, Bayern, Vorarlberg, Lichtenstein sowie der Kantone St. Gallen und Thurgau wurde bzw. wird aber auch durch die AWBR stets darauf hingewiesen, dass der vorsorgende und nachhaltige Schutz der Gewässer nach wie vor den zentralen Eckpunkt zur Bewahrung der Lebensgrundlagen des Menschen und eines intakten Ökosystems „Bodensee“ darstellt. Der Bodensee ist nicht nur ein Natur-, Kultur- und Wirtschaftsraum, der in seiner Einzigartigkeit und Attraktivität kaum zu überbieten ist, vielmehr ist er auch einer der größten Trinkwasserspeicher Europas. Trotz aller Erfolge in der Vergangenheit und Stolz auf das Erreichte (z.B. Verringerung des Nährstoffgehaltes) sind die Aufgaben zur Reinhaltung des Bodensees keineswegs abgeschlossen: „Stillstand ist Rückschritt“.

Um im Kontext der Klimaveränderung frühzeitig die sich ändernden Rahmenbedingungen erkennen, deren Entwicklungen und Auswirkungen für das aquatische System „Bodensee“ abschätzen und beurteilen sowie ggf. erforderliche Handlungsoptionen erarbeiten zu können, besteht Konsens darüber, dass die bisherigen Schutzmaßnahmen verstärkt fortzusetzen sind [UMBW (2003), UMBW (2004), UMBW (2007), DVGW (2009a), Günther (2012), IBA (2011)].

Es gilt, insbesondere

- die enge Zusammenarbeit der am Bodensee tätigen Kommissionen, nationalen Umweltbehörden, Verbänden und wissenschaftlichen Forschungseinrichtungen (**Bild 7.1**) weiter zu stärken,
- im Hinblick auf den Parameterumfang, die Häufigkeit und die Entnahmestellen abgestimmte Untersuchungs- und Monitoringprogramme durchzuführen (**Bild 7.2**) sowie
- durch gemeinsame F&E-Vorhaben und Veranstaltungen den Wissens- und Informationsaustausch zu intensivieren.

Hierbei bietet es sich an, dass das „Internationale Kooperationsnetzwerk Bodensee, IKNB“ die Koordination übernimmt.



Bild 7.1:
Internationale Kommissionen, Verbände und wissenschaftliche Institutionen, die eng im Rahmen eines vorsorgenden Gewässerschutzes am Bodensee zusammenarbeiten [Logos der jeweiligen Institution (2013)]



Bild 7.2:
„Analysieren, auswerten, handeln“ - Forschung am Bodensee [BWV (2013), Zintz (2009)]

Zudem wird vorgeschlagen, unter Federführung des IGKB-Fachbereiches „See“ sowie des wissenschaftlichen Beirates der AWBR jeweils einen ständigen Projektkreis „Klima“ einzurichten, der die künftig erforderlichen Schwerpunktthemen begleitet:

- Ermittlung der Auswirkungen von Wandelprozesse im Einzugs- und Trinkwasserversorgungsgebiet
- Weitergehender Ausbau der Kläranlagen und Regenrückhaltebecken zur Minimierung anthropogener Beeinträchtigungen (z.B. anthropogene Spurenstoffe, Phosphateintrag)
- Untersuchungen der Zuflüsse einschließlich deren Einschichtungsverhalten

- Beobachtung der jahreszeitlichen und langfristigen Wasserstände des Bodensees
- Erfassung von Strömungen und des Stofftransports im Bodensee (u.a. Schichtungs-/Zirkulationszustände)
- Beobachtung des ökologischen Artenspektrums sowie der biologischen und physikalischen/chemischen Abbau- und Umsetzungsprozesse ("Selbstreinigungskraft") im Ufer- und Flachwasserbereich
- Durchführung von Uferrenaturierungen
- Untersuchungen zur biologischen, mikrobiologischen, physikalischen und chemischen Wasserbeschaffenheit im Freiwasser (u.a. anthropogener Spurenstoffe, partikuläre Inhaltsstoffe,)
- Erforschen der Vorgänge in Sedimentnähe (z.B. Sauerstoff- und Nährstoffkonzentration)

Zusätzlich zu dem komplexen und empfindlichen Öko- und Strömungssystem verfügt der Bodensee aber auch über ein großes energetisches Potenzial. Unter dem Aspekt der zukünftig angedachten thermischen Nutzung des Bodenseewassers zu Heiz- und Kühlzwecken (Stichwort: Energieeinsparung, Steigerung Energieeffizienz, Verringerung der CO₂-Emissionen) sind daher zwischen den Anrainerstaaten einheitliche Standards und Regelungen zum Wärmelastmanagement (Festlegen der Temperaturdifferenz, Einleittiefe,...) aufzustellen und abzustimmen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine entsprechende Nutzung nur zulässig sein darf, wenn sowohl auf das Gesamtsystem „Bodensee“ als auch für regionale und lokale Bereiche einschließlich der Trinkwassergewinnung keine nachteiligen Auswirkungen resultieren.

7.3 Qualitätssicherung - Überwachung der Wasserbeschaffenheit

In der Praxis der Trinkwasserversorgung hat die Qualitätssicherung seit jeher einen hohen Stellenwert eingenommen. Dabei stand bzw. steht aus gesetzlicher Sicht die Überwachung des abgegebenen Trinkwassers im Vordergrund. Für Deutschland sind beispielsweise die aktuellen Anforderungen an die Beschaffenheit von Trinkwasser in der TrinkwV 2001, in der Fassung vom 05.12.2012 festgelegt. Um auch zukünftig unter den zu erwartenden Klimaentwicklungen und den zunehmenden wirtschaftlichen Zwängen eine einwandfreie hygienische Wasserbeschaffenheit gewährleisten zu können, wird jedoch eine darüber hinausgehende systematische Betrachtungsweise als zielführend erachtet. Daher wird empfohlen, die Qualitätssicherung nicht nur auf produktbezogene sondern -wie in der schweizerischen Lebensmittelgesetzgebung vorgeschrieben und von vielen Wasserversorgern bereits praktiziert- verstärkt auf risikobasierte und prozessorientierte Kontrollen im Sinne des HACCP¹ - Konzeptes auszurichten (**Bild 7.3**).

¹ HACCP = Hazard Analysis and Critical Control Point



Bild 7.3:
Beispiel: Das Labor der Bodensee-
Wasserversorgung – seit fast 60 Jah-
ren Garant für die Qualitätssicherung
und betriebsorientierte Forschung bei
der Bodensee-Wasserversorgung
[BWV (2013)]

Insbesondere im Zusammenhang mit den zu erwartenden Durchsatzschwankungen und klimabedingten Wasserabgaben (Grundlast/Spitzenabgaben) kommen vor allem

- der regelmäßigen Überwachung der mikrobiologischen Wasserbeschaffenheit und Dokumentation der dabei resultierenden Auffälligkeiten,
- den on-line-Messungen (elektrische Leitfähigkeit, pH-Wert, Trübung, Partikelanalysen,) sowie
- der Erfassung der gesetzlich bzw. in einschlägigen Normen geregelten physikalisch/chemischen Parametern sowie den organischen anthropogenen Spurenstoffen

eine besondere Bedeutung zu. In enger und vertrauensvoller Zusammenarbeit mit der zuständigen Behörde können somit im Hinblick auf die Auswirkungen/Folgen des Klimawandels frühzeitig Schwachstellen, kritische Punkte und Trends identifiziert, im Sinne einer Gefährdungsanalyse bewertet und -falls erforderlich- geeignete Gegenmaßnahmen eingeleitet werden.

7.4 Versorgungssicherheit - Technische Belange der Wassergewinnung, -aufbereitung und -verteilung/-speicherung

Zusätzlich zu den Ansprüchen an die mikrobiologische und physikalisch/chemische Beschaffenheit des Trinkwassers kommt beispielsweise in der DIN 2000 auch die Bedeutung der Versorgungssicherheit sehr deutlich zum Ausdruck: Trinkwasser muss jederzeit in ausreichender Menge und mit genügendem Druck an jeder Übergabestelle zur Verfügung stehen. Um die hierbei resultierenden Anforderungen gewährleisten zu können, sind u.a. alle relevanten sicherheitstechnischen- und betrieblichen Belange in Form der Trinkwasserverordnung 2001 [*TrinkwV (2001)*] oder technischen Regeln, Normen, Sicherheits- und Arbeitsschutzvorschriften zu berücksichtigen.

sichtigen [z.B. www.dvgw.de, www.svgw.ch, www.oevgw.at, www.DIN.de]. Damit kann u.a. sichergestellt werden, dass nicht bei jeder auftretenden Funktionsstörung, jedem Schadensfall oder einem anderen nicht vorhersehbaren Ereignis im Normalbetrieb eine Unterbrechung der Wasserversorgung zu besorgen ist.

Nicht zuletzt wegen der in Zukunft zu erwartenden meteorologischen Verhältnisse sind daher die bestehenden Grundlagen für ein sicheres Handeln in der Wasserversorgung konsequent weiter auszubauen und zu optimieren [IBA (2011)]. Dabei gilt es, neben „Bewährtem“ wie z.B. der redundanten Auslegung aller relevanten technischen Anlagen alle innovativen Entwicklungen zu fördern, die zu einem „intelligenten“, d.h. umwelt- und ressourcenschonenden Umgang mit der Ressource „Wasser“ führen.

- Im Zusammenhang mit der Abschätzung des Bedarfs an Trinkwasser für „morgen“ sind entsprechende Prognosen und Trendanalysen zu erstellen, die neben der zukünftigen Wetterentwicklung auch die Verbrauchergewohnheiten, den Demographiewandel, industrielle/wirtschaftliche Fortschritte, konkurrierende Wassernutzungen, ökonomische Aspekte und institutionelle/politische Vorgaben berücksichtigen. Demzufolge sind bereits vorhandene Vorhersagemodelle weiterzuentwickeln bzw. die GIS²-basierten Rohrnetzrechnungen an die zukünftigen Anforderungen einer bedarfsgerechten Auslastung des Speichervolumens anzupassen (Stichwort: Behälterbewirtschaftung).
- Vor allem bei den überregionalen Wasserversorgungsunternehmen sind in Zukunft erhöhte Spitzenabgaben bei gleichzeitig verringerter Grundlast zu erwarten. Individuelle Entscheidungen zur Anpassung der Versorgungsstrukturen (Gewinnung, Aufbereitung, Verteilung/Speicherung) an einen ggf. sich zeitlich und räumlich ändernden Trinkwasserbedarf sind sorgsam abzuwägen. Zum Beispiel steht einem aus hygienischen Gründen ggf. gebotenen Rückbau (z.B. geringer Rohrquerschnitt,...) ein klimabedingtes ausreichend dimensioniertes Leitungssystem sowie die Vorhaltung ausreichender Speicherkapazitäten (Hochbehälter) entgegen. Bei entsprechenden geodätischen Höhenverhältnissen bietet u.a. auch der Einsatz von dezentralen Drucksteigerungspumpwerken die Möglichkeit, die in Spitzenbedarfszeiten benötigten Wassermengen bereitzustellen (**Bild 7.4**).

² Geo-Informationssystem (GIS)



Bild 7.4:
Drucksteigerungspumpwerke zur
Deckung des Spitzenbedarfs, darge-
stellt am Beispiel der Bodensee-
Wasserversorgung [BWV (2013)]

- Im Hinblick auf die erwartete Zunahme von Extremsituationen wird zur Vermeidung bzw. Minimierung von Schäden an den Gewinnungsanlagen und Brunnen- bzw. Quelfassungen vorgeschlagen, bestehende Hochwasservorhersage- sowie bodensee- bzw. flussspezifische Strömungs- und Grundwassermodelle (z.B. BodenseeOnline,...) unter Berücksichtigung wasserwerksrelevanter Parameter weiterzuentwickeln sowie die Warn- und Alarmdienste dahingehend anzupassen, indem die Wasserversorgungsunternehmen direkt mit in die Meldekette (SMS, e.mail, Fax) eingebunden werden.
- Aufgrund der geplanten Hochwasserschutzmaßnahmen im Alpenrheintal [IRR (2011a), [IRR (2011b), IRR (2012a), IRR (2012b)] sind entsprechende Vorsorgestrategien bei den Seewasserwerken zu entwickeln. Hiervon sind neben den baulichen und technischen Maßnahmen (z.B. Errichtung von Schutzwällen gegen Überflutungen, hochwasserdichter Ausbau von gefährdeten Hochbauten, technischen Anlagen und Anfahrtswegen, ...) auch die Optimierung betrieblicher und managementbasierter Prozessabläufe (z.B. einzugsgebietsbezogenes Hochwassermanagement, länderübergreifende Hochwasservorhersage, frühzeitige Information und Kontaktaufnahme zu Behörden, Erarbeitung interner Anweisungen zum Verhalten bei Hochwasser, Abstimmung mit externen Hilfskräften zur Schadensbegrenzung,...) betroffen.
- Hinsichtlich der Wassergewinnung sind geeignete Strategien und technische Lösungsansätze zu erarbeiten, um auch bei ungünstigen Verhältnissen (z.B. temporäre Niedrigwasserstände, langfristig sinkender Wasservordruck, Absenkung des Grundwasserspiegels im Trinkwasserversorgungsgebiet, ...) eine sichere und zuverlässige Wasserentnahme gewährleisten zu können. Um einer möglichen Begrenzung der Förderleistung bzw. möglichen Kavitationserscheinungen entgegenzuwirken, ist eine Verringerung des Abstandes zwischen der Pumpe und dem Wasserspiegel oder eine Anpassung der Entnahmeleitungen bzw. Pumpenschauflerräder denkbar.

- Eine weitere mögliche Beeinträchtigung der Wasserentnahme kann u.U. auch dadurch erfolgen, dass jederzeit und unabhängig vom Klimawandel bislang nicht heimische Organismen (Neozoen oder Neophyten) in den Bodensee eingeschleppt werden können (Stichwort: Quaggamuschel). In entsprechenden Forschungsprojekten sind daher ohne Zeitverzug weitergehende Erkenntnisse zu erarbeiten und regulatorisch bzw. technisch umsetzbare Präventionsmaßnahmen aufzuzeigen.
- Bei den Seewasserwerken werden seit langem effiziente, gut aufeinander abgestimmte Aufbereitungsstufen zur Sicherung einer hygienisch einwandfreien Beschaffenheit des abgegebenen Trinkwassers eingesetzt. Im Rahmen dieses „Multi-Barrieren-Systems“ kommen neben den Desinfektionsmaßnahmen vor allem den Verfahren zur Partikelabtrennung eine besondere Bedeutung zu. Da zivilisations- und klimabedingt eine Änderung der Beschaffenheit des Bodenseewassers (u.a. mikrobiologische Auffälligkeiten, erhöhte Feststoffanteile, anthropogene Spurenstoffe,...) nicht auszuschließen ist, kann als mögliche Gegenmaßnahme eine Optimierung der bewährten Aufbereitungsstufen (z.B. Anpassung der Betriebsbedingungen zur Filtration und Filterspülung, der Zugabemenge von Flockungs- oder Desinfektionsmittel, ...) bzw. die Ergänzung durch innovative Technologien (Membranfiltration, Aktivkohle,...) in Erwägung gezogen werden.
- Zur Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit sind alle relevanten technischen Anlagen, deren Ausfall zwangsläufig zu einer Versorgungsunterbrechung führen bzw. bei denen im Reparaturfall mit langen Ausfallzeiten zu rechnen ist, redundant auszulegen (**Bild 7.5**). Beispiele für mindestens doppelte oder mehrfache Ausführungen im Bereich der Wassergewinnung und -aufbereitung sind:
 - Seewasserentnahmeleitungen, Rohwasserdruckleitungen,
 - Roh- und Reinwasserpumpen,
 - Mikrosiebe, Ozoneure, Sandfilter, DesinfektionsanlagenDarüber hinaus ist das Verteilsystem auf eine entsprechende Vernetzung der Transportleitungen sowie auf Rückförder- und Verbundmöglichkeiten für Notfälle auszurichten (Reinwasserpumpen, mehrere Hauptleitungen und Parallelisierung von Leitungsabschnitten, Hoch- und Speicherbehälterbehälter mit Mehrkammer-system, Ersatzstromanlagen,...).

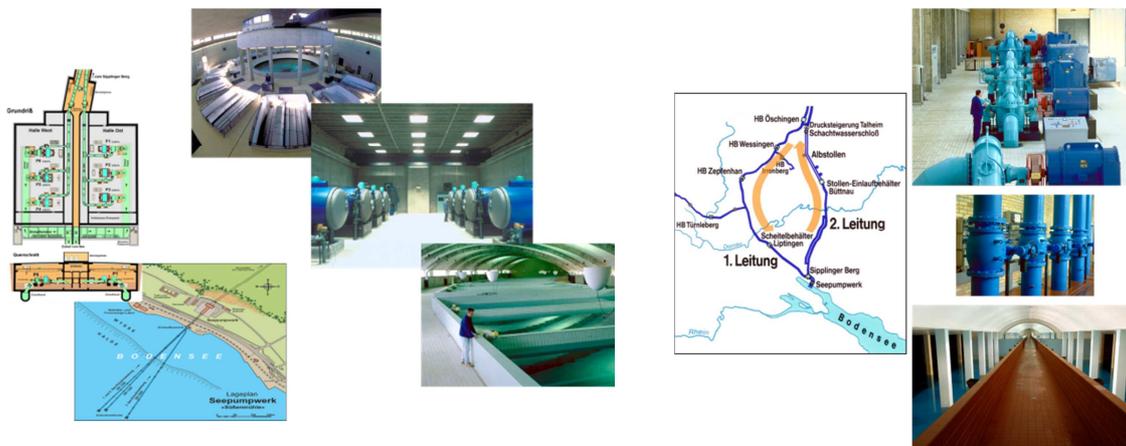


Bild 7.5:
Redundante Auslegung von technischen Anlagenteilen [BWV (2013)]

Zusätzliche Sicherheit bieten zudem Lösungen mit mehreren Bezugsquellen (Stichwort: „zweites Standbein“, gleichzeitige Versorgung bzw. Mischung von örtlich gewonnenem Brunnen- bzw. Quellwasser mit Trinkwasser aus dem Bodensee) (**Bild 7.6**).

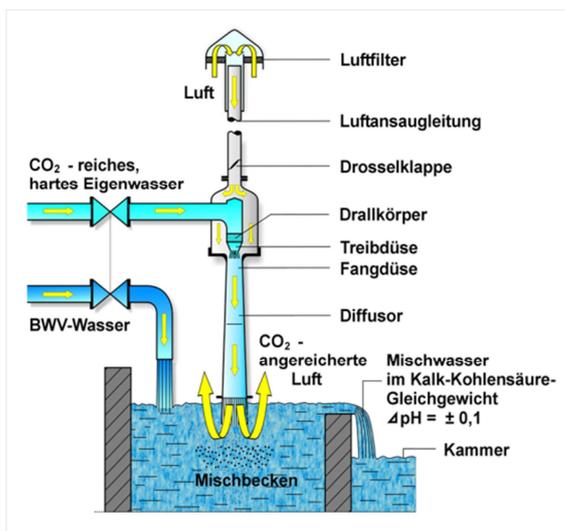


Bild 7.6:
Mischung von Wässern aus unterschiedlichen Gewinnungsgebieten (z.B. Bodenseewasser mit örtlich gewonnenem Quellwasser), dargestellt am Beispiel der Entsäuerung [BWV (2013)]

- Im Zusammenhang mit der Vermeidung/Minimierung von Betriebsstörungen und Infrastrukturschäden sind die begonnenen Instandhaltungs-, Sanierungs- und Wartungskonzepte für alle technischen Anlagen sowie die Ersatz- und Ertüchtigungsmaßnahmen für alle Hochbauten langfristig fortzuführen (**Bild 7.7**).

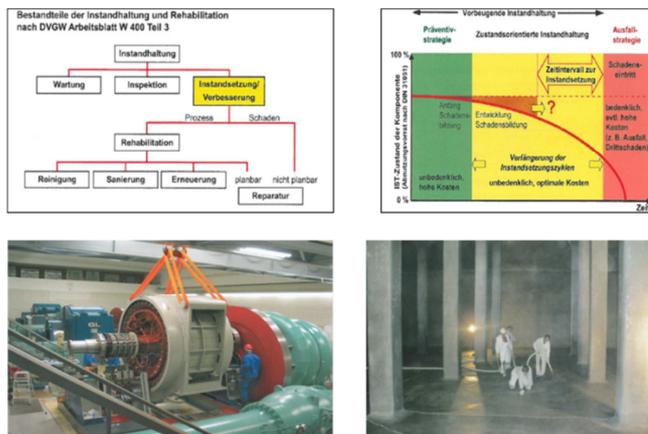


Bild 7.7:
Wererhaltung von technischen Anlagen der Wasserversorgung
 [Weiß (2009), Grüner (2007), Scholz (2007)]

- a) Beispiel: Bestandteile der Instandhaltung
 b) Beispiel: Lebensdauerreserven von Anlagen bei unterschiedlichen Instandhaltungskonzepten
 c) Beispiel: Pumpenrevision
 d) Beispiel: Sanierung eines Hochbehälters

Dies betrifft alle Bereich der Wasserversorgung, beginnend bei

- der Gewinnung (z.B. regelmäßige Reinigung Entnahmeverrichtungen, regelmäßige Pumpenrevisionen,...),
 - über die Aufbereitung (z.B. Überprüfung der Verfahrenstechnologien, Ausbau bzw. Austausch der Kühlung besonders schützenswerter Pumpen, Maschinen, Aggregate, Schaltschränke ...) bis hin zu
 - der Verteilung (z.B. Erneuerung/Austausch defekter/korrodiertes Leitungen, Minimierung von Wasserverlusten, Vermeidung von Kondenswasserbildung in Hochbehältern, Aufstellen von Luftentfeuchtern, systematisch durchgeführte Rohrnetzinspektionen und -spülungen, Ausrichtung des Verteilsystems hinsichtlich Notfallvorsorge, Schaffung von Verbundmöglichkeiten, Einbau von strategisch relevanten Pumpwerken und Verschlussorganen, Vorhaltung ausreichender Desinfektionskapazitäten und Schaffung von Möglichkeiten zur Nachdesinfektion,...) [Merkel (2012), Müller (2006)].
- Um eine möglichst lange Lebensdauer der einzelnen Komponenten zu erzielen, sind bei der Beschaffung aller Anlagenteile die im jeweiligen Anwendungsfall geforderten Qualitätsstandards einzuhalten.

7.5 Präventivmaßnahmen zur Energie- und Stromversorgung sowie von IT- und Kommunikationssystemen

Die meisten menschlichen Aktivitäten sind stark von der Bereitstellung von Energie, insbesondere Strom abhängig. Stromausfälle werden beispielsweise Züge zum Anhalten zwingen ebenso wie industrielle Produktionen stilllegen. Sollte der Stromausfall extensiv sein und länger andauern, kann es im worst-case-Fall sogar zu massiven Ausschreitungen und Störungen des menschlichen Zusammenlebens kommen.

Aber auch alle Komponenten der Wasserversorgung, beginnend bei der Gewinnung, über die Aufbereitung bis hin zur Verteilung/Speicherung und den Einrichtungen der Fernwirktechniken und Kommunikationssysteme sind von Stromausfällen in bedeutendem Maße betroffen. Im Rahmen der „Doppelstrategie“ der Mitigation und der Adaption sind daher unter den in Zukunft zu erwartenden Rahmenbedingungen die in der Wasserversorgung seit langem bewährten Präventivmaßnahmen verstärkt fortzusetzen [EUWID (2012b), UBA (2011b)].

- Senkung des Energieverbrauches durch Einsatz von energieeffizienten und CO₂-emissionsarmen Technologien bzw. Optimierung von Betriebsabläufen**

Neben Kläranlagen zählen Trinkwasserversorgungsunternehmen mit einem bundesweiten Energieverbrauch von etwa 2,4 Mrd. kWh pro Jahr zu den energieintensiven Betrieben [www.dvgw.de (2013)]. Daher fühlt sich die Versorgungswirtschaft nicht erst seit den beobachteten Auswirkungen des Klimawandel einem sensiblen / schonenden Umgang mit Energie und endlicher Ressourcen im Sinne eines nachhaltigen, verantwortungsvollen Wirtschaftens verpflichtet. Gemäß den Angaben der DVGW-Information 77 bzw. der DIN EN ISO 50 001 ist zur Steigerung der Energieeffizienz bzw. Verminderung der CO₂-Emission zunächst im Rahmen eines „Energiemanagements“ (**Bild 7.8**) eine systematische Bestandsaufnahme aller der Energieströme zusammen mit einer übersichtlichen Dokumentation der Ergebnisse erforderlich. Aufbauend auf einer solchen Erhebung erfolgt über eine energetische Bewertung abschließend die Identifizierung von Einsparpotentialen und des Handlungs- bzw. Umsetzungsbedarfs. Neueren Untersuchungen zufolge sind bei Pumpen Einsparungen von bis zu 15%, in Einzelfällen und bei entsprechenden Standortfaktoren sogar von mehr als 35% möglich [DVGW (2010), DIN EN ISO 50 001 (2011)].

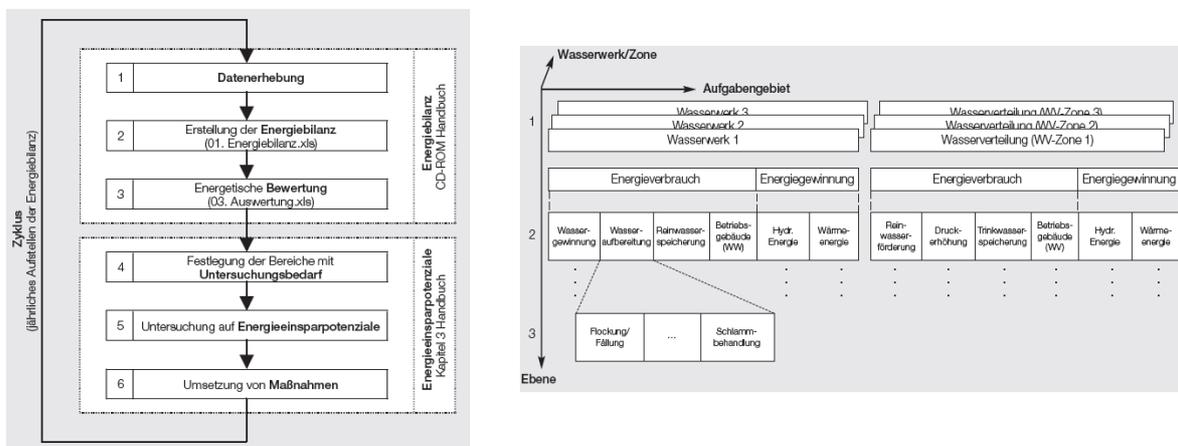


Bild 7.8:
Energiemanagement in der Wasserversorgung [DVGW (2010)]

- Zukunftsorientierte Überlegungen zum Strombezug**

Um auch in Zukunft eine hohe Versorgungssicherheit im Bereich der Wassergewinnung, -aufbereitung und -verteilung/-speicherung gewährleisten zu können, sind Maßnahmen, mit denen die Ausfallwahrscheinlichkeit der elektrischen Komponenten auf ein Minimum verringert werden kann, konsequent fortzusetzen. Zunächst bietet sich in diesem Zusammenhang der redundante Energiebezug über infrastrukturunabhängige Stromeinspeisungen an (**Bild 7.9**). Hierdurch ist es möglich, zumindest einen Teilausfall oder regional bedingte Stromengpässe entsprechend auszugleichen.



Bild 7.9:
Redundanter Strombezug für
Förderung und Aufbereitung von
Bodenseewasser, dargestellt am
Beispiel der Bodensee-
Wasserversorgung [BWV (2013)]

Darüber hinaus lässt sich die Verfügbarkeit der versorgungsrelevanten Anlagen weiter absichern, indem zusätzlich dezentrale „Energiequellen“ vor Ort genutzt werden. Vor dem Hintergrund der sogenannten „Energiewende“ gewinnt diesbezüglich vor allem die Bereitstellung und der Bezug von regenerativer/erneuerbarer Energie³ aus Wasserkraft-, Wind-, Solar- Geothermie- oder Biogasanlagen zunehmend an Bedeutung (**Bild 7.10**).



Bild 7.10:
Regenerative Energiegewinnung -
Beispiel Windkraft [BWV (2013)]

³ Als „erneuerbare, regenerative oder alternative Energien“ werden Energieträger bezeichnet, die im Rahmen des menschlichen Zeithorizonts praktisch unerschöpflich zur Verfügung stehen oder sich verhältnismäßig schnell „erneuern“. Damit grenzen sie sich von fossilen Energiequellen ab, die sich erst über den Zeitraum von Millionen Jahren „regenerieren“. Die Begriffe sind nicht im streng physikalischen Sinne zu verstehen, da Energie sich nach dem Energieerhaltungssatz weder vernichten noch erschaffen lässt, sondern lediglich in verschiedene Formen überführt werden kann.

Da der Erfolg des Einsatzes von regenerativen Energien entscheidend von innovativen Lösungsansätzen abhängt, sind die Wasserversorgungsunternehmen aufgefordert, zukünftig auch hier ihren Beitrag zu leisten und verstärkt an Forschungsvorhaben mitzuwirken, die beispielsweise als Schwerpunktthemen

- die Stromrückgewinnung im Falle von überschüssiger geodätischer Energie,
- den Ausgleich von Lastschwankungen im Sinne einer azyklischen „intelligenten“ Stromnutzung oder
- die Energiespeicherung via Wasserkraft

zum Gegenstand haben.

Um die Abhängigkeit gegenüber Dritten zu verringern, sind zukünftig auch Überlegungen anzustellen, ob und inwieweit es zielführend ist, unter den spezifischen Rahmenbedingungen des jeweiligen Einzelfalles eine „eigene“ Stromherstellung mit in die Organisationsstruktur des Wasserversorgungsunternehmens einzubinden, sich finanziell an Energieversorgungsnehmern zumindest anteilig zu beteiligen oder über rechtsverbindliche Regelungen einen bevorzugten Strombezug zu sichern.

- *Erhöhung der Versorgungssicherheit durch Vorhaltung von Ersatzstrom sowie Notversorgungssystemen für IT- und Kommunikationstechniken*

Wegen den verstärkt zu erwartenden Versorgungsengpässen bei der Energieversorgung ist als dritte Vorsorgemaßnahme ein ausgewogener Ausbau/Nachrüstung stationärer bzw. eine entsprechende Vorhaltung mobiler Ersatzstromaggregate (ESTA) oder von Hilfsenergieanlagen (z.B. Hauswaserturbinen, Photovoltaik, Batterien) anzuraten (**Bild 7.11**). Neben den ggf. begrenzten Platz- und Schaltschrankreserven sind hierbei eine ausreichende Größe der Treibstofftanks sowie die Gegebenheiten von Standorten mit exponierten Lagen (z.B. Befahrbarkeit der Straßen bei extremen Wetterverhältnissen, Überschwemmungsrisiko, ...) zu berücksichtigen.

Die Versorgungssicherheit kann durch Präventivmaßnahmen, die der Absicherung der Anlagen zur Datenübertragung dienen, erhöht werden (**Bild 7.12**). Zum Beispiel lassen sich durch

- die Installation von Schutzanlagen, die nachteilige Auswirkungen von Blitzeinschlägen und Überspannungen entgegenwirken,
- den Einbau von Rohrbruchsicherungen mit der Sicherheitsstellung „stromlos offen“,
- die Verwendung eigener Datenkabel sowie
- die Regionalisierung von Fernwirktechniken und den Einsatz von autark betreibbaren „Leitstellen-Unterzentralen“
- eine redundante Auslegung der MSR-Technik,
- den Einsatz von Doppelrechnersystemen,
- die Verfügbarkeit voneinander unabhängiger Kommunikationssystemen (Betriebsfunk, Mobiltelefon, Festnetztelefon, Fax, Datenübertragung per Computer)

zumindest teilweise die Funktionsfähigkeit der Anlagen im „Vor-Ort“-Betrieb aufrechterhalten und weiterhin entsprechende Messungen, Steuerungen und Regelungen vornehmen.



Bild 7.11:
Ersatzstromanlagen (ESTA) zum notfallbedingten Betrieb technischer Betriebskomponenten (z.B. Pumpen, Ozonerzeuger, ...), dargestellt am Beispiel der Bodensee-Wasserversorgung [BWV (2013), Staib (2013)]

links: Stationäre ESTA in der Aufbereitungsanlage „Siplinger Berg“ (ab 2014 installierte Leistung: 12.400 MW)

rechts: Mobiles Ersatzstromaggregat (100 kVA), geeignet zum Transport mit einem VW-Bus, zugelassen für Führerschein B

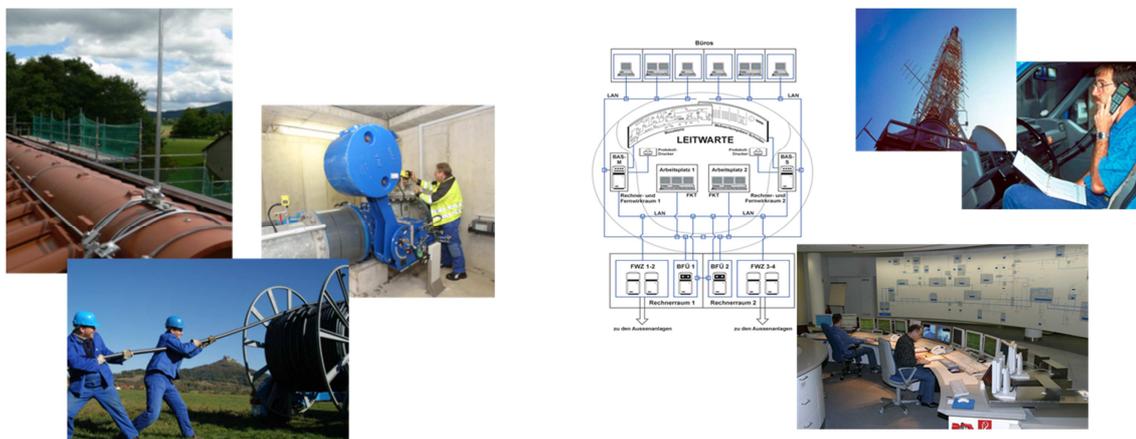


Bild 7.12:
Beispiele von Präventivmaßnahmen, die zusätzlich zur Erhöhung der Versorgungssicherheit insbesondere bei lokalen Stromunterbrechungen beitragen können (Erläuterungen siehe Text) [BWV (2013), Staib (2013)]

7.6 Forschung und Kenntniserweiterung

Um unter den zu erwartenden Rahmenbedingungen der Klimaveränderung den steigenden Anforderungen an die Trinkwassergüte gerecht zu werden, reichen die betrieblich/technischen Maßnahmen alleine nicht aus, vielmehr sind wie bislang praxisorientierte Monitoring-, Forschungs- und Entwicklungsprojekte in den Bereichen des vorsorgenden Gewässerschutzes, der Biologie/Limnologie, der Mikrobiologie, der chemischen Analytik und der Verfahrenstechnik/betriebliche Belange unverzichtbar (**Bild 7.13** bis **Bild 7.16**).



Bild 7.13:
Forschung und Entwicklung sichern die Zukunft [BWV (2013)]
Beispiel: Biologie, Limnologie

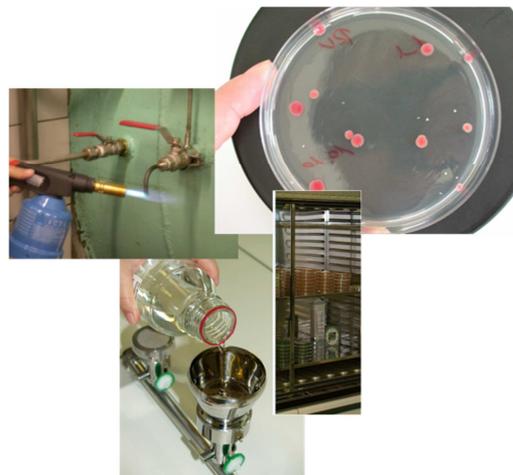


Bild 7.14:
Forschung und Entwicklung sichern die Zukunft [BWV (2013)]
Beispiel: Mikrobiologie



Bild 7.15:
Forschung und Entwicklung sichern die Zukunft [BWV (2013)]
Beispiel: Analytik - wirkungsbezogene Untersuchungen, Online-Messungen, Screeningverfahren, Einzelstoffanalytik,...)



Bild 7.16:
Forschung und Entwicklung sichern die Zukunft [BWV (2013)]
Beispiel: Verfahrenstechnik / Betriebliche Belange

Nur durch langfristig ausgerichtete Untersuchungs-/Überwachungsprogramme ist es möglich, frühzeitig sich abzeichnende Trends zu erkennen. Hier gilt es, in enger Zusammenarbeit mit den zuständigen Behörden und wissenschaftlichen Institutionen wie beispielsweise

- der Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB),
- der Arbeitsgemeinschaft Wasserwerke Bodensee-Rhein (AWBR),
- dem Institut für Seenforschung Langenargen,
- dem Institut für Umwelt und Lebensmittelsicherheit des Landes Vorarlberg,
- der Universität Konstanz, Limnologisches Institut,
- der Universität Stuttgart,
- dem Bundesumweltamt, Berlin
- der Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz, Dübendorf,
- das Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe,
- dem Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung, Mülheim,
- der Ingenieurgesellschaft Prof. Kobus und Partner, Stuttgart oder
- den Laboren der Landeswasserversorgung (LW) und Wasserversorgung Zürich (WVZ)

das in den Wasserwerken vorhandene know-how einzubringen sowie im Falle, dass unerwünschte Auswirkungen und Folgen nicht auszuschließen sind, bei der Erarbeitung von Vorsorge-/Gegenmaßnahmen aktiv mitzuwirken. Durch die Weiterentwicklung innovativer Lösungsansätze lassen sich u.a. grundlegende Zusammenhänge ableiten, die als Entscheidungshilfen im Rahmen der Anpassungsstrategie herangezogen werden können.

7.7 Katastrophen- und Notfallmanagement

Trinkwasserversorgungssysteme sind Infrastruktureinrichtungen mit existenzieller Bedeutung [BMBF (2011), UBA (2011c)]. Eine Beeinträchtigung oder Unterbrechung der Trinkwasserlieferung kann wesentliche Auswirkungen auf die Gesellschaft im Allgemeinen sowie auf Einzelpersonen im Speziellen haben. Sowohl die Gesundheit der Bevölkerung als auch die ökonomische Wertschöpfung hängen maßgeblich von einer zuverlässigen Trinkwasserversorgung ab. Im „betrieblichen Alltag“ werden die Aufgaben meist effektiv und effizient mit der bestehenden Aufbau- und Ablauforganisation der Wasserversorgungsunternehmen beherrscht. Durch das gleichzeitige Auftreten mehrerer Störungen oder die Verkettung ungünstiger Umstände, können jedoch auch unvorhersehbare Ausnahmesituationen resultieren, in der die vorhandenen betriebsgewöhnlichen Mittel und/oder Organisationsstrukturen zu deren Beherrschung nicht ausreichen (**Bild 7.17**).

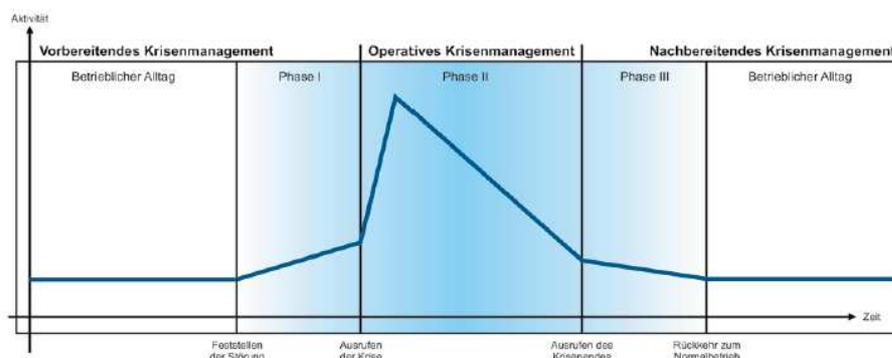


Bild 7.17:
Zeitlicher Ablauf
einer Krise [DVGW
(2012)]

Als Beispiele sind hier neben technischem Versagen von Anlagenteilen, internationalen Gefahren (Kriege) sowie Großschadensereignissen vor allem auch Naturkatastrophen⁴ zu nennen. Solche außergewöhnlichen Vorkommnisse sind dadurch gekennzeichnet, dass sie zwar verhältnismäßig selten eintreten, jedoch vielfach mit einem hohen Schadenspotenzial verbunden sind. Ferner erschweren zudem die oft nur eingeschränkt zur Verfügung stehenden Ressourcen, eine mangelnde Informati-

⁴ z.B. Rohrbruch, Ausfall von Pumpen, ..., kriminelle Handlungen, Sabotage, Terror, ..., großflächiger Stromausfall, Pandemie, ..., Erdbeben, extremer Starkregen, Überschwemmungen, Hochwasser, Stürme, ...

onslage und Kommunikationsmöglichkeiten (intern, extern), sowie die hohe Eigendynamik bzw. schlechte Planbarkeit die Beherrschung der Situation. Alle Beteiligten und „Akteure“ stehen somit unter einem hohen Entscheidungs-, Zeit- und Rechtfertigungsdruck. Neben der Sicherstellung der Versorgung im Normalbetrieb [DVGW (2012)] sind daher in „Friedenszeiten“ auch für unvorhersehbare und nicht planbare Ereignisse entsprechende Konzepte, Unternehmensstrategien und Sonderstrukturen vorzubereiten, die im Stör-, Not- und Katastrophenfall bzw. im Falle einer Krise zu deren Bewältigung und Schadensminimierung angewandt werden können.

Insbesondere im Zusammenhang mit den sich ändernden Rahmenbedingungen des Klimawandels und den zu erwartenden extremen Wetterereignissen wird daher empfohlen, die vorhandenen Vorsorgepläne und Organisationsmaßnahmen entsprechend zu aktualisieren. Nachfolgend werden ohne Anspruch auf Vollständigkeit erste Anregungen aufgezeigt, die hierbei zu berücksichtigen sind.

U.a. hat es sich als geeignet erwiesen, den Aufbau eines Notfall- und Krisenmanagements an die streng hierarchische Organisationsstruktur der zuständigen Behörden für den Katastrophenschutz und den Einsatzkräften zur Schadensabwehr (z.B. Polizei, Feuerwehr, Rettungskräfte, ...) anzulehnen (**Bild 7.18**).

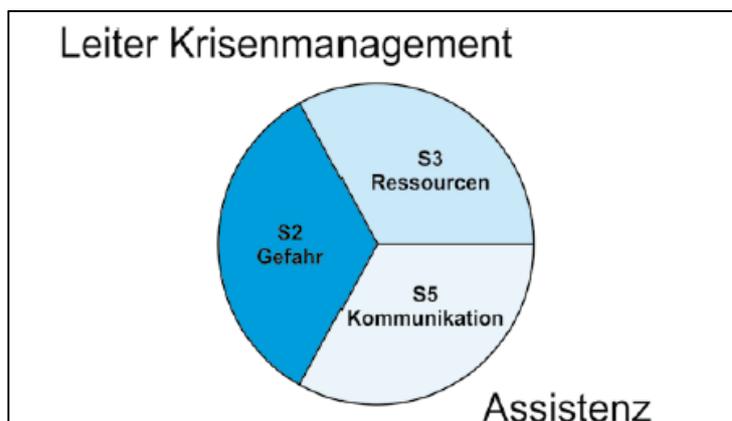


Bild 7.18:
Aufbau eines Krisenmanagements
[BWV (2013)]

Mit den im Vorfeld benannten Mitgliedern des Krisenstabes (Leiter, S2 für die Gefahrenbeurteilung, S3 für die operative Ressourcenplanung und S5 für die Kommunikationsarbeit) sowie einem unterstützenden Assistententeam können zwar Unfälle, Sabotageakte oder Naturkatastrophen nicht verhindert werden, aber als Instrument der temporären Unternehmenssteuerung dient das Notfall- und Krisenmanagement dazu, die Handlungsfähigkeit des Wasserversorgungsunternehmens sowie die Wasserversorgung auch bei außergewöhnlichen Vorkommnissen durch fundierte, sachgerechte und transparente Entscheidungen soweit wie möglich aufrecht zu erhalten.

Zur Beurteilung der Lage hat sich eine Zusammenstellung von entsprechenden Fragestellungen in Form einer Checkliste als hilfreich erwiesen. In **Tabelle 7.2** sind bei-

spielhaft einige Überlegungen aufgeführt, die nicht nur im Falle von klimabedingten Naturkatastrophen und Extremereignissen zu beachten sind.

Tabelle 7.2:

Zentrale Fragen zur Bewältigung von außergewöhnlichen Vorkommnissen

<p>Kurzbeschreibung des Ereignisses und Einschätzung der Lage</p>	<p>Welches Ereignis liegt vor und wie ist die aktuelle Sachlage einzuschätzen? Welche externen Einflüsse sind zu erwarten (Wetter, Jahreszeit, Tageszeit, Schichtung/Vollzirkulation,...)? Sind bereits Auswirkungen im Einzugsgebiet bzw. im Trinkwasserversorgungsgebiet sowie Bodensee (Tiefenwasser, Ufer- und Flachwasserbereich,...) zu beobachten? Sind bereits Schäden (personell, materiell) eingetreten (u.a. bei Mitarbeitern, Gemeinden/Städte, Endkunden, Anlagen/Betrieb, Infrastruktur und Umwelt wie Strom, Telekommunikation, Zusatzstoffe für Aufbereitung, Entsorgung von Betriebsrückständen)? Ist die Beschaffenheit des Trinkwassers beeinträchtigt? Ist die Versorgungssicherheit (Wassermenge, Druck) gewährleistet? Welche Behörden und Experten sind bereits involviert? Welche Empfehlungen der Behörden und externen Experten liegen vor?</p>
<p>Prognose über mögliche Verläufe (voraussichtliche zukünftige Entwicklungen im besten und schlechtesten Fall)</p>	<p>Welche Folgeereignisse sind wo und mit welcher Intensität zu erwarten? Mit welcher Zeitdauer ist zu rechnen? Welcher Zeitraum steht für Gegenmaßnahmen zur Verfügung? Wie wirken sich Einflüsse (z.B. Wetterentwicklung, Tageszeit, Schichtungszustände,...) von außen kurz-, mittel-, langfristig aus? Welche zukünftigen Auswirkungen sind zu erwarten (personell, materiell, Trinkwasserbeschaffenheit, Versorgungssicherheit,... bzgl. Mitarbeiter, Verbandsmitglieder, Endkunden, Rohwasser, Trinkwasser, Versorgungssicherheit (Wassermenge, Druck), Anlagen/Betrieb, Auswirkungen auf weitere Infrastruktur und Umwelt (Strom, Telekommunikation, Zusatzstoffe für Aufbereitung, Anrainer, Ökosystem,...))</p>
<p>Empfehlungen möglicher Gegenmaßnahmen</p>	<p>Sind Sofortmaßnahmen notwendig? (Rettung und Evakuierung von Personen, Sicherung/Absperrung des betroffenen Bereichs, Empfehlungen der Behörden und externen Experten umsetzen, wer kann helfen (extern, intern Polizei, Labor, Hilfsdienste), Welche Gegenmaßnahmen sind gemäß Schadensbild, Schadensausmaß und Schadensursache sinnvoll? (Untersuchungsprogramm, Screening, Spülen, Chloren,..., Wasserabgabe verringern, einstellen,... persönliche Schutzausrüstung besorgen,...) Sind Verhaltensregeln für Mitarbeiter und Betroffene festgelegt und umsetzbar?</p>
<p>Zuständige Behörden, wissenschaftliche Institutionen und Organisationen (Beispiele)</p>	<p>Ministerien/Behörden: Ministerium Ländlicher Raum, Umweltministerium, Innenministerium, Justizministerium, Sozialministerium, Regierungspräsidien, Landesgesundheitsamt, Landratsämter, Gesundheitsämter, Polizei,, Wasserschutzpolizei, ... Fachabteilungen: BfR, RKI, UBA, CVUA, LGRB, DWD, HVZ, TZW, KIT, ISF, kup, weitere WVU, zuständiger Energieversorger, Hersteller, Lieferanten, ... Verbände: DVGW, SVGW, ÖVGW, IGKB, AWBR, ...</p>

Wie die Erfahrungen bei der Bodensee-Wasserversorgung gezeigt haben, ist außerdem die gute und vertrauensvolle Zusammenarbeit mit den zuständigen Behörden, wissenschaftlichen Institutionen sowie mit Kollegen von befreundeten Wasserversorgungsunternehmen für eine erfolgreiche Bewältigung einer Krise ausschlaggebend. Ferner kommt während einer Krise der internen und externen Kommunikation eine besondere Bedeutung zu. Zur Information der Bevölkerung bietet sich beispielsweise die Einrichtung einer unternehmensspezifische Home-page oder eines temporären Bürgertelefons an.

7.8 Präventive Kommunikations- und Dialogstrategie, Zusammenarbeit mit Dritten

Die Anpassung der natürlichen und gesellschaftlichen Systeme an den Klimawandel ist durch eine Vielzahl an Herausforderungen gekennzeichnet, die oftmals nicht einfach zu lösen sein werden. Daher sind alle Anpassungsoptionen, die im Rahmen des vorsorgenden Gewässerschutzes sowie der technischen Optimierungsansätze erarbeitet werden, durch Maßnahmen zu ergänzen, die den Grundgedanken einer „präventiven Kommunikations- und Dialogstrategie“ unter Nutzung der vorhandenen wasserwerksinternen und externe Informationsmöglichkeiten und Einbeziehung aller heute zur Verfügung stehenden Medien (z.B. Intranet, Internet, Soziale Netzwerke, Diskussionsforen, Workshops, Kolloquien, Veröffentlichungen, Fernsehen, Rundfunk,...) umsetzen (**Bild 7.19**).

Die Vorgehensweise ist dabei so auszurichten, dass über alle Grenzen und internationalen, nationalen und regionalen Ebenen hinweg

- eine gezielte Bewusstseinsbildung gegenüber dem Klimawandel im Rahmen eines interaktiven Austausches von Informationen, Wissen und Meinungen gefördert,
- eine transparente Darstellung aller klimarelevanten Indikatoren, Vulnerabilitäten und Chancen/Risiken ermöglicht sowie
- ein kooperatives Miteinander und eine intensive/integrative Zusammenarbeit zwischen Entscheidungsträgern, Wissenschaft, Praxis, Interessensverbänden, Katastrophenschutz und Öffentlichkeit erleichtert

wird. Durch sensibilisierte Akteure können denkbare Spannungsfelder bereits frühzeitig ausgeglichen und die Akzeptanz für die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen geschaffen werden.



Bild 7.19:

Eine präventive Kommunikationsstrategie, eine kooperatives Miteinander und enge Zusammenarbeit aller „Akteure“ trägt wesentlich zur Lösung zukünftiger Herausforderungen bei [BWV (2013)]

7.9 Personelle Aspekte

Um die Verpflichtungen und Aufgaben der Wasserversorgungsunternehmen, insbesondere in Hochverbrauchszeiten bzw. im Not-, Katastrophen- und Krisenfall erfüllen zu können, bedarf es hoch qualifizierter Mitarbeiter in ausreichender Anzahl. Nicht nur wegen des demographischen Wandels und des drohenden Fachkräftemangels sondern auch aufgrund der zu erwartenden Herausforderungen, die aus den Auswirkungen und Folgen der Klimaveränderung resultieren, ist die Entwicklung innovativer Strategien und Erarbeitung nachhaltiger Ansätze im Rahmen eines zukunftsorientierten Personalentwicklungskonzepts unabdingbar. Motivierte und zufriedene Mitarbeiter/innen, die mit ihrem Arbeitsbereich bestens vertraut sind, stellen einen der wichtigsten Erfolgsfaktoren für ein Unternehmen dar (**Bild 7.20**).



Bild 7.20:
Beispiele der viel-
fältigen und ab-
wechslungsreichen
Aufgaben von Mit-
arbeitern in einem
Wasserversor-
gungsunternehmen
[BWV (2013)]

Neben individueller Förderung und Unterstützung eines jeden Einzelnen ist daher vor allem die Umsetzung von Maßnahmen zielführend, die die gesamte Belegschaft gleichermaßen mit einschließen:

- Eine fundierte Ausbildung junger Menschen sowie die regelmäßige Teilnahme von Mitarbeitern an Schulungs- und Fortbildungsveranstaltungen sichern langfristig die fachlichen und sozialen Fähigkeiten, Fertigkeiten und Kenntnisse.
- Zur Minimierung von klimabedingten Einflüssen (z.B. Hitze), die zu nachteiligen Beeinträchtigungen der menschlicher Gesundheit und des Wohlbefindens führen können, sind geeignete Anpassungen hinsichtlich der Arbeitsbedingungen und des Arbeitsplatzes (z.B. flexible Zeiteinteilung, Lockerung der Kleiderordnung, Wärmedämmung von Gebäuden, Installation von Klimaanlage/Ventilatoren in Fahrzeugen und Büroräumen,...) vorzusehen.
- Aufgrund der klimabedingten Änderung von ökologischen Faktoren, dem natürlichen Vogelflug sowie dem zunehmenden globalen Personen-, Tier- und Güterverkehr können weltweit Ausbrüche von Infektionskrankheiten möglich sein, die auf bislang nicht bekannte Erreger zurückzuführen sind. Im worst-case-Fall kann dies zu einer Epidemie oder gar Pandemie führen. Da solche Ereignisse weder zeitlich noch räumlich begrenzt sind und sich stetig ausbreiten, sind jedoch Vorhersagen über Ausbreitungsrichtung, Geschwindigkeit, Eintrittszeit, Dauer und Ausmaß nicht oder nur schwer möglich. Es ist daher damit zu rechnen, dass nahezu die gesamte Mitarbeiterbelegschaft krankheitsbedingt ausfallen könnte. Als Präventivmaßnahmen für einen solchen Fall ist anzuraten, dass die vorhandenen Notfallstrukturen stetig aktualisiert, fortgeschrieben und konsequent umgesetzt werden. Entsprechende Hilfestellungen hierzu liegen beispielsweise in Form von Pandemieplänen

oder Empfehlungen vor [Sozialministerium (2008), DVGW (2009c)]. U.a. wird darin auf folgende Punkte näher eingegangen:

- Unterrichtung der Mitarbeiter über persönliche Schutz- und Hygienemaßnahmen (Schutzkleidung, Schutzmasken, regelmäßige Desinfektion von Gegenständen, Körperteilen,....)
- Ermittlung kritischer Infrastrukturpunkte (Schaltwarten, ...)
- Frühzeitige Ermittlung der Anzahl an Mitarbeitern in Schlüsselfunktionen, die zur Aufrechterhaltung der Wasserversorgung erforderlich sind
- Einarbeitung zusätzlicher Arbeitskräfte zur Übernahme von relevanten Aufgaben
- Enge und frühzeitige Kontaktaufnahme und Abstimmung mit den für den Gesundheitsschutz zuständigen Behörden (Innenministerium, Regierungspräsidium, Landratsamt, Gesundheitsamt) und dem Betriebsarzt
- Einberufung Krisenstab

7.10 Rechtlicher Ordnungsrahmen

Die nachhaltige Nutzung der Ressource Wasser stellt unter Berücksichtigung der klimatischen, demographischen, ökologischen und ökonomischen Veränderungen eine der großen gesellschaftlichen Herausforderungen der Zukunft dar. Als bedeutendes Element der Daseinsfürsorge leisten hierbei die Wasserversorgungsunternehmen im Spannungsfeld zwischen Umwelteinflüssen und anthropogenen Eingriffen einen wesentlichen Beitrag. Dabei muss allen Beteiligten immer wieder klar gemacht werden, dass die Anpassung an den Klimawandel eine sektorübergreifende und gesamtgesellschaftliche Aufgabe ist und es kein allgemeingültiges Lösungsmuster angewandt werden kann. Die jeweils umsetzbaren Handlungsmöglichkeiten ergeben sich u.a. aus den jeweiligen naturräumlichen Bedingungen, den regional resultierenden Umweltauswirkungen sowie den Wechselwirkungen mit anderen Wandelprozessen. Nicht zuletzt sind es die rechtlichen Rahmenbedingungen, die die Gestaltungsspielräume eines Wasserversorgers definieren [DVGW (2009a)]. Ziel muss es daher sein, im regulatorischen Bereich allen Tendenzen und Entwicklungen entgegen zu wirken, bei denen eine Beeinträchtigung der für die Trinkwasserversorgung genutzten Gewässer bzw. bei denen Benachteiligungen von Wasserversorgungsunternehmen nicht auszuschließen sind. Vor diesem Hintergrund wird es als notwendig erachtet, dass sich die Wasserversorgungsunternehmen aktiv bei der Erarbeitung von internationalen, nationalen und regionalen/kommunalpolitischen Vorgaben beteiligen und ihren Einfluss entsprechend geltend machen.

- Die europäische Wasserrahmenrichtlinie zielt im Wesentlichen auf eine Verbesserung des ökologischen Zustandes der Oberflächengewässer und des guten chemischen Zustandes der Grundwasserkörper ab. Da die Auswirkungen des Klimawandels auch auf wesentliche Elemente der Richtlinie (z.B. ökologischer Mindestabfluss, Nähr- und Schadstofffrachten,...) Einfluss nehmen, wird beispielsweise

se von *Kropp u.a. (2009)* empfohlen, ihren integrativen Charakter auch für die Findung und Umsetzung nachhaltiger Anpassungsstrategien zu nutzen.

- Insbesondere in länger anhaltenden Hitze- und Trockenperioden können konkurrierende Nutzungen (z.B. Bewässerungsbedarf der Landwirtschaft, Kühlwasserentnahme zur Energieerzeugung, Trinkwasserversorgung) der örtlich/regional begrenzten Wasservorkommen (Grundwasser, Fließgewässer, Seen,...) zur Verknappung des Wasserdargebotes führen. Es ist davon auszugehen, dass ohne eine gezielte Regelung nicht mehr jederzeit und überall die Ansprüche und Anliegen der verschiedenen Interessensgruppen in gleichem Maße erfüllt werden können [*AWEL (2007)*]. Um die Versorgungssicherheit auch zukünftig gewährleisten zu können, ist darauf hinzuwirken, dass durch Rechtsgrundlagen der Trinkwasserversorgung
 - Vorrang vor allen anderen Interessensgruppen eingeräumt wird,
 - ausreichende Wasserrechte zur Spitzenbedarfsdeckung erteilt sowie
 - die Wasserversorgungsunternehmen bei den Genehmigungsverfahren und den Umsetzungen von Maßnahmen zum Hochwasserschutz beteiligt werden.
- Treffen die Prognosen zu, dass in Zukunft zunehmend länger anhaltende Hitze- und Trockenperioden resultieren, ist vor allem in den Sommermonaten auch eine starke Abnahme der Abflüsse der Fließgewässer und ein Anstieg der Wassertemperatur zu erwarten. Bei einem gleichzeitig steigendem Energieverbrauch zu Kühlzwecken sind somit wegen der Verknappung von Kühlwasser auch Stromengpässe bzw. Stromunterbrechungen/-ausfälle nicht auszuschließen. Um die Versorgung mit Trinkwasser auch in Hochverbrauchszeiten gewährleisten zu können, ist ein „bevorzugter“ Strombezug von kritischen Infrastrukturen im rechtlichen Ordnungsrahmen zu integrieren.
- Es ist zu erwarten, dass sich das derzeit dreigliedrige System der Trinkwasserversorgung von Baden-Württemberg bestehend aus der Grundversorgung durch örtliche Wasserversorgungen, dem regionalen Wasserbezug durch Gruppenwasserversorgungen und dem überregionalen Wasserausgleich über Fernwasserversorgungen (**Bild 7.21**), sich auch unter den sich ändernden Rahmenbedingungen des Klimawandels bewähren wird.



Bild 7.21:
Trinkwasserversorgung in Baden-Württemberg, basierend auf den Eckpunkten der Orts- und Gruppenwasser-versorgungen sowie überregional tätigen Versorgungsverbänden [BWV (2013)]

Wie in Kap. 4 und 5 ausführlich dargestellt, ist davon auszugehen, dass in Abhängigkeit der örtlichen/regionalen Verhältnisse zeitlich und räumlich unterschiedlich ausgeprägte Grundwasserneubildungsraten resultieren, im langjährigen Mittel i.d.R. jedoch Grund- und Quellwassermengen in ähnlichem Ausmaß wie heute zur Verfügung stehen. Hingegen ist wegen der prognostizierten Zunahme der Häufigkeit und Intensität von extremen Wetterereignissen und den damit verbundenen Auswirkungen ein deutlicher Anstieg des Bedarfs an Fernwasser zu erwarten [Landtag Baden-Württemberg (2009), EUWID (2012)]. Vor diesem Hintergrund sind die gesetzlichen Vorgaben des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) in der aktuellen Fassung vom 01.08.2013 sowie das Leitbild „Wasserversorgung in Baden-Württemberg“ gemeinsam mit allen betroffenen Akteuren (Politik, Verwaltung, Wirtschaft, Verbände, Wassernutzer) zu überprüfen und den zukünftigen Rahmenbedingungen anzupassen [Wasserhaushaltsgesetz (2013), UM-BW (2007)]. Ziel sollte es dabei sein, „intelligente“, d.h. zukunftsorientierte Wasserversorgungskonzepte/Verbundsysteme zu entwickeln, bei denen die Bedeutung der jeweiligen Versorgungssysteme „Fernwasser, Gruppenwasser, Ortswasser“ entsprechend berücksichtigt ist. Insbesondere die in §50, Abs. 2 des WGH festgeschriebene Regelung, dass grundsätzlich der Wasserbedarf der öffentlichen Wasserversorgung vorrangig aus ortsnahen Wasservorkommen zu decken ist, steht aus Sicht der überregional tätigen Unternehmen dem o.g. Sachverhalt entgegen.

7.11 Ökonomie

Angesichts der Erkenntnis, dass kurz- bis mittelfristig kaum mit einer Trendumkehr im Zusammenhang mit der Verringerung der CO₂-Emissionen und somit auch nicht mit einer signifikanten Veränderung der zu erwartenden globalen Erderwärmung zu rechnen ist, gewinnen im Rahmen der Klimapolitik die Adaptions- bzw. Anpassungs-

strategien immer mehr an Bedeutung [UFZ (2012)]. Mit zunehmenden Aktivitäten, die zu einer konkreten Umsetzung der Handlungserfordernisse in den jeweiligen Wirtschaftssektoren führen, sind somit zukünftig vermehrt Diskussionen über deren monetäre Bewertung zu erwarten (**Bild 7.21**).



Bild 7.22:
**Ökonomische Bewertung der Auswirkungen
und Folgen des Klimawandels [BWV (2013)]**

Speziell im Bereich der Trinkwasserversorgung werden daher vor allem ökonomische Überlegungen zur Finanzierung von klimabedingten Präventivmaßnahmen zunehmend in den Mittelpunkt des Interesses rücken. Es bedarf folglich praktikabler Vorgehensweisen und methodischer Ansätze, mit denen offene Fragestellungen wie z.B.

- Welche Lösungsansätze sind vorrangig umzusetzen und welche sind ökonomisch sinnvoll?
- Welcher „Nutzen“ ergibt sich aus den jeweiligen Anpassungsmaßnahmen?
- Wie hoch sind die finanziellen Zusatzaufwendungen, die durch klimabedingte Handlungserfordernisse verursacht werden?
- Ab welchem Zeitpunkt lohnen sich investive Vorkehrungen?
- Inwieweit ist eine Anpassung der Preis-/Gebührenstruktur an die veränderten Rahmenbedingungen zielführend?

beantwortet werden können. Um die derzeitigen Kenntnislücken schließen zu können, sind über die bisherigen Anstrengungen zur Identifizierung, Priorisierung und Vulnerabilitäts-/Risikoabschätzung der Klimaauswirkungen/Folgen einschließlich der daraus abgeleiteten Anpassungsmöglichkeiten hinaus entsprechende Untersuchungen und Auswertungen von wirtschaftlichen Gesichtspunkten mit in die Gesamtbeurteilungen einzubeziehen.

- Während die ökonomische Forschung zu den Kosten des Klimaschutzes (Verringerung CO₂-Emissionen, Energieeinsparung, alternative Energiegewinnung,...) schon recht weit fortgeschritten ist, liegen hinsichtlich der erforderlichen finanziellen Aufwendungen für Adaptionserfordernisse lediglich wenige Erkenntnisse auf räumlich hoch aggregierten Skalenebenen oder für einzelne Sektoren der Was-

serwirtschaft (z.B. Küsten- und Hochwasserschutz) vor. Im Rahmen der Gremienarbeit (z.B. DVGW, BDEW, ...) sollte daher der Forschungsbedarf erfasst und in entsprechenden Projekten in Anlehnung an die aktuell initiierten bzw. abgeschlossenen einschlägigen Forschungsvorhaben umgesetzt werden [*www.oekonomie-klimawandel.de* (2013), *HWWI* (2012), *UFZ* (2011), *UFZ* (2012)].

- Hinsichtlich der vorgeschlagenen Handlungserfordernisse und Präventionsmaßnahmen sind in Zukunft investive und organisationsbasierte Mehrkosten zu erwarten. Finanzierungsmodelle, die weiterhin eine faire und sozialverträgliche Kostenstruktur gewährleisten, sind zu entwickeln. Bei der Gestaltung der Wasserentgelte (öffentlich-rechtliche Gebühren, privatwirtschaftliche Preise) ist u.a. zu beachten, ob und inwieweit klimabedingte Zusatzaufwendungen zu einer Änderung der Fix- und förderabhängigen Kosten beitragen.
- Da die Wasserversorgung u.a. durch eine aufwändige Infrastruktur und durch lange Nutzungsdauer der technischen Anlagen gekennzeichnet ist, sind in einem Abwägungsprozess ökonomische Aspekte in Form einer entsprechenden Kosten-Nutzen-Analyse zu bewerten. Während bei einer klassischen Vorgehensweise diejenige Handlungsoption ausgewählt wird, die unter Berücksichtigung direkter Kosten und Nutzen entweder das beste Gesamtergebnis (Effektivität) erbringt oder mit Blick auf die eingesetzten Mittel die beste Rentabilität (Effizienz) verspricht, werden bei einer erweiterten Kosten-Nutzen-Analyse auch indirekte Kostenkomponenten (z.B. Folgekosten durch Schädigung der Umwelt, Erhalt der Biodiversität, Maßnahmen zur Verbesserung der Lebensqualität,...) mit berücksichtigt.
- Wegen ihrer längeren Umsetzungs- und Finanzierungsphase bedürfen vor allem die vermögensplanrelevanten Aktivitäten einer frühzeitigen und sorgfältigen Planung. Da außerdem eine Zunahme von Wetterextremen verbunden mit Elementarschäden größeren Ausmaßes nicht auszuschließen ist, wird daher zusätzlich empfohlen, zeitnah den derzeit bestehenden Versicherungsschutz zu überprüfen und hinsichtlich der zu erwartenden Rahmenbedingungen ggf. anzupassen. Versicherungsgesellschaften sind aktuell dabei, entsprechende Produkte zu generieren [*UBA* (2011a)].

7.12 Abschließende Bemerkungen

Durch den heute bereits spür- und sichtbaren Klimawandel verändern sich auch bislang als „fest“ angenommene Kriterien und Kenngrößen, die seither als zuverlässige Informationsgrundlagen zur Einschätzung zukünftiger Entwicklungen herangezogen wurden bzw. auf die sich die Planungs- und Investitionsentscheidungen in der Vergangenheit stützten. Beispielsweise ist davon auszugehen, dass die zunehmende Variabilität des Klimas und damit eine größere Vielfalt möglicher Witterungsphänomene Teil der künftigen Rahmenbedingungen sein werden. Daher bedarf es einer kritischen Überprüfung der bisherigen Überlegungen bei gleichzeitiger Beobachtung

und Auswertung der klimabedingten Umweltauswirkungen bzw. der daraus resultierenden Folgen für die Wasserversorgungsunternehmen. Trotz aller Unsicherheiten, Unwägbarkeiten und subjektiven Einschätzungen, die dem heutigen Wissensstand zugrunde liegen, gilt es, sich bereits „heute“ auf die zu erwartenden Verhältnisse von „morgen“ vorzubereiten. Hierzu sind unter Abwägung der z.T. gegensätzlich verlaufenden Klimaentwicklungen und zivilisatorischen Einflüsse sowie unter Berücksichtigung der standort- und systemspezifischen Rahmenbedingungen⁵ pragmatische, d.h. dynamische, flexible und angemessene Anpassungsstrategien, Empfehlungen und Umsetzungsmöglichkeiten zu erarbeiten. Die aufgezeigten Beispiele, die sich vorwiegend an dem Grundgedanken der „vorteilsausnutzenden Maßnahmen“ („win-win“) oder „Maßnahmen ohne Reue“ („no/low-regret“) orientieren, stellen dabei keine „starren“ Handlungsanweisungen sondern vielmehr erste „Denkansätze“ und Diskussionsgrundlagen im Sinne eines „präventiven Handelns unter Unsicherheit“ dar, die es den zuständigen Umweltbehörden und jedem Wasserversorgungsunternehmen am Bodensee auch unter turbulenter werdenden Rahmenbedingungen und knapper finanziellen Ressourcen erlauben, Chancen und Systemresilienzen frühzeitig zu erkennen, den vorhandenen Vulnerabilitäten entgegenzuwirken sowie den daraus resultierenden Folgen durch verantwortungsvolle Planungen vorzubeugen.

⁵ z.B. Demographische Entwicklung, Verbraucherverhalten, Stromversorgung, technologischer Fortschritt, politischer Ordnungsrahmen, sozio-ökonomische Aspekte,

8.0 Gesamtbeurteilung und Ausblick

Die Klimaveränderung stellt neben dem globalen Bevölkerungszuwachs und den zukünftigen Fragen zur Energieversorgung eine der wesentlichsten Herausforderungen unserer Gesellschaft im 21. Jahrhundert dar. Das Thema „globaler Klimawandel“ und die damit verbundenen Auswirkungen stehen daher nicht nur zunehmend im Fokus der internationalen Politik und der Fachexperten, sie sind auch verstärkt in das öffentliche Bewusstsein gerückt.

Seit Mitte des vorigen Jahrhunderts wird eine weltweite Erwärmung der Erdatmosphäre verbunden mit Vielzahl an direkten und indirekten Folgeerscheinungen (u.a. Rückgang der Schnee- und Eisbedeckung, Änderung der Niederschlagsmuster oder Intensität, Häufigkeit und räumlichen Ausdehnung von Extremereignissen,...) beobachtet, die durch natürliche Einflussfaktoren (z.B. Sonnenaktivität, Schwankungen des ozeanischen Strömungssystems, Vulkanausbrüche, ...) alleine nicht mehr erklärbar sind. Mit Ausnahme weniger Skeptiker besteht wissenschaftlicher Konsens darüber, dass die Klimaänderung vor allem durch die anthropogen verursachten Emissionen von sogenannten Treibhausgasen wie Kohlendioxid CO_2 , Methan CH_4 , Distickstoffoxid (Lachgas N_2O), Schwefelhexafluorid SF_6 , Stickstofftrifluorid NF_3 und Aerosole bedingt ist. Selbst im Falle einer Stabilisierung der Emissionen auf heutigem Niveau werden sich für nahezu alle Regionen auf der Erde die beobachteten Trends in den nächsten Jahrzehnten fortsetzen und dadurch die Lebensgrundlagen bzw. Entwicklungschancen künftiger Generationen zunehmend verändern. Nach den Angaben des Weltklimarates ist es daher erforderlich, die weltweiten Treibhausgas-Emissionen bis zum Jahr 2050 um 50 Prozent gegenüber dem Jahr 1990 zu verringern. Gelingt es hingegen nicht, die anthropogen bedingten Klimaeinflüsse zu minimieren, ist mittel- bis langfristig mit einer Zunahme an klimabedingten Schäden in erheblichem Ausmaß zu rechnen.

Die Auswirkungen und Folgen des Klimawandels sind aber nicht nur weltweit sondern auch in der Bodenseeregion und in dessen Einzugs- bzw. Trinkwasserversorgungsgebiet deutlich wahrnehmbar. Um insbesondere unter derartigen Rahmenbedingungen den zukünftigen Herausforderungen der Wasserwirtschaft, des vorsorgenden Gewässerschutzes und der Trinkwasserversorgung gerecht zu werden, bedarf es daher weiterhin gemeinsamer Anstrengungen und entsprechend innovativer Forschungsaktivitäten. Vor diesem Hintergrund werden im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsprojektes „Klimawandel am Bodensee, KlimBo“ bis Mitte 2014 die zu erwartenden meteorologischen und hydrologischen Auswirkungen des Klimawandels auf die Entwicklungen im Bodenseegebiet sowie Quantifizierung von längerfristig im Bodensee ablaufenden Vorgängen, insbesondere die hydrodynamischen, biologischen und physikalisch/chemischen Wechselwirkungen eingehend untersucht und anhand modelltheoretischer Überlegungen transparent abgebildet.

Die vorliegende Literaturrecherche

„Risikobewertung klimatischer Einflüsse auf die Trinkwassergewinnung“

zielte darauf ab, die aus den klimatischen Veränderungen resultierenden Umweltauswirkungen und Folgen aus Sicht der Trinkwasserversorgung aufzuzeigen. Aufgrund der Vielzahl an Einflussgrößen und deren gegenseitige Wechselwirkungen ist jedoch die szenariobasierte Ableitung von Prognosen nur unter großen Unwägbarkeiten, die u.a. durch den zu betrachtenden Zeithorizont bis 2050 bzw. 2100 und den Unsicherheiten der Klimamodellierung begründet sind, möglich. Bereits kleinste Abweichungen der getroffenen Annahmen von den zukünftig realen Entwicklungen können signifikante Fehlinterpretationen zur Folge haben. Eine kritische Einzelfallprüfung ist daher unerlässlich. Die skizzierten Überlegungen und Schlussfolgerungen sind somit nicht „in Stein gemeißelt“, sie sind vielmehr als „Entscheidungs- und Orientierungshilfen“ anzusehen, die aus heutiger Sicht plausibel erscheinen. Ferner können sie als Diskussionsgrundlage in Form von Denkanstößen dazu beitragen, die betroffenen Entscheidungsträger verstärkt für das Thema „Klimaveränderung“ zu sensibilisieren sowie die Bereitschaft wecken, die bisherige Sicht- und Verhaltensweise ergebnisoffen zu hinterfragen.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass die betrachteten nutzungsspezifischen, technischen und sozio-ökonomischen Aspekte für die Wasserversorgungsunternehmen am Bodensee bzw. im Trinkwasserversorgungsgebiet des Bodensees keine unbekanntes Phänomene sind. Sie sind es gewohnt,

- in langfristigen Planungs- und Investitionszeiträumen zu denken,
- mit sich verändernden Rahmenbedingungen umzugehen und
- „Entscheidungen unter Unsicherheiten“ zu treffen.

Außerdem liegen sowohl für Extremereignisse und den damit verbundenen Herausforderungen als auch im Umgang mit einer langfristigen bzw. zeitlich begrenzten Änderung der Wasserbeschaffenheit bereits einschlägige Erfahrungen vor.

Wie die Überlegungen der Vulnerabilitätsabschätzung und Risikomanagement ferner gezeigt haben, **ist deutlich ein Einfluss der zu erwartenden Klimaentwicklungen auf die Trinkwasserversorgung zu erkennen. Bisher sind jedoch keine Hinweise ableitbar, die auf einen akuten und dringenden Handlungsbedarf hindeuten. Dennoch sind alle betroffenen „Akteure“ zu einer vorausschauenden, aktiven und sachlichen Auseinandersetzung mit dem Thema „Klimawandel“ sowie zur Erarbeitung entsprechender Anpassungsstrategien bzw. Handlungsoptionen aufgefordert.** Dabei gilt es, in Abhängigkeit von den politischen, sozialen und finanziellen Gestaltungsmöglichkeiten sowie den standortspezifischen Rahmenbedingungen¹ Bewährtes zu erhalten und mit Augenmaß in den nächsten Jahren/Jahrzehnten

¹ z.B. Wassereinzugsgebiet, Wasserdargebot, Wasserbeschaffenheit, technische Struktur des Versorgungssystems, dem jeweiligen Verbraucherverhalten, den Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklungen oder der landwirtschaftlichen Wassernutzung

fortzuentwickeln. Aufbauend auf einer konsequenten Umsetzung von Maßnahmen, die vor allem auf den Eckpunkten

- des vorsorgenden und nachhaltigen Gewässerschutzes,
- einer regelmäßigen Überwachung des Wassers in allen Komponenten der Wertschöpfungskette „Trinkwasserversorgung“,
- des Einsatzes bewährter bzw. innovativer Technologien zur Gewinnung, Aufbereitung und Verteilung/Speicherung einschließlich deren Instandhaltung,
- der Förderung von bzw. der aktiven Beteiligung an entsprechenden Forschungs- und Entwicklungsvorhaben sowie
- einer vorausschauenden ökonomischen Vorgehensweise

basieren, sind die bislang noch nicht berücksichtigten klimabedingten Auswirkungen/Folgen einschließlich der anthropogenen „Wandelprozesse“ und der zunehmende Beeinträchtigung der aquatischen Systeme durch unerwünschte Stoffeinträge frühzeitig in die systematische Gesamtbetrachtung zur Planung und Betrieb der zukünftigen Versorgungsstruktur zu integrieren. Die Wasserversorgungsunternehmen am Bodensee tragen durch ihr weitsichtiges und verantwortungsvolles Handeln somit maßgeblich dazu bei, dass auch **unter den geänderten Rahmenbedingungen des Klimawandels weiterhin eine nachhaltige Bereitstellung von Trinkwasser im Versorgungsgebiet des Bodensees gewährleistet ist.**

9.0 Literatur

- Academia Engelberg (2008)*: Gesicherte Wasserversorgung trotz Klimawandel. vta-aktuell 4, 26-29.
- AGBU (2006)*: Mit dem Klima wandelt sich der Bodensee. Medieninformation der Arbeitsgruppe Bodenseeufer, www.bodensee-ufer.de
- Allianz Umweltstiftung (2007)*: Wissen: Informationen zum Thema „Klima“. Grundlagen, Geschichte und Projektionen. Hrsg.: Allianz Umweltstiftung, München. www.allianz-umweltstiftung.de
- Alverde (2012)*: Klima = mehr als Wetter. Alverde Heft Nr. 04, 52-56.
- ANEBO (2005)*: Wirbellose Neozoen im Bodensee. Hrsg.: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU). ISSN: 1437-0166, ISBN: 3-88251-289-X. www.lfu.baden-wuerttemberg.de
- ANEBO (2013)*: Aquatische Neozoen im Bodensee und seinen Zuflüssen. www.neozoen-bodensee.de
- Anpassung (2012a)*: Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung – KomPass. Startseite. www.anpassung.net
- Anpassung (2012b)*: Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung – KomPass. Klimaprojektionen. www.anpassung.net
- Anschober (2012)*: Rekordtrockenheit im November bringt Probleme für Wasser und Luft.- Eine Folge der Klimaveränderung? Pressekonferenz, Amt der Oberösterreichischen Landesregierung. www.land-oberoesterreich.gv.at
- Atmosphere (2012)*: Klimamodelle. www.atmosphere.mpg.de
- AWBR (2006)*: „Bodensee-Online“ – ein Informationssystem zur Vorhersage der Hydrodynamik und der Wasserqualität von Seen. Anwendungsbezogene Aspekte aus der Sicht der Wasserversorgung. Arbeitsgemeinschaft Wasserwerke Bodensee-Rhein, Jahresbericht 2005, 107-138, www.arwb.org
- AWBR (2012a)*: „Nachhaltiger Hochwasserschutz Alpenrhein“ - Stellungnahme der Arbeitsgemeinschaft Wasserwerke Bodensee-Rhein. Arbeitsgemeinschaft Wasserwerke Bodensee-Rhein, Jahresbericht 2011, 34-37, www.arwb.org
- AWBR (2012b)*: Limnologischer Zustand des Bodensees im Überlinger Seeteil in den Jahren 2007 bis 2011 – Chemische Parameter, Phytoplankton und Spurenstoffe. Arbeitsgemeinschaft Wasserwerke Bodensee-Rhein, Jahresbericht 2011, 83-100, www.arwb.org
- AWBR (2013)*: Wasserentnahme aus dem Bodensee. Arbeitsgemeinschaft Wasserwerke Bodensee-Rhein, Jahresbericht 2012, 35-36, www.arwb.org
- AWEL / IBK (2007)*: Auswirkungen des Klimawandels und mögliche Anpassungsstrategien – erste Standortbestimmung. Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich, Internationale Bodenseekonferenz, Geschäftsstelle Konstanz.
- BAFU (2007a)*: Kosten der Klimaänderung für die Schweiz. Faktenblatt, Hrsg.: Bundesamt für Umwelt, Bern.
- BAFU (2007b)*: Auswirkungen der Klimaänderung auf die Schweizer Volkswirtschaft - Schlussbericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt. Arbeitsgemeinschaft INFRAS/Ecologic/Rütter + Partner, www.bafu.ch
- BAFU (2008)*: Herausforderung Klimawandel. Umwelt 3, Heft 08, Hrsg.: Bundesamt für Umwelt, Bern.
- BAFU (2010a)*: Klimawandel – Kritik und Fakten. Faktenblatt, Hrsg.: Bundesamt für Umwelt, Bern.

- BAFU (2010b)*: Schweizer Klimapolitik auf einen Blick - Kurzfassung des klimapolitischen Berichts 2009 der Schweiz an das UNO-Klimasekretariat. Hrsg.: Bundesamt für Umwelt, Bern.
- BAFU (2012a)*: Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz im Sektor Wasserwirtschaft - Beitrag des Bundesamtes für Umwelt zur Anpassungsstrategie des Bundesrates. Hrsg.: Bundesamt für Umwelt, Bern.
- BAFU (2012b)*: Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz (CCHydro) – Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserressourcen und die Gewässer in der Schweiz. Hrsg.: Bundesamt für Umwelt, Bern.
- BAFU (2012c)*: Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer - Synthesebericht zum Projekt „Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz“, CCHydro. www.bafu.ch
- BAFU (2012d)*: Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz. Ziele, Herausforderungen und Handlungsfelder - Erster Teil der Strategie des Bundesrates. Bundesamt für Umwelt Bern, www.bafu.ch
- Bárdossy, A. (2010)*: Klimawandel und Siedlungsentwässerung. Hrsg.: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Band 22, ISSN 1437-014X.
- Bárdossy, A. (2012)*: Stochastic Downscaling Precipitation Temperature and Wind Fields in High Spatial and Temporal Resolution for Hydrodynamical and Hydrological Modelling. Final Report, funded by German Research Foundation (DFG), BA 1150/14-1.
- BDEW (2008a)*: Kernaussagen des Branchenbildes der deutschen Wasserwirtschaft. Hrsg.: ATT, BDEW, DBVW, DVGW, DWA, VKU.
- BDEW (2008b)*: Aktuelle Trends und Entwicklungen, www.bdew.de.
- BDEW (2010)*: Auswirkungen des Klimawandels und des demografischen Wandels auf die Wasserwirtschaft. Wasser/Abwasser-Info, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., www.bdew.de
- BDEW (2011)*: Entwicklung der Wasserförderung für die öffentliche Trinkwasserversorgung in Deutschland. www.bdew.de
- BDEW (2012)*: Entwicklung der Wasserabgabe an die Verbraucher. www.bdew.de
- Bednar-Friedl, B., Koland, O. und Raab, J. (2011)*: Die gesellschaftlichen Kosten von Anpassung: Ansätze für eine Bewertung von Anpassungsoptionen (SALDO), Endbericht StartClim2010.C. In: StartClim2010 „Anpassung an den Klimawandel“, Auftraggeber: BMLFUW, BMWF, BMWFJ, ÖBF, www.austroclim.at
- Blümel, W.-D. (2002)*: 20.000 Jahre Klimawandel und Kulturgeschichte - von der Eiszeit in die Gegenwart. In: Wechselwirkungen, Jahrbuch 2002, 1-19.
- BMBF (2011)*: Bekanntmachung „Richtlinien zur Förderung von Forschungsvorhaben auf dem Gebiet intelligente und multifunktionelle Infrastruktursysteme für eine zukunftsfähige Wasserversorgung und Abwasserentsorgung“. www.bmbf.de
- BMU (2003)*: Mögliche Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die Ausbreitung von primär humanmedizinisch relevanten Krankheitserregern über tierische Vektoren sowie auf die wichtigen Humanparasiten in Deutschland. Climate Change 05/2003-05-27, Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Forschungsbericht 200 61 218/11, UBA-FB 000454.
- BMU (2005)*: Klimawandel in Deutschland - Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Förderkennzeichen (UFOPLAN) 201 41 253.

- BMU (2008a)*: Investitionen für ein klimafreundliches Deutschland. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Endbericht Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK).
- BMU (2008b)*: Klimawandel in den Alpen – Fakten/Folgen/Anpassung. Hrsg.: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Referat Öffentlichkeitsarbeit, www.bmu.de
- BMU (2009a)*: Dem Klimawandel begegnen - Die Deutsche Anpassungsstrategie. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Referat Öffentlichkeitsarbeit, www.bmu.de
- BMU (2009b)*: Klimaschutzpolitik in Deutschland. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), www.bmu.de
- BMU (2010)*: Anpassung an den Klimawandel. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Stand: Oktober 2010, www.bmu.de
- BMU (2012a)*: Kernaussagen des IPCC-Sonderberichtes „Management des Risikos von Extremereignissen und Katastrophen zur Förderung der Anpassung an den Klimawandel (SREX)“. www.bmu.de
- BMU (2012b)*: Worum geht es beim Klimaschutz. Kurzinfo. www.bmu.de
- BMU (2012c)*: Die Nationale Klimaschutzinitiative des Bundesumweltministeriums. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Stand: März 2012, www.bmu.de
- BMU (2012d)*: Wasserwirtschaft in Deutschland – Wasserversorgung/Abwasserbeseitigung. Hrsg.: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Referat Öffentlichkeitsarbeit, www.bmu.de
- BMVBS (2011)*: Vulnerabilitätsanalyse in der Praxis – Inhaltliche und methodische Ansatzpunkte für die Ermittlung regionaler Betroffenheiten. Hrsg.: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, BMVBS-Online-Publikation 21, ISSN 1869-9324.
- BodenseeOnline (2008)*: Abschlussbericht zum Verbundforschungsvorhaben „BodenseeOnline“ - ein Informationssystem zur Vorhersage der Hydrodynamik und der Wasserqualität von Seen am Beispiel des Bodensees. Gefördert vom BMBF und DFG, 02WT0550 ff., Bericht: A254-7.
- Boehrer, B. and Schultze, M. (2008)*: Stratification for lakes, Review of Geophysics 46. DOI: 10.1029/2006RG000210.
- Born, D. (2008)*: Auswirkung des Klimawandels auf die Bodenseeregion. Maturaarbeit, Kantonschule am Burggraben, www.nccr-climate.unibe.ch
- Branchenbild (2011)*: Branchenbild der deutschen Wasserwirtschaft 2011. wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, ISBN: 978-3-89554-182-7
- Brauch, H.-J. (2004)*: Risiken, denen unsere Gewässer ausgesetzt sind. Vortrag bei IAWR-Symposium Gewässerschutz. DVGW-Technologiezentrum Wasser (TZW), Karlsruhe.
- Bundesregierung (2008a)* Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel, Kurzfassung. <http://www.bmu.de>
- Bundesregierung (2008b)*: Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. <http://www.bmu.de>
- Bundesregierung (2011)*: Aktionsplan Anpassung der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. www.bmu.de
- Bunse (2009)*: Kosten des Klimawandels. <http://www.bpb.de>
- Busch, J. (2008)*: Moderne Wetterbeobachtungen. Seminararbeit. Eberhard-Karls-Universität Tübingen - Geographisches Institut - Hauptseminar: Klimawandel, Klimageschichte der Erde, Klimatologie.

- BUWAL (2004)*: Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer. Schriftenreihe Umwelt Nr. 369 – Gewässerschutz. Zusammenfassung/Folgerungen. Hrsg.: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft in Zusammenarbeit mit Bundesamt für Wasser und Geologie und Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, www.buwalshop.ch
- BWV (2013)*: Bilder und Daten. Copyright: Zweckverband Bodensee-Wasserversorgung, Stuttgart.
- Castell-Exner, C. und Zenz, T. (2010)*: Klimawandel und Wasserversorgung – Auswirkungen des Klimawandels und mögliche Anpassungsstrategien. *Energie/Wasser-Praxis* 3, 20-23.
- CCCA (2011)*: Koordinierende Einrichtung der Klimaforschung in Österreich. <http://www.ccca.ac.at>
- CH2011 (2011a)*: Szenarien zur Klimaänderung in der Schweiz- Zusammenfassung. Center for Climate Systems Modeling, ETH Zürich. www.ch2011.ch
- CH2011 (2011b)*: Swiss Climate Change Scenarios CH2011. Published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate and OcCC, Zurich, ISBN: 978-3-033-03065-7.
- CIPRA (2009)*: Im Namen des Klimaschutzes – Was wir Menschen alles tun, um dem Klimawandel zu begegnen. *Szene Alpen* 92, ISSN 1016-9954, Hrsg.: Internationale Alpenschutzkommission, www.cipra.org
- CIPRA (2011)*: Water in climate change – a background report of Cipra. Kompakt No. 3, Internationale Alpenschutzkommission, www.cipra.org
- CLISP (2013)*: Strategische Empfehlungen. www.clisp.eu.
- Cornelius, I. (2007)*: Die Bevölkerungsentwicklung in Baden-Württemberg bis zum Jahr 2050 – Ergebnisse einer neuen Voraussrechnung. In: *Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg*, Heft 2, 5-13, www.stala.bwl.de
- Cubasch, U. und Fast, I. (2006)*: Perspektiven der Klimamodellierung. In: *Der belebte Planet*, Institut für Meteorologie, Berlin, 28-35.
- DAV (2010)*: Herausforderung Klimawandel – Bergsport mit Verantwortung. Sonderheft Panorama-Spezial, Hrsg: Deutsche Alpenverein.
- Dienst, M., Strang, I. und Ostendorp, W. (2008)*: Auswirkungen des Klimawandels auf die Lebensgemeinschaften am Bodenseeufer. *Natur und Mensch* 50 (1), 2- 8.
- DIN/ISO 31000 (2011)*: Risikomanagement – Grundsätze und Leitlinien. Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin.
- DIW (2007)*: Der Klimawandel kostet die deutsche Volkswirtschaft Milliarden. www.unendlich-viel-energie.de
- Donner, Ch. und Panglisch, S. (2011)*: Anpassungsstrategien an den Klimawandel: Potenzialanalyse von Ruhrwasserwerken. Vortrag DynaKlim.
- Donner, Ch., Panglisch, S. (2011)*: Anpassungsstrategien an den Klimawandel: Potenzialanalyse von Ruhrwasserwerken, www.rwe.com
- DPA (2007)*: Eine unbequeme Wahrheit. *Südkurier*, www.suedkurier.de
- DPA (2012a)*: Eisigere Winter für Europa. *Südkurier*, www.suedkurier.de
- DPA (2012b)*: Dilemma um ein neues schädliches Treibhausgas. *Südkurier*, www.suedkurier.de
- DVGW (2007)*: Klimawandel und Wasserversorgung – Beobachtungen, Konsequenzen, Lösungsansätze. DVGW-Forum in Bonn, 18.10.2007.
- DVGW (2008)*: Wasserbedarf – Kennwerte und Einflussgrößen. Technische Regeln - Arbeitsblatt W 410. ISSN 0176-3504. www.dvgw.de

- DVGW (2009a)*: Klimawandel und Wasserversorgung. Auswirkungen des Klimawandels und mögliche Anpassungsstrategien. Information der DVGW-Lenkungskomitees 1 „Wasserwirtschaft, Wassergüte, Wasserwerke“ und 2 „Wasserversorgungssysteme“. www.dvgw.de
- DVGW (2009b)*: Climate Change and Water Supply – The consequences of climate change and potential adaptation strategies. DVGW-Information, Dez. 2009.
- DVGW (2009c)*: Hilfestellung zur Pandemievorbereitung der Wasserversorgungsunternehmen, DVGW-Rundschreiben W 02/09.
- DVGW (2010)*: DVGW-Information Wasser Nr.77 zur Energieeffizienz. Energie/Wasser-Praxis Nr. 1, 58-60.
- DVGW (2011)*: Wasserwirtschaftliche Infrastruktur in Extremsituationen. DVGW-Forum in Karlsruhe, 26.05.2011.
- DVGW (2012)*: Sicherheit in der Trinkwasserversorgung – Organisation und Management im Krisenfall. DVGW Technischer Hinweis – Merkblatt DVGW W 1002 (M). ISSN 0176-3504. www.dvgw.de
- DWD (2010)*: WMO-Bericht zum Zustand des globalen Klimas 2010. World Meteorological Organization. WMO-Nr. 1074, www.dwd.de
- DWD (2011)*: Klimastatusbericht 2011 des Deutschen Wetterdienstes. ISBN 3-88148-388-8, www.dwd.de.
- DWD (2012a)*: Ergebnisse der Klimaforschung müssen Teil des Verwaltungshandelns werden. Pressekonferenz des DWD, Mai 2012, www.dwd.de
- DWD (2012b)*: Klimaatlas Deutschland. www.dwd.de
- DWD (2012c)*: Klima, Klimaprognose, Wetter, Verdunstung, Die Vb-Wetterlage. www.dwd.de
- EAWAG (2009)*: Wasserversorgung 2025 – Vorprojekt Standortbestimmung im Auftrag des BAFU. Hrsg.: EAWAG – Das Wasserforschungs-Institut des ETH-Bereichs, CH-Dübendorf.
- ECCP (2010)*: Climate Action. European Climate Change Programme. www.ec.europa.eu.
- Eco-Institut (2009)*: Klimawandel: Welche Belastungen entstehen für die Tragfähigkeit der Öffentlichen Finanzen? Endbericht, Ecologic Institut, 10717 Berlin.
- Eder, M., Rinke, K., Kempke, S., Huber, A., Wolf, T. (2008a)*: Seeweite Bodensee-Messkampagne 2007 als Test für BodenseeOnline. In: Wasserwirtschaft 98, Heft 10, 34-38.
- Eder, M.; Kobus, H.; Helmig, R. (2008b)*: Dreidimensionale Modellierung der Hydrodynamik im Bodensee. In: Wasserwirtschaft 98, Heft 10, 16-21.
- EEA (2009)*: Regional climate change and adaptation – the alps facing the challenge of changing water resources. EEA Report No. 8, ISSN 1725-9177.
- Eisenmenger, M., Pöttsch, O. und Sommer, B. (2006)*: Bevölkerung Deutschlands bis 2050 – 11. Koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung. Hrsg.: Statistisches Bundesamt, Pressestelle, www.destatis.de
- epd (2012)*: Klimawandel steigert Allergierisiko. Südkurier, www.suedkurier.de
- EU – Europäische Kommission (2007)*: Grünbuch der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: Anpassung an den Klimawandel in Europa – Optionen für Maßnahmen der EU. Brüssel, KOM 354.
- EU – Europäische Kommission (2009)*: Weißbuch: Anpassung an den Klimawandel: Ein europäischer Aktionsrahmen. Brüssel, KOM 147.

- EU – Europäische Kommission: (2013):* Grünbuch - Ein Rahmen für die Klima- und Energiepolitik bis 2030. Brüssel, KOM 169 final.
- EUWID (2011):* Wasserwirtschaft rechnet mit Trockenperioden am Bodensee. EUWID Wasser und Abwasser, Nr. 48, 3.
- EUWID (2012a):* Versicherer rechnen mit Zunahme von Überschwemmungsschäden. EUWID Wasser und Abwasser, Nr. 33, 9.
- EUWID (2012b):* Erneuerbare Energien müssen Anforderungen der Wasserversorgung genügen. EUWID Wasser und Abwasser, Nr. 8, 13.
- EUWID (2013):* Klimawandel erfordert strategische Anpassungsplanung für Wasserversorgung. EUWID Wasser und Abwasser, Nr. 8, 3-4.
- EWP (2009):* Klimawandel und Wasserwirtschaft - IWA-Konferenz am 17./18. Nov. 2008 in Amsterdam. Energie Wasser, Heft 1, 7.
- Faißt, M., Schick, R., Kühn, W., Baldauf, G. und Marcus, P. (2007):* Verfahrenstechnisch orientierte Forschung als Beitrag zur Optimierung der Aufbereitungstechnik. In: Wissensdurst – eine Fachveröffentlichung der Bodensee-Wasserversorgung, Heft 2, 32-37.
- FAZ (2007):* Klimawandel kostet bis zu 800 Milliarden Dollar. Frankfurter Allgemeine Zeitung, 06.09.2007, www.faz.net
- Feierabend, R. (2010):* Klimakatastrophe – Wahrheit oder Panikmache? In: Labor Dr. Feierabend, Jahresbroschüre 2010.
- Fichter, K., von Gleich, A., Pfriem, R. und Siebenhüner, B. (2010):* Theoretische Grundlagen für erfolgreiche Klima-Anpassungsstrategien. Projektkonsortium Nordwest2050, ISSN 2191-3218, Internet: www.nordwest2050.de
- Flessner, Ch. (2009):* Klimawandel in den Alpen - Wie wird sich der Klimawandel in den Alpen auf den Skitourismus auswirken? www.loicz.org
- Formayer, H. und Frischauf, Ch. (2004):* Extremereignisse und Klimawandel in Österreich aus Sicht der Forschung. Untersuchungsbericht im Auftrag des WWF Österreich.
- Formayer, H., Clementschitsch, L., Hofstätter, M. und Kromp-Kolb, H. (2008):* Vorsicht Klima! Studie im Auftrag von Global 2000 Österreich, www.wau.boku.ac.at
- Formayer, H., Eitzinger, S., Nefzger, H., Simic, S. und Kromp-Kolb, H. (2001):* Auswirkungen einer Klimaveränderung in Österreich – was aus bisherigen Untersuchungen ableitbar ist. Institut für Meteorologie und Physik, Universität für Bodenkultur.
- Forschungsfelder (2012):* Klimawandel und Gesundheit – Forschungsfelder
- Frassl, M. A., Schlabing, D., Eder, M.M., Rothhaupt, K.-O. and Rinke, K. (2012):* Simulating the effect of meteorological variability on a lake. Ecosystem, EGU General Assembly 14, p. 13352.
- Frauenlob, G. (2005):* Nach dem Hochwasser ist vor dem Hochwasser. Natur&Mensch Nr. 5, 2-7.
- Frei Ch., Croci-Maspoli M. und Appenzeller Ch. (2008):* Das Klima ändert - sich was nun? In: Der neue UN-Klimabericht (IPCC 2007) und die wichtigsten Ergebnisse aus der Sicht der Schweiz. OcCC - Organe consultatif sur les changements climatiques, Bern, 47 pp. ISBN: 978-3-907630-33-4.
- Funk, M. (2010):* Gletscherrückgang – noch genügend Wasser für die Wasserkraftproduktion? In: Nationales Forschungsprogramm 61 „Nachhaltige Wassernutzung“, Cluster 1: Hydrologie – Gletscher, Grundwasser und Extremereignisse. <http://www.nfp61.ch>
- Gander, B. (2009):* Klimaänderung und Wasserversorgungen. GWA Heft 4, 241-249.

- Gessner, M. (2009): Biodiversität, Klima und Gewässer im Wandel. Vortrag EAWAG, Abteilung Gewässerökologie, Dübendorf.
- Gewässerschutzfachstellen (2008): Neuankömmlinge im Bodensee – Herausforderungen für den Gewässerschutz. Informationsblatt der Gewässerschutzfachstellen der Kantone und Länder am Bodensee.
- Gönner, T. (2008): Neue Instrumente für den Gewässerschutz am Bodensee. In: Wasserwirtschaft 98, Heft 10, 4.
- Göttle, A. (2007): Herausforderung Klimawandel. Wasserwirtschaft Heft 3, 3.
- Graßl, H. (2000): Der Rhein im 21. Jahrhundert. In: Die Trinkwasserversorgung auf dem Weg ins 3. Jahrtausend. IAWR-Bericht 2000, 16. Arbeitstagung, Stuttgart.
- Grundwasserdatenbank (2013): Grundwasserdatenbank – Wasserversorgung. 21. Jahresbericht, Ergebnisse der Beprobung 2012, Zusammenfassung. www.grundwasserdatenbank.de
- Grüner, Ch. und Ilg, F.-X. (2007): Zustandsorientierte Instandhaltung der Rohwasserpumpen bei der Bodensee-Wasserversorgung. In: Wissensdurst – eine Fachveröffentlichung der Bodensee-Wasserversorgung, Heft 2, 22-31.
- Güde, H., Hetzenauer, H., Kümmerlin, R., Roßknecht, H., Schröder H.-G., Stich, H.-B. und Wesels, M. (2009): Bodensee-Untersuchung-Seeboden (BUS). Bericht Nr. 56, Blaue Reihe, ISSN 1011-1263, Hrsg.: Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee.
- Gujer, W. (2011): „Dafür sorgen, dass die Probleme gar nicht erst entstehen“ – Interview mit Prof. Willi Gujer. gwa – Abwasser / Eaux / uses 11, 787-790.
- Günther, E. (2012): Entwicklung und Erprobung eines Integrierten Regionalen Klimaanpassungsprogramms für die Modellregion Dresden. Bundesministerium für Bildung und Forschung, Förderkennzeichen: 01 LR 0802, www.regklam.de
- Günther, T. (2004): Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wissenschaft. Langzeitverhalten hydrometeorologischer Größen. In: KLIWA Heft 4, 37-56.
- Haakh, F. (2008): Klimawandel und Wasserversorgung – Auswirkungen auf das Wasserdargebot, die Wasserqualität und die Versorgungssicherheit. In: Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 192, ISBN 978-3-8356-3152-6, Oldenburg Industrieverlag GmbH.
- Haakh, F. (2009a): Anpassungsstrategien der Wasserversorgung an klimabedingte Veränderungen am Beispiel einer Fernwasserversorgung. In: 4. KLIWA-Symposium – Fachvorträge – Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, KLIWA-Berichte Heft 15, 221-233.
- Haakh, F. (2009b): Klimawandel und Wasserversorgung. Im Fokus: Wasserdargebot und Wasserqualität. Zweckverband Landeswasserversorgung, Stuttgart.
- Haerberli, W. (2010): Seen als Folge schmelzender Gletscher: Chancen und Risiken. In: Nationales Forschungsprogramm 61 „Nachhaltige Wassernutzung“, Cluster 1: Hydrologie – Gletscher, Grundwasser und Extremereignisse. www.nfp61.ch
- Hamberger, S. und Zängl, W. (2012): Klimaänderung und Gletscher. Gesellschaft für ökologische Forschung, www.gletscherarchiv.de
- Haubner, E. (2002): Klimawandel und Alpen. Alpmedia Hintergrundbericht 3, Hrsg.: Commission Internationale pour la Protection des Alpes (CIPRA), www.cipra.org
- Hennegriff, W., Ihringer, J. und Kolokotronis, V. (2008): Prognose von Auswirkungen des Klimawandels auf die Niedrigwasserhältnisse in Baden-Württemberg. KW Korrespondenz Wasserwirtschaft Heft 1(6), 309-314.
- Hofmann, K. (2009): Wasserversorgung in Baden-Württemberg und Förderung durch das Land. Aktuelle Fragen der Trinkwasserhygiene – Fortbildungsreihe LGA – RP Stuttgart, 06.05.2009.

- Hofmann, K. (2012):* Anforderungen an eine zukunftsfähige (kommunale) Trinkwasserversorgung. „Rund ums Wasser“ – Info-Veranstaltung zu aktuellen Fragen der Trinkwasser- und Badewasserhygiene – RP Stuttgart, 15.05.2012.
- Hofmann, K. (2009):* Wasserversorgung in Baden-Württemberg und Förderung durch das Land - Aktuelle Fragen der Trinkwasserhygiene. Vortrag Fortbildungsreihe des LGA.
- Höppe (2012):* Ansätze zur Integration von Klimarisiken in planerisches Risikomanagement. Vortrag „Dialoge zur Klimaanpassung“, Berlin
- Höppe, P. (2012):* Ansätze zur Integration von Klimarisiken in planerisches Risikomanagement. Präsentation Dialoge zur Klimaanpassung, Berlin 06.06.2012.
- Hozner, D.P., Aeschbach-Hertig, W., Simona, M., Veronesi, M., Imboden D.M. and Kipfer, R. (2009):* Exceptional mixing events in meromictic Lake Lugano (Switzerland/Italy), studied using environmental tracers. *Limnology&Oceanography* 54, 1113-1124.
- Hunkeler, D. (2010):* Grundwasserknappheit durch Klimawandel? In: Nationales Forschungsprogramm 61 „Nachhaltige Wassernutzung“, Cluster 1: Hydrologie – Gletscher, Grundwasser und Extremereignisse. <http://www.nfp61.ch>
- Hunziker, S. und Wuest, A. (2011):* Anthropogene Temperaturveränderungen in Flüssen und Seen – eine Literaturanalyse. Literaturstudie zu Auswirkungen, Risikopotenzial und Toleranzbereichen von Wärmenutzungen, KlimBo, Teilprojekt 2.a.
- HWWI (2012):* Gutachten zu den ökonomischen Folgen des Klimawandels und Kosten der Anpassung für Hamburg. Hamburgisches WeltWirtschaftsinstitut, gemeinnützige GmbH (HWWI).
- IBA (2011):* *Ressource Wasser: Klimaanpassung und Energieeffizienz.* Internationale Bauausstellung Hamburg, Dokumentation Fachtagung.
- IBK (2005):* Klimaschutz am Bodensee – Bilanz und Perspektiven sowie Empfehlungen für die Aktivitäten der IBK bis 2010. Hrsg.: Umweltministerium Baden-Württemberg, Stuttgart.
- IBK (2008):* Der Klimawandel und seine Auswirkungen – IBK legt Bericht für den Bodenseeraum vor. Pressemitteilung der IBK.
- IDW (2009):* Auswirkungen des Klimawandels auf Seen. www.fona.de
- IGKB (2004):* Klima und Witterung. In: Der Bodensee – Zustand, Fakten, Perspektiven, Hrsg.: Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee, ISBN 3-902290-04-8.
- IGKB (2006a):* Vorsorge am See zahlt sich aus. Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee, IGKB-Seespiegel Nr. 25, 1. www.igkb.de
- IGKB (2006b):* Es wird wärmer mit Folgen für den See. Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee, Seespiegel Nr. 24, 2. www.igkb.de
- IGKB (2007a):* Die Folgen der Gletscherschmelze. Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee, Seespiegel Nr. 26, 1. www.igkb.de
- IGKB (2007b):* Der Klimawandel und die Folgen. Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee, Seespiegel Nr. 26, 2. www.igkb.de
- IGKB (2007c):* Ein Rekordapril und die Folgen. Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee, Seespiegel Nr. 25, 3. www.igkb.de
- IGKB (2008a):* Invasion unter der Wasseroberfläche. Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee, Seespiegel Nr. 27, 3. www.igkb.de
- IGKB (2008b):* Computermodell hilft dem Bodensee. Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee, Seespiegel Nr. 28, 1. www.igkb.de

- IGKB (2011a)*: Niedriger Wasserstand gefährdet Bodensee nicht. Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee, Seespiegel Nr. 33, 1. www.igkb.de
- IGKB (2011b)*: Forscher kümmern sich um das Klima am Bodensee. Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee, Seespiegel Nr. 34, 1. www.igkb.de
- IGKB (2011c)*: Das Klima ändert sich schnell. Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee, Seespiegel Nr. 34, 2. www.igkb.de
- IGKB (2012a)*: Der Bodensee soll neu vermessen werden. Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee, Seespiegel Nr. 35, 1. www.igkb.de
- IGKB (2012b)*: Limnologischer Zustand des Bodensees. Jahresbericht Untersuchungsprogramm Freiwasser 2011 - Untersuchungsprogramm Einzugsgebiet 2010/2011. Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee, Grüner Bericht Nr. 39. www.igkb.de
- IGKB (2013a)*: Das Einzugsgebiet des Bodensees. www.igkb.de
- IGKB (2013b)*: Faktenblatt „Phosphor im Bodensee“, Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee, unveröffentlichter interne Stellungnahme.
- IKSR (2013)*: Aktueller Kenntnisstand über mögliche Auswirkungen von Änderungen des Abflusses und der Wassertemperatur auf das Ökosystem Rhein und mögliche Handlungsoptionen. Hrsg.: Internationale Kommission zum Schutz des Rheins. Bericht Nr. 204. www.iksr.org, ISBN 3-941994-26-3978-3-941994-26-3.
- InfoNRW (2011)*: Klimawandel und Wasserwirtschaft - Maßnahmen und Handlungskonzepte in der Wasserwirtschaft zur Anpassung an den Klimawandel. Broschüre des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, www.klimawandel.nrw.de
- IPCC (1997)*: Protokoll von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen. www.bmu.de
- IPCC (2001)*: Klimaänderung 2001, Synthesebericht - Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change), www.ipcc.ch
- IPCC (2007a)*: Climate Change 2007 - Synthesis Report. Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change), www.ipcc.ch
- IPCC (2007b)*: Autoren und Experten-Gutachter, Glossar, Abkürzungen, Akronyme, Einheiten. Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change), www.ipcc.ch.
- IPCC (2007c)*: Klimaänderung 2007 – Synthesebericht. Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change), www.ipcc.ch
- IPCC (2007d)*: Klimaänderung 2007, Synthesebericht – Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change), www.ipcc.ch
- IPCC (2007e)*: Klimaänderung 2007 - Auswirkungen, Anpassung, Verwundbarkeiten. Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change), www.ipcc.ch
- IPCC (2007f)*: Klimaänderung 2007 - Wissenschaftliche Grundlagen, Auswirkungen, Anpassung, Verwundbarkeiten, Verminderung des Klimawandels (Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger). Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change), deutsche Koordinierungsstelle, www.de-ipcc.de
- IPCC (2012a)*: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, www.ipcc.ch

- IPCC (2012b)*: Management des Risikos von Extremereignissen und Katastrophen zur Förderung der Anpassung an den Klimawandel (SREX). Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change), deutsche Koordinierungsstelle, www.de-ipcc.de
- IPCC (2012c)*: Management des Risikos von Extremereignissen und Katastrophen zur Förderung der Anpassung an den Klimawandel (SREX) – Kernaussagen, Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change), deutsche Koordinierungsstelle, www.de-ipcc.de
- IPCC (2012d)*: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. Summary for Policymakers. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, www.ipcc.ch
- IRR (2011a)*: Nachhaltiger Hochwasserschutz auf der Flusstrecke der IRR. Projektinformation AWBR, 08.04.2011.
- IRR (2011b)*: Nachhaltiger Hochwasserschutz Alpenrhein – Start der Planung. Internationale Rheinregulierung, Zentralbüro: Informationsveranstaltung 14.11.2011.
- IRR (2012a)*: Rhesi. Rhein – Erholung und Sicherheit. 1. Vortrag IGKB Sachverständigenkreis.
- IRR (2012b)*: Rhesi. Rhein – Erholung und Sicherheit. 2. Vortrag IGKB Sachverständigenkreis.
- ISF (2009)*: ISF Arbeitsbericht 2008/2009. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, 76231 Karlsruhe, www.lubw.baden-wuerttemberg.de
- Jacob, D. (2009)*: Methoden, Möglichkeiten und Grenzen der regionalen Klimamodellierung. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg.
- Jacob, D., Kotlarski, S., Göttel, H. (2008)*: Klimawandel und Wasserressourcen: regionale Trends in Deutschland und Europa. Energie/Wasser-Praxis, Heft 1, 44-48.
- Jeannin, P.-Y. (2010)*: Karstwasser, eine Wasserressource für die Zukunft. In: Nationales Forschungsprogramm 61 „Nachhaltige Wassernutzung“, Cluster 1: Hydrologie – Gletscher, Grundwasser und Extremereignisse. .
- Jonas, M., Staeger, T. und Schönwiese, Ch. (2005)*: Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von Extremereignissen durch Klimaänderungen – Schwerpunkt Deutschland. Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Kurzbericht zum Forschungsvorhaben 201 41 254.
- Kämpf, M., Gerdas, H., Mikat, H., Berthold, G. u. Roth, U. (2008)*: Auswirkungen des Klimawandels auf eine nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung. Energie/Wasser-Praxis, Heft 1, 49-53.
- Kemfert C. (2007)*: Die Kosten des Klimawandels: Der Mensch heizt die Erde auf – was muss er dafür bezahlen? Der Weltklimakonflikt IP, 38-45. www.claudiakemfert.de
- Kempke, S., Raff, E., Lang, U. und Schick, R. (2007)*: Forschungsvorhaben „BodenseeOnline“ – Ein bedeutender Meilenstein zur Entschlüsselung eines sensiblen Chaos. Arbeitsgemeinschaft Wasserwerke Bodensee-Rhein, Jahresbericht 2006, 87-110, www.awbr.org
- Kempke, S., Schick, R., Rinke, K., Rothhaupt, K.-O. (2008)*: Biogene Calcitfällung im Bodensee – Prozessverständnis und Modellierung. In: Wasserwirtschaft 98, Heft 10, 31-33.
- KHR (2006)*: Vorbereitet auf Klimaänderungen im Einzugsgebiet des Rheins. Broschüre der Internationalen Kommission für die Hydrologie des Rheingebiets. www.chr-khr.org
- Kinzelbach, W., Naef, F. und Franssen, H. (2007)*: Herausforderung des Klimawandels für die Schweiz. Vortrag ETH Zürich, Institut für Umweltingenieurwissenschaften.
- Kinzelbach, W., Naef, F., Hendricks Franssen, H.-J. (2007)*: Herausforderung des Klimawandels für die Schweiz. Hrsg.: ETH Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.

- Kipfer, R. (2010)*: Warum der Luganersee lange nicht durchmischte. EAWAG News 68d, 14-16.
- Kipfer, R. und Livingstone, D. (2008)*: Wasserressourcen und Klimawandel. EAWAG News 65d, 8-11.
- KLIMAKS (2012)*: Klimawandel - Anpassungskonzept Stuttgart (KLIMAKS), www.stadtklima-stuttgart.de
- Klimamoro (2011)*: Vulnerabilitätsbericht der Region Stuttgart. Im Rahmen des Projekts KlimaMORO „Raumentwicklungsstrategien zum Klimawandel“ des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung im Auftrag des Verbands Region Stuttgart.
- Klimamoro (2013a)*: Raumentwicklungsstrategien zum Klimawandel – Phase II, Modellregion Stuttgart. 5. Querschnittsworkshop, Stuttgart. 24./25.01.2013.
- Klimamoro (2013b)*: Region Stuttgart. Highlights, Produkte, regionalwirtschaftliche Betroffenheiten. Landkarte.
- Klimaskeptiker (2012a)*: CO₂ folgt der Temperatur und nicht umgekehrt. www.klimaskeptiker.info
- Klimaskeptiker (2012b)*: Klimarealistische Beiträge. www.klimaskeptiker.info
- Klimawandel Global (2007)*: Gefahr Klimawandel – Rückversicherer registrieren Zunahme an Naturkatastrophen. www.klimawandel-global.de
- Kliwa (2000)*: Erstes KLIWA-Symposium – Fachvorträge Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. Heft 1, ISBN: 3-88251-279-2. Hrsg.: Arbeitskreis KLIWA, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU) und Deutscher Wetterdienst (DWD), www.kliwa.de
- Kliwa (2002)*: Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse in Baden-Württemberg und Bayern. Heft 2, ISBN: 3-88251-284-9, Hrsg.: Arbeitskreis KLIWA, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU) und Deutscher Wetterdienst (DWD), www.kliwa.de
- Kliwa (2003)*: Langzeitverhalten der mittleren Abflüsse in Baden-Württemberg und Bayern. Heft 3, ISBN: 3-88251-286-5, Hrsg.: Arbeitskreis KLIWA, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU) und Deutscher Wetterdienst (DWD), www.kliwa.de
- Kliwa (2004)*: Zweites KLIWA-Symposium – Fachvorträge Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. Heft 4, ISBN: 3-937911-16-2, Hrsg.: Arbeitskreis KLIWA, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU) und Deutscher Wetterdienst (DWD), www.kliwa.de
- Kliwa (2005)*: Langzeitverhalten der Lufttemperatur in Baden-Württemberg und Bayern. Heft 5, ISBN: 3-937911-17-0, Hrsg.: Arbeitskreis KLIWA, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU) und Deutscher Wetterdienst (DWD), www.kliwa.de
- Kliwa (2005)*: Langzeitverhalten der Schneedecke in Baden-Württemberg und Bayern. Heft 6, ISBN: 3-937911-18-9, Hrsg.: Arbeitskreis KLIWA, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU) und Deutscher Wetterdienst (DWD), www.kliwa.de
- Kliwa (2005)*: Langzeitverhalten des Gebietsniederschlags in Baden-Württemberg und Bayern. Heft 7 (a,b+c), ISBN: 3-937911-19-7, Hrsg.: Arbeitskreis KLIWA, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU) und Deutscher Wetterdienst (DWD), www.kliwa.de

Kliwa (2006): Langzeitverhalten der Starkniederschläge in Baden-Württemberg und Bayern. Heft 8, ISBN: 3-88148-412-4 und 978-3-88148-412-1, Hrsg.: Arbeitskreis KLIWA, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU) und Deutscher Wetterdienst (DWD), www.kliwa.de

Kliwa (2006): Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland - Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt. Heft 9, ISBN: 3-88251-305-5, Hrsg.: Arbeitskreis KLIWA, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU) und Deutscher Wetterdienst (DWD), www.kliwa.de

Kliwa (2007): Drittes KLIWA-Symposium – Fachvorträge Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. Heft 10, ISBN: 978-3-88251-325-7, Hrsg.: Arbeitskreis KLIWA, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU), Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (LUWG) und Deutscher Wetterdienst (DWD), www.kliwa.de

Kliwa (2007): Zum Einfluss des Klimas auf den Bodensee. Heft 11, ISBN: 978-3-88251-326-4, Hrsg.: Arbeitskreis KLIWA, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU), Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (LUWG) und Deutscher Wetterdienst (DWD), www.kliwa.de

Kliwa (2008): Langzeitverhalten von Sonnenscheindauer und Globalstrahlung sowie von Verdunstung und klimatischer Wasserbilanz in Baden-Württemberg und Bayern. Heft 12, ISBN: 978-3-88148-429-9, Hrsg.: Arbeitskreis KLIWA, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU), Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (LUWG) und Deutscher Wetterdienst (DWD), www.kliwa.de

Kliwa (2009): Auswirkung des Klimawandels auf Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz - Untersuchungen an ausgewählten Pegeln und Gewässerstellen. Heft 14, ISBN: 978-3-88251-346-2, Hrsg.: Arbeitskreis KLIWA, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU), Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (LUWG) und Deutscher Wetterdienst (DWD), www.kliwa.de

Kliwa (2009): Modellunterstützte Untersuchungen zum Einfluss des Klimas auf den Bodensee. Heft 13, ISBN: 978-3-88251-345-5, Hrsg.: Arbeitskreis KLIWA, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU), Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (LUWG) und Deutscher Wetterdienst (DWD), www.kliwa.de

Kliwa (2010): Viertes KLIWA-Symposium – Fachvorträge Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. Heft 15, ISBN: 978-3-933123-20-6, Hrsg.: Arbeitskreis KLIWA, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU), Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (LUWG) und Deutscher Wetterdienst (DWD), www.kliwa.de

Kliwa (2011): Langzeitverhalten von Grundwasserständen, Quellschüttungen und grundwasserbürtigen Abflüssen in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. Heft 16, ISBN: 978-3-88251-362-2, Hrsg.: Arbeitskreis KLIWA, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU), Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (LUWG) und Deutscher Wetterdienst (DWD), www.kliwa.de

- Kliwa (2012):* Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. Heft 17, ISBN: 978-3-88251-363-9, Hrsg.: Arbeitskreis KLIWA, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU), Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (LUWG) und Deutscher Wetterdienst (DWD), www.kliwa.de
- Kliwa (2012):* Die Entwicklung von trockenen Großwetterlagen mit Auswirkungen auf den süddeutschen Raum. Heft 18, Hrsg.: Arbeitskreis KLIWA, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU), Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (LUWG) und Deutscher Wetterdienst (DWD), www.kliwa.de
- Kliwa (2012):* Klimawandel im Süden Deutschlands – Ausmaß/Auswirkungen/Anpassung. Folgen für die Wasserwirtschaft. Hrsg.: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU), Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (LUWG) und Deutscher Wetterdienst (DWD), www.kliwa.de
- KLIWAS (2012):* Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland. Hrsg.: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2. Statuskonferenz in Berlin, 25. u. 26. 10. 2011. www.bmvbs.de, ISBN 978-3-940247-04-9.
- Knutti, R. (2007):* Das Klima wartet nicht: Klimawandel im Bodenseeraum – Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. Institut für Atmosphäre und Klima, ETH Zürich, Schweiz.
- Knutti, R. (2007):* Das Klima wartet nicht: Klimawandel im Bodenseeraum – Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. Vortrag ETH.
- Köhler, N. (2012):* Heiß, kalt und sehr trocken. Südkurier, www.suedkurier.de
- KOHS (2007):* Auswirkungen der Klimaänderung auf den Hochwasserschutz der Schweiz. Ein Standortpapier der Kommission Hochwasserschutz KOHS im Schweizerischen Wasserwirtschaftsverband. WasserEnergieLuft, 99. Jahrgang, Heft 1, CH-Baden.
- Kotlarski, S. und Jacob, D. (2007):* Klimaänderung in Deutschland, Österreich und der Schweiz: Wie sieht der Klimawandel aus? Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg. Vortrag anlässlich des Festkolloquiums von Prof. Mehlhorn, Oktober 2007, Stuttgart.
- Kramer, I. (2006):* Fische und Klimawandel am Bodensee – mögliche Auswirkungen. Hrsg.: AGBU, www.bodensee-ufer.de
- Kröhnert, S., Medicus, F. und Klingholz, R. (2006):* Die demografische Lage der Nation – Wie zukunftsfähig sind Deutschlands Regionen? Hrsg.: Berlin-Institut, Verlag dtv, München.
- Kromp-Kolb, H., Schwarzl, I. (2008):* Auswirkungen des Klimawandels auf Österreich – Fallbeispiele. Endbericht, StartClim2007, Auftraggeber: u.a. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Bundesministerium für Gesundheit, Familie und Jugend, Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung, Umweltbundesamt, <http://www.austroclim.at>
- Kromp-Kolb, H., Schwarzl, I. (2009):* Anpassung an den Klimawandel in Österreich. Endbericht, StartClim2008, Auftraggeber: u.a. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Bundesministerium für Gesundheit, Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung, Umweltbundesamt, <http://www.austroclim.at>
- Kronberger (2011):* Die österreichische Strategie zur Anpassung an den Klimawandel (Entwurf). Teil 2 – Aktionsplan – Handlungsempfehlungen für die Umsetzung. www.lebensministerium.at

- Kropp, J. (2009):* Klimawandel in Nordrhein-Westfalen - Regionale Abschätzung der Anfälligkeit ausgewählter Sektoren. Abschlussbericht Potsdamer Institut für Klimafolgenforschung, www.pik-potsdam.de
- Kuhn, M. (200x):* Auswirkungen der Klimaveränderung in den Alpen. Vortrag Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Innsbruck.
- Kunz, Y., von Gunten, U. und Maurer, M. (2009):* Wasserversorgung 2025 – Vorprojekt Standortbestimmung im Auftrag des BAFU. Hrsg.: EAWAG, Dübendorf.
- Landtag Baden-Württemberg (2009):* Wasserversorgung in Baden-Württemberg. Landtag Baden-Württemberg, Kleine Anfrage und Antwort, Drucksache 14/4462, 11.05.2009.
- Landtag Baden-Württemberg (2010):* Die Herausforderung „Klimawandel“ in Baden-Württemberg. Antrag und Stellungnahme, Drucksache 14/7090, www.landtag-bw.de
- Lang, U. (2011):* unveröffentlichte Simulationsergebnisse. Ingenieurgesellschaft Prof. Kobus und Partner, Stuttgart.
- Lang, U., Eder, M. und Mirbach, S. (2012):* Quantifizierung heutiger und Abschätzung zukünftiger Austauschprozesse und deren Einfluss auf die Wasserqualität. Vortrag anlässlich des IKNB-Forschungskolloquium am 22.11.2012, Sipplingen.
- Lang, U., Kobus, H., Mehlhorn, H. (2008a):* BodenseeOnline als Entscheidungs- und Unterstützungssystem. In: Wasserwirtschaft 98, Heft 10, 45-48.
- Lang, U., Paul, T. (2008b):* Zustandsbeschreibung und Prognose mit der Daten- und Methodenbank BodenseeOnline. In: Wasserwirtschaft 98, Heft 10, 39-44.
- Lang, U., Schick, R., Schröder, G. (2010):* The Decision Support System BodenseeOnline for Hydrodynamics and Water Quality in Lake Constance. Source: Decision Support Systems, Advances in, Book edited by: Ger Devlin, ISBN 978-953-307-069-8, pp. 342, March 2010, INTECH, Croatia, downloaded from SCIYO.COM
- LAWA (2010):* Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft“ - Bestandsaufnahme und Handlungsempfehlungen. Strategiepapier der Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser LAWA, c/o Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft, Dresden.
- Lebensministerium (2007):* Anpassung der Klimastrategie Österreichs zur Erreichung des Kyoto-Ziels 2008-2012 - Vorlage zur Annahme im Ministerrat. www.lebensministerium.at
- Lebensministerium (2011a):* Die österreichische Strategie zur Anpassung an den Klimawandel – Teil 1: Kontext, www.lebensministerium.at
- Lebensministerium (2011b):* Die österreichische Strategie zur Anpassung an den Klimawandel. Teil 2 - Aktionsplan: Handlungsempfehlungen für die Umsetzung. www.lebensministerium.at
- Leibundgut, Ch. (2010):* Nachhaltige Sicherung von Wasserressourcen – das NFP 61 im Spiegel globaler und nationaler Herausforderungen. Wasser Energie Luft, 102/3, 222-228.
- LfU (2011):* Internationale Klimaschutzpolitik – Umwelt Wissen. www.lfu.bayern.de
- Liebscher, H.-J. (1991):* Mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt. Wasserwirtschaft 81 (1), 5-10.
- Livingstone, D. (2004):* Eisbedeckung von Seen und Flüssen - Klimatrends aus historischen Aufzeichnungen. EAWAG News 58, 19-22.
- Livingstone, D. (2010):* Einfluss des Klimawandels auf das Grundwasser. In: Nationales Forschungsprogramm 61 „Nachhaltige Wassernutzung“, Cluster 1: Hydrologie – Gletscher, Grundwasser und Extremereignisse. <http://www.nfp61.ch>
- Löbermann, M., Gürtler, L.G., Eichler-Löbermann, B. und Reisinger, E.C. (2012):* „Neue“ Viren als bedrohliche Krankheitserreger in Europa. In: DMW 17, 900-905.

- LUBW (2006)*: Unser Klima verändert sich – Folgen, Ausmaß, Strategien. Hrsg.: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg. www.kliwa.de
- LUBW (2007)*: Klimaveränderung am Bodensee – Auswirkungen auf den Wasserhaushalt. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg.
- LUBW (200x)*: Aquatische Neozoen: Tiere mit Migrationshintergrund. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, www.lubw.baden-wuerttemberg.de
- LUBW (2011a)*: Angebotseinholung von freiberuflichen Leistungen. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, www.lubw.baden-wuerttemberg.de
- LUBW (2011b)*: Wie kommt der Bodensee mit dem Klimawandel zurecht? Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, www.lubw.baden-wuerttemberg.de.
- LUBW (2011c)*: Ermittlung des Extremwasserstandes (ca.HW₁₀₀₀) für den Bodensee – Ober- und Untersee. Arbeitsgruppe Wasserstandvorhersage Bodensee. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, www.lubw.baden-wuerttemberg.de
- LUBW (2011d)*: Langzeitverhalten der Bodense-Wasserstände. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden- Württemberg. ISBN: 978-3-88251-361-5.
- LUBW (2012)*: Der Klimawandel in Baden-Württemberg – Zusammenfassung Klimaszenarien Baden-Württemberg 2021 – 2050. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, www.lubw.baden-wuerttemberg.de
- LUBW (2013)*: Zukünftige Klimaentwicklung in Baden-Württemberg - Perspektiven aus regionalen Klimamodellen (Langfassung). Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, ISBN 978-3-88251-377-6, www.lubw.baden-wuerttemberg.de
- Lucas, R. (2011)*: Gefährdungen von Ökosystemleistungen durch den Klimawandel. Dynaklim-Publikation Nr. 15, www.dynaklim.de
- Luding, H. (2007)*: Klimawandel und die Auswirkungen auf die Natur. Unveröffentlichte Mitteilung der Landesanstalt für Umweltschutz, Ref. 56, Bayern.
- LW (2006)*: Ursachen und Folgen des Klimawandels – Womit ist in Baden-Württemberg zu rechnen? Landeswasserversorgung Heft 7, 6-7.
- Mahrenholz, P. (2007)*: Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft: Künftige Klimaänderungen in Deutschland – ein Anlass zur Sorge? In: KLIWA Heft 10, 33-43.
- Mai, R. und Swiaczny, F. (2008)*: Demographische Entwicklung – Potenziale für Bürgerschaftliches Engagement. BiB Heft 126, Hrsg.: Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung, Wiesbaden.
- Malitz, G. (2007)*: Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft: Starkniederschläge und Schneeschmelze in Süddeutschland. In: KLIWA Heft 10, 55-69.
- Marotzke, J. (2012)*: Von der Vergangenheit bis in die Zukunft: Neue Klimasimulationen für Wissenschaft und Gesellschaft. Vortrag KLIWA, 5. Symposium, Würzburg.
- Martignani, K. (1993)*: Chance und Risiko – wer wagt gewinnt? In: Risiko. Hrsg.: Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit (GSF), ISSN 0175-4521, 46-47.
- Mayer, S. (2007)*: Risikomanagement im Alpenraum. Umweltbundesamt, www.umweltbundesamt.at
- Mehlhorn, H., Kobus, H., Schick, R., Lang, U. (2008)*: Naturschatz und Ressource Bodensee – eine wasserwirtschaftliche Herausforderung. Wasserwirtschaft 98 , Heft 10, 12-15.
- Merkel, W., Leuchs, W. u. Odenkirchen, G. (2008)*: Herausforderungen des globalen Klimawandels für die Wasserwirtschaft in Deutschland. Gwf – wasser/abwasser 149/4, 332-337.

- Merkel, W., Sorge, H.-Ch. und Christen, T. (2012):* Erstellung einer risikobasierten Instandhaltungsstrategie für Fernwasserleitungen. Vortrag BWV, Stuttgart, Mai 2012.
- Messner (2011):* Bodensee droht chronisches Niedrigwasser. Stuttgarter Zeitung, www.stuttgarter-zeitung.de
- Messner, W. (2012):* Klima macht dem Bodensee zu schaffen. Stuttgarter Zeitung, www.stuttgarter-zeitung.de
- Müller, E. (2009):* Forschungsprogramm Pumpencheck - Vorgehen zur Energiekostenoptimierung. gwa 6/2009, 475-480.
- MunichRe (2009):* Klimawandel und Auswirkungen. Munich Re Newables, 1-10. www.munich-re.com
- NABU (2012):* Ist die Sonne an allem Schuld – Argumente gegen aktuelle Thesen der Klimaskeptiker. <http://www.nabu.de>
- Naef, F. (2010):* Wie verändert sich die Hochwassergefahr in den Alpen? In: Nationales Forschungsprogramm 61 „Nachhaltige Wassernutzung“, Cluster 1: Hydrologie – Gletscher, Grundwasser und Extremereignisse. <http://www.nfp61.ch>
- Naef, F. NFP 61 (2010):* Nachhaltige Wassernutzung – Porträt des Nationalen Forschungsprogramms NFP 61, www.nfp61.ch
- Nagler, H. (2011):* „Wettermaschine“ soll Bodensee-Klima erkunden. Schwäbische Zeitung, www.schwaebische-zeitung.de
- Neumann, J. und Gudera, Th. (2007):* Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft: Auswirkung der Klimaveränderung auf die Grundwasserneubildung in Süddeutschland. In: KLIWA Heft 10, 163-173.
- NKGCf - Autorenkollektiv (2010):* Regionale Klimamodelle – Potentiale, Grenzen und Perspektiven. Sonderausgabe des Nationalen Komitees für Global Change Forschung, c/o Institut für Weltwirtschaft, Kiel.
- North N., Kljun N., Kasser F., Heldstab J., Maibach M., Reutimann J. und Guyer M. (2007):* Klimaänderung in der Schweiz - Indikatoren zu Ursachen, Auswirkungen, Maßnahmen. Umwelt-Zustand Nr. 28, Hrsg.: Bundesamt für Umwelt, Bern.
- OcCC (2007):* Klimaänderung und die Schweiz 2050 – Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. www.occc.ch
- OcCC (2008):* Das Klima ändert sich, was nun? - Der neue UN-Klimabericht (IPCC 2007) und die wichtigsten Ergebnisse aus Sicht der Schweiz. Hrsg.: Organe consultatif sur les changements climatiques (OcCC, beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung), ISBN: 978-3-907630-33-4, www.occc.ch
- Ostendorp, W. (2006):* Fachtagung „Bodenseeufer und Klimawandel“ – ein Rückblick. AGBU e.V., www.bodensee-ufer.de
- Ostendorp, W. (2008):* Auswirkungen des Klimawandels auf die Lebensgemeinschaften am Bodenseeufer. Natur und Mensch 50, 2-8.
- Ostendorp, W. und Jöhnk, K. (2003a):* Jahrhunderthochwasser 1999 – Jahrhundertniedrigwasser 2003: Seespiegeltrends und Extremwasserstände am Bodensee. PrePrint aus Natur + Mensch Nr. 6, Schaffhausen.
- Ostendorp, W. und Jöhnk, K. (2003b):* Jahrhunderthochwasser 1999 – Jahrhundertniedrigwasser 2003: Seespiegeltrends und Extremwasserstände am Bodensee. Natur&Mensch Nr. 6, 6-11.

- Ostendorp, W., Brem, H., Dienst, M., Jöhnk, K., Mainberger, M., Peintinger, M., Rey, P., Ross-knecht, H., Schlichtherle, H., Straile, D. u. Strang, I. (2007): Auswirkungen des globalen Klimawandels auf den Bodensee. In: Schriften des Vereins für Geschichte des Bodensees und seiner Umgebung, Heft 125, 199-244.
- ÖWAV (2010): Auswirkungen des Klimawandels auf Hydrologie und Wasserwirtschaft in Österreich. Präsentation aktueller Studien, ISBN 978-3-902084-79-8, Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, www.oewav.at
- Petry, D. (2009): Klimawandel und Trinkwasserversorgung: Auswirkungen, Handlungsbedarf, Anpassungsmöglichkeiten. Energie Wasser-Praxis 10, 48-54.
- Pieper, Th., Kleiner, J. (2001): Arsen und die Qualität des Bodenseetiefenwassers. In: CLB Chemie in Labor und Biotechnik, 52. Jahrgang, Heft 4, 144-147.
- Pinnekamp, J., Köster, S., Siekmann, M. und Staufer, Ph. (2008): Klimawandel und Siedlungswasserwirtschaft. www.klimazwei.de
- Posch, T., Köster, O., Salcher, M. and Pernthaler, J. (2012): Harmful filamentous cyanobacteria favoured by reduced water turnover with lake warming. Nature climate change, www.nature.com.
- Preuß, G., Borgmann, A., Fricke, K., Skark, Ch. und Remmler, F. (2011a): Klimawandel und wasserassoziierte Krankheitserreger in Trinkwasserressourcen von NRW. Posterbeitrag. GDCh-Tagung 2011, Norderney.
- Preuß, G., Borgmann, A., Remmler, F. (2011b): Klimawandel und wasserassoziierte Krankheitserreger in Trinkwasser-Ressourcen. Kurzreferat bei der GDCh-Jahrestagung 2011, 30.05.-01.06.2011 in Norderney, www.gdch.de
- ProClim (2005): Schweizer Forschende fordern CO₂-Reduktionsmassnahmen im Inland. ProClim – Forum for Climate and Global Change, www.proclim.ch
- Prognos (2010): Prognos Zukunftsatlas 2010 – Deutschlands Regionen im Zukunftswettbewerb. Berlin/Bremen/Düsseldorf. 15.11.2010, www.prognos.com.
- Raith, Ch. (2004): Rekord-Wasserabgabe im Sommer 2003. Zweckverband Bodensee-Wasserversorgung, Kristallklar Nr. 04, 30-32.
- Regionalverband (2009a): Regionale Klimaanalyse Bodensee-Oberschwaben – REKLIBO. Wissenschaftlicher Abschlussbericht, Band 1. www.bodensee-oberschwaben.de
- Regionalverband (2009b): Regionale Klimaanalyse Bodensee-Oberschwaben – REKLIBO, Grundlagenkarten - Ergebniskarten – Analysekarten. www.bodensee-oberschwaben.de
- Regionalverband (2010): Klimafibel - Ergebnisse der Klimaanalyse für die Region Bodensee-Oberschwaben und ihre Anwendung in der regionalen und kommunalen Planung. Regionalverband Bodensee-Oberschwaben, Info Heft No. 11, www.bodensee-oberschwaben.de
- REGKLAM (2012): Entwicklung und Erprobung eines Integrierten Regionalen Klimaanpassungsprogramms für die Modellregion Dresden, Förderkennzeichen: 01 LR 0802, www.regklam.de
- Rickenmann, D. (2010): Mehr Hochwasser – mehr Sedimenttransport – weniger Fische. In: Nationales Forschungsprogramm 61 „Nachhaltige Wassernutzung“, Cluster 2: Wassermanagement – Hochwasser – Sedimenttransport - Fische, <http://www.nfp61.ch>
- Rinke, K., Rothhaupt, K.-O. (2008): Das ökologische Modell des Bodensees: Konzept, Simulation und Test an Langzeitdaten. In: Wasserwirtschaft 98, Heft 10, 26-30.
- Rödl & Partner (2009): Kennzahlenvergleich Wasserversorgung in Baden-Württemberg. Ergebnisbericht für das Erhebungsjahr 2009. Hrsg.: Rödl & Partner, Nürnberg, www.roedl.de

- Roßknecht, H. (2003):* Der Alpenrhein im Bodensee – Chemische Indikatoren zur Aufklärung physikalischer Prozesse im Bodensee-Obersee. Hrsg.: Landesanstalt für Umweltschutz, Institut für Seenforschung Bd. 3, ISSN: 1437-0166.
- Roßknecht, H. (2007):* Auswirkungen von Klimaveränderungen auf das Zirkulationsverhalten des Bodensee-Obersees. KLIWA Heft 11, 65-99.
- Ruegg, K. (2008):* Klimawandel und Trinkwasser (CH). Vortrag im Rahmen der Veranstaltung „Gesicherte Wasserversorgung trotz Klimawandel“, Academia-Engelberg 2008.
- Ruegg, K. (2012):* 2050 ist es zu spät, sich Gedanken zu machen. SVGW-Jahresbericht 2011. www.svgw.ch
- Schädler, B. (2006):* Abnehmende Wasserreserven in den Alpen. Umwelt Heft 4 (06), 10-12.
- Schädler, B. (2008a):* Klimawandel – Geht uns das Wasser aus. GWA Heft 10, 763-769.
- Schädler, B. (2008b):* Klimaänderung – Strategien des Bundes im Bereich Wasser. Vortrag im Rahmen des Symposiums „Herausforderung des Klimawandels für die Schweiz“, 29.08.2008, Grafenort.
- Schär, Ch., Frei, Ch., Fukutome, S., Lüthi, D., Kleinn, J., Seneviratne, S. und Vidale, P.-L. (2000a):* Regionale Klimamodelle – Möglichkeiten und Grenzen. 1. KLIWA Symposium 2000, 92-103.
- Schär, Ch., Frei, Ch., Vidale, P.-L., Kleinn, J. und Gurtz, J. (2000b):* Grenzen und Möglichkeiten der globalen und regionalen Klimamodellierung für die Quantifizierung des Wasserhaushaltes. Studie für den Deutschen Wetterdienst. ETH Klimaforschung, Zürich.
- Schavan, A. (2008):* BodenseeOnline – ein erfolgreiches Beispiel für neue Wege der Forschungsförderung. Wasserwirtschaft 98, Heft 10, 3.
- Scheuermann, W., Schmidt, F., Krass, C. (2008):* Modellierung des Windfeldes als Antriebskraft für die interne Strömung im Bodensee. Wasserwirtschaft 98, Heft 10, 22-25.
- Schick, R. (2013a):* Auswirkungen/Folgen des Klimawandels am Bodensee aus Sicht der Trinkwasserversorgung. In: 27. Oldenburger Rohrleitungsforum 2013. Rohrleitungen – im Zeichen des Klimawandels. ISBN: 978-3-8027-2777-1, Vulkan-Verlag GmbH, Essen.
- Schick, R. (2013b):* Auswirkungen/Folgen des Klimawandels auf die Trinkwasserversorgung aus dem Bodensee. In: Trinkwasserqualität und Gewässerschutz, 27. Trinkwasserkolloquium. Stuttgarter Berichte Siedlungswasserwirtschaft, Band 213, 61-83.
- Schlichtherle, H., Mainberger, M. (2006):* Klimawandel – Probleme für das archäologische Kulturgut unter Wasser in den Seen und Mooren des Alpenvorlandes. NAU 13, 59-63.
- Schneider, A. (2010):* Gepanzerte Truppe erobert den Bodensee. Südkurier, www.suedkurier.de
- Schneider, B. (2013):* Auswirkungen des Klimawandels auf die Trinkwasservorräte in Süddeutschland - Ergebnisse der KLIWA-Kooperation. In: 27. Oldenburger Rohrleitungsforum 2013. Rohrleitungen – im Zeichen des Klimawandels. ISBN: 978-3-8027-2777-1, Vulkan-Verlag GmbH, Essen.
- Schöll, F., Egers, Th., Haybach, A., Gorka, M., Klima, M. und König, B. (2012):* Verbreitung von *Dreissena rostriformis bugensis* (Andrusov, 1897) in Deutschland (Mollusca: Bivalvia). *Lauterbornia* 74, 111-115.
- Scholz, G., Schwinge, E. und Wolf, B. (2007):* Sanierung des Hochbehälters. In: Wissensdurst – eine Fachveröffentlichung der Bodensee-Wasserversorgung, Heft 2, 2-15.
- Schöner, W.; Böhm, R.; Haslinger, K.; Blöschl, G.; Merz, R.; Blaschke, A.P.; Viglione, A.; Parajka, J.; Kroiß, H.; Salinas, L.; Drabek, U.; Laaha, G. & Kreuzinger, N. (2011):* Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft. Im Auftrag des BMLFUW und der Länder. ZAMG, TU-Wien.

- Schönmuth, J. (2010):* Deutschlands Zukunft liegt im Süden. Südkurier, 16.11.2010.
- Schwab, A. (2010):* Klimafibel – Ergebnisse der Klimaanalyse für die Region Bodensee-Oberschwaben und ihre Anwendung in der regionalen und kommunalen Planung. Info-Heft Nr. 11, Hrsg.: Regionalverband Bodensee-Oberschwaben.
- Seiler W. (2009):* Der globale Klimawandel – Herausforderung und Chancen. Wettbewerb „Allgäuhaus“ in Kempten, 20.08.2009.
- Seneviratne, S. (2010):* Sind wir auf Trockenperioden vorbereitet? In: Nationales Forschungsprogramm 61 „Nachhaltige Wassernutzung“, Cluster 1: Hydrologie – Gletscher, Grundwasser und Extremereignisse. www.nfp61.ch
- Sieber, A., Bremicker, M., Mathis, C. und Helbling, A. (2011):* Ermittlung des Extremwasserstandes (ca. HW 1000) für den Bodensee (Ober- und Untersee. Hrsg.: Arbeitsgruppe Wasserstandsvorhersage Bodensee, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Schweizerische Eidgenossenschaft - Bundesamt für Umwelt, Land Vorarlberg – Wasserwirtschaft.
- Siebler, J. (2006):* Exoten sind auf dem Vormarsch. Südkurier 20.10.2006.
- Sorge, H.-Ch., Grobe S., Feller, M. und Merkel, W. (2013):* Klimawandel – Wie flexibel sind unsere Wasserversorgungssysteme? Ein Zwischenstand zum BMBF-Forschungsvorhaben dynaklim. In 27. Oldenburger Rohrleitungsforum 2013. Rohrleitungen – im Zeichen des Klimawandels. ISBN: 978-3-8027-2777-1, Vulkan-Verlag GmbH, Essen.
- Sozialministerium (2008):* Influenzapandemieplan Baden-Württemberg, Ministerium für Arbeit und Sozialordnung, Familien, Frauen und Senioren. www.sm.baden-wuerttemberg.de
- Stabel, H.-H., Kamperdick, P. und Sinemus, H.-W. (1988):* Arsengehalte im Bodenseewasser. Vom Wasser 71, 163-172.
- Staib, O. und Stühle, D. (2013):* Das Notstromkonzept der BWV - Wasserversorgung mittels Ersatzstrom vom Sipplinger Berg bis in den Norden. Vortrag BWV-Infotag 2013.
- Stark, K., Niedrig, M., Biederbick, W., Merkert, H. u. Hacker, J. (2009):* Die Auswirkungen des Klimawandels – Welche neuen Infektionskrankheiten und gesundheitlichen Probleme sind zu erwarten? Bundesgesundheitsblatt Nr. 7, 699-713.
- Statistisches Bundesamt Deutschland (2006):* Im Jahr 2050 doppelt so viele 60-Jährige wie Neugeborene. Pressemitteilung Nr. 464 v. 07.11.2006. www.destatis.de
- Statistisches Bundesamt Deutschland (2009):* Bevölkerung in Deutschland Ende März 2009 unter 82 Millionen. Pressemitteilung Nr. 417 v. 04.11.2009. www.destatis.de
- Stecker, R., Mohns, T. und Eisenack, K. (2012):* Anpassung an den Klimawandel – Agenda Setting und Politikintegration in Deutschland: In: Zeitschrift Umweltpolitik & Umweltrecht Heft 2, 179-208.
- Stocker, T. (2008):* Einführung in die Klimamodellierung. Vorlesungsmanuskript, Physikalisches Institut, Universität Bern.
- Stoll-Kleemann, S. (2000):* Bürgerperspektiven zum Klimawandel in der Schweiz - wahrgenommene Handlungsbarrieren. In: EAWAG-News 50d, 10-12.
- Südkurier (2003a):* Fast auf dem Trockenen: Die Rotachmündung bei Friedrichshafen. www.suedkurier.de
- Südkurier (2003b):* Steinschlag: der See vor Hagnau - Nicht im Wasser: Schloss Wasserburg - Die Pfahlbauten sind nur zu Fuß erreichbar. Fotosammlung Südkurier, www.suedkurier.de
- Südkurier (2008):* Wenn das Wetter total verrückt spielt. Online-Spezial: Sammlung von Leserfotos zum Thema „Unwetter“. Südkurier, www.suedkurier.de

- Südkurier (2011)*: Beunruhigende Botschaften. Südkurier, www.suedkurier.de
- Tichler, R., Schneider, F. und Lindorfer, J. (2007)*: Volkswirtschaftliche Auswirkungen der Klimaerwärmung in Oberösterreich und Österreich. Energieinstitut Johannes Kepler Universität Linz, www.energieinstitut-linz.at
- Tiefenschärfe (2013)*: Faszinierender Blick in den Bodensee. EU-gefördertes Projekt „Tiefenschärfe“ kartiert den Bodensee neu. Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee, Pressemitteilung, www.igkb.de
- TrinkwV (2001)*: Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch – Trinkwasserverordnung. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2013, Teil I, 46, 2978-3004.
- Truffer, B. und Vollenweider, S. (2006)*: Wasser-Agenda 21 – Szenarioanalyse zur Entwicklung von Zukunftsstrategien für die schweizerische Wasserwirtschaft. EAWAG – Das Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs, CH-Dübendorf.
- UBA (2005a)*: Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von Extremereignissen durch Klimaänderungen – Schwerpunkt Deutschland. Kurzbericht zum Forschungsvorhaben 201 41 254. Institut für Atmosphäre und Umwelt der Uni Frankfurt/Main, Arbeitsgruppe Klimaforschung.
- UBA (2005b)*: Klimawandel in Deutschland – Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. Kurzfassung, Förderkennzeichen (UFOPLAN) 201 41 253. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung.
- UBA (2005c)*: Klimawandel in Deutschland - Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. Forschungsbericht 201 41 253, UBA-FB 000844, ISSN 1611-8855. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung.
- UBA (2006)*: Klimagefahr durch tauenden Permafrost? UBA-Hintergrundpapier, www.anpassung.net
- UBA (2008)*: Klimafolgen und Anpassung im Bereich Wasserwirtschaft. www.anpassung.net
- UBA (2010a)*: Zukünftig zu erwartende Klimaveränderungen. www.anpassung.net
- UBA (2010b)*: Beobachtete Klimaänderungen. www.anpassung.net
- UBA (2010c)*: Aufbau eines zentralen Informations-, Kommunikations- und Kooperationssystems für die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (IKK-DAS). Förderkennzeichen 3707 41 111, UBA-FB 001352, ISSN 1862-4359.
- UBA (2011a)*: Anpassung an den Klimawandel – Versicherungen. Themenblatt, www.anpassung.net
- UBA (2011b)*: Anpassung an den Klimawandel – Energiewirtschaft. Themenblatt, www.anpassung.net
- UBA (2011c)*: Anpassung an den Klimawandel – Bevölkerungsschutz. Themenblatt, www.anpassung.net
- UBA (2011d)*: Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland -Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. Forschungsbericht 204 41 138, UBA-FB 000969, ISSN 1862-4359.
- UBA (2011e)*: Unterstützung des Managements von Klimarisiken und –chancen. Förderkennzeichen 3708 49 111, UBA-FB 001468, ISSN 1862-4359.
- UBA (2011f)*: Ökonomische Aspekte der Anpassung an den Klimawandel. Literaturlauswertung zu Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel. Forschungskennzahl 3709 41 121, ISSN 1862-4359.

- UBA (2011g)*: Stakeholder-Dialoge: Chancen und Risiken des Klimawandels. Förderkennzeichen: 3708 49 106, UBA-FB 001454, ISSN 1862-4359.
- UBA (2012a)*: Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung. www.anpassung.net
- UBA (2012b)*: Anpassung an den Klimawandel in Unternehmen der öffentlichen Versorgung am Beispiel der Wasserwirtschaft. Kompass-Newsletter Nr. 20. Hrsg.: Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung, www.anpassung.net
- UBA (2012c)*: Klimalotse – Leitfaden zur Anpassung an den Klimawandel, Risiken und Chancen. www.klimalotse.anpassung.net
- UBA (2012d)*: Anpassung an den Klimawandel – Hitze in der Stadt. Themenblatt, www.anpassung.net
- UBA (2012e)*: Arbeitspapier zur Vorbereitung des Dialogs zur Klimaanpassung: Risikomanagement in Planungsprozessen. www.anpassung.net
- UBA (2012f)*: Das Klima ändert sich – was können wir tun? Beispiele der Anpassung vor Ort. www.anpassung.net
- UBA (2012g)*: Die Folgen des Klimawandels in Deutschland – Was können wir tun und was kostet es? Hintergrundpapier.
- UBA (2013)*: Politikszenerarien für den Klimaschutz VI. Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030. Forschungskennzahl 3709 41 109, UBA-FB 001730, ISSN 1862-4359.
- UBA / DWD (2008)*: Klimawandel und Gesundheit – Informationen zu gesundheitlichen Auswirkungen sommerlicher Hitze und Hitzewellen und Tipps zum vorbeugenden Gesundheitsschutz. Umweltbundesamt und Deutscher Wetterdienst, www.umweltbundesamt.de, www.dwd.de
- UBA Österreich (2003)*: StartClim – Ausgangspunkt für Klimaforschung. Mitteilung des österreichischen Umweltbundesamtes, www.umweltbundesamt.at
- UBA Österreich (2010a)*: Klimaänderungsszenarien und Vulnerabilität - Aktivitätsfelder Gesundheit, Natürliche Ökosysteme und Biodiversität, Verkehrsinfrastruktur, Energie, Bauen und Wohnen. www.umweltbundesamt.at
- UBA Österreich (2010b)*: Klimawandelanpassung. Report Nr. 0286 des österreichischen Umweltbundesamtes.
- UBA Österreich (2010c)*: Die Anpassung als zweite Säule in der Klimapolitik. Mitteilung des österreichischen Umweltbundesamtes, www.klimawandelanpassung.at
- UFZ (2011)*: Kosten der Anpassung an den Klimawandel – Eine ökonomische Analyse ausgewählter Sektoren in Sachsen-Anhalt. UFZ-Bericht Nr. 05. Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, Department Ökonomie, ISSN 0948-9452.
- UFZ (2012)*: Ökonomische Grundfragen der Klimaanpassung: Umriss eines neuen Forschungsprogramms. Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, UFZ, ISSN 0948-9452.
- UM-BW (2003)*: Kooperationen und Fusionen in der Wasserversorgung. Betriebswirtschaft/Recht/ Steuern. Leitfaden. Hrsg.: Ministerium für Umwelt u. Verkehr BW, Innenministerium BW.
- UM-BW (2004)*: Festlegung der Überdeckungen von Trinkwasserleitungen in Baden-Württemberg. Leitlinie. Hrsg.: Ministerium für Umwelt und Verkehr BW.
- UM-BW (2005)*: Vierter Internationaler/Kommunaler Klimaschutzkongress, Friedrichshafen 16.06.2005. Zusammenfassung der Vorträge und Publikationen.
- UM-BW (2007)*: Zukunftsfähige Trinkwasserversorgung Baden-Württemberg. Leitbild. Hrsg.: Umweltministerium Baden-Württemberg.

- UM-BW (2009)*: Umweltministerin Tanja Gönner zieht positive Bilanz über zehn Jahre Klimafor-
schung im Verbundprojekt KLIWA. Pressemitteilung des Umweltministeriums Baden-
Württemberg Nr. 324.
- UM-BW (2010a)*: Klimaschutz 2010 – Konzept für Baden-Württemberg. Umweltministerium Baden-
Württemberg, www.um.baden-wuerttemberg.de
- UM-BW (2010b)*: Klimawandel in Baden-Württemberg – Fakten, Folgen, Perspektiven. Broschüre,
Hrsg.: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg LUBW, Mi-
nisterium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr.
- UM-BW (2012a)*: Land entwickelt Anpassungsstrategie an die unvermeidbaren Folgen des Klima-
wandels. Pressemitteilung des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-
Württemberg, 05.03.2012.
- UM-BW (2012b)*: Klimawandel in Baden-Württemberg. Fakten – Folgen – Perspektiven. Hrsg.:
Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, ISBN 978-3-88251-
368-4.
- UMID (2009)*: Klimawandel und Gesundheit. Umweltmedizinischer Informationsdienst, Themenheft
3, 2009.
- Vahrenholt F. und Lüning, S. (2012)*: Die kalte Sonne – Warum die Klimakatastrophe nicht stattfindet.
Hoffmann und Campe Verlag Hamburg, ISBN: 978-3-455-50250-3.
- Von Gunten, U. (2010)*: Von Flüssen gespiesenes Trinkwasser: Noch sauber genug? In: Nationa-
les Forschungsprogramm 61 „Nachhaltige Wassernutzung“, Cluster 1: Hydrologie – Gletscher,
Grundwasser und Extremereignisse, www.nfp61.ch
- Wahl, B. (2007a)*: Auswirkungen der Klimaveränderung auf Binnenseen am Beispiel des Boden-
sees. KLIWA Heft 10, 185-198.
- Wahl, B. (2007b)*: Kovarianzanalysen physikalischer, chemischer und biologischer Langzeitdaten
des Bodensees mit hydrometeorologischen Parametern. KLIWA Heft 11, 11-63.
- Wahl, B. (2009)*: Modellunterstützte Untersuchungen zum Einfluss des Klimas auf den Bodensee:
Die Antriebsdaten KLIWA Heft 13, 27-37.
- Wang, M. (2012)*: Risikomanagement und Klimawandel - Empfehlungen der Versicherer. Präsen-
tation, Dialoge zur Klimaanpassung Berlin, 27.06.2012.
- Wang, M. (2012)*: Risikomanagement und Klimawandel - Empfehlungen der Versicherer. Vortrag:
UBA-Dialoge zur Klimaanpassung am 27.06.2012, Berlin.
- Wasserbilanz Bodensee (2011a)*: Interpellation Gemperle-Goldach (20 Mitunterzeichnende) vom
07.06.2011. Wasserbalance im Bodensee. Kantonsrat St. Gallen.
- Wasserbilanz Bodensee (2011b)*: Interpellation Gemperle-Goldach (20 Mitunterzeichnende) vom
07.06.2011. Wasserbalance im Bodensee. Kantonsrat St. Gallen, schriftliche Antwort der Regie-
rung vom 16.08.2011.
- Wasserhaushaltsgesetz (2013)*: Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz - WHG) vom 31. Juli 2009 in der Fassung vom 21. Januar 2013 (BGBl. I Nr. 3, 95 ff).
- Wasserwirtschaft (2008)*: BodenseeOnline – Ein Informationssystem zur Vorhersage der Hydrody-
namik und der Wasserqualität in Seen. Wasserwirtschaft 10, 3-48.
- Wasserwirtschaft (2010)*: Klimawandel und Demographie - Widersprüchliche Folgen für die Was-
serwirtschaft. Wasserwirtschaft 32, 2.
- Weber M.-Ch. (2011)*: How do water companies adapt to climate change impacts? A literature re-
view. Bachelorarbeit der wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät, Technischen Universität Dres-
den.

- Weiß, M. (2009):* Werterhaltung von Wasserversorgungsanlagen zur Steigerung der Versorgungssicherheit und Effizienz. Wissensdurst – eine Fachveröffentlichung der Bodensee-Wasserversorgung, Heft 4, 4-11.
- Welzl, G. (1993):* Wenn Gefahren zu Zahlen werden. In: Risiko. Hrsg.: Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit (GSF), ISSN 0175-4521.
- Wendler, S. (2013):* Neue Übersichtsstudie: Klimawandel verringert genetische Vielfalt. Gwf-Wasser/Abwasser 2013/2, 160-161.
- Werner, S. (2012):* Gefahren für Gewässer und Wasserversorgung durch invasive Muscheln. Unveröffentlichter Bericht, Hydra-Institut Konstanz, Zweckverband Bodensee-Wasserversorgung.
- Wiki.bildungsserver (2012a):* Ursachen von Klimaänderungen. www.wiki.bildungsserver.de
- Wiki.bildungsserver (2012b):* Die IPCC-Emissionszenarien.
- Wiki.bildungsserver (2012c):* Klimamodelle. www.wiki.bildungsserver.de/klimawandel
- Wikipedia (2012a):* Klimawandel. www.wikipedia.org/wiki/Klimawandel.
- Wikipedia (2012b):* Klimamodell. www.wikipedia.org/wiki/Klimamodell.
- Wikipedia (2012c):* Folgen der globalen Erwärmung. www.wikipedia.org/wiki/Folgen_der_globalen_Erwärmung.
- Wikipedia (2012d):* Klimaveränderung. www.wikipedia.org/wiki/Klimaveränderung.
- Wikipedia (2012e):* Wetterbeobachtung. www.wikipedia.org/wiki/Wetterbeobachtung.
- Wikipedia (2012f):* Globale Erwärmung. www.wikipedia.org/wiki/Globale_Erwärmung.
- Wikipedia (2012h):* Klimapolitik. www.wikipedia.org/wiki/Klimapolitik.
- Wikipedia (2012i):* Klima. www.wikipedia.org/wiki/klima.
- Wikipedia (2012j):* Gletscherschwund. www.wikipedia.org/wiki/Gletscherschwund.
- Wikipedia (2013):* Meteorologie, www.wikipedia.org/wiki/Meteorologie
- WMO (2011):* WMO-Bericht zum Zustand des globalen Klimas 2010. WMO-No. 1074. Hrsg.: World Meteorological Organization CH-Genf. ISBN 978-92-63-11074-9, www.wmo.int
- Wricke, B. und Korth, A. (2007):* Auswirkungen demografischer Entwicklungen auf die Wasserversorgung. Energie/Wasser-Praxis 10, 30-34.
- WWF (2007):* Klimawandel in Österreich – Factsheetsammlung Bundesländer.
- ZAMG (2010):* PRISK-CHANGE „Veränderung des Risikos extremer Niederschlagsereignisse als Folge des Klimawandels“. Abschlussbericht der Fachabteilung Klimavariabilität/Modellierung in der Abteilung Klimaforschung.
- ZAMG (2011):* Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft. Studie der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik und Technische Universität Wien im Auftrag von Bund und Ländern.
- ZAMG (2012):* Wetter und Klima: Unterschiedlicher Zeitrahmen – unterschiedliche Phänomene. www.zamg.ac.at
- Zimmermann, L. (2007):* Regionale Klima-Szenarien – kein Spiel ohne Grenzen. LWF aktuell 60, 11-13.
- Zintz, K., Löffler, H. und Schröder, G. (2009):* Der Bodensee – Ein Naturraum im Wandel. ISBN: 978-3-7995-0838-4, Thorbecke Verlag der Schwabenverlag AG, Ostfildern.

Anhang

A.1 Erläuterungen von Fachbegriffen, Glossar

[Bundesregierung (2008b), IPCC (2007c)]

Aktuelles Wettergeschehen	Zustand der Atmosphäre zu einem bestimmten Zeitpunkt und an einem bestimmten Ort der Erdoberfläche, gekennzeichnet durch die meteorologischen Elemente Strahlung, Luftdruck, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Wind sowie die daraus ableitbaren Phänomene wie Sonnenschein, Bewölkung, Nebel, Niederschlag, Schneefall,...)
Ambiguität	Ambiguität bezeichnet die Tatsache, dass die möglichen Konsequenzen eines Risikos von unterschiedlichen Gruppen völlig unterschiedlich bewertet werden, gleichgültig wie wahrscheinlich oder unwahrscheinlich sie sein mögen.
Anpassung an den Klimawandel	Die Anpassung an den Klimawandel umfasst Initiativen und Maßnahmen, um die Empfindlichkeit bzw. die Schadensanfälligkeit ökologischer, gesellschaftlicher und ökonomischer Systeme gegenüber tatsächlichen oder erwarteten Auswirkungen/Folgen der Klimaänderung zu verringern. Es können verschiedene Arten von Anpassungen unterschieden werden, darunter vorausschauende und reaktive, private und öffentliche Anpassungsmaßnahmen.
Anpassungsfähigkeit	Die Gesamtheit aller Fähigkeiten, Ressourcen und Institutionen eines Landes oder einer Region, um wirksame Anpassungsmaßnahmen umzusetzen.
Auswirkungen des Klimawandels	Als Auswirkungen des Klimawandels werden beobachtete Primäreffekte oder Prognoseaussagen bezeichnet, die auf Szenarien basieren. Beispiele sind: Änderung der Temperatur und Niederschlagsmenge, Extremereignisse wie Starkniederschläge, Trockenheit, Hoch-/Niedrigwasser, Hangrutschungen, Murenabgänge, Stürme
Biologische Vielfalt	Oberbegriff für die Vielfalt der Ökosysteme, insbesondere der Lebensgemeinschaften und der genetischen Vielfalt innerhalb einer Art.
Deterministische Risikoabschätzung	Bei der deterministischen Risikoabschätzung wird unterstellt, dass ein bestimmtes Ereignis/Störfall eintritt, unabhängig von der Kenntnis der Ursachen und Wahrscheinlichkeit.
Demographischer Wandel	Demographischer Wandel bedeutet eine Modifikation der Alterszusammensetzung der Bevölkerung, die auf eine Veränderungen der Fertilität, Mortalität oder Migration zurückzuführen ist.
Empfindlichkeit, Sensitivität	Der Grad, zu welchem ein System entweder nachteilig oder positiv durch Klimavariabilität oder Klimaänderungen beeinflusst ist.
Exposition	Gesamtheit der „äußeren“ Einwirkungen, denen ein System ausgesetzt ist

Extremes Wetterereignis, Extremereignis	Ein extremes Wetterereignis ist ein Ereignis, das an einem bestimmten Ort und zu einer bestimmten Jahreszeit selten ist. Die Definitionen für "selten" variieren, aber ein extremes Wetterereignis wäre normalerweise so selten wie oder seltener als das 10- oder 90%-Perzentil der beobachteten Wahrscheinlichkeitsverteilung. Per Definition kann die Charakteristik von so genanntem "Extremwetter" absolut gesehen von Ort zu Ort unterschiedlich sein. Einzelne Extremereignisse können nicht einfach und direkt der anthropogenen Klimaänderung zugeordnet werden, da immer ei-ne begrenzte Chance besteht, dass das betreffende Ereignis natürlicherweise hätte auftreten können. Wenn ein Muster von extremem Wetter über eine bestimmte Zeitspanne, z. B. eine Saison, bestehen bleibt, kann es als "extremes Klimaereignis" klassiert werden, vor allem wenn es ein Mittel bzw. eine Summe aufweist, die seinerseits bzw. ihrerseits extrem ist (z. B. eine Dürre oder Starkniederschlag während einer ganzen Saison).
Folgen des Klimawandels	Die primären Auswirkungen des Klimawandels haben vielfältige Folgen und Sekundäreffekte für Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. Die damit verbundenen qualitativen/quantitative Aussagen basieren i.d.R. auf Abschätzungen.
Gefahr	Zustand, Umstand oder Vorgang, aus dem mit hinreichender Wahrscheinlichkeit ein Schaden an einem Schutzgut entstehen kann.
Invasive Arten	Arten, deren Vorkommen außerhalb ihres natürlichen Verbreitungsgebiets für die dort natürlich vorkommenden Ökosysteme, Biotop oder Arten ein erhebliches Gefährdungspotenzial darstellen.
Klima	Klima im engen Sinn ist normalerweise definiert als das "Durchschnittswetter", oder genauer als die statistische Beschreibung des Wetters in Form von Durchschnittswerten und der Variabilität relevanter Größen über eine Zeitspanne im Bereich von Monaten bis Tausenden von Jahren. Der klassische, von der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) definierte Zeitraum (= Klimanormalperiode) sind 30 Jahre. Diese Größen sind meistens Oberflächenvariablen, wie Temperatur, Niederschlag und Wind. Klima im weiteren Sinn ist der Zustand des Klimasystems, einschließlich einer statistischen Beschreibung.
Klimamodell	Eine numerische Darstellung des Klimasystems, die auf den physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften seiner Bestandteile, seinen Wechselwirkungen und Rückkopplungsprozessen basiert und alle oder einige seiner bekannten Eigenschaften berücksichtigt. Das Klimasystem kann von Modellen unterschiedlicher Komplexität dargestellt werden, d.h. für jeden Bestandteil oder eine Kombination von Bestandteilen kann ein Modellspektrum oder eine Modellhierarchie bestimmt werden, die sich in Aspekten unterscheidet wie der Anzahl der räumlichen Dimensionen, dem Ausmaß, in welchem physikalische, chemische oder biologische Prozesse explizit dargestellt werden, oder bis zu welchem Grad empirische Parametrisierungen verwendet werden. Gekoppelte allgemeine Atmosphären- Ozean-Meereis-Zirkulationsmodelle (AOGCM) bieten eine Darstellung des Klimasystems, die sich nahe am umfassendsten Ende des derzeit vorhandenen Spektrums befindet. Es gibt eine Entwicklung in Richtung noch komplexerer Modelle mit interaktiver Chemie und Biologie. Klimamodelle werden als Forschungsinstrument verwendet, um das Klima zu untersuchen und zu simulieren, aber auch für operationelle Zwecke, einschließlich monatlicher, saisonaler und jahresübergreifender Klimaprognosen.

Klimaprognose	Eine Klimaprognose oder Klimavorhersage ist das Resultat eines Versuchs, eine Schätzung der effektiven Entwicklung des Klimas in der Zukunft vorzunehmen, z. B. auf saisonaler, jahresüber-greifender oder längerfristiger Zeitskala). Weil die zukünftige Entwicklung des Klimasystems stark von den Ausgangsbedingungen abhängen kann, bestehen solche Prognosen in der Regel aus Wahrscheinlichkeitsangaben.
Klimaprojektion	Eine Projektion der Reaktion des Klimasystems auf Emissions- oder Konzentrationsszenarien von Treibhausgasen, Aerosolen oder Strahlungsantriebs-Szenarien, häufig auf Klimamodellsimulationen basierend. Klimaprojektionen werden von Klimaprognosen unterschieden, um zu betonen, dass Klimaprojektionen von den verwendeten Emissions-/Konzentrations- bzw. Strahlungsantriebs-Szenarien abhängen, die auf Annahmen z. B. über zukünftige gesellschaftliche und techno-logische Entwicklungen beruhen, die nur eventuell verwirklicht werden und deshalb mit erheblichen Unsicherheiten verbunden sind.
Komplexität	Komplexität verweist auf schwer zu identifizierende und quantifizierende Kausalzusammenhänge, weil zwischen Ursache und Wirkung viele intervenierende Größen wirksam sind, die diese Beziehung entweder verstärken oder abschwächen, sodass man aus der beobachteten Wirkung nicht ohne weiteres auf Ursachen rückschließen kann.
Konservativ	Der Begriff „konservativ“ bedeutet im Sinne der vorliegenden Literaturstudie eine „vorsichtige“ Herangehensweise: ungünstige, d.h. zwar unwahrscheinliche aber dennoch denkbare Rahmenbedingungen werden unterstellt. Diese führen dazu, dass ein angenommenes Ereignis keine nachträgliche Minderung erfährt.
Lösungs- und Maßnahmenansätze	Mögliche Lösungs- und Maßnahmenansätze umfassen die Prävention (Klimaschutz) und die Adaption (Anpassung im Sinne strategischer und langfristiger Planung).
Modelle	Modelle helfen, ein besseres Verständnis für komplexe Vorgänge zu erhalten, die über lange Zeiträume stattfinden und für die nur eine begrenzte Anzahl an Messergebnissen vorliegen. Im Rahmen einer Modellierung trifft man zuerst Annahmen, mit denen versucht wird, die Wirklichkeit möglichst realitätsnah abzubilden. Danach lassen sich unter Berücksichtigung von mathematischen Algorithmen anhand computerunterstützter Simulationen Vorgänge und Wechselwirkungen abschätzen und zu visualisieren.
Monitoring	Monitoring nennt man die Beobachtung und Überwachung bestimmter Zustände und Veränderungen in der Umwelt. Systematische Beobachtungen werden dabei meist mit Alarm- oder Handlungswerten belegt, die bei einer Überschreitung entsprechende Gegenmaßnahmen auslösen.
Probabilistische Risikoabschätzung	Im Zusammenhang mit der probabilistischen Risikoabschätzung werden vor allem Ursachen analysiert, Eintrittswahrscheinlichkeiten kalkuliert und daraus das Risiko berechnet.

Regionales Klimamodell	Dynamische Verfahren simulieren mit einem höher aufgelösten dynamischen (numerischen) Modell Parameter für Teilgebiete des globalen Modellgebietes und nutzen dazu Eingangsdaten aus dem globalen Klimamodell. Beispiele sind REMO und CLM. Statistische Verfahren gehen davon aus, dass die globalen Modelle im großräumigen Maßstab in der Lage sind, die Muster der atmosphärischen Zirkulation treffend zu beschreiben. Bei den meisten dieser Verfahren werden statistische Beziehungen zwischen den großräumigen Mustern/Wetterlagen und den lokalen Auswirkungen identifiziert, wobei die aus der Vergangenheit oder Gegenwart gewonnenen Beziehungen auf die Projektionen der globalen Modelle angewendet werden. Beispiele sind WETTREG und STAR.
Resilienz	Resilienz (lateinisch resiliere: zurückspringen, abprallen) beschreibt die Toleranz bzw. Widerstandsfähigkeit eines Systems gegenüber Störungen. Vor dem Hintergrund einer globalen Veränderung z.B. durch klimabedingte Faktoren geht die Resilienz-Forschung davon aus, dass sich Systeme anpassen müssen. Kritiker werfen ihr vor, Umweltveränderungen hin zu nehmen und aus einer opportunistischen Haltung "das Beste daraus zu machen".
Risiko	Maß für die Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines bestimmten Schadens an einem Schutzgut unter Berücksichtigung der Gefährdung und der Verwundbarkeit. Im Rahmen des Risikomanagements werden eintretende Schäden, aber auch technische und organisatorische Vorkehrungen zu deren Vermeidung und Begrenzung berücksichtigt. Dagegen beschreibt die Gefahr nur die Möglichkeiten von Schäden.
Sensitivität	Die Sensitivität oder Empfindlichkeit beschreibt, wie stark ein System durch die Klimaänderungen direkt oder indirekt durch Sekundärfolgen beeinflussbar bzw. veränderbar ist. Die Systemveränderung kann sowohl positive als auch negative Auswirkungen/Folgen beinhalten.
SRES-Szenarien	SRES-Szenarien sind Emissionsszenarien, die als Basis für die Klimaprojektionen im IPCC Bericht 2001 „Special Report on Emissions Scenarios“ verwendet wurden.
Szenarien	Szenarien sind fiktive Abläufe, die denkbare Ereignisse beschreiben. Worst-case-Szenarien sind Szenarien, bei denen die denkbar ungünstigsten Rahmenbedingungen in allen damit verbundenen Bereichen (z.B. Umwelt, Technik, Mensch, Organisation,...) unterstellt wird.
Unsicherheit	Ein Ausdruck für das Ausmaß, in dem ein Wert ungewiss ist (z. B. der zukünftige Zustand des Klimasystems). Unsicherheit entsteht durch einen Mangel an Information oder durch Meinungsverschiedenheiten darüber, was bekannt ist oder überhaupt bekannt sein kann. Unsicherheit kann viele Quellen haben, von bezifferbaren Fehlern in Daten bis hin zu mehrdeutig formulierten Konzepten und Terminologien oder unsicheren Projektionen über menschliches Verhalten. Unsicherheit kann deshalb entweder quantitativ angegeben werden, z. B. durch eine Auswahl von berechneten Werten aus verschiedenen Modellen, oder durch qualitative Aussagen, die das Urteil eines Expertenteams wiedergeben.
Variabilität	Die Klimavariabilität bezieht sich auf Schwankungen des mittleren Zustandes und anderer statistischer Größen (wie Standardabweichungen, Vorkommen von Extremereignissen, etc.) auf allen zeitlichen und räumlichen Skalen, die über einzelne Wetterereignisse hinausgehen. Die Variabilität kann durch natürliche interne Prozesse innerhalb des Klimasystems (interne Variabilität) oder durch natürliche oder anthropogene äußere Einflüsse (externe Variabilität) begründet sein.

Volatilität	Das Maß von Schwankungen innerhalb eines bestimmten Zeitraums wird als Volatilität bezeichnet.
Vorsorge	Summe aller vorbeugenden und vorbereitenden Maßnahmen, die zur Verringerung oder Vermeidung möglicher Schadensfälle ergriffen werden können.
Vulnerabilität	Das Ausmaß, zu welchem ein System anfällig ist gegenüber nachteiligen Auswirkungen des Klimawandels, einschließlich der Klimavariabilität und der Extrema oder unfähig ist, diese zu bewältigen. Die „Verwundbarkeit“ ist abhängig von der Art, dem Ausmaß und der Geschwindigkeit der Klimaänderung einschließlich der Schwankung, welcher das System ausgesetzt ist (Exposition), seiner Sensitivität (Empfindlichkeit) und seiner Anpassungskapazität.

A.2 Ausgewählte Behörden und wissenschaftliche Fachinstitutionen

International

Behörde / Fachinstitution	Abkürzung	Internetpräsenz
Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderung (Intergovernmental Panel on Climate Change)	IPCC	www.ipcc.ch www.de-ipcc.de www.umweltbundesamt.de
World Meteorological Organization	WMO	www.wmo.int www.unbrussels.org
Weltgesundheitsorganisation	WHO	www.who.int
Europäische Union	EU	www.europa.eu
Europäische Kommission	EK	www.ec.europa.eu
Europäische Umweltagentur	EEA	www.eea.europa.eu

Schweiz

Behörde / Fachinstitution	Abkürzung	Internetpräsenz
Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung (Organe consultatif sur les changements climatiques)	OcCC	www.occc.ch
Bundesamt für Umwelt Bern	BAFU	www.bafu.admin.ch
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Centre for Climate and System Modelling	ETHZ	www.ethz.ch
Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz	EAWAG	www.eawag.ch
Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches	SVGW	www.svgw.ch
Forum für Klima und globale Umweltveränderungen.	ProClim	www.proclim.ch
Universität Bern - Physikalisches Institut	UniBe	www.phinst.unibe.ch
Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebiets	KHR	www.chr-khr.org/de
Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft	AWEL	www.awel.zh.ch

Österreich

Behörde / Fachinstitution	Abkürzung	Internetpräsenz
Lebensministerium Österreich	LM	www.lebensministerium.at
Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft Österreich	BMLFUW	www.lebensministerium.at
Umweltbundesamt Wien	UBA-Wien	www.klimawandelanpassung.at
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik	ZAMG	www.zamg.ac.at
Climate Change Centre Austria	CCCA	www.ccca.boku.ac.at
Universität Wien Institut für Meteorologie und Geophysik	Uni-Wien	www.img.univie.ac.at
Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Innsbruck	Uni-Inns	www.imgi.uibk.ac.at
Institut für Geophysik, Astrophysik und Meteorologie, Universität Graz	Uni-Graz	www.physik.uni-graz.at
Amt für Umwelt und Lebensmittelsicherheit des Landes Vorarlberg	AUL	www.vorarlberg.at
Österreichischer Verein des Gas- und Wasserfaches	ÖVGW	www.oevgw.at

Deutschland

Behörde / Fachinstitution	Abkürzung	Internetpräsenz
Bundesregierung - Climate Service Center	CSC	www.climate-service-center.de www.klimzug.de www.klimanavigator.de www.fona.de
Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung „Globale Umweltveränderungen“	WBGU	www.wbgu.de
Bundesministerium des Innern	BMI	www.bmi.bund.de
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit	BMU	www.bmu.de www.bmu-klimaschutzinitiative.de www.klimascout.de
Bundesministerium für Bildung und Forschung	BMBF	www.bmbf.de
Umweltbundesamt - Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung	UBA	www.anpassung.net www.umweltbundesamt.de
Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg	UM-BW	www.um.baden-wuerttemberg.de

Landesanstalt für Umwelt, Mes- sung und Naturschutz Baden- Württemberg	LUBW	www.lubw.baden-wuerttemberg.de
Bayerische Staatsregierung, Baye- rische Klima-Anpassungsstrategie	BayKLAS	www.stmug.bayern.de
Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit	STMUG	www.stmug.bayern.de
Bayerisches Landesamt für Um- welt	LfUBay	www.lfu.bayern.de
Internationale Bodenseekonferenz	IBK	www.bodenseekonferenz.org
Internationale Gewässerschutz- kommission für den Bodensee	IGKB	www.igkb.de
Arbeitsgemeinschaft der Wasser- werke Bodensee-Rhein Internationale Arbeitsgemeinschaft Wasserwerke Rhein	AWBR IAWR	www.awbr.org www.iawr.org
Deutscher Wetterdienst	DWD	www.dwd.de
Max-Planck-Gesellschaft - Institut für Meteorologie	MPI-M	www.mpimet.mpg.de www.mcs.de
Helmholtz-Gemeinschaft - Climate Service Center	CSC	www.climate-service-center.de www.klimabuero.de www.helmholtz.de
Leibniz-Gemeinschaft - Potsdam- Institut für Klimaforschung	PIK	www.pik-potsdam.de www.leibniz-transfer.de
Umweltforschungszentrum Leipzig	UFZ	www.ufz.de
Karlsruher Institut für Technologie	KIT	www.klima-umwelt.kit.edu
Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches	DVGW	www.dvgw.de
Vereinigung kommunaler Unter- nehmen	VKU	www.vku.de
Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft	BDEW	www.bdew.de
Münchener Rückversicherungs- Gesellschaft Aktiengesellschaft	MunichRE	www.munichre.com
Allianz-Umweltstiftung		www.allianz-umweltstiftung.de
Klimaskeptiker		www.klimaskeptiker.info

A.3 Ausgewählte Förderprogramme und F&E-Projekte

Schweiz

Förderprogramm / F&E-Projekt	Internetpräsenz
Swiss Climate Change Scenarios	www.ch2011.ch
Nachhaltige Wassernutzung - Nationales Forschungsprogramm NFP 61	www.nfp61.ch
Projekt CCHydro - Klimaänderung und Hydrologie	www.bafu.admin.ch
NFS Klima - Schweizer Klimaforschung	www.nccr-climate.unibe.ch

Österreich

Förderprogramm / F&E-Projekt	Internetpräsenz
alpS – Forschungszentrum für Klimawandelanpassung in Gebirgsregionen	www.alp-s.at
Reclip:more - Research for Climate Protection. Model Run Evaluation	www.foresight.ait.ac.at
ALPCLIM – Environmental and Climate Records from High Elevation Alpine Glaciers	www.zamg.ac.at
ALP-IMP - Multi-centennial climate variability in the Alps based on Instrumental data, Model simulations and Proxy data	www.zamg.ac.at
CLIVALP – Climate Variability Studies in the Alpine Region	www.zamg.ac.at
Austrian Panel on Climate Change	www.apcc.ac.at

Deutschland

Förderprogramm / F&E-Projekt	Internetpräsenz
KLIWA Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft	www.kliwa.de
FORKAST Auswirkungen des Klimas auf das Ökosystem und klimatische Anpassungsstrategien	www.bayceer.uni-bayreuth.de
KLIMZUG Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten	www.klimzug.de
Dynaklim Dynamische Anpassung an die Auswirkungen des Klimawan- delns in der Emscher-Lippe-Region (Ruhgebiet)	www.dynaklim.de
REGKLAM Regionales Klimaanpassungsprogramm für die Modellregion Dresden	www.regklam.de
KlimaMORO Raumentwicklungsstrategien zum Klimawandel	www.klimamoro.de
AdaptAlp Adaptation to Climate Change in the Alpine Space	www.adaptalp.org
WASKlim Wasserwirtschaftliche Anpassungsstrategien an den Klima- wandel	www.wasklim.de
Ökonomie der Anpassung an den Klimawandel	www.oekonomie-klimawandel.de
KLIWAS Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt - Entwicklung von Anpassungsoptionen	www.kliwas.de
GLOWA Globaler Wandel des Wasserkreislaufs	www.glowa.org
Klimazwei Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen	www.klimazwei.de