



Der Einfluss des Klimawandels auf die terrestrischen Wassersysteme in Deutschland

Eine Analyse ausgesuchter Studien der Jahre 2009 bis 2013

REPORT 29



Titelbild: © Fotolia / TTstudio

Zitierhinweis: Bender, S., Butts, M., Hagemann, S., Smith, M., Vereecken, H. & Wendland, F. (2017): Der Einfluss des Klimawandels auf die terrestrischen Wassersysteme in Deutschland. Eine Analyse ausgesuchter Studien der Jahre 2009 bis 2013. Report 29. Climate Service Center Germany. Hamburg.

Erscheinungsdatum: Februar 2017

Dieser Report ist auch online unter www.climate-service-center.de erhältlich.

Der Einfluss des Klimawandels auf die terrestrischen Wassersysteme in Deutschland

Eine Analyse ausgesuchter Studien der Jahre 2009 bis 2013

Autoren: Bender, S., Butts, M., Hagemann, S., Smith, M., Vereecken, H. & Wendland, F.

Abteilung „Klimafolgen und Ökonomie“ am
Climate Service Center Germany (GERICS)

Februar 2017

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	3
Verzeichnis der Textboxen	4
Danksagung	5
1. Motivation und Hintergrund	6
2. Trends bei Beobachtungsdaten und Zukunftsprojektionen	11
2.1 Historische Aufzeichnung klimatischer und hydrologischer Parameter	11
2.1.1 Temperatur	11
2.1.2 Niederschlag	12
2.1.3 Luftfeuchtigkeit	14
2.1.4 Evapotranspiration	14
2.1.5 Beobachtete Abflussmessungen an Messstationen	15
2.1.6 Bodenfeuchte	16
2.2 Projektionen des Klimas und möglicher Folgen für hydrologische Parameter	17
2.2.1 Projektionen, die Grundlagen	17
2.2.2 Projektion der Temperatur	21
2.2.3 Projektion des Niederschlagsverhaltens	22
2.2.4 Projektion des Gesamtabflusses	24
2.2.5 Projektionen der Evaporation und Evapotranspiration	28
2.2.6 Projektionen der Grundwasserneubildung	29
2.2.7 Umgang mit Klimaprojektionen	31
3. Tatsächliche und mögliche Folgen des Klimawandels	35
3.1 Beeinträchtigung der Binnenschifffahrt	36
3.2 Fehlende Verfügbarkeit von Kühlwasser für die Industrie	38
3.3 Nicht gedeckter Wasserbedarf für die Bewässerung in der Landwirtschaft	38
3.4 Zusätzlicher Stress für aquatische Ökosysteme	39
3.5 Herausforderungen für die lokale Wasserversorgung	41
3.6 Hochwasserrisiko	46
3.7 Schneebedingungen in Bergregionen	47

4. Empfehlungen	48
4.1 Allgemeines	48
4.1.1 Verringerung der Flusserwärmung	49
4.1.2 Wassereinsparung in der Landwirtschaft	49
4.1.3 Die Wasserversorgung der Zukunft.....	50
4.1.4 Vorausschauende, nachhaltige Managementstrategien	51
4.1.5 Auf Hochwasser vorbereitet sein	52
4.2 Bedarf für Monitoring und freien Zugang zu Daten.....	53
4.3 Identifikation und Förderung von No-Regret-Maßnahmen	54
4.4 Verstärkte Nutzung risikobasierter Ansätze.....	54
4.5 Gestaltung flexibler Infrastrukturen.....	55
4.6 Verbesserung der Steuerungskompetenz für Anpassungsmaßnahmen	56
5. Zusammenfassung.....	57
6. Literaturverzeichnis	58
Anhang 1: Wie muss man die Synthese-Karten lesen?	76

Abbildungsverzeichnis

Abb.1: Für Akteure relevante Zeitskalen im Hinblick auf benötigte Informationen zu Klima und Klimawandel	7
Abb.2: Ausgesuchte Forschungsprogramme, die sich von 2009 bis 2013 mit den Folgen des Klimawandels für terrestrische Wassersysteme in Deutschland befasst haben.	9
Abb.3: Beobachtete Jahresmitteltemperaturen in Deutschland (1901 – 2015)	12
Abb.4: Temperatur- (links) und Niederschlagstrends (rechts) in Deutschland (1881 – 2011).	13
Abb.5: Niederschlagstrends (Winter/Sommer) in Deutschland (1881 – 2011)	14
Abb.6: Projizierte Veränderungen des jährlichen mittleren Niederschlags (links) und der jährlichen mittleren Temperatur (rechts) für 2071 – 2100 (im Vergleich zu 1971 – 2000) für RCP 4.5.	20
Abb.7: Temperaturprojektionen für 2041 - 2070 (A1B, verglichen zur Referenzperiode 1961 - 1990)	21
Abb.8: Temperaturprojektionen für 2071 – 2100 (A1B, verglichen zur Referenzperiode 1961 – 1990)	22
Abb.9: Projizierter Niederschlag (2041 – 2070), verglichen mit der Referenzperiode 1961 – 1990	23
Abb.10: Projizierter Niederschlag (2071 – 2100) verglichen mit der Referenzperiode 1961 – 1990	24
Abb.13: Abflussbedingungen für die Periode 1971 – 2000 und die Veränderungen in einer 2°C wärmeren Welt (Kartenausschnitte aus IMPACT2C Webatlas	25
Abb.11: Projizierter Abfluss (2041 - 2070) verglichen mit der Referenzperiode 1961 - 1990	26
Abb.12: Projizierter Abfluss (2071 – 2100), verglichen mit der Referenzperiode 1961 – 1990	27
Abb.14: Projizierte Grundwasserneubildung (2041 – 2070), verglichen mit der Referenzperiode 1961-1990	30
Abb.15: Projizierte Grundwasserneubildung (2071 – 2100), verglichen mit der Referenzperiode 1961 – 1990	30
Abb.16: Änderungen in den verfügbaren Wasserressourcen. Vergleich der Ensemble-Mittelwerte 2071 – 2100 zu 1971 – 2000 für 24 Simulationen (8 GHMs, 3 GCMs), A2 Szenario	32
Abb.17: Herkunft des Wassers für die öffentliche Wasserversorgung.	42
Abb.18: Herkunft des Wassers für die nicht-öffentliche Wasserversorgung.	42
Abb.19: Wandel-Meter	76

Verzeichnis der Textboxen

Box 1: EURO-CORDEX – Coordinated Downscaling Experiment – European Domain	19
Box 2: Konvektive und stratiforme Niederschläge	23
Box 3: IMPACT2C – Quantifying projected impacts under 2°C	25
Box 4: Niedrigwasser und Hochwasser	36
Box 5: Dürre	43
Box 6: Nachhaltiger Wasserkreislauf in der Region Berlin und Brandenburg	51

Danksagung

Der Klimawandel hat das Potenzial, alle Komponenten des Wasserkreislaufs zu beeinflussen. Dies kann zu weitreichenden Folgen für die Ökosysteme, die Sektoren Energiewirtschaft, Landwirtschaft, Transport und Logistik, aber auch für die Wasserwirtschaft führen. Aufgrund der hohen gesellschaftlichen Relevanz wurden die umfangreichen heutigen Erkenntnisse zum Klimawandel und seine Folgen für die terrestrischen Wassersysteme mit Blick auf Deutschland übersichtlich zusammengefasst. Die Eckpunkte des vorliegenden Berichts wurden, gemeinsam mit einem Expertengremium, im Stil des „*National Research Council*“ (USA) erarbeitet und die Inhalte und Empfehlungen kontrovers diskutiert. Ein besonderer Dank geht an dieser Stelle an allen beteiligten Experten für deren Engagement bei der Entwicklung dieses prototypischen Syntheseformats.

Das Projekt wurde in den unterschiedlichen Entwicklungsphasen von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Climate Service Center Germany (GERICS) unterstützt. Vielen Dank an: Prof. Dr. Guy Brasseur, Miriam Brune, Dr. Paul Bowyer, Dr. Irene Fischer-Bruns, Prof. Dr. Daniela Jacob, Dr. Uwe Kehlenbeck, Dr. Andreas Hänsler und Dr. Diana Rechid.

1. Motivation und Hintergrund

Der Begriff „Terrestrische Wassersysteme“ umfasst die Süßwassersysteme unserer Erde. Dazu gehören die Binnengewässer und das Grundwasser, einschließlich der Lebensräume wie Seen, Flüsse, Bäche, Teiche, Moore, Sümpfe, Auen, sowie Bodenfeuchte und Süßwasser in gefrorenem Zustand als Gletscher, Schnee und Eis. Abgesehen von ihrer Bedeutung für die Umwelt (Biodiversität von Süßwasser-Ökosystemen) sind die terrestrischen Wassersysteme auch in anderer Hinsicht von weitreichender Bedeutung für den Menschen, beispielsweise aufgrund ihrer Nutzung durch Schifffahrt, Landwirtschaft, Industrieprozesse sowie der Energie- und Wasserversorgung. Dieser Bericht behandelt den Einfluss des Klimawandels auf die vorgenannten Süßwassersysteme. Küstenüberschwemmungen und die Folgen des Meeresspiegelanstiegs werden aufgrund ihrer lokalen Bedeutung – Salzwasserintrusionen in küstennahe Süßwasseraquifere – hier nicht weiter betrachtet.

Die Funktionalität und das ökologische Gleichgewicht terrestrischer Wassersysteme wurden durch den Menschen bereits erheblich verändert, insbesondere durch morphologische Veränderungen der Wasserkörper und –läufe, veränderte Landnutzung, Verschmutzungen und einem erhöhten Wasserverbrauch. Hierbei handelt es sich um kleinräumige Eingriffe wie Bautätigkeiten, die zu lokalen oder regionalen Veränderungen des Wasserkreislaufs führen. Der Klimawandel bewirkt hingegen großräumige systematische Veränderungen der Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag, Verdunstung, Abfluss und Grundwasserneubildung.

Viele Studien sowie die Erfahrungen des Climate Service Centers Germany zeigen, dass die Verantwortlichen in Städten, Kommunen und Unternehmen einen hohen Bedarf an Klimainformationen sowie gebündelten, gutaufbereiteten Informationen zu den Folgen des Klimawandels haben (Mahammadzadeh et al. 2013, Bender et al. 2012, ARL 2009). Nutzer von Klimainformationen aus den Sektoren Land- und Wasserwirtschaft gaben auf die Frage, welche Art Informationen sie benötigen, ein breites Spektrum an Antworten hinsichtlich der räumlichen und zeitlichen Auflösung gewünschter Klimadaten an (Bender et al. 2012). Ein Grund dafür ist, dass je nach Sektor, Branche und Planungsprozesse ganz unterschiedliche zeitliche Skalen von Relevanz sind (Abb.1). Informationen über Zeiträume von 20 und mehr Jahren sind insbesondere für die Forstwirtschaft, den Versicherungssektor und bei der Planung großer Infrastrukturprojekte von Interesse. Aussagen zum saisonalen oder dem jährlichen Verlauf werden besonders von der Landwirtschaft nachgefragt, um daraus Standortbewertungen ableiten zu können. Obwohl sich die Güte saisonaler Vorhersagen in den letzten Jahren für einige Regionen der Erde verbessert hat, liefert sie in Europa häufig nicht die Informationen, die von der Landwirtschaft gewünscht werden. Aber auch der Bedarf an dekadischen Informationen steigt zunehmend, beispielsweise für die Raumplanung oder die Wasserversorgung. Jedoch bestehen auch hier noch Defizite bei der Bereitstellung robuster Ergebnisse, d.h. von Ergebnissen die mit einer hohen Wahrscheinlichkeit den Zukunftstrend wiedergeben. Hierzu bedarf es noch weiterer Forschungsanstrengungen. So war beispielsweise das Hauptziel des BMBF-Projektes MiKlip (<http://www.fona-miklip.de/>), die Ergebnisse dekadischer Vorhersagen zu verbessern. Zusätzlich organisiert die EURO-CORDEX-Initiative (<http://www.euro-cordex.net/>) einen koordinierten Rahmen, um regionale Klimaprojektionen zu optimieren.

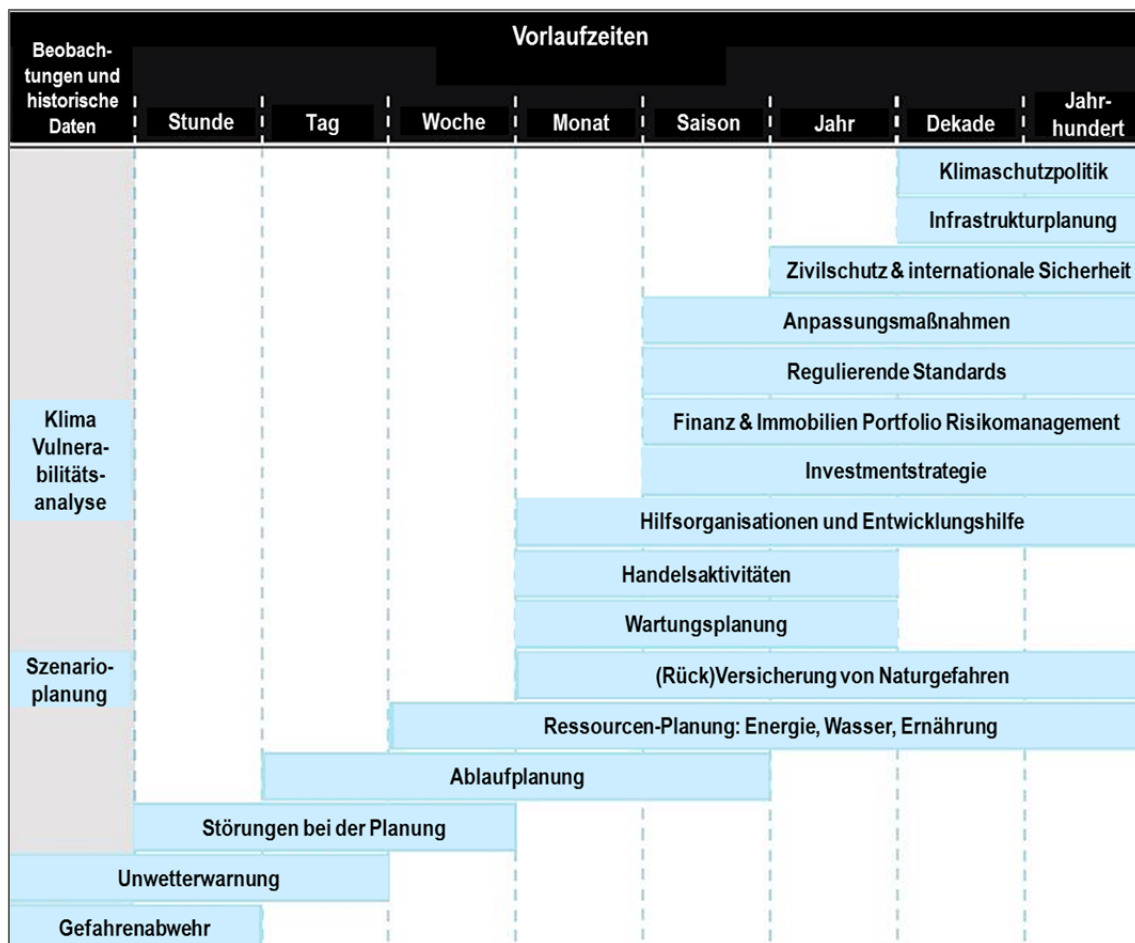


Abb.1: Für Akteure relevante Zeitskalen im Hinblick auf benötigte Informationen zu Klima und Klimawandel (Quelle Met Office 2010, verändert).

Es ist allgemein bekannt, dass klimatische oder hydrologische Ergebnisse aus Globalmodellen (GCMs) von Entscheidungsträgern nicht direkt verwendet werden können, um auf lokaler, und regionaler Ebene über Maßnahmen zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels zu entscheiden (UNFCCC 2011). Wegen dieser Einschränkung werden die Ergebnisse globaler Klimamodelle typischerweise herunter skaliert. Für dieses Downscaling stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, wie das dynamische oder statistische Downscaling. Mit steigender Verfeinerung des Maßstabes nimmt die Variabilität der Modellergebnisse weiter zu. Zurzeit erreichen regionale Klimamodelle (RCMs) eine räumliche Auflösung von etwa $10 \times 10 \text{ km}^2$. Von Nutzern werden gleichermaßen gröbere ($50 \times 50 \text{ km}^2$) als auch feine Auflösungen (weniger als $1 \times 1 \text{ km}^2$) nachgefragt (Bender et al. 2012). Für viele umweltrelevante Fragestellungen gibt es zudem einen Bedarf an räumlich hochaufgelösten Niederschlagsdaten im Meter-Raster, die als Eingangsgrößen für Kanalsimulationen, Dimensionierung von Entwässerungssystemen oder für die Projektion zeitlicher hydrologischer Entwicklungen in kleinen Einzugsgebieten Verwendung finden. Die Hauptprobleme bei der Nutzung von Ergebnissen aus Klimaprojektionen sind zum einen das Unverständnis, dass Wetter und Klima unterschiedliche Dinge beschreiben, zum anderen die Tatsache, dass Projektionen keine Vorhersagen oder Prognosen sind. Wetter ist der tägliche Zustand der Atmosphäre in einer Region einschließlich ihrer kurzfristigen Schwankungen.

Das Klima beschreibt dagegen die Statistik des Wetters und bezieht sich auf statistische Größen, die atmosphärische Bedingungen über längere Zeiträume hinweg, in der Regel 30 Jahre, beschreiben. Die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) definiert dazu 30 jährige Referenzperioden um die Vergleichbarkeit von Ergebnissen zu gewährleisten. Mit Klimamodellen können unter der Annahme verschiedener Emissionsszenarien mögliche zukünftige Klimaentwicklungen abgebildet werden. Diese sogenannten Projektionen sind im Gegensatz zu Prognosen keine Vorhersagen sondern Abbildungen möglicher Klimaentwicklungen auf Grundlage verschiedener Annahmen (Rechid et al. 2014).

Das Climate Service Center Germany (GERICS, ehemals CSC), das 2009 von der Bundesregierung im Rahmen der „Hightech-Strategie zum Klimaschutz“ ins Leben gerufen wurde, hatte zunächst die Ziele, vom klimawandelbetroffene Sektoren bei ihren Bemühungen zur Anpassung an den Klimawandel zu unterstützen. Neben einer Bedarfsermittlung bildet dabei auch die Synthese des aktuell vorhandenen Wissens die Grundlage für weiterführende Aktivitäten. Im Stil des „*National Research Council*“ sollte ein Berichtsform entstehen, in der vorgegebene Themenfelder aus verschiedener wissenschaftlicher und praxisorientierter Perspektive, unter Umständen auch kontrovers, betrachtet werden. Als erstes Themenfeld wurde „Der Einfluss des Klimawandel aus die terrestrischen Wassersysteme in Deutschland“ ausgewählt. Die Synthese des aktuellen Wissenstandes sowie über offene Fragestellungen und Bedarfe wurde zusammen mit einen internationalen Expertenkreis erarbeitet. Folgende Leitfragen standen im Vordergrund der nachfolgenden Analyse:

- Welche Klimainformationen werden benötigt, um die Folgen des Klimawandels auf die terrestrischen Wassersysteme bewerten zu können und sind diese Informationen aktuell verfügbar?
- Welche hydraulischen oder hydrochemischen Veränderungen müssen berücksichtigt werden? Welcher Prozess ist hierbei der wichtigste?
- Wo gibt es Verständnislücken in Bezug auf die Folgen des Klimawandels für terrestrische Wassersysteme?
- Welche Anwenderbedarfe treiben Anpassungs- und Klimaschutzmaßnahmen an?
- Aus Sicht der Praxisakteure: welche offenen Fragen müssen noch beantwortet werden?
- Warum müssen die Ergebnisse von Modellensembles betrachtet werden, obwohl das Arbeiten mit einer Klimaprojektion viel „einfacher“ wäre?

Die vorliegende Analyse orientiert sich an der Berichtsperiode zum Fünften IPCC Sachstandsbericht und fasst die Ergebnisse ausgesuchter Studien zusammen, die sich mit den Folgen des Klimawandels für die terrestrischen Wassersysteme in Deutschland beschäftigten (Abb.2). Für weiterführende Informationen auf internationaler Ebene wird auf die Berichte der drei Arbeitsgruppen zum Fünften Assessment Report des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2013, IPCC 2014a, IPCC 2014b, IPCC 2014c) verwiesen.

Einen zusätzlichen fächerübergreifenden Blick über die Auswirkungen des Klimawandels auf verschiedene Naturräume und Wirtschaftssektoren in Deutschland bietet Brasseur et al. (2016).

Als Auswahlkriterien dienten: a) der Projektabschluss: 2009 bis 2013, b) die Projektförderung: EU oder deutsche Projektträger¹, c) die Methodik: Verknüpfung von Klimamodellen und hydrologischen Modellen und d) das Arbeitsgebiet: ganz oder teilweise in einem deutschen Flusssystem beziehungsweise Grundwasserleiter. Verschnittene Bergregionen und Gletscher in der Schweiz und Österreich wurden ebenfalls miteinbezogen, da sie Einfluss auf die terrestrischen Wassersysteme in Deutschland haben.

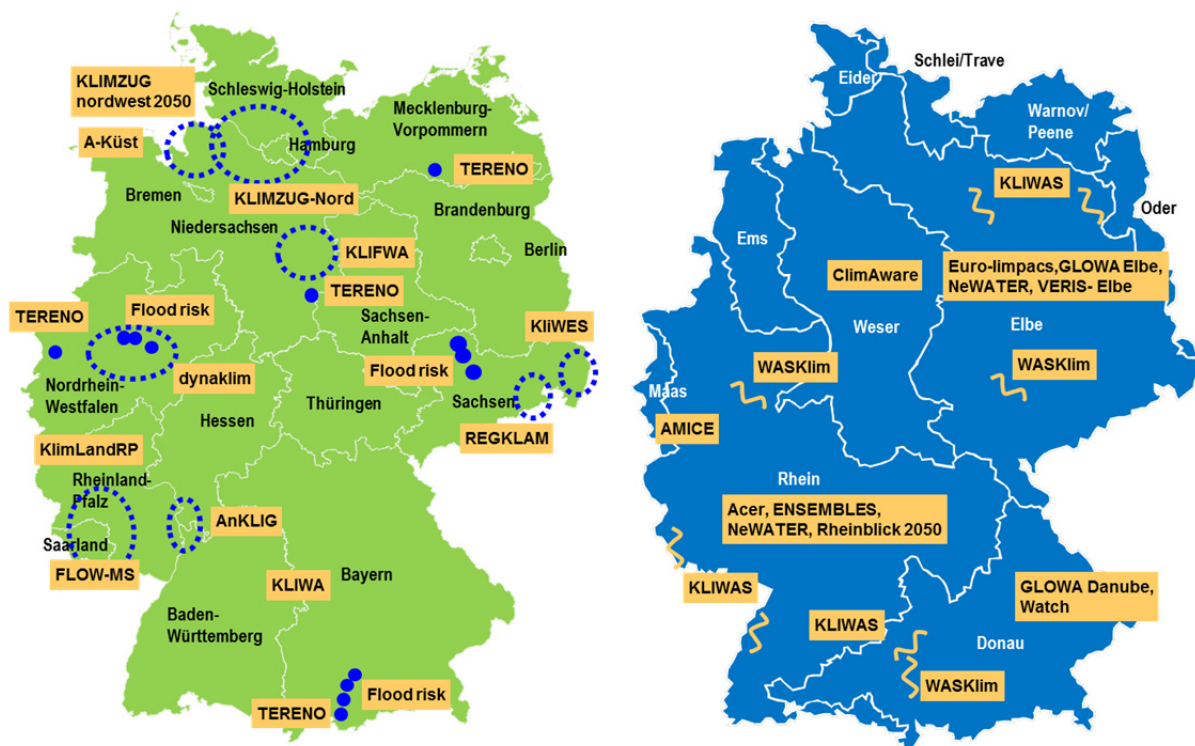


Abb.2: Ausgesuchte Forschungsprogramme, die sich von 2009 bis 2013 mit den Folgen des Klimawandels für terrestrische Wassersysteme in Deutschland befasst haben.

Die Analyse fasst die Ergebnisse von 29 Studien zusammen und wird in den Bereichen „Klimainformationen“ und „Anpassung an die Folgen des Klimawandels“ durch Forschungsergebnisse ergänzt. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass direkte Vergleiche nicht immer leicht durchführbar sind, da es keine standardisierten Arbeitsmethoden gibt. So werden unterschiedliche Bezugszeiträume, individuelle Modelle und Modellensembles verschiedener Emissionsszenarien und/oder unterschiedliche Bearbeitungsmaßstäbe verwendet. Der Bericht betrachtet historische Aufzeichnungen und Beobachtungen,

¹ Projekte gefördert vom BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung), BMUB (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit), BMVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung) sowie DFG-SFB-Projekte (Sonderforschungsbereiche der Deutschen Forschungsgemeinschaft)

präsentiert projizierte Trends bezogen auf Wasserverfügbarkeit und Wasserqualität und diskutiert deren Aussagegrenzen sowie Folgen für ausgewählte Akteure. Dies schließt auch den Umstand mit ein, dass ältere und aktuelle Studien zu widersprüchlichen Aussagen über zukünftige Entwicklungen kommen, da unterschiedliche Modellansätze gewählt wurden (Hattermann et al. 2010).

Es darf ebenfalls nicht übersehen werden, dass die Forschung zum Klimawandel und den Folgen des Klimawandels eine rasch wachsende und sich schnell veränderte Wissenschaft ist. Das bedeutet aber auch, dass sich der „Stand der Technik“ kontinuierlich verändern und verbessern wird. Deshalb stellen die hier vorgestellten Ergebnisse lediglich eine Momentaufnahme dar.

Wie die Praxis zeigt, ist der Transfer wissenschaftlicher Ergebnisse aus der Klima- und Klimafolgenforschung in die Praxis immer noch einer der wichtigsten Hauptaufgaben von Klimaservices. Dies schließt gleichermaßen die Kommunikation von Eintrittswahrscheinlichkeiten und Ergebnisbandbreiten mit ein. Dazu gehören aber auch die immer wiederkehrenden Empfehlungen zur Nutzung von Ensembledaten beziehungsweise der Hinweise auf die Notwendigkeit von Signifikanz- und Robustheitstest von Modellergebnissen, um die Güte der Trendermittlung bewerten zu können.

Hydrologische Projektionen sind ebenso wie Klimaprojektionen nicht als absolute Vorhersagen oder Prognosen zu verstehen, sondern zeigen vielmehr das Potential möglicher hydrologischer Zustände beziehungsweise Zustandsveränderungen in der Zukunft auf. Trotz der zum Teil erheblichen Ergebnisvarianz von Klima- und Wirkmodellen müssen auf deren Basis jedoch Entscheidungen über Anpassungsmaßnahmen an die Folgen des Klimawandels getroffen werden (Dessai et al. 2009). Die in diesem Bericht erarbeiteten Empfehlungen stellen somit eine Hilfestellung für Entscheidungsträger und Akteure dar, die sich mit den Folgen des Klimawandels für terrestrische Wassersysteme in Deutschland beschäftigen. Generell gilt, wie bei allen maßstabsübergreifenden Betrachtungen, dass die meisten Modellergebnisse skalenabhängig sind. Deshalb dürfen diese keinesfalls einfach von einem Maßstab in einen anderen transferiert werden; es würden sich beim Vergleich von Ergebnissen aus unterschiedlichen Skalen unter Umständen widersprüchliche Aussagen ergeben.

2. Trends bei Beobachtungsdaten und Zukunftsprojektionen

2.1 Historische Aufzeichnung klimatischer und hydrologischer Parameter

Grundvoraussetzung für die Bewertung der Folgen des Klimawandels und der Entwicklung angemessener Klimaschutz- und Anpassungsstrategien ist ein gutes Verständnis des Klimasystems. Dieses Wissen basiert auf der Beobachtung verschiedener Parameter auf unterschiedlichen Beobachtungsskalen. Bezogen auf Fragestellungen zum Einfluss des Klimawandels auf terrestrische Wassersysteme sind folgende Parameter von besonderer Bedeutung: Temperatur, Niederschlag, Luftfeuchtigkeit, Evapotranspiration, Abflussmengen und Bodenfeuchte

2.1.1 Temperatur

Globale Beobachtungen von Klimaparametern begannen in der Mitte des 19. Jahrhunderts. Globale Temperaturanalysen zur Beobachtung und zum Verständnis des Klimawandels basieren auf Stationsdaten und Messungen in natürlichen Archiven wie Gletschern, Eisbohrkernen, Baumringen oder Sedimenten. Seit Ende der 70er Jahre sind auch konsistente Datensätze von Wettersatelliten erhältlich. Diese Informationen werden beispielsweise von EUMETSAT (Europäische Organisation für die Nutzung meteorologischer Satelliten) oder dem ECMWF (Europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage) zur Verfügung gestellt. Ausgehend von diesen Zeitreihen zeigt sich, dass die globale Erwärmung besonders seit den 1970er Jahren deutlich steigt. Die zehn wärmsten je gemessenen Jahre liegen zwischen 1998 und 2015 (National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Global Analysis – Annual 2015). In Bezug auf Hitzewellen (Definition nach Perkins et al. 2012 bzw. Fischer & Schär 2010) ist es wahrscheinlich („likely“), dass sich deren Häufigkeit seit der Mitte des 20. Jahrhunderts in weiten Teilen Europas vergrößert hat (Hartmann et al. 2013, Perkins et al. 2012, Della-Marta et al. 2007).

In Deutschland betreibt der Deutsche Wetterdienst (DWD) ein großes Beobachtungsnetzwerk auf nationaler Ebene. Die längste Zeitreihe des DWD beginnt im 19. Jahrhundert, der überwiegende Teil jedoch erst in der Mitte des 20. Jahrhunderts. Auf Basis dieser Messwerte kann gezeigt werden, dass in Deutschland seit 1881 eine durchschnittliche Temperaturzunahme von 1,3°C aufgetreten ist (Quelle DWD 2015). Der Anstieg im Frühling und Herbst ist hierbei höher als im Sommer und Winter. Zusätzlich werden mehr heiße Tage (Höchsttemperatur über 30°C) und weniger Eistage (maximale Temperatur unter 0°C) beobachtet (AK KLIWA 2005).

Ein Anstieg der Jahresmitteltemperaturen ist für Deutschland (Abb.3 und Abb.4) sowie für die Bundesländer Sachsen (Zeitraum 1991 – 2005), Sachsen-Anhalt (1951 – 2006), Bayern (1960 – 2009) und für das gesamte Einzugsgebiet des Rheins (1901 – 2000) an weiteren Stellen dokumentiert (ICPR 2011, Lünich & Steinl 2011, Auerswald & Vogt 2010, IKSR 2009, GLOWA-Danube 2009, Bernhofer et al. 2008, AK KLIWA 2005). Die Ergebnisse einer Trendanalyse zeigen geringere Temperaturerhöhungen im Alpenraum im Vergleich zum Rest des oberen, bayerischen Donaeinzugsgebietes (Reiter et al. 2012). Pöhler et al.

(2007) fanden für Sachsen heraus, dass sich die Vegetationsperiode seit Mitte der 1980er Jahre verlängert hat, was vor allem auf das frühere Überschreiten der 5°C-Marke zurückzuführen ist.

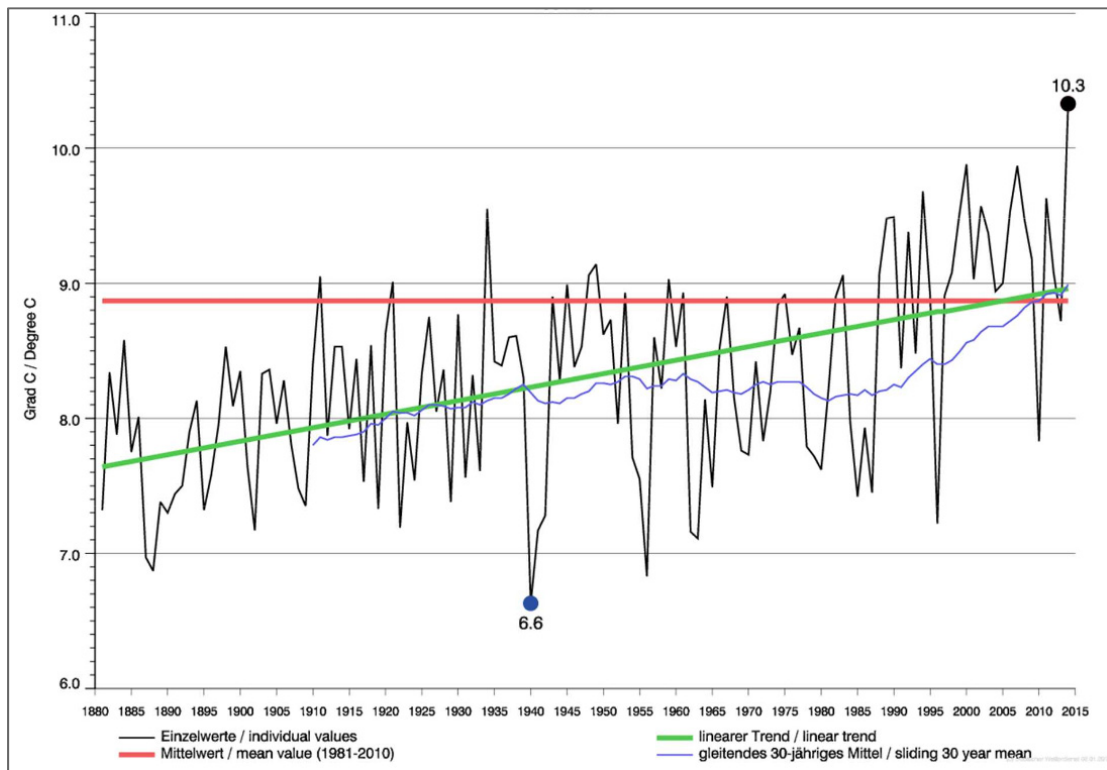


Abb.3: Beobachtete Jahresmitteltemperaturen in Deutschland (1901 – 2015) (Quelle DWD).

2.1.2 Niederschlag

Globale Niederschlagsanalysen zur Beobachtung und Erforschung des Erdklimas werden unter anderem vom Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) zur Verfügung gestellt. Dieses Zentrum ist der deutsche Beitrag zum Weltklimaforschungsprogramm (WCRP) und Teil des globalen Klimabeobachtungssystems (GCOS). Das GPCC wird vom DWD unter der Schirmherrschaft der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) betrieben (DWD 2014). Daten auf nationaler Ebene basieren auf dem Messnetz des DWD.

Im Allgemeinen ist es wegen der hohen räumlichen und zeitlichen Variabilität der Niederschlagsereignisse schwierig, genaue Aussagen über gefallene Niederschlagsmengen zu treffen (Berg et al. 2013). Diese räumlichen und zeitlichen Schwankungen können sowohl zu positiven wie auch negativen Trends in Messreihen führen. Die AK KLIWA (2005) weist darauf hin, dass die große räumliche und zeitliche Variabilität es schwierig macht, statistisch signifikante Trends für die durchschnittlichen Niederschlagsmengen zu extrahieren. Trotzdem ergibt sich zum Beginn des 20. Jahrhunderts deutschlandweit ein sichtbarer Anstieg der mittleren Jahresniederschlagssummen (OECD 2013, Schönwiese & Janoschitz 2008) (Abb.4). Im Vergleich zum Beginn des 20. Jahrhunderts ist ein sichtbarer Anstieg der mittleren Niederschlagssummen sowie eine innerjährliche Verschiebung der

Niederschlagsmengen dokumentiert (Datenquelle DWD). Die mittleren Mengen im Winter haben deutlich zugenommen (ca. 26%) während sie im Sommer nahezu gleich geblieben sind (Abb.5). Bei der Interpretation müssen allerdings die regionalen und lokalen Unterschiede berücksichtigt werden.

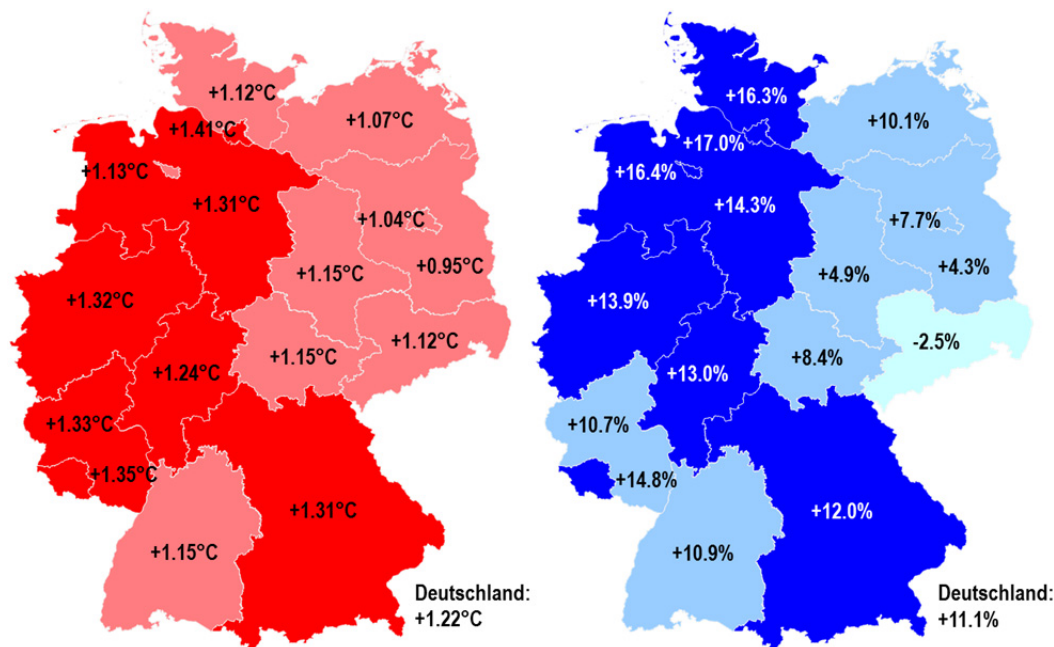


Abb.4: Temperatur- (links) und Niederschlagstrends (rechts) in Deutschland (1881 – 2011). Über- und unterdurchschnittliche Werte sowie Extreme sind unterschiedlich gefärbt. (Quelle: Klima-Presskonferenz des Deutschen Wetterdienstes am 3. Mai 2012 in Berlin).

Im hochaufgelösten lokalen Maßstab werden keine verbreiteten Trends beobachtet. Für Sachsen-Anhalt zeigt die Auswertung des Zeitraums 1951 – 2006 Veränderungen der räumlichen und zeitlichen Niederschlagsmuster mit steigenden Niederschlagsmengen im Harz und abnehmenden im Talbereich der Saale (Bernhofer et al. 2008).

In Sachsen wird ebenfalls eine Umverteilung der Niederschläge von den Sommer- zu den Wintermonaten beobachtet (Vergleich Referenzzeitraum 1961 – 1990 mit 1991 – 2005) (LFULG 2012). Für den südlichen Teil von Deutschland (Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz) zeigt die Auswertung der Daten (1935 – 2005), dass die mittleren Niederschlagsmengen im Winter deutlich zugenommen haben. Die Sommerniederschlagsmengen blieben dagegen nahezu unverändert. Bei den Starkregenereignissen zeigt sich ein zunehmender Trend für die Ereignisse im Winterhalbjahr. In den Sommermonaten ist eine signifikante regionale Differenzierung zu beobachten, wobei die Ereignisse in einigen Regionen verglichen zu anderen auch abnehmen (ICPR 2011, AK KLIWA 2008).

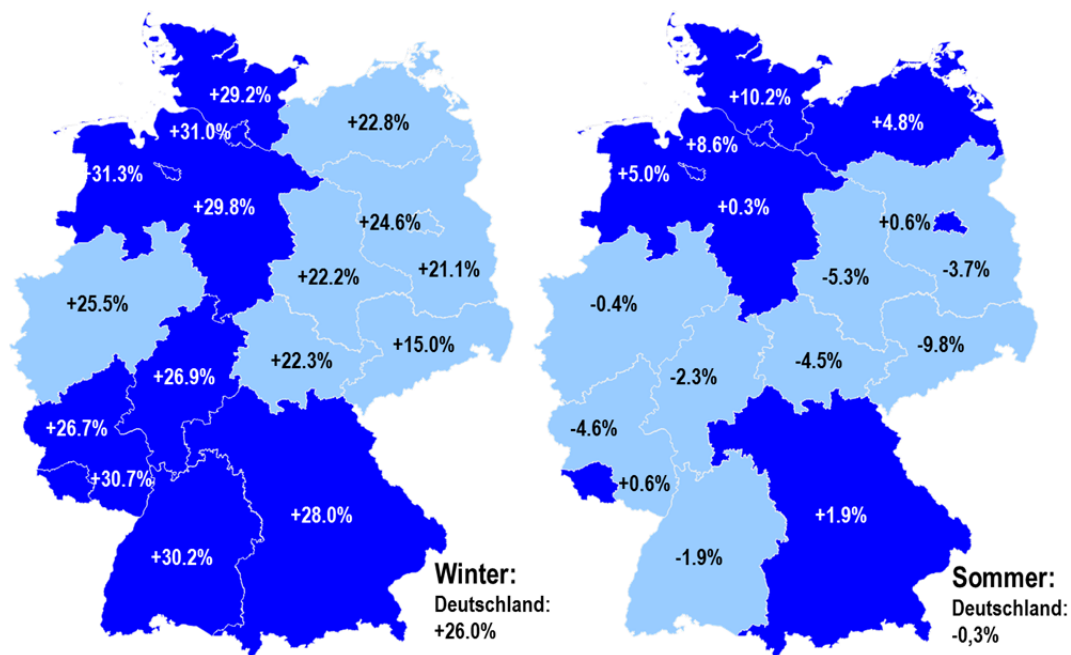


Abb.5: Niederschlagstrends (Winter/Sommer) in Deutschland (1881 – 2011) (Quelle DWD). Über- und unterdurchschnittliche Werte sind unterschiedlich gefärbt. (Quelle: Klima-Presskonferenz des Deutschen Wetterdienstes am 3. Mai 2012 in Berlin).

2.1.3 Luftfeuchtigkeit

Der Parameter Luftfeuchtigkeit wird sowohl als relative wie auch als absolute Größe beschrieben. Bleibt die absolute Feuchtigkeit konstant, so nimmt die relative mit steigender Temperatur der Atmosphäre ab (Hattermann et al. 2012a). Die Messungen für Deutschland zeigen, dass die Jahresmittelwerte der absoluten Luftfeuchte im Zeitraum von 1951 bis 2006 um 4% gestiegen sind. Im gleichen Zeitraum hat sich die relative Luftfeuchtigkeit im Mittel verringert. Dadurch ist das Potenzial für Starkniederschläge in den letzten Jahrzehnen angestiegen, da mehr Wasser in der Atmosphäre gespeichert werden kann. Allerdings ist aus der räumlichen Verteilung kein regionales Muster erkennbar (Hattermann et al. 2012b).

2.1.4 Evapotranspiration

Die Folgen des Klimawandels können Verdunstungsvorgänge, die Bodenfeuchte und die Grundwasserneubildung beeinflussen. Generell gilt es zwischen potentieller Evapotranspiration (wird häufig als Eingangsgröße für hydrologische Modelle verwendet) und aktueller beziehungsweise tatsächlicher Evapotranspiration (wird mit Modellen simuliert) zu differenzieren. Eine der Hauptschwierigkeiten beim Vergleich aktueller und potentieller Evapotranspirationswerte ist die Verwendung unterschiedlicher Berechnungsverfahren. Bender & Schaller (2014) beschreiben dazu die am häufigsten verwendeten Methoden. Wie die Recherche zeigt, gibt es nur wenige Informationen über beobachtbare zeitliche Entwicklungen, obwohl die potenzielle Verdunstung (PET) zusammen mit dem Niederschlag eine der wichtigsten Größen für die hydroklimatologische Beschreibung eines Standortes

oder einer Region darstellt, da mit Hilfe von PET der Einfluss des atmosphärischen Energiedargebots auf Wasserhaushaltsprozesse erfasst wird (Klämt 2000).

Die Verteilung der PET für Deutschland besitzt einerseits einen zunehmend kontinentalen Charakter mit zunehmender Entfernung zum Atlantischen Ozean und andererseits eine Höhenabhängigkeit. Die Mehrzahl der in diesem Bericht einbezogenen Forschungsprojekte verwendet zur Ermittlung von PET die Methode von Penman-Montheith.

Die Auswertung der PET-Zeitreihen (1931 – 1997) für das südliche Deutschland (Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz) zeigen fallende Trends der PET für den hydrologischen Sommer (Mai bis Oktober). In den Wintermonaten (Dezember bis Februar) treten regionale Unterschiede auf, mit überwiegend positiven oder leicht negativen Trends (Klämt 2000). Für Sachsen und den Zeitraum 1991 – 2005 ergibt sich im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961 – 1990 eine geringfügige Zunahme der realen Verdunstung um rund 5% (Lünich & Steini 2011).

2.1.5 Beobachtete Abflussmessungen an Messstationen

Zur Analyse der Abflussverhältnisse stehen in Deutschland mehrere Beobachtungsnetzwerke und Plattformen zur Verfügung. Seit 1988 ist bei der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) das „Weltdatenzentrum Abfluss“ eingerichtet (Runoff Data Centre, GRDC). Dort werden zusammen mit der WMO Abflussdaten aus den weltweit wichtigsten Flussgebieten (rund 9.000 Stationen in 157 Ländern) gesammelt und mit den zugehörigen Metadaten bereitgestellt. Diese einzigartige Sammlung täglicher beziehungsweise monatlicher Messwerte hilft der Forschung, Rückschlüsse auf die Folgen der Klimavariabilität und den Folgen des Klimawandels ziehen zu können. Auf nationaler Ebene betreibt die BfG die Informationsplattform UNDINE, auf der historische Extremereignisse (Hochwasser, Niedrigwasser) und aktuelle Messungen der Flüsse Elbe, Oder, Rhein und Weser archiviert werden. Nachfolgend sind historische Beobachtungen und Trends hinsichtlich der beobachteten Abflussmengen bezogen auf die einzelnen Flusseinzugsgebiete aufgeführt.

Elbe:

Kropp et al. (2009) beschreiben für die Elbe und ihre Nebenflüsse in Sachsen-Anhalt eine Verschiebung der Spitzenabflüsse in den Vorfrühling sowie die Verringerung des Abflusses in den Sommermonaten. Nach einer Studie der BfG (2002) gibt es eine Verlagerung der jährlichen Schüttungsmaxima, wobei in den letzten 40 Jahren eine drastische Abnahme der Maxima im Winter und ein deutlicher Anstieg der Maxima im Sommer zu verzeichnen ist. Der Rückgang des Winterhochwassers wird ebenfalls von Mudelsee et al. (2003) beschrieben, allerdings weisen die Autoren auch darauf hin, dass in den Sommermonaten keine Veränderungen aufgetreten sind. Beobachtungen (1961 – 2002) aus dem östlichen Teil des Einzugsgebietes zeigen einen Rückgang der mittleren Jahresabflussmenge (Koehler et al. 2007).

Rhein:

Während des 20. Jahrhunderts nahm die mittlere Abflussmenge an den Messstationen entlang des Hauptstroms zu. Im Sommer gab es einen Rückgang auf Grund steigender Temperaturen in Verbindung mit stagnierenden Niederschlägen, die mit verringerten Schneemengen in den Alpen zusammenfielen (ICPR 2011). Allerdings können die Folgen des Klimawandels und die Folgen direkter menschlicher Eingriffe, wie beispielsweise der Bau von Speicherbecken, nicht eindeutig einzelnen Einflussgrößen zugeordnet werden. Belz (2010) beschreibt eine Reduzierung der jährlichen Variationsbreite der Abflüsse, da sich bei den monatlichen Abflüssen die hohen und niedrigen Mengen einander annähern.

Der Hochrhein, der überwiegend durch die Abflüsse der Schweizer Alpen gespeist wird, zeigt bisher keine erkennbaren Veränderungen beim Abflussverhalten (Köppke & Sterger 2011). Allerdings treten seit 1990 am Bodensee sinkende Wasserstände von Juli bis September sowie steigende Wasserstände von November bis Januar auf (AK KLIWA 2007). Eine Trendanalyse der letzten 100 Jahre für den Zufluss der Mosel in den Rhein (Rheinland-Pfalz) zeigt einen Anstieg der jährlichen und der winterlichen Abflussmenge (KHR/CHR 2007).

Donau:

Das Abflussregime des bayerischen Teils der Donau wird durch die Überlagerung des Abflusses der nördlichen Nebenflüsse aus den Mittelgebirgen und den Abflüssen aus den Alpen charakterisiert. Die Aufzeichnungen zeigen, dass in den letzten 100 Jahren eine Verringerung der monatlichen mittleren Abflussmengen im Sommer sowie eine Zunahme im Winter aufgetreten ist (Klein et al. 2011).

Weser:

Die Werra, einer der beiden Hauptquellflüsse der Weser, zeigt in den letzten 60 Jahren eine Zunahme der Hochwasserstände im Winter. Dagegen sind die sommerlichen Hochwasserstände in den letzten 250 Jahren zurückgegangen (Mudelsee et al. 2006).

Oder:

Die Oder zeigt ein sehr stabiles Fließverhalten ohne erkennbare Trends für Veränderungen (LUA 2006).

2.1.6 Bodenfeuchte

Prinzipiell wirken sich Veränderungen bei der Verdunstung und dem zeitlichen und mengenmäßigem Niederschlagsmuster direkt auf die Bodenfeuchte aus. Im Vergleich zu den anderen Komponenten des Wasserkreislaufs ist das Wasservolumen im Boden sehr gering. Dennoch ist seine räumliche und zeitliche Verteilung eine wichtige Größe innerhalb des Boden-Atmosphäre-Systems, die auf der kleineren bis mittleren Skala sowohl die

hydrologischen Verhältnisse, als auch die Feuchtigkeitsverfügbarkeit für die Atmosphäre beeinflusst. Auf längeren Zeitskalen spielt die Bodenfeuchte eine wichtige Rolle für die Wechselwirkungen zwischen Land und Atmosphäre in Verbindung mit Niederschlägen und Hitzewellen. Darüber hinaus ist sie ein wichtiger Parameter, der das Vegetationswachstum und die Stabilität von Berghängen steuert. Langfristige Zeitreihen der Bodenfeuchte sind wichtig, um das Verständnis der Auswirkungen des Klimawandels auf die Kohlenstoffbilanz der Wasserressourcen zu verbessern.

Verfügbare Zeitreihen können unterschieden werden in Informationen von in-situ-Messnetzen und Informationen, die von Satellitendaten abgeleitet wurden. Bodenfeuchtemessungen mit in-situ-Messnetzen sind wegen des hohen Installations- und Wartungsaufwandes der Messgeräte nicht einfach durchzuführen. Darüber hinaus ist die räumliche Repräsentativität der Messwerte nicht garantiert, da die Bodenfeuchte wegen ihrer starken Abhängigkeit zu Bodenart, Oberflächeneigenschaften, Landnutzung, Vegetation und Orographie eine große räumliche Variabilität aufweist.

Zur Verbesserung des Verständnisses der hydrologischen Prozesse eines Einzugsgebietes im globalen Maßstab wurden in den letzten Jahren viele Satellitenplattformen für die Beobachtung der Feuchtigkeit der Erdoberfläche initiiert (z. B. SMOS oder ASCAT). Sie liefern Informationen mit unterschiedlicher räumlicher und zeitlicher Auflösung. Allerdings umfassen diese Zeitreihen nur selten dreißig Jahre, wie sie typischerweise für Klimastatistiken verwendet werden. Folglich ist die Bodenfeuchte immer noch eine unsichere Größe, für die nur wenige Daten aus operativen Messnetzen zur Verfügung stehen. Die Größe projizierter Veränderungen ist ebenfalls mit großen Fehlergrenzen verbunden (Bates et al. 2008). Informationen zur Bodenfeuchte können bei der „Globale Bodenfeuchte Datenbank“ (Global Soil Moisture Data Bank) bezogen werden. Für Deutschland werden vom DWD Übersichtskarten zur Verfügung gestellt.

2.2 Projektionen des Klimas und möglicher Folgen für hydrologische Parameter

2.2.1 Projektionen, die Grundlagen

Die Vorhersagbarkeit der Atmosphäre ist auf etwa 10 Tage beschränkt. Die Wettervorhersage basiert auf den gemessenen Ausgangsbedingungen der Atmosphäre und physikalischen Gesetzen, die zukünftige Zustände mit vergangenen verknüpft. Wegen der chaotischen Natur des Wetters genügen allerdings schon geringe Änderungen bei den Eingangswerten der Modelle, um vollständig andere Ergebnisse zu erhalten. Um die Prognosesicherheit abschätzen zu können, werden neben den Beobachtungsdaten auch leicht veränderte Datensätze zur Berechnung verwendet. Die Ergebnisse der verschiedenen Berechnungsläufe werden in Ensembles verglichen, wobei ähnliche Werte für einen Prognosezeitraum ein Indiz für eine relativ sichere Vorhersage sind.

Im Gegensatz dazu werden Klimaprojektionen mit Modellen des globalen Klimasystems erstellt. Mit globalen Klimamodellen können die Veränderung der Energiebilanz der Erde und die Auswirkungen auf die globale Zirkulation in der Atmosphäre in Wechselwirkung mit dem

Ozean, dem Eis, dem Land und weiteren Komponenten des Klimasystems ermittelt werden. Die Simulationen werden stark von den Anfangsbedingungen aller Komponenten des Klimasystems, also neben der Atmosphäre auch des Ozeans und der Landoberfläche bestimmt. Je weiter der simulierte Zeitraum in die Zukunft reicht, desto mehr werden die Ergebnisse auch durch externe Einflüsse (solare Einstrahlung, vulkanische Aktivität, Erdbahnparameter) und anthropogenen Einflüssen (Emissionen klimarelevanter Substanzen, Landnutzung) beeinflusst. Diese werden auch als Randbedingungen des Klimasystems bezeichnet (Schmidt et al. 2015). Klimaprojektionen sind keine Vorhersagen oder Prognosen einzelner zukünftiger Ereignissen sondern eine in sich schlüssige zukünftige Entwicklung unter gegebenen Randbedingungen des Klimasystems (Rechid et al. 2014). Um die möglichen Auswirkungen menschlicher Aktivitäten auf das Klimasystem zu untersuchen, werden verschiedene Annahmen zur Entwicklung der Bevölkerung, der menschlichen Kultur, der Technologie und der Wirtschaft gemacht und auf Basis dieser sozioökonomischen Szenarien Veränderungen der stofflichen Zusammensetzung der Atmosphäre abgeleitet (Rechid et al. 2014).

Seit Beginn der Industrialisierung nimmt die Konzentration langlebiger Treibhausgase in der Atmosphäre ständig zu. Dadurch wird eine langfristig zunehmende Erwärmung der Erdoberfläche, der Ozeane und der bodennahen Atmosphäre angestoßen, was die Zirkulation der Luftmassen in der Atmosphäre und den Wasserkreislauf der Erde verändert. Eine Erwärmung der Atmosphäre bedeutet ein erhöhtes Aufnahmevermögen von gasförmigem Wasser in der Luft. Das kann bei verfügbarem Wasser zu mehr Verdunstung und höheren Niederschlägen führen. Mit der atmosphärischen Zirkulation werden die wasserdampfhaltigen Luftpakete jedoch räumlich bewegt, was regional auch zu abnehmenden Niederschlägen und damit zu kleinräumigen Mustern von Niederschlagsänderungen führen kann. Die Veränderungen können sich zudem durch zahlreiche Wechselwirkungen gegenseitig verstärken oder abschwächen (Rechid et al. 2014).

Als plausible, vereinfachte Vorstellungen, wie sich die Zukunft entwickeln könnte, nutzt man Klimaszenarien. Der Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) veröffentlichte im IPCC-Sonderbericht zu Emissionsszenarien (SRES) 40 Emissionsszenarien zur Beschreibung der menschlichen Einflüsse, die in vier Familien (A1, A2, B1 und B2) gruppiert wurden (Nakicenovic et al. 2000). Innerhalb der Familie A1 gibt es verschiedene Arten für alternative Entwicklungen der Energietechnologien: A1FI (intensive Nutzung fossiler Brennstoffe), A1B (ausgewogene Nutzung) und A1T (überwiegend nicht-fossile Brennstoffe). Das A1B-Szenario geht beispielsweise von einem starken Wirtschaftswachstum, einer raschen Entwicklung neuer Technologien sowie einem ausgewogenen Energieverbrauch aus erneuerbaren und fossilen Energieträgern aus. Für den 5. Sachstandsbericht des IPCC wurde von der wissenschaftlichen Gemeinschaft ein Satz von vier neuen Szenarien definiert, den repräsentativen Konzentrationspfaden (Representative Concentration Pathways, RCP) (RCP2.6, RCP4.5, RCP6 und RCP8.5). Die Bezeichnung „repräsentativ“ weist darauf hin, dass sie stellvertretend für einen größeren Satz an Szenarien stehen. Im Gegensatz zu den früheren Szenarien bilden hier die Treibhausgaskonzentration und der Strahlungsantrieb den Ausgangspunkt. Darauf aufbauend können sozioökonomische Entwicklungen beschrieben werden, die es benötigt, um zu einem solchen Verlauf zu führen. Dabei können auch

denkbare Vermeidungs- und Anpassungsmaßnahmen wie auch die aktive Klimapolitik mitberücksichtigt werden.

Aus den Emissionsszenarien werden die Konzentrationen der Treibhausgase und Aerosole in der Atmosphäre für das 21. Jahrhundert abgeleitet. Diese Konzentrationen werden globalen Klimamodellen vorgegeben und damit die Auswirkungen der veränderten atmosphärischen Zusammensetzung auf das globale Klimasystem simuliert. Um die regionalen Ausprägungen der Klimaänderungen genauer untersuchen zu können, werden die Simulationen der globalen Modelle mit regionalen Klimamodellen räumlich verfeinert.

In der Klima- und Klimafolgenforschung ist es „Stand der Wissenschaft“, dass man nur an Hand aller verfügbaren, plausiblen Klimasimulationen in der Lage ist, robuste Aussagen über Klimaänderungen zu treffen. Deshalb ist es nicht möglich einen einzelnen Wert für eine zukünftige Entwicklung anzugeben. Es ist jedoch möglich die Bandbreiten möglicher Entwicklungen aufzuzeigen. Dadurch können sowohl Einschätzungen über maximale und minimale Änderungsmöglichkeiten erfolgen, aber auch Eintrittswahrscheinlichkeiten abgeleitet werden. Gemäß IPCC ist der Bereich einer Änderung als „likely“ (wahrscheinlich) einzustufen, wenn 66% aller projizierten Änderungen in diesem Bereich liegen. Umfasst der Bereich 90% der Änderungen, so wird von „very likely“ (sehr wahrscheinlich) gesprochen (Mastrandrea et al. 2010). Im Rahmen der EURO-CORDEX Initiative wurde der Ensemble-Ansatz dazu benutzt, um die Robustheit und Signifikanz der Ergebnisse zu bestimmen (Box 1).

Für Studien, die sich mit den Folgen des Klimawandels auf regionaler Ebene beschäftigen, sind allerdings höher aufgelöste Informationen notwendig. Für Deutschland stehen hochaufgelöste regionale Klimasimulationen zur Verfügung, die zum Teil im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) oder als vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Konsortialrechnungen erstellt wurden und in der Klimafolgenforschung verwendet werden (Jacob et al. 2012).

Box 1: EURO-CORDEX – Coordinated Downscaling Experiment – European Domain

EURO-CORDEX ist der europäische Zweig der internationalen CORDEX Initiative. Sie wird durch das World Climate Research Program (WRC) gefördert, um einen international koordinierten Rahmen zu schaffen, mit dem Ziel, verbesserte regionale Klimaprojektionen für alle Länderregionen weltweit zu produzieren. Die EURO-CORDEX Simulationen nutzen die globalen Klimasimulationen der CMIP5 Langzeitexperimente bis zum Jahr 2100. Diese basieren auf den RCP-Szenarien.

Jacob et al. (2014) nutzten den ersten Satz von Simulationen mit einer horizontalen Auflösung von 12,5 km für die Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5, um u.a. die Ergebnisse mit denen der SRES A1B Simulationen des ENSEMBLES-Projektes zu vergleichen. Während die großflächigen Veränderungsmuster für die mittlere Temperatur und den Niederschlag bei allen Szenarien ähnlich sind, zeigen sich aufgrund der höheren Auflösung in EURO-CORDEX allerdings regionale Unterschiede. Darüber hinaus wurde der Ensemble-Ansatz dazu benutzt, um die Robustheit und Signifikanz der Ergebnisse zu ermitteln. Ein Ergebnis kann als robust bezeichnet werden, wenn es durch veränderte Modellansätze möglichst wenig beeinflusst wird (vgl. Pfeifer et al. 2015).

Die Ergebnisse von Jacob et al. (2014) zeigen für die Periode 2071 – 2100 (verglichen mit 1971 – 2000) einen robusten und signifikanten Anstieg der **mittleren jährlichen Temperatur** (+1,6° bis +3,2°C für RCP 4.5 bzw. +3,7° bis +5,2°C für RCP 8.5). Die **mittleren jährlichen Niederschlagssummen** sind bei RCP 8.5 für weite Teile Deutschlands erhöht (signifikant und robust), mit Ausnahme von Norddeutschland, bzw. bei RCP4.5 variieren die Veränderungen zwischen -5% und +25% (signifikant und robust). Bei den **Starkregenereignissen** zeigen die Ergebnisse deutliche saisonale Unterschiede. Für RCP 8.5 ergeben sich deutschlandweit im Winter robuste und signifikante Zunahmen von 15 – 35%, wohingegen im Sommer, außer in Teilen Bayerns, keine signifikanten Veränderungen berechnet wurden. Für RCP 4.5 zeigen die Ergebnisse nur wenige signifikante, robuste Veränderungen. Ausnahmen bilden die Zunahme von 5% bis 25% für den Winter in Ostdeutschland, den nördlichen Teil Nordrhein-Westfalens und für Teile Südost-Bayerns.

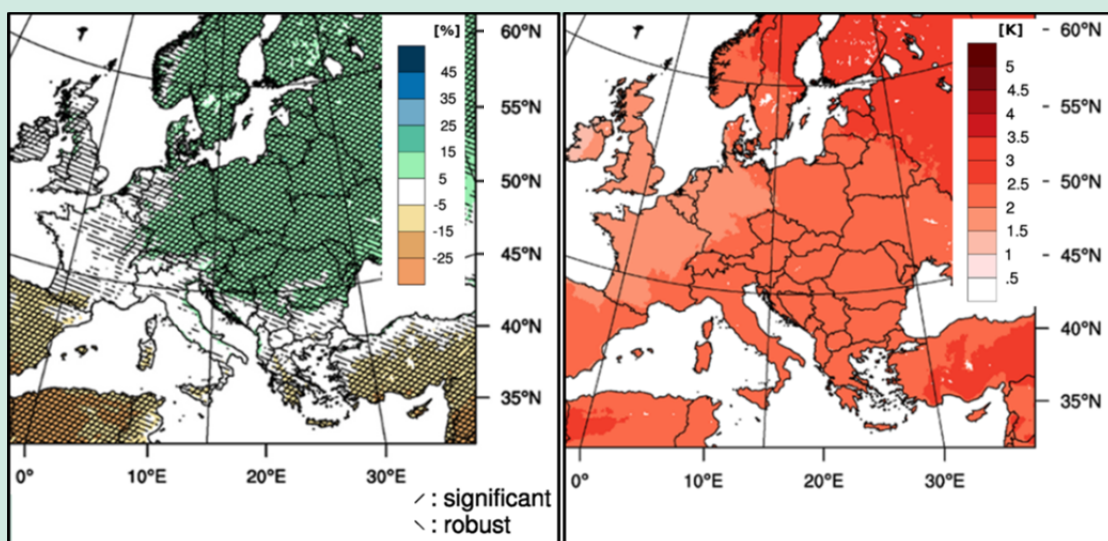


Abb.6: Projizierte Veränderungen des jährlichen mittleren Niederschlags (links) und der jährlichen mittleren Temperatur (rechts) für 2071 – 2100 (im Vergleich zu 1971 – 2000) für RCP 4.5. (Ausschnitt aus Jacob et al. 2014)

In einem weiteren Schritt werden die RCMs mit Wirkmodellen (Impaktmodelle) gekoppelt, um beispielsweise die zukünftigen Folgen für ausgewählte Teile des Wasserkreislaufs projizieren zu können.

Wie bereits erwähnt muss zur Beantwortung wasserwirtschaftlich relevanter Fragestellungen, die gesamte Ergebnisbandbreite der Klimaprojektionen berücksichtigt werden. Bei den hier im Bericht untersuchten Projekten war dies nicht bzw. nur ansatzweise der Fall. Die Ergebnisse spiegeln somit nur einen mehr oder wenigen großen Ausschnitt möglicher Zukunftsentwicklungen wider, was es bei der weiteren Interpretation zu berücksichtigen gilt. Die zur Visualisierung verwendeten Wandel-Meter (Siehe Anhang 1) können auch nicht direkt miteinander verglichen werden, da ihnen eine unterschiedliche Anzahl von Klimaprojektionen, Szenarien, Klimamodellen und hydrologischen Modellen zugrunde liegen.

2.2.2 Projektion der Temperatur

Klimaprojektionen globaler Klimamodelle zeigen für Gesamteuropa eine Zunahme der Temperatur sowie der Temperaturextreme („high confidence“), wobei jedoch deutliche, regionale Unterschiede möglich sind (Kovats et al. 2014). Es ist auch sehr wahrscheinlich („very likely“), dass zukünftig in Europa Hitzewellen aufgrund der Zunahme der mittleren Temperatur mit einer größeren Häufigkeit und längeren Dauer auftreten werden (Collins et al. 2013). Im Vergleich zu vielen Regionen der Welt werden die Auswirkungen des Klimawandels in Deutschland aber weniger extrem ausfallen. So werden die Temperaturen in der Periode 2070 – 2100 (im Vergleich zu 1971 – 2000) in Kontinentaleuropa um 2,1°C bis 4,1°C steigen (Jacob et al. 2014).

Die untersuchten Berichte, die sich nur auf das A1B Szenario beziehen, stellen ebenfalls einen ansteigenden Trend der mittleren Temperatur fest (Beniston et al. 2007, Rowell 2005) (vgl. Abb.7 und Abb.8), der in der näheren Zukunft (2041 – 2070) im Winter höher ausfallen wird als im Sommer. In der fernen Zukunft (2071 – 2100) werden diese saisonalen Unterschiede weiter zunehmen (Baldy 2012, ICPR 2011, Görgen et al. 2010, Terink et al. 2009, GLOWA-Danube 2009, Christensen et al. 2007, Barnett et al. 2005). Bei regionaler Betrachtungsweise der Entwicklung in der nahen Zukunft zeigt sich eine räumliche Differenzierung, wobei in den Küstenregionen von Nord- und Ostsee die jährlichen Durchschnittstemperaturen weniger stark ansteigen als im Süden (z.B. Kunkel et al. 2012 oder Spekat et al. 2007).

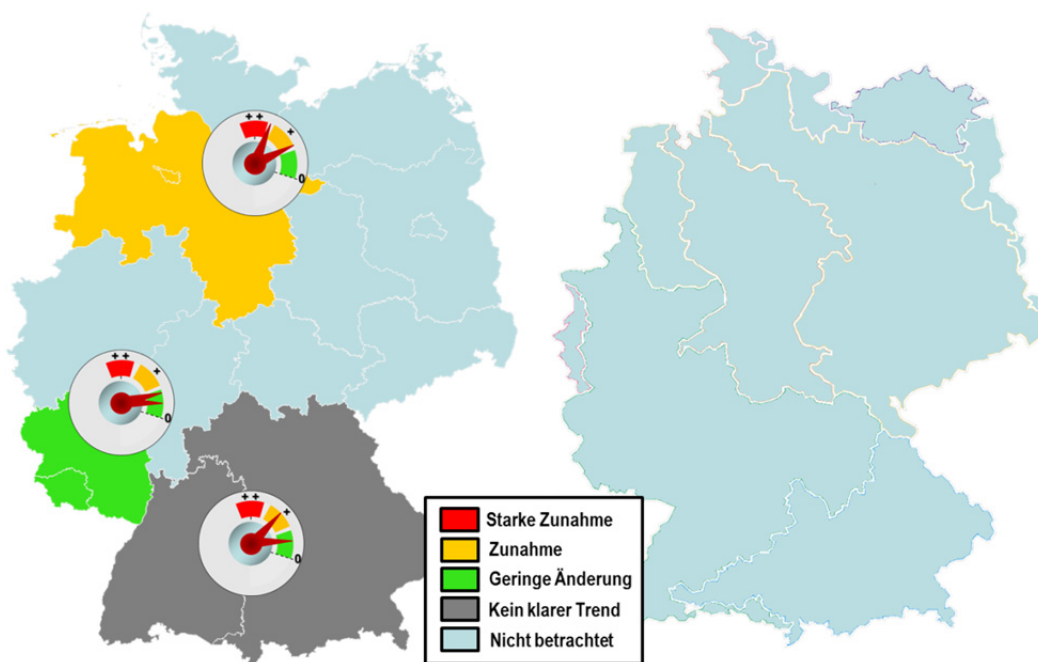


Abb.7: Temperaturprojektionen für 2041 - 2070 (A1B, verglichen zur Referenzperiode 1961 - 1990) (Quelle: AK KLIWA 2012, Grocholl 2011).

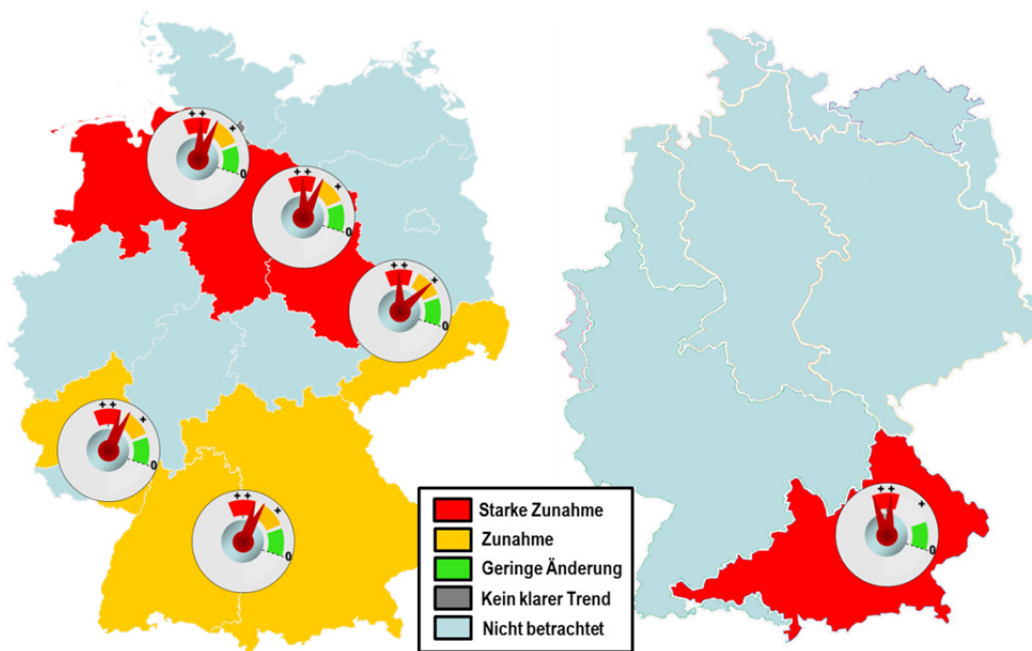


Abb.8: Temperaturprojektionen für 2071 – 2100 (A1B, verglichen zur Referenzperiode 1961 – 1990) (Quelle: Hermann et al. 2013, Kunkel et al. 2012, AK KLIWA 2012, AnKliG 2010, Auerswald & Vogt 2010, Scherzer et al. 2010, GLOWA-Danube 2009, Kuhn 2009).

2.2.3 Projektion des Niederschlagsverhaltens

Im Vergleich zu projizierten Temperaturveränderungen, weisen projizierte Niederschlagsmengen wegen ihrer großen zeitlichen und räumlichen Variabilität größere Ergebnisvariationen auf, die in Abhängigkeit des Betrachtungsmaßstabes auch entgegengesetzte Trends zeigen können. Klimaprojektionen globaler Klimamodelle zeigen für Nordeuropa eine Zunahme der Niederschlagsmenge sowie der Anzahl der Starkregenereignisse („high confidence“). Allerdings sind deutliche regionale Unterschiede möglich (Kovats et al. 2014). Regionale Klimaprojektionen (RCP 4.5) zeigen in der Periode 2070 – 2100 (im Vergleich zu 1971 – 2000) nahezu deutschlandweit eine Zunahme der jährlichen Niederschlagssumme um 5% – 15%, mit Ausnahme des äußeren Nordwestens, wo nahezu keine Veränderungen auftreten. Bei RCP 8.5 zeigt sich eine nahezu deutschlandweit eine Zunahme von 5% – 15%, mit Ausnahme des Oberrheingrabens, wo die Mengen nahezu unverändert bleiben (Jacob et al. 2014).

Generell wird davon ausgegangen, dass sich der beobachtete Trend mit Niederschlagszunahmen im Winter und –abnahmen im Sommer weiter fortsetzen sowie die Anzahl und Intensität der Extremereignissen zunehmen wird (Feldmann et al. 2012, Lühr et al. 2011, Schädler et al. 2010, Beniston et al. 2007, Rowell 2005). Die Studie von Berg et al. (2013) zeigt hierbei, dass konvektive Niederschläge wesentlich empfindlicher auf die Temperaturerhöhungen reagieren als stratiforme Niederschläge und dass letztere zunehmend die extremen Niederschlagsereignisse dominieren werden (Box 2).

Box 2: Konvektive und stratiforme Niederschläge

Bei konvektiven Niederschlägen handelt es sich um starke, kurz andauernde Niederschläge, die auf verhältnismäßig kleine Gebiete begrenzt sind. Insbesondere im Sommer können sich aufgrund konvektiver Prozesse Gewitter bilden. Im Gegensatz dazu umschreibt der Begriff „stratiformer Niederschlag“ einen lang andauernden, gleichförmigen Niederschlag aus einer geschlossenen Wolkendecke.

Bei Studien auf Länderebene, die sich nicht immer auf größere Klimaensembles beziehen und generell keine Signifikanz- und Robustheitstest durchführen, zeigen die verwendeten Projektionen vielerorts nahezu konstante jährliche Niederschlagssummen, allerdings treten saisonale Verschiebungen mit höheren Mengen im Winter und geringeren im Sommer auf. Diese Verschiebungen sind für Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Rheinland-Pfalz, Bayern und Baden-Württemberg dokumentiert (Herrmann et al. 2014a, AK KLIWA 2012, Kunkel et al. 2012, Lühr et al. 2011, KLIWAS 2011, Görgen et al. 2010) (Abb.9 und Abb.10).

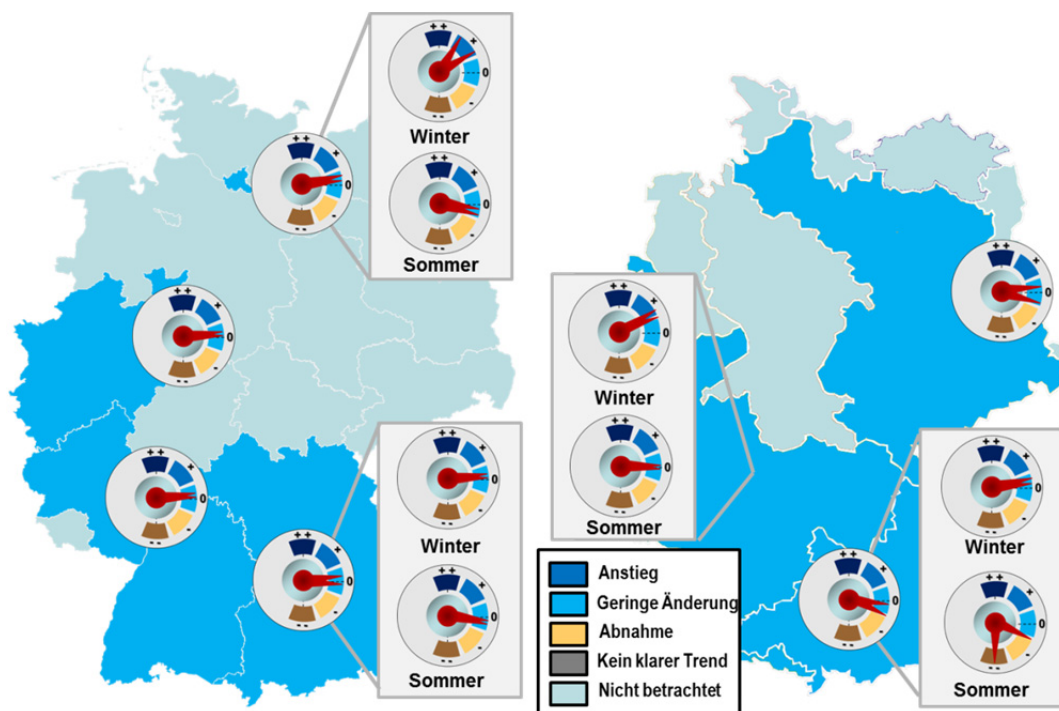


Abb.9: Projizierter Niederschlag (2041 – 2070), verglichen mit der Referenzperiode 1961 – 1990 (Quellen: Herrmann et al. 2014a, Kunkel et al. 2012, AK KLIWA 2012, Gädecke et al. 2012, Grochol 2011, Messer 2011, Görgen et al. 2010, Schneider 2010, GLOWA-Danube 2009).

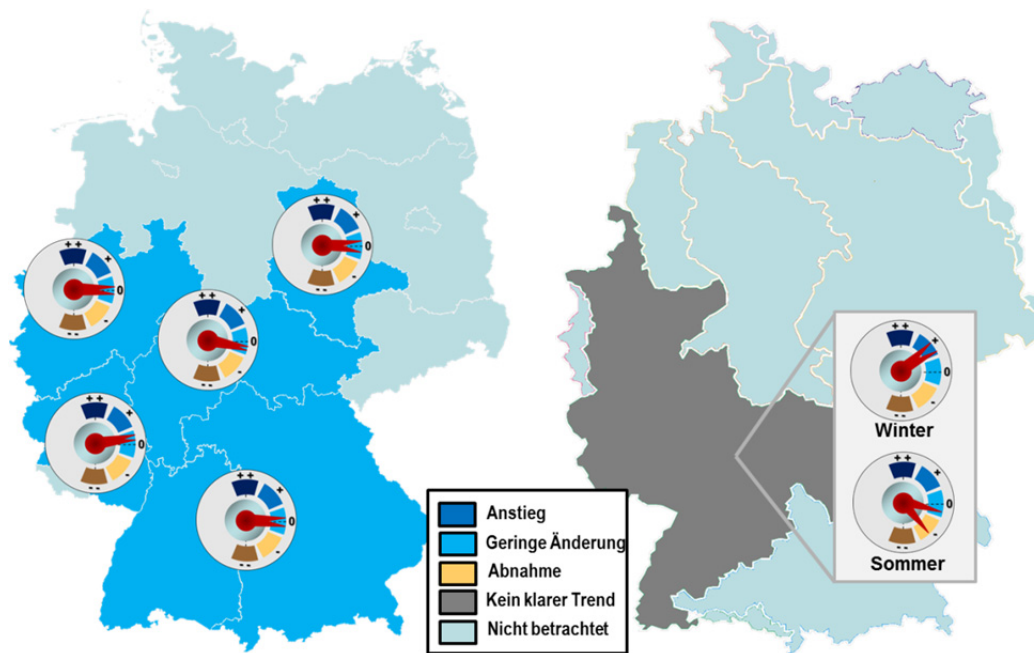


Abb.10: Projizierter Niederschlag (2071 – 2100) verglichen mit der Referenzperiode 1961 – 1990 (Quellen: AK KLIWA 2012, AnKliG 2010, Scherzer et al. 2010, Messer 2011, Görgen et al. 2010, GLOWA-Danube 2009).

Die Sommerniederschläge nehmen in den Projektionen sehr stark im Süden, Südwesten und Nordosten Deutschlands ab, wobei der größte Rückgang in den Alpen auftritt (Terink et al. 2009, Petry 2009, Zebisch et al. 2005,). Im mittleren Teil Deutschlands (Hunsrück, Taunus und große Teile des Main Einzugsgebiets) (Görgen et al. 2010) und im Harz (Kropp et al. 2009) zeigt sich dagegen kein Anstieg der Niederschlagsmengen. In Nordrhein-Westfalen rechnet man damit, dass die Zahl der Schneetage zukünftig sinkt, da der Niederschlag vor allem als Regen fallen wird (Lühr et al. 2011, Grocholl 2011).

Geht man von einer Fortsetzung der saisonalen Verschiebung der Niederschlagsmengen mit weniger Niederschlägen im Sommer und mehr im Winter aus, so hätte dies weitreichende Auswirkungen auf den monatlichen Wasserhaushalt auf lokaler und regionaler Ebene. In bereits trockenen Regionen wie Ost-Deutschland, Franken oder der Oberpfalz könnte sich die jährlich gespeicherte Wassermenge dauerhaft verringern.

2.2.4 Projektion des Gesamtabflusses

Eine der wichtigsten Folgen des Klimawandels für die Wasserressourcen betrifft die Veränderung der Abflussmenge von Flüssen (Ludwig & Moench 2009). Dies gilt insbesondere für die Extremereignisse Niedrig- und Hochwasser. Wegen der Verwendung verschiedener RCMs, Referenzperioden und hydrologischer Modelle ist es jedoch nicht möglich, detaillierte quantitative Vergleiche durchzuführen oder regionalen Veränderungen in Deutschland zu identifizieren (Abb.11 und Abb.12, vgl. Box 3).

Box 3: IMPACT2C – Quantifying projected impacts under 2°C

IMPACT2C ist ein von der EU gefördertes Projekt (Laufzeit: 10/2011 - 09/2015), das vom Climate Service Center Germany (Helmholtz-Zentrum Geesthacht) koordiniert wurde. Das Projektteam aus 17 Nationen und 29 Institutionen kombinierte die Expertise von Klimawissenschaftlern und Spezialisten für Klimafolgen mit dem Wissen lokaler Experten.

Das Projekt liefert klimatisch und sozio-ökonomisch harmonisierte Informationen über sektorspezifische Klimafolgen in einer 2°C wärmeren Welt sowie unterschiedliche Anpassungsmöglichkeiten. Dies schließt die Bewertung von Risiken, Vulnerabilitäten, Klimafolgen und der damit verbundenen Kosten mit ein.

Hauptaussagen des Projekts in Bezug auf terrestrische Wassersysteme:

- Bei einer Klimaerwärmung um global 2°C kann europaweit mit einer Zunahme der Häufigkeit von Extremereignissen gerechnet werden. Die Anzahl der Hitzewellen wird sich verdoppeln, extreme Niederschlagsereignisse werden intensiver.
- Der mittlere jährliche Abfluss aus Flusseinzugsgebieten kann sich nördlich von 45N erhöhen. In höheren Lagen kann sich die Schneesaison auf ein bis zwei Monate pro Jahr verringern.
- Die Höchstwasserstände bei Überflutungen können sich in Mitteleuropa erhöhen.
- Für extreme Niedrigwasserereignisse zeigt sich europaweit kein einheitlicher Trend.

Die Projektergebnisse werden im IMPACT2C Webatlas (IMPACT2C-Team 2015) gesammelt und nutzerfreundlich dargestellt. Zudem wurden in einer Reihe von „Policy Briefs“ veröffentlicht. Die Informationen bieten eine wertvolle Grundlage für die Entwicklung von Anpassungsstrategien.

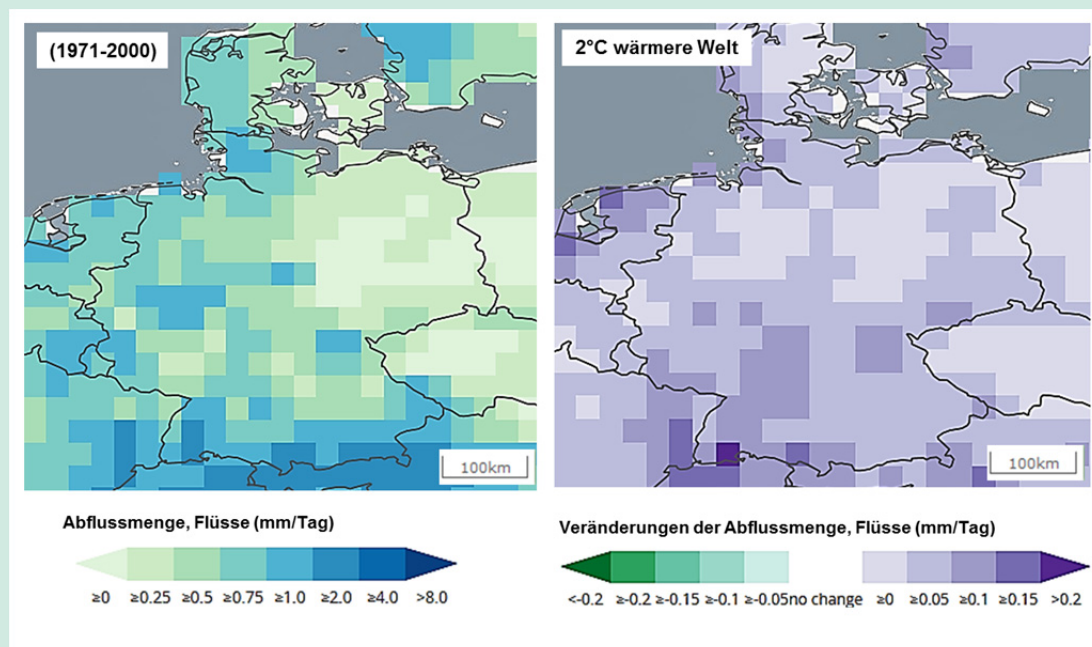


Abb.11: Abflussbedingungen für die Periode 1971 – 2000 und die Veränderungen in einer 2°C wärmeren Welt (Kartenausschnitte aus IMPACT2C Webatlas (IMPACT2C-Team 2015))

Projekt Webseite: www.impact2c.eu

IMPACT2C Webatlas: www.atlas.impact2c.eu

Hochwasserabflüsse reagieren empfindlich auf veränderte räumliche und zeitliche Niederschlagsmuster sowie auf den veränderten Zeitpunkt der Schneeschmelze. Im Allgemeinen zeigen Projektionen, eine Verschiebung der jährlichen Niederschlagsverteilung, was Veränderungen beim Abflussverhalten zur Folge hätte (Huang et al. 2010, Petrow & Merz 2009, Leipprand et al. 2008, Zebisch et al. 2005, Lehner et al. 2001).

Wegen der steigenden Temperaturen werden die Gletscher in den Alpen weiter abschmelzen und Niederschläge werden nicht mehr als Schnee und Eis zurückgehalten. Dies wird den Rückgang des Sommerabflusses (Zierl & Bugmann 2005) und ein früheres Auftreten des maximalen Wasserstandes zur Folge haben. Zusätzlich werden sich längere Niedrigwasserperioden einstellen (Scibek et al. 2007).

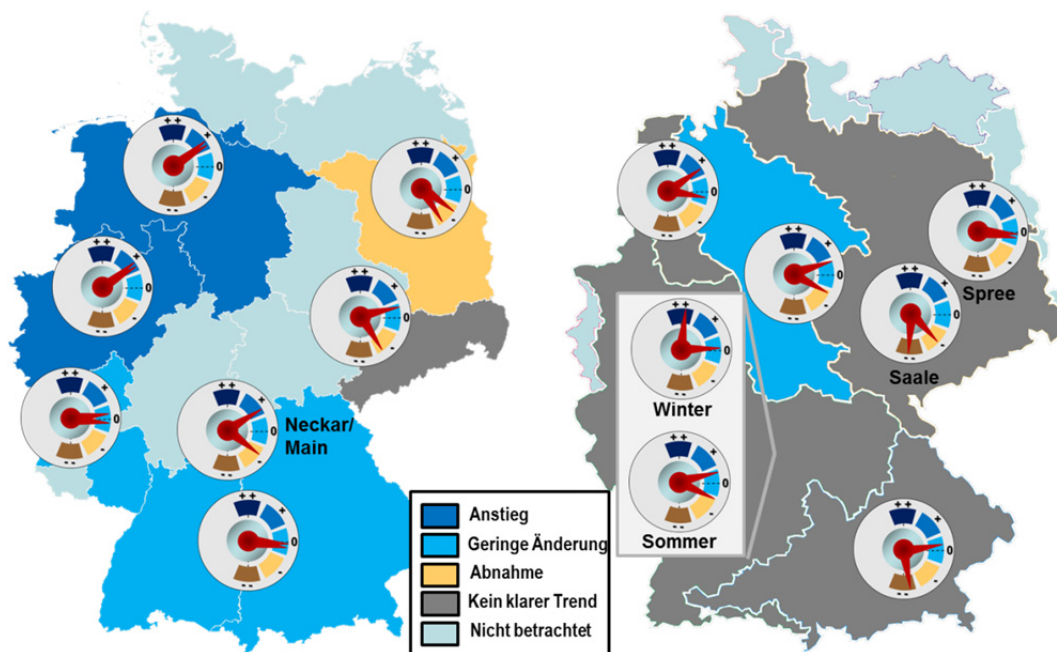


Abb.12: Projizierter Abfluss (2041 - 2070) verglichen mit der Referenzperiode 1961 - 1990 (Quellen: Hermann et al. 2014a, 2014b, 2013a, AK KLIWA 2012, Gädecke et al. 2012, Klein et al. 2011, Nilson et al. 2011, Horsten et al. 2011, Görgen et al. 2010, Huang et al. 2010, GLOWA-Danube 2009, Hattermann 2005, Krysanova et al. 2005, Gerstengarbe et al. 2003).

Elbe:

Projektionen zeigen für viele Nebenflüsse, wie Havel, Unstrut oder Mulde eine Verringerung des mittleren monatliche Abfluss (Pöhler et al. 2007, Wurbs 2005, BfG 2003, Sommer et al. 2003). Zudem deuten die Projektionen auf eine Verschiebung der maximalen Abflüsse von der Elbe und seiner Nebenflüsse vom Herbst in den Winter (GLOWA-Elbe Memorandum 11.10.2009).

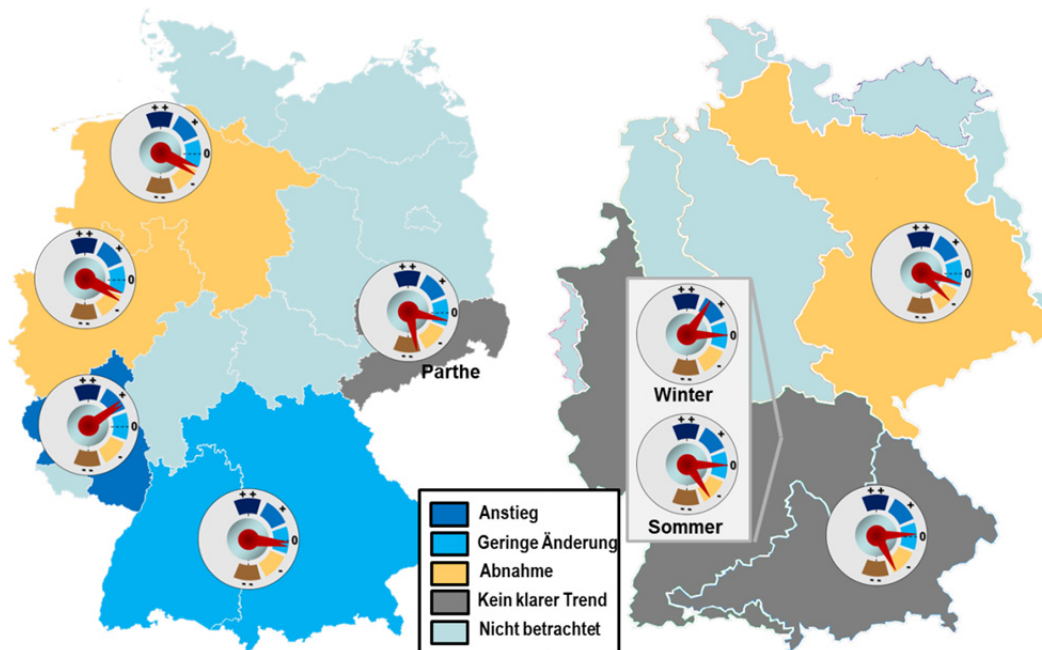


Abb.13: Projizierter Abfluss (2071 – 2100), verglichen mit der Referenzperiode 1961 – 1990 (Quellen: Hermann et al. 2014a, 2014b, 2013a, AK KLIWA 2012, Horsten et al. 2011, Klein et al. 2011, Nilson et al. 2011, Görgen et al. 2009, Kuhn 2009).

Rhein:

Für den Rhein zeigen die Ensembles regionaler Klimaprojektionen, dass der mittlere Abfluss in den Sommermonaten bis 2050 nahezu unverändert bleibt. Die zunehmende Niederschlagsmenge im Winter, die insbesondere unter 500 m nicht mehr als Schnee sondern als Regen fällt, führt zu einem Anstieg der mittleren Abflussmengen (ICPR 2011). Generell wird der saisonale Verlauf des Abflusses in Zukunft mehr vom Regen als von der Schneeschmelze beeinflusst sein (Nilson et al. 2011). Wegen des vermindernden Rückhalts des Niederschlags als Schnee wird sich die Abflussmenge im Winter spürbar erhöhen, allerdings wird das Abflussmaximum deutlich niedriger ausfallen, da das Wasser gleichmäßiger und ohne Zwischenspeicherung als Schnee abfließen wird.

Auf Länderebene zeigen die Projektionen für Bayern und Baden-Württemberg eine Abnahme des Gesamtabflusses bis 2050, während in Rheinland-Pfalz eine leichte Erhöhung auftritt. Die stärksten Rückgänge zeigen sich in den Nordalpen (AK KLIWA 2012). Für die fernere Zukunft (2071– 2100) wird projiziert, dass sich die Abflüsse in den Nordalpen und Südbayern weiter verringern, in Rheinland-Pfalz zunehmen (AK KLIWA 2012).

Donau:

Ensembles regionaler Klimaprojektionen zeigen für die nahe Zukunft (2020 – 2050) eine moderate Abnahme der Abflussmengen im Sommer. Der höchste Rückgang tritt in Alpennähe, der geringste entlang der Donau auf (KLIWAS 2011, ENSEMBLES 2009, GLOWA Danube 2009). Dieser rückläufige Trend erhöht sich in der fernen Zukunft noch weiter, wobei fast alle Projektionen einen einzugsgebietsweiten Rückgang der mittleren

Jahresabflüsse zeigen. Ausnahmen treten an den Messstellen auf, die schon heute nur einen geringen Einfluss durch die Schneeschmelze aufweisen. Nach Klein et al. (2011) ist das frühere Auftreten des jährlichen Maximums ein Indikator für den Wandel hin zu einem mehr regendominierten Abflussregime.

Weser:

Die Modellprojektionen zeigen ein differenziertes Verhalten der Nebenflüsse. Während die Ergebnisse eine Abnahme des mittleren jährlichen Abflusses von Eder und Diemel zeigen, erhöht sich dagegen der Abfluss der Fulda (Brahmer 2006).

Niedersachsen, Hamburg, Nordrhein-Westfalen:

Einzelne Projektionen zeigen für Niedersachsen (Herrmann et al. 2013a), die Metropolregion Hamburg (Herrmann et al. 2013b) und Nordrhein-Westfalen (Herrmann et al. 2014a) basierend auf WETTREG und REMO (A1B) einen lokalen Anstieg des Gesamtabflusses bis 2040 sowie in allen drei Regionen einen flächendeckenden Rückgang bis 2100. Da in allen Fällen keine Modellensembles verwendet wurden, ist jedoch keine Bewertung über die Signifikanz und Robustheit der Ergebnisse möglich.

2.2.5 Projektionen der Evaporation und Evapotranspiration

Die Projektionen für das 21. Jahrhundert zeigen höhere Evaporations- und Evapotranspirationswerte für Europa (z. B. Beniston et al. 2007, Rowell 2005). Nach einer Studie vom AK KLIWA (2012) sind die projizierten Veränderungen für Süddeutschland (Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz) nur gering. Von Dezember bis März steigen die Werte an, während sie im Sommerhalbjahr rückläufig sind. Dieser Effekt verstärkt sich in der ferneren Zukunft (2071 – 2100). Ausnahmen bilden der Bayerische Wald, das Fichtelgebirge, die Rhön, der Spessart und der Pfälzer Wald. Hier fallen die Veränderungen nur gering aus.

Generell liegen in den zugrundeliegenden Berichten jedoch nur spärliche Informationen über die zukünftigen Veränderungen der Parameter Evaporation und Evapotranspiration vor.

2.2.6 Projektionen der Grundwasserneubildung

Die DIN 4049 definiert Grundwasserneubildung als die Menge Wasser, die in den Grundwasserleiter infiltriert. Diese Menge wird im Allgemeinen durch die Verwendung der Wasserhaushaltsgleichung berechnet, die die Beziehung zwischen den Komponenten und Kompartimenten des Wasserkreislaufs beschreibt. Im vereinfachten Fall:

$$\text{Niederschlag} = \text{Verdunstung} + \text{Abfluss} \pm (\text{Rückhalt}).$$

Es ist zu erwarten, dass der Klimawandel die Komponenten Niederschlag, Evapotranspiration (Verdunstung) und Abfluss beeinflussen wird, wodurch sich ebenfalls Veränderungen bei der Grundwasserneubildung ergeben. Darüber hinaus werden die Folgen des Klimawandels auch zu Veränderungen bei der Vegetation sowie der Vegetationsperiode führen, was sich zusätzlich beim Jahresgang der Grundwasserneubildung bemerkbar machen wird. Die Ergebnisse hydrologischer Globalmodelle zeigen einen Anstieg der durchschnittlichen Werte für die Grundwasserneubildung (Vergleich Bezugszeitraum 1961 – 1990 mit 2041 – 2070) (Döll & Flörke 2005, ECHAM4, IPCC Szenario A2). Zur Klärung lokaler Fragestellungen sind jedoch komplexere Wirkmodelle notwendig. Da diese kleinräumige Prozesse berücksichtigen, benötigen sie aber auch weitere modellspezifische Eingabegrößen. Grundsätzlich sind Vergleiche zwischen verschiedenen Wasserhaushaltsstudien jedoch problematisch, da die Ergebnisse zumeist auf unterschiedlichen Bezugsräumen beruhen bzw. Daten verschiedener regionaler Klimamodelle verwendet werden.

Projektionen bis 2050 zeigen in Deutschland eine hohe Variabilität der regionalen Neubildungsraten. Diese reichen von +25% für Hessen bis zu -40% für Brandenburg (BMU 2008, WVGW 2011) (Abb.14). Für Süddeutschland (Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz) zeigen die Simulationen für die nahe Zukunft (2012 – 2050) keine klaren Signale, die auf eine Veränderung der Neubildungsraten hindeuten. Eine Ausnahme bildet der leicht ansteigende Trend für Rheinland-Pfalz sowie die leicht fallende Tendenz in Alpennähe (DWA 2011). Ausgehend von diesen Ergebnissen wird damit gerechnet, dass sich der Wasserstress um zwei oder drei Wochen pro Jahr verlängern wird (AK KLIWA 2012). Für die ferne Zukunft wird eine Erhöhung dieser Belastung als wahrscheinlich angesehen. Projektionen für Sachsen-Anhalt und Hessen zeigen eine allgemeine Erhöhung der Neubildungsraten in den Mittelgebirgsregionen, wohingegen in den anderen Gebieten kein signifikanter Trend erkennbar ist (Kropp et al. 2009). Für Sachsen werden Jahre mit negativem jährlichem Wasserbudget projiziert (AnKliG 2010, Brahmer 2006, Hertwig 2004).

Projektionen für Nordrhein-Westfalen legen nahe, dass sich die Grundwasserneubildungsraten bis 2050 in der Regel erhöhen werden (Herrmann et al. 2014a). In Anbetracht der sich fortsetzenden Verschiebung der Niederschlagsmengen vom Sommer in den Winter, lassen sich daraus größere Grundwasserschwankungen (Messer et al. 2011) und geringere mittlere Flurabstände (Messer et al. 2013) ableiten.

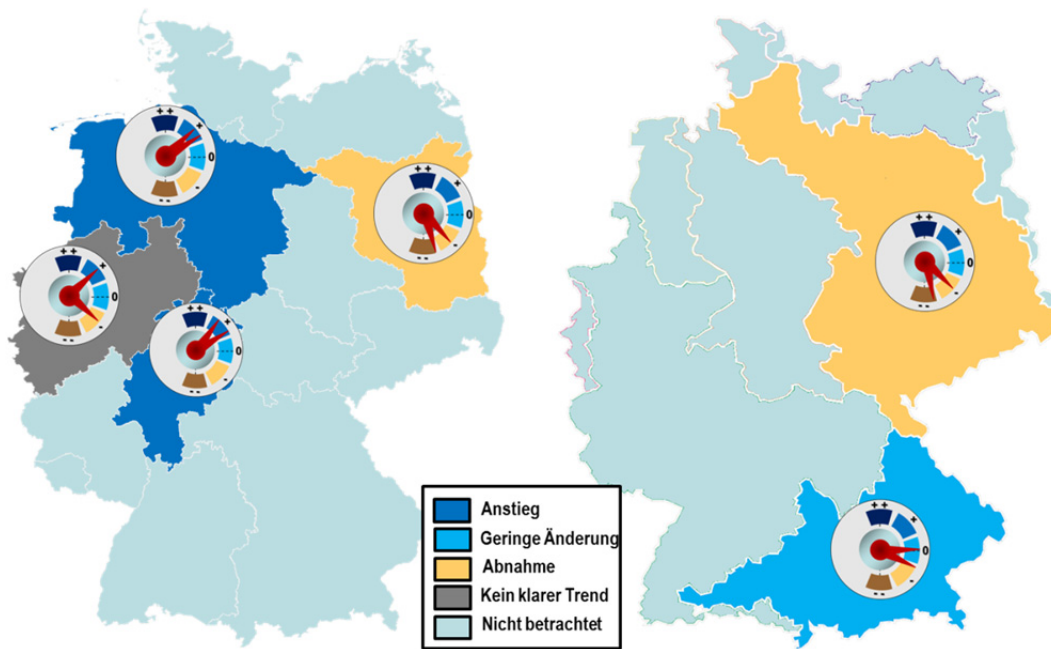


Abb.14: Projizierte Grundwasserneubildung (2041 – 2070), verglichen mit der Referenzperiode 1961-1990.
(Quellen: Hermann et al. 2014a, 2013b, GLOWA-Danube 2009, Berthold & Hergesell 2005, Hattermann 2005, Krysanova et al. 2005, Gerstengarbe et al. 2003, Krüger et al. 2001).

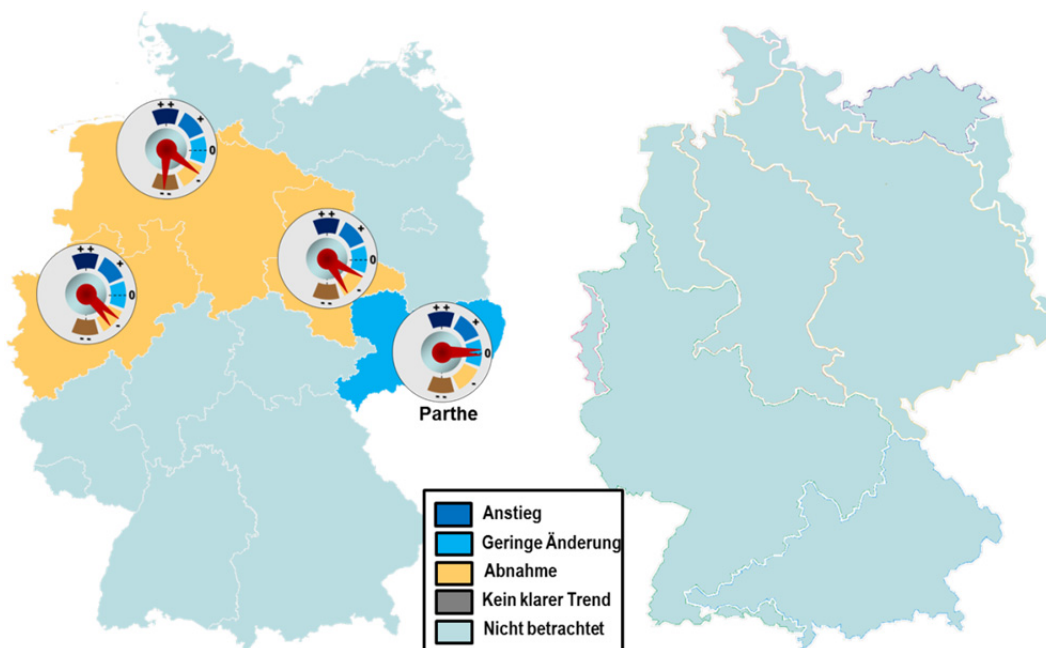


Abb.15: Projizierte Grundwasserneubildung (2071 – 2100), verglichen mit der Referenzperiode 1961 – 1990.
(Quellen: Hermann et al. 2014a, 2013a, Scherzer et al. 2010, Kuhn 2009, Wixwat 2009)

Die Projektionen bis 2100 zeigen, dass sich das Auffüllen der Grundwasserspeicher auf die Zeit von Oktober bis April verkürzen wird (Herrmann et al. 2014a). Für Niedersachsen zeigt sich der gleiche Trend (Herrmann et al. 2013a) (Abb.15).

Für die landwirtschaftlich genutzten Flächen in der Metropolregion Hamburg ergibt sich aus den projizierten Veränderungen beim Jahresgang der Grundwasserneubildung eine Erhöhung des vorhandenen Bodenwasserdefizit im Sommer, so dass der Bewässerungsbedarf besonders an sandigen Standorten steigen wird (Herrmann et al. 2014b)

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die projizierten höheren Niederschläge im Winter sowie die niedrigeren Niederschlagsmengen im Sommer, in Verbindung mit höheren Verdunstungsraten, Veränderungen im jahreszeitlichen Verlauf der Grundwasserneubildung mehr als wahrscheinlich machen. Aufgrund der lokalen Unterschiede lassen sich jedoch keine detaillierten Trends ableiten.

2.2.7 Umgang mit Klimaprojektionen

Die größten Herausforderungen für die Beurteilung der Folgen des Klimawandels für die terrestrischen Wassersysteme sind die Quantifizierung von Wasserbedarf und –verfügbarkeit sowie die Planung und Umsetzung von Hochwasserschutz- und Anpassungsmaßnahmen. Globale und regionale Klimamodelle liefern diese Größen selbst nicht, sondern nur die Variablen, die etwa für die Berechnung von Wasserstand und Grundwasserneubildung oder beziehungsweise für andere Land-Oberflächen-Komponenten des Wasserkreislaufs benötigt werden.

Wirk- oder Impaktmodelle werden dazu verwendet, menschliche Aktivitäten und deren Auswirkungen auf regionale und lokale Wasserkreisläufe zu simulieren, Flüsse, Seen, Feuchtgebiete und Grundwasser im Einzugsgebietsmaßstab miteinander zu verbinden oder um Management- und Anpassungsstrategien zu entwickeln und zu bewerten. Dies wird vor allem in Form von Fallstudien durchgeführt. Die zu beantwortenden Fragen sind dabei genauso vielfältig wie die Wirkmodelle, die zur Beantwortung eingesetzt werden können. Diese unterscheiden sich in ihrer Komplexität (bezogen auf zeitliche und räumliche Auflösung sowie die betrachteten Prozesse), in den Zielen der Modellierung (Simulation oder Prognose), in den Zielvariablen und in den Daten, die erforderlich sind, um das Modell auszuführen.

Typische Modelle mit Wasserbezug sind hydrologische Globalmodelle (z.B. GWAVA, MPI-HM, WaterGAP), Offline-Land-Oberflächen-Modelle (z.B. JULES, ORCHIDEE), gekoppelte Land-Oberflächen-Modelle (z.B. PARFLOW-CLM-COSMO, PROMET-MM5, WRF-Hydro), dynamische, globale Vegetationsmodelle (z.B. LPJmL), hydrodynamische Modelle (z.B. EFDC, EPD-RIV1), Grundwassermodelle (z.B. MODFLOW, FEFLOW, SPRING), Bodenwassermodelle (z.B. Hydrus, GRASP), Niederschlag-Abfluss-Modelle (z.B. HEC-HMS, MIKE SHE, VIC), Kanalmodelle (z.B. MIKE URBAN, MOUSE), Modelle zur Wasserversorgung (z.B. WaSSi, GoldSim), Wasserhaushaltsmodelle (z.B. GROWA,

mGROWA), Modelle zur Wasserbewirtschaftung (z.B. SWMM, MIKE BASIN), Oberflächenwassermodelle (z.B. SMS, Realm) und Vorhersagesysteme für Wasserstände (z.B. CATFLOW, LISFLOOD-FP, MIKE FLOOD).

Um Aussagen über mögliche Klimaauswirkungen zu treffen gibt es eine prinzipielle, aber nicht standardisierte Methode im Sinne einer kompletten Modellkette: Emissionsszenario – GCM – RCM – Bias-Korrektur – Wirkmodell. Auf Grundlage dieser Modellkette ergeben sich zahlreiche Modellkonfigurationen. Die Berechnungen folgen einer Hierarchie mit oder ohne Feedback-Schleifen.

Hagemann et al. (2013) zeigten, dass die projizierten Folgen des Klimawandels nicht nur von den Emissionsszenarien und Klimamodellen abhängen, sondern dass verschiedene hydrologische Modelle ebenfalls unterschiedliche Ergebnisse liefern. Für ihre Studie benutzen sie ein Multi-Modell-Ensemble von Simulationen, welche mit drei globalen Klimamodellen und acht globalen hydrologischen Modellen (HM) berechnet wurden, um die zukünftigen, großskaligen Veränderungen der Wasserflüsse auf der Landoberfläche und der verfügbaren Wasserressourcen zu betrachten (Abb.16). Die Studie zeigt auch, dass große Unterschiede in den Ergebnissen auf die verschiedenen modellspezifischen Evapotranspiration-Ansätze zurückzuführen sind.

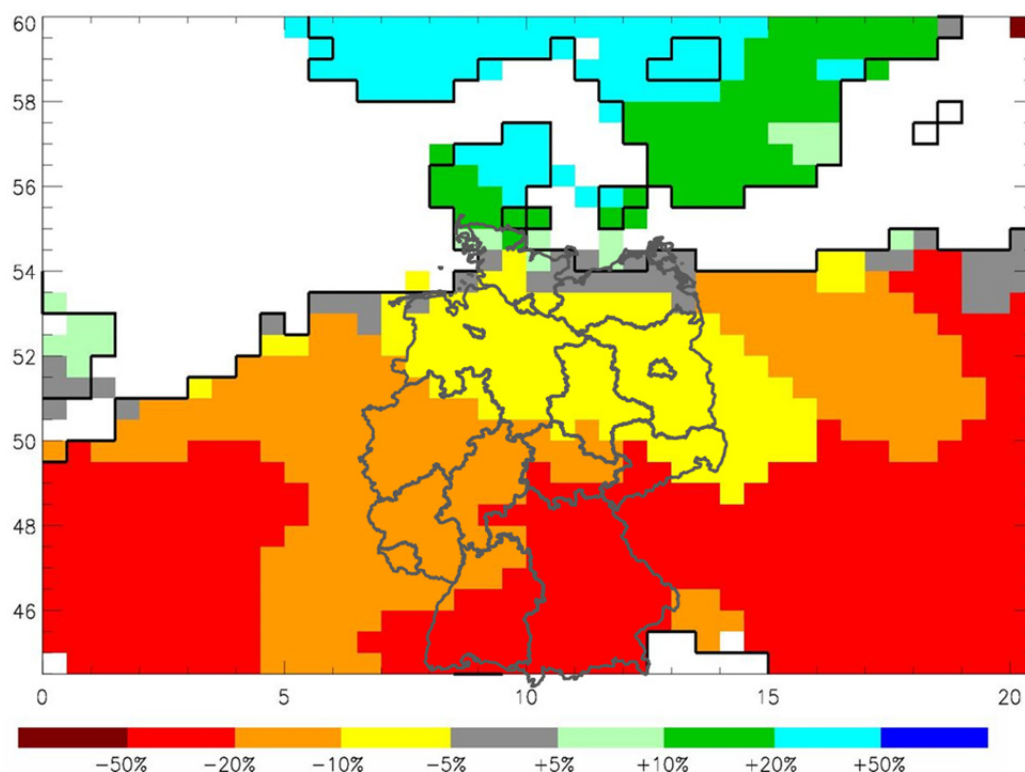


Abb.16: Änderungen in den verfügbaren Wasserressourcen. Vergleich der Ensemble-Mittelwerte 2071 – 2100 zu 1971 – 2000 für 24 Simulationen (8 GHMs, 3 GCMs), A2 Szenario (Hagemann et al. 2013).

Bei der Verwendung eines Multi-Modell-Ansatzes auf regionaler Ebene zeigten Veijalainen et al. (2010), Kay et al. (2009) und Wilby (2005), dass die Wahl des GCM und die natürliche Variabilität den größten Einfluss auf das Ergebnis haben, gefolgt von der Wahl des RCM, des HM und zuletzt des Emissionsszenarios. Diese Reihenfolge ist jedoch ortsspezifisch und kann sich in Abhängigkeit regionaler Charakteristika auch ändern.

Die Anwendung eines Modell-Ensembles ist eine gängige Praxis in den Klimawissenschaften. Dabei kann ein Ensemble aus den Simulationen eines oder mehrerer GCMs und/oder eines oder mehrerer RCMs und/oder eines oder mehrerer Wirkmodelle bestehen, aber auch aus mehreren Simulationen eines Modells mit verschiedenen Emissionsszenarien beziehungsweise unterschiedliche Modellbedingungen. Jede genannte Kombination ist möglich. Dieses Ensemble-Konzept kann theoretisch auch bei der Verwendung hydrologischer Modelle angewendet werden.

Idealerweise werden immer mehrere globale Klimamodelle, regionale Klimamodelle und hydrologische Modelle verwendet (Ludwig et al. 2010, Terink et al. 2009). Allerdings führt die Kombination verschiedener Klimaszenarien, GCMs, RCMs und hydrologischer Modelle zu einer enormen Anzahl von Variationsmöglichkeiten, zeitaufwendigen Berechnungen und sehr unterschiedlichen Ergebnissen, insbesondere für sehr niedrige und sehr hohe Abflussmengen (Görgen et al. 2010). Daher werden in der Praxis nur ein oder zwei Wirkmodelle angewendet (Gosling & Arnell 2011, Hagemann et al. 2011). Es muss jedoch betont werden, dass die gesamte Ergebnisbandbreite nicht mit zwei Modellketten beschrieben werden kann, da die vollständige Bandbreite wahrscheinlicher Ergebnisse deutlich größer ist. Deshalb bietet ein Ensemble-Ansatz eine bessere Möglichkeit, die Gesamtheit wahrscheinlicher, zukünftiger Veränderungen hydrologischer Parameter darzustellen (Roberts et al. 2011, Feyen & Dankers 2009).

Grundsätzlich muss jedes Untersuchungs- oder Einzugsgebiet einzeln untersucht werden, da jeder Standort seine eigenen spezifischen Eigenschaften aufweist. Daher gelten alle Ergebnisse ausschließlich für das bearbeitete Gebiet und nur ausgesuchte und geprüfte Teilergebnisse können in ein anderes Gebiet transferiert werden. Auch der Transfer maßstabsbezogener Ergebnisse innerhalb eines Gebietes ist ähnlich problematisch, da für jede Maßstabsskala andere Schlüsselprozesse ausschlaggebend sind. Eine weitere offene Frage ist die unbekannte, zukünftige Entwicklung der Landnutzung. Zum Beispiel kann es durch den Einfluss des Klimawandels möglich sein, dass Feldfrüchte nun zweimal im Jahr angebaut werden. Dadurch würde jedoch der Wasserbedarf steigen und sich die Verfügbarkeit von Wasser verringern. Allerdings ist diese Entwicklung aufgrund der komplexen Wechselwirkungen zwischen sozioökonomischen und politischen Prozessen nur schwer vorherzusehen. Lösungsansätze bietet der Einsatz dynamischer globaler Vegetationsmodelle wie Hyland, TRIFFID, LPJmL oder LPJ-GUESS (z.B. Rosenzweig et al. 2014, Galbraith et al. 2010).

In den hier analysierten Projekten kommen projektspezifische Modell-Ketten mit projektspezifischen Referenzzeiträumen zum Einsatz, um ortsspezifische Fragen auf Grundlage individuell verfügbarer Beobachtungsdaten zu beantworten. Da im überwiegenden Teil der Projekte kein Multi-Modell-Ensemble oder Multi-Szenario-Ensembles

verwendet wurde, lässt sich dort nichts über die Signifikanz und Robustheit der Ergebnisse aussagen. Hagemann et al. (2013) geben die Empfehlung, dass derartige Analysen nicht nur auf dem Ergebnis eines einzelnen Modells basieren sollten. Generell gilt, um robuste und signifikante Aussagen treffen zu können, ist es notwendig nicht nur Ensembles aus Klimamodellen sondern auch Ensembles hydrologischer Modelle zu verwenden. Zudem sollte die Vertrauenswürdigkeit und Wahrscheinlichkeit der Ergebnisse in Bezug auf zukünftige Auswirkungen mit angegeben werden.

3. Tatsächliche und mögliche Folgen des Klimawandels

Der Klimawandel hat das Potenzial, alle Teilbereiche des Wasserkreislaufs zu beeinflussen, was zu komplexen Wechselwirkungen und Rückkopplungseffekten zwischen den einzelnen Kompartimenten des terrestrischen Systems wie Grundwasser, Boden, Vegetation, Gewässer und Atmosphäre führen kann. Das Ausmaß der Klimafolgen ist von der Art und Intensität der Auswirkungen, der Exposition und der Vulnerabilität des betroffenen Ziels, dem Ort und Zeitpunkt des Auftretens der Auswirkungen, vorhandenen Vorbelastungen sowie den betroffenen Ökosystemen und Sachwerten abhängig (OECD 2013).

Dieser Bericht hebt vier Aspekte aus dem Wassersektor heraus: Wassermenge, Wasserverfügbarkeit, Wasserqualität und Veränderungen der biologischen Vielfalt. Der Begriff Wassermenge schließt Änderungen der jährlichen und saisonalen Abflussmenge, abgesenkte Wasserstände, Änderungen der Häufigkeit und Intensität von Extremereignissen (Überschwemmungen und Dürren) und urbane Überflutungen mit ein. Die Wasserverfügbarkeit wird bestimmt durch die multiplen Wasserbedarfe sowie den Veränderungen bei der Grundwasserneubildung. Die Wasserqualität umfasst Änderungen der Wassertemperatur, Versalzung des Grundwassers, verminderte Verdünnungswirkung während einer Niedrigwasserphase, sowie Änderungen der Schmutzfracht und der Sauerstoffsättigung. Die Veränderungen der biologischen Vielfalt umfassen Auswirkungen auf die aquatischen Ökosysteme, Verlust von Arten und Schutzgebieten (z.B. Feuchtgebieten), Veränderungen der Ökoregionen (Stichwort Nordwärtsbewegung) und Einwanderung invasiver Arten.

Obwohl aktuell exakte quantitative Prognosen der Veränderungen von Niederschlägen, Abflussmengen und Wasserständen im Flussgebietsmaßstab nicht möglich sind, ist es jedoch sehr wahrscheinlich, dass sich die hydrologischen Charakteristika in der Zukunft verändern werden (OECD 2013, Quevauviller 2010). Um auf die Folgen des Klimawandels reagieren zu können, ist eine dynamische, zukunftsorientierte Vorgehensweise notwendig, wobei die Variabilität des Wetters und des Klimas auf allen Zeitskalen berücksichtigt werden muss. Nachfolgend werden die möglichen Einflüsse auf folgende ausgesuchte Schlüsselbereiche des Wassersektors betrachtet:

- Binnenschifffahrt
- Kühlwasser für die Industrie
- Bewässerung in der Landwirtschaft
- Aquatische Ökosysteme
- Wasserversorgung
- Hochwasserrisiko
- Schneebedeckung in Bergregionen

3.1 Beeinträchtigung der Binnenschifffahrt

Die Nutzbarkeit von Wasserstraßen in Deutschland spielt eine wichtige Rolle für die Logistikbranche. Die Binnenschifffahrt wird in der Regel in Zeiten niedriger Wasserstände sowie bei extremem Hochwasser gestört.

Box 4: Niedrigwasser und Hochwasser

Prinzipiell kann Niedrigwasser in zwei Arten eingeteilt werden: a) Niedrigwasser im Spätsommer oder Frühherbst als Folge von Niederschlagsdefiziten und hohen Verdunstungsraten und b) winterliche Niedrigwasserverhältnisse als Folge des frostbedingten Wasserrückhalts. Allerdings können auch lang anhaltende Trockenperioden außerhalb der oben genannten Zeiträume zu deutlich niedrigeren Wasserständen führen (z.B. Rhein im April – Mai 2011, November 2011).

Flusshochwasser entstehen bei andauernden, ausgiebigen und großräumigen Niederschlägen und/oder bei Schneeschmelze (z.B. Elbe März 2006 oder Donau Juni 2009, Mai 2010).

Die Auswertung der Beobachtungsdaten (1951 – 2010) erlaubt keine Rückschlüsse auf das Langzeitverhalten der Niedrigwasserbedingungen (AK KLIWA 2011). Dies kann unter anderem auf Bau- und Wiederherstellungsmaßnahmen am Flusssufer zurückgeführt werden, die einen großen Einfluss auf das Abflussverhalten besitzen. Aus diesem Grund ist es wegen der wechselnden Randbedingungen nicht sinnvoll, Statistiken auf Basis dieser heterogenen Informationen durchzuführen. Beim Einsatz eines Modells kann die Gesamtheit dieser Einflüsse nur mit großem Aufwand in vereinfachte Modellansätze implementiert werden, wobei die Wahrscheinlichkeit groß ist, dass die Ergebnisse nicht das zeigen werden, was tatsächlich in der Zukunft zu erwarten ist.

Der 5. IPCC-Sachstandsbericht kommt zu dem Ergebnis, dass der Klimawandel nach 2050 die Binnenschifffahrt in den Sommermonaten zum Beispiel am Rhein beeinflussen wird (Kovats et al. 2014). Niedrige Wasserstände infolge einer Trockenperiode bedeuten Einschränkungen hinsichtlich Größe und Kapazität (d.h. Tiefgang) der Schiffe, die die Wasserwege in diesen Zeiträumen befahren (Feyen & Dankers 2009). Wegen der hochgradigen Verzahnung führt ein Transportengpass auf einer Wasserstraße zu Engpässen in vielen anderen Sektoren (WVGW 2011). Allerdings ist es notwendig, die einzelnen Einzugsgebiete differenziert zu betrachten:

Elbe:

Die Mehrzahl der Studien weist auf eine Verschlechterung der Schiffbarkeit für die Periode 2050 bis 2100 hin (LAWA 2010, BMVBS 2007). Allerdings ist auf lokaler Ebene aufgrund der großen Variabilität der Ergebnisse kein klarer Trend sichtbar. Durch den Bau von Talsperren und Stauseen auf der tschechischen Seite, insbesondere 1955-1980, können niedrige Wasserstände in der Elbe gut reguliert werden (Köppke & Sterger 2011, Wechsung et al. 2006). Obwohl es sich bei den Ergebnissen um Informationen handelt, aus denen keine zuverlässigen Entscheidungen abgeleitet werden können, so gibt es trotzdem die

Empfehlung, dass alle weiteren Entwicklungsmaßnahmen die erwarteten höheren Frequenzen von Niedrigwasser und Hochwasser berücksichtigen sollen (LAWA 2010, Wechsung et al. 2006, Hattermann 2005). Eine Verschärfung der Niedrigwasserbedingungen in den Sommermonaten wird für die Bundesländer Sachsen (SMUL 2005), Sachsen-Anhalt und Thüringen (Franke et al. 2006) erwartet. Das Niedrigwasser wird früher eintreten, länger andauern und unter die üblichen Niveaus fallen. Ohne weitere Baumaßnahmen werden einige Flussbereiche vorübergehend trocken fallen (GLOWA-Elbe Memorandum 11.10.09).

Rhein:

Im 20. Jahrhundert gab es eine Verminderung der extremen Niedrigwasserbedingungen. Allerdings müssen diese Extreme räumlich differenziert betrachtet werden, da es bei den Nebenflüssen große lokale Unterschiede gibt (Belz 2010, Scherzer et al. 2010). Projektionen in der nahen Zukunft zeigen für das Rheineinzugsgebiet keinen auffälligen Trend für Veränderungen beim Auftreten von Niedrigwasserständen. Auch für die ferne Zukunft gibt es keine Anzeichen für Veränderungen. Allerdings zeigt sich an einigen Pegeln ein Absinken des niedrigsten Niedrigwasserniveaus (Görgen et al. 2010, CHR 2010, Scherzer et al. 2010). Für die Einzugsgebiete des Bodensees und des Hochrheins gehen Hennegriff et al. (2007) davon aus, dass sich die Dauer der Niedrigwasserperioden in Zukunft deutlich verlängern wird.

Donau:

Die Auswertung der Messdaten des Pegels „Achleiten“ weist darauf hin, dass sich das Niedrigwasserniveau im 20. Jahrhundert als Folge des Baus und Betriebs von Wasserreservoirs erhöht hat (KLIWAS 2011). Projektionen für die nahe Zukunft (2012 – 2050) zeigen eine Abnahme der Niedrigwasserkennwerte. Die Ergebnisse aus GLOWA-Danube und KLIWAS deuten auf deutlich verschiedene Abnahmetendenzen hin, was allerdings auf die unterschiedlichen Berechnungsansätze (Zukunftsszenarien, hydrologische Modellierung) zurückgeführt wird (Klein et al. 2012). Wegen der projizierten Veränderungen bei der Schneeschmelze (Verschiebung vom Frühsommer zum Frühjahr) (GLOWA-Danube 2009), geht man für den deutschen Teil des Einzugsgebietes aus, dass sich die Niedrigwasserbedingungen vom Herbst in den Spätsommer verschieben werden.

Fazit

Die analysierten Berichte zeigen, dass sich einzelne Flussabschnitte sehr unterschiedlich verhalten, so dass für ein gesamtes Flusssystem kein einheitlicher Trend erkennbar ist. In der fernen Zukunft (2100) sind längere Niedrigwasserperioden wahrscheinlich, was auf eine weitere Verschärfung der Engpässe hindeutet. Prinzipiell wird aber davon ausgegangen, dass es genügend Anpassungsmöglichkeiten gibt, um die Folgen des Klimawandels verringern zu können.

3.2 Fehlende Verfügbarkeit von Kühlwasser für die Industrie

In Deutschland werden jährlich mehr als 32 Milliarden Kubikmeter Wasser von öffentlichen und nicht-öffentlichen Wassernutzern entnommen. Auf die privaten Haushalte entfallen dabei 11%. Der Hauptteil (82%) wird von der Industrie verbraucht, wobei der größte Teil davon (72%) auf die Kühlwassernutzung von Energieversorgern entfällt (alle Daten: Statistisches Bundesamt (Destatis), Stand Juni 2011). Das verwendete Süßwasser stammt überwiegend (90%) aus Flüssen, Seen oder Stauseen.

Für die Industrie ist Wasser ein bedeutender Produktions- und Kostenfaktor. Bereits ein kurzzeitiger Ausfall der Wasserversorgung ist ein Problem für viele Industriebranchen, vor allem bei der Aufrechterhaltung der Produktionsprozesse (Lühr et al. 2011). Mit steigenden Außentemperaturen wird mehr Kühlwasser für die Kühlung von Gebäuden, Maschinen und Produktionsprozessen erforderlich.

Die Energieindustrie, die auf thermische Kraftwerke setzt, ist ebenfalls in erheblichem Maße von Kühlwassermangel betroffen. Beim Einsatz von Kühlwasser werden bei steigenden Wassertemperaturen zunächst höheren Wassermengen entnommen, um die rechtlichen und ökologischen Temperaturschwellenwerte für wieder eingeleitetes, erwärmtes Kühlwasser einhalten zu können und gleichzeitig die Effizienz nicht verringern zu müssen. Wenn die entnommene Menge Oberflächenwasser nicht zur Kühlung ausreicht, verringert sich die Effizienz des Kraftwerks und die Energieumwandlung muss reduziert werden (Grocholl 2011). Ungewöhnlich lange Zeiträume von heißem oder trockenem Wetter führen letztendlich zu einem Produktionsstopp (Sieber 2013).

In einigen Abschnitten des Rheins und seiner Nebenflüsse ist der Einfluss von Kühlwasser schon heute so hoch, dass sich die Wassertemperatur um 1,5°C erhöht hat. Die höchsten Temperaturveränderungen wurden dabei in Karlsruhe und Mainz beobachtet (BUND 2009).

Ein Anstieg der Flusswassertemperaturen durch den Klimawandel ist wahrscheinlich unvermeidlich. Es wird davon ausgegangen, dass bis zum Jahr 2100 die Flusstemperaturen in Deutschland um 1 – 2°C steigen werden (Petry 2009). Für den Sommer wird erwartet, dass Situationen mit Niedrigwasserbedingungen in Kombination mit erhöhten Wassertemperaturen in den nächsten 40 Jahren zunehmen werden (OECD 2013). Die Wasserkraftgewinnung und auch die Produktion von Wärmekraftwerken wird sich während der Sommermonate verringern (Kovats et al. 2014). Aber auch die chemische und pharmazeutische Industrie muss sich wegen der wahrscheinlichen Nutz- und Kühlwasserengpässe neuen Herausforderungen stellen.

3.3 Nicht gedeckter Wasserbedarf für die Bewässerung in der Landwirtschaft

Die Ergebnisse von Klimaprojektionen für Deutschland deuten auf eine Verschiebung der Niederschlagsmengen vom Sommer in den Winter und auf einen deutlichen Anstieg der Jahresmitteltemperatur hin. Die Änderung des jährlichen Niederschlagsmusters hat bereits kurzfristige Konsequenzen für die Landwirtschaft, die Wasserversorgung sowie für

Ökosysteme. Ein besonderes Konfliktpotenzial bei der Wassernutzung entsteht besonders nach mehreren trockenen Jahren, in denen der Grundwasserspeicher aufgebraucht wird. Die Folge sind niedrige Grundwasserstände und ein Wasserdargebot, das zu gering ist, um alle Bedarfe decken zu können.

Für Deutschland zeigen die Klimaprojektionen eine Zunahme der Temperatur und in vielen Regionen eine Abnahme der Sommerniederschläge. Somit ist es wahrscheinlich, dass die Anzahl, Länge und/oder Intensität von Trockenperioden in der Zukunft zunehmen wird. Großflächige Simulationen des Bodenwasserhaushaltes in Nordrhein-Westfalen haben gezeigt, dass sich die Anzahl der Tage im Sommer mit einem Bodenwasserdefizit von 60% (Schwellenwert für die Bewässerung) bis 2100 von 30 auf 60 verdoppeln könnte (Herrmann et al. 2014a). Die zunehmende Trockenheit wird vor allem zu negativen Auswirkungen in den intensiv landwirtschaftlich bewirtschafteten Regionen wie Hessen oder Niedersachsen führen (AnKliG 2010).

In Zeiten niedriger Fluss- beziehungsweise Grundwasserstände sind Wasserentnahmen in Deutschland per Gesetz eingeschränkt. Ausgehend von den Projektionen, die eine Zunahme extremer Wasserstände (Niedrig- beziehungsweise Hochwasser) zeigen sowie vom zeitlich veränderten Verlauf der Grundwasserneubildung werden die zukünftigen Herausforderungen für Wassernutzer weiter wachsen. Deshalb müssen schon jetzt neue integrierte Anpassungsstrategien auf Flussgebietsebene entwickelt werden, die sich zusammen mit Maßnahmen auf lokaler Ebene koordinieren lassen (Te Linde et al. 2012).

3.4 Zusätzlicher Stress für aquatische Ökosysteme

Obwohl alle Ökosysteme durch den Klimawandel bedroht werden, sind Süßwasser-Ökosysteme besonders anfällig, da sie die höchste Zahl bedrohter Arten aufweisen (Le Quesne et al. 2010, Vörösmarty et al. 2010, Ludwig & Moench 2009). Süßwasser-Ökosysteme stehen schon heute unter Stress, der auf Landnutzungsänderungen, Bevölkerungswachstum und Umweltverschmutzung zurückgeführt werden kann. Zukünftig müssen sie sich noch den zusätzlichen Belastungen durch den Klimawandel stellen, die die Folgen der anderen Stressfaktoren noch verschärfen werden. Leider sind die Folgen des Klimawandels für die Ökosysteme nur schwer zu projizieren. Wegen der komplizierten und vielfältigen Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Teilbereichen und Systemprozessen ist eine Verallgemeinerung von Aussagen dazu nicht möglich (Euro-limpacs 2009). Ökosysteme reagieren auf hydrologische Veränderungen in einer komplexen, oftmals nicht-linearen Weise.

Die Folgen des Klimawandels werden sich als dramatische Verschiebungen zeigen, vor allem wenn sogenannte „Kipppunkte“ überschritten werden (Le Quesne et al. 2010). Aktuelle Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass der Klimawandel nicht nur zu einer Massenmigration von Arten führen wird, sondern dass sich ebenfalls neue Ökosysteme ausbilden werden, die wir bis heute noch nicht kennen (Fox 2007).

Grundwasser ist für viele Ökosysteme notwendig, genauso wie Ökosysteme wichtig für das Grundwasser sind. In Deutschland sind 36% der Natura-2000-Schutzgebiete direkt und 16% indirekt vom Grundwasser abhängig (Petersen & Ssymank 2007). Obwohl die Fauna entscheidend für die Qualität des Grundwassers ist (Griebler & Lueders 2009), wurde bis heute noch keine systematische Sammlung der Organismen im Grundwasser durchgeführt (Michel et al. 2009). Habitate, die mit hohen Grundwasserständen verknüpft sind, sind besonders anfällig für den Klimawandel, denn zunehmende Verdunstungsraten bewirken ein Absinken des Grundwasserspiegels (Huang et al. 2010). Geschieht dies für längere Zeiträume, so sind diejenigen Pflanzen im Vorteil, die sich längeren Trockenperioden anpassen können (Holsten et al. 2009). Laub- und Mischwälder können beispielsweise Grundwasser bis zu einem Flurabstand von 5 bis 10 Meter nutzen (Froend & Zencich 2001). Allerdings ist jedes Feuchtgebiet in einer anderen Weise betroffen, wobei sich voraussichtlich das Ausmaß der Folgen des Klimawandels in Deutschland von Nordwesten nach Südosten, gemäß dem Klimagradienten, erhöhen wird (PIK 2010).

Die Gemeinschaft der Organismen ist an die physiko-chemischen Eigenschaften ihres Lebensraums angepasst. Dabei ist die Wassertemperatur eine der wichtigsten Variablen in der Ökologie (Görgen et al. 2010). Höhere Wassertemperaturen führen im Allgemeinen zu: a) höheren Konzentrationen nichtflüchtiger Substanzen im Wasser, b) einer Erhöhung der Diffusionsraten, des biotischen Metabolismus und abiotischer Reaktionsgeschwindigkeiten (erhöhte mikrobielle Aktivität und größere Bakterien- und Pilzpopulationen) und verstärktem Abbau organischer Verbindungen, c) Minderung des Sauerstoffgehalts, d) vermehrten Algenblüten (Ludwig & Moench 2009) und e) einer unzureichenden Vermischung der Wassersäule, was die räumliche Verteilung von Sauerstoff, Nährstoffen und Organismen in der Wassersäule beeinflusst (AK KLIWA 2007, O'Reilly et al. 2003, Straile et al. 2003). Ansteigende Temperaturen verursachen Veränderungen bei der Verteilung der Arten. In Mitteleuropa äußert sich dies in einer allgemeinen Migration der Kaltwasserarten in nördliche Richtung sowie in höhere Lagen. Dies kann aufgrund begrenzter Verlagerungsmöglichkeiten sogar zum Aussterben einzelner aquatischer Arten führen. Ein weiterer Effekt ist ein längerfristiges Austrocknen von Seen und kleinen Bächen, wodurch eine Wiederbesiedlung unwahrscheinlich wird (Ott 2007).

Ein weiterer wichtiger Schlüsselfaktor ist die Wasserzusammensetzung. Grundsätzlich ist es schwierig, Änderungen der Wasserqualität zu bewerten, da es zahlreiche Steuerungsfaktoren gibt, die die Qualität beeinflussen. Lokal gesehen genügt schon eine mäßige Zunahme der Lufttemperatur, um Änderungen in der Wasserchemie zu verursachen. Es reichen aber auch schon geringfügige Änderungen bei den gelösten Wasserinhaltsstoffen aus, um große Veränderungen bei der Vielfalt und Zusammensetzung der Artengemeinschaft hervorzurufen. Thies et al. (2007) zeigten, dass am Rasaß-See (auf 2682 m ü. NN, Italien) die Konzentrationen verschiedener Wasserkomponenten in den letzten Dekaden aufgrund des veränderten Schmelzwasserabflusses angestiegen sind. Andere Studien belegen, dass aquatische Ökosysteme auch durch weiträumig transportierte Schadstoffe geschädigt werden (Euro-limpacs 2009). Eine Zunahme von Flusshochwasser, Sturzfluten und Bodenerosion würde den Eintrag von gefährlichen und unerwünschten Stoffen in den Wasserkreislauf verstärken. Auch steigende Konzentrationen aufgrund von Niedrigwasserbedingungen stellen eine Belastung für Ökosysteme dar (OECD 2013).

Für gebietsfremde Arten bieten die veränderten Umweltbedingungen hingegen die Chance sich an neuen Orten anzusiedeln. Dies kann durch Verschiebung der Verbreitungsgebiete aber auch durch neue Transfermechanismen erfolgen. Die Möglichkeiten, die sich durch die moderne Schifffahrt und den Luftverkehr ergeben sind immens. Andererseits verbirgt sich dahinter auch ein großes Gefährdungspotential, da dadurch der Erhalt der globalen Biodiversität bedroht wird (Dextrase & Mandrak 2006). Am Mittel- und Niederrhein sind bereits heute mehr als 20% der vorkommenden Arten eingewandert und machen mehr als 90% der Biomasse aus (Galil et al. 2007).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Folgen des Klimawandels eine zusätzliche Belastung für die Wasserfauna und –flora bedeuten. Allerdings ist das genaue Ausmaß der Folgen aufgrund der großen Bandbreite der Projektionsergebnisse sowie den unvorhersehbaren Änderungen von Punkt- und diffusen Quellen und deren zukünftigen Auswirkungen auf die Ökosysteme nur schwer zu beurteilen (Feld & Hering 2007). Prinzipiell werden durch die Erwärmung der Gewässer Eutrophierungsprobleme in stehenden Gewässern und Seen (MUNLV 2007) wie auch in Flusssystemen (KLIWAS 2011) zunehmen.

3.5 Herausforderungen für die lokale Wasserversorgung

In Deutschland wird, überall wo es möglich ist, Grundwasser zur Trinkwassergewinnung verwendet (Fig.17). Es gibt aber auch mehr als 300 Wasserwerke, die Uferfiltration nutzen und ungefähr 50, die künstlich Grundwasser anreichern (Schmidt et al. 2003). Die nicht-öffentliche Wasserversorgung ist im Allgemeinen auf die Nutzung von Oberflächenwasser oder Uferfiltrat konzentriert (Fig.18). Die Folgen des Klimawandels stellen die Wasserversorgung vor verschiedene Herausforderungen, die das Management der Wassermenge und –qualität, aber auch den Schutz der vorhandenen Infrastruktur betreffen (Bender & Jacob 2016).

Wassermenge

Die den Verbrauchern zur Verfügung stehende Wassermenge kann durch eine Vielzahl von Klimafolgen betroffen werden. Da es jedoch regionale Unterschiede bei den Einflussgrößen und den Vulnerabilitäten gibt, müssen diese jeweils individuell beurteilt werden (WVGW 2011). Die jährliche Wasserverfügbarkeit von Grundwasser sowie von Seen und Stauseen wird sich in Folge des sich ändernden Jahresgangs der Niederschläge sowie der Temperaturzunahme regional verändern. Die projizierten Ergebnisse für die zukünftige Niederschlagsverteilung beziehungsweise Grundwasserneubildung weisen allerdings große Schwankungsbreiten auf. Somit sind keine detaillierten Aussagen über die zu erwartenden Veränderungen möglich (WVGW 2011). Allerdings deuten die Tendenzen darauf hin, dass sich die Zeiträume der Wasserneubildung und –zehrung verändern werden. Zusammen mit sich verändernden Stadtstrukturen, dem demografischen Wandel und einem abnehmendem Wasserverbrauch stellen diese Faktoren eine große Herausforderung für die deutsche Wasserwirtschaft dar.

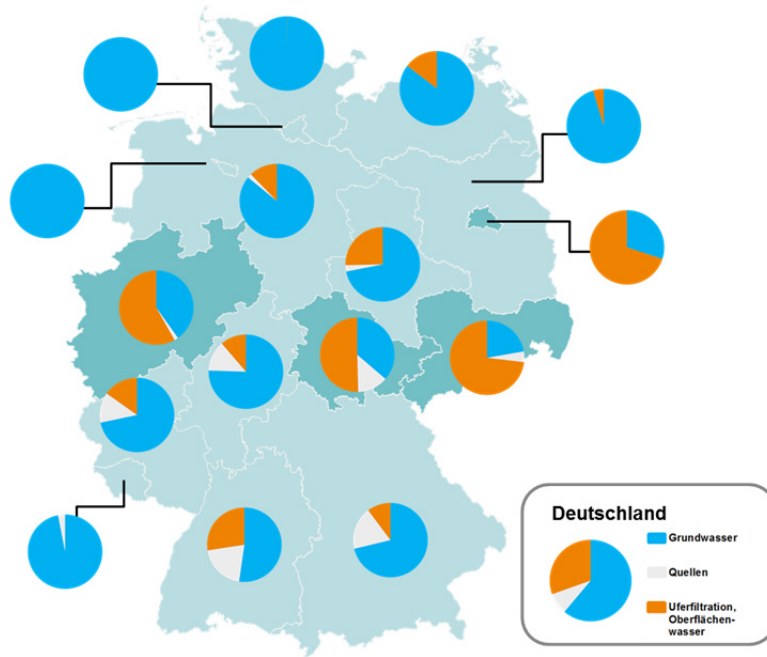


Abb.17: Herkunft des Wassers für die öffentliche Wasserversorgung. (Quelle: DESTATIS 2010, Statistisches Bundesamt 2013).

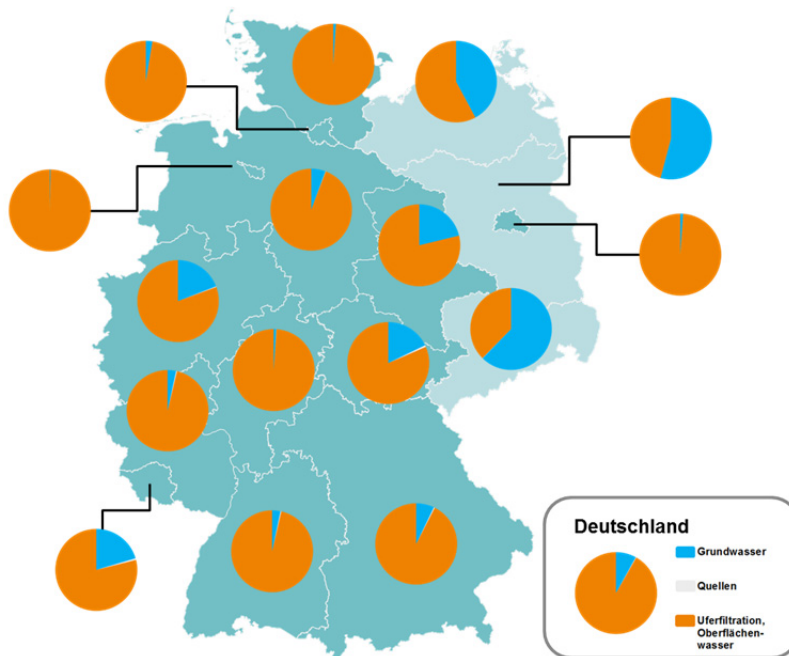


Abb.18: Herkunft des Wassers für die nicht-öffentliche Wasserversorgung. (Quelle: Statistisches Bundesamt 2013, DESTATIS 2010).

Die öffentliche Trinkwasserversorgung verwendet derzeit etwa 3% der regenerativen Wassermengen Deutschlands (ATT et al. 2008). Obwohl deutschlandweit auch in Zukunft ausreichend Wasser vorhanden sein wird, kann es trotzdem lokal zu zeitlich begrenzten Engpässen als Folge von Trockenperioden und konkurrierenden Entnahmen kommen (Petry 2009). In Deutschland deckte eine langfristige Dürre von Februar bis September 2003 die Anfälligkeit lokaler Trinkwasserversorgungen auf und dies trotz der Tatsache, dass der vorangegangene Winter hohe Niederschläge brachte und die Wasserspeicher zu Beginn des Jahres 2003 gut gefüllt waren. Das Jahr 2003 war von sehr geringen Niederschlägen gekennzeichnet. Es wies 10 Monate auf, die trockener als der langjährige Durchschnitt waren. Zudem wurden an viele Klimastationen die höchsten jemals aufgezeichneten Sommertemperaturen gemessen. Stauseen büßten aufgrund der Wasserknappheit 75% ihrer Gesamtkapazität ein (BfG 2006).

Die aktuellen Ergebnisse der Klimamodellierung zeigen, dass die globale Erwärmung die Entwicklung von Dürren in vielen Regionen Europas begünstigen wird. In den meisten der untersuchten Studien beziehen sich die Auswirkungen von Dürren auf die resultierenden hydrologischen Bedingungen, wie niedrige Wasserstände und eine verminderte Grundwasserneubildung (Feyen & Dankers 2009). Untersuchungen in Sachsen zeigen, dass es bereits in den Sommerhalbjahren 1951 – 2000 zu einem Anstieg in der Häufigkeit und Dauer meteorologischer Dürren gekommen ist. Dieser Trend setzte sich in den Sommerhalbjahren 2003, 2006, 2007 und 2008 fort (LFULG 2012).

In weiten Teilen Deutschlands wird für die nächsten 15 bis 20 Jahre ein Rückgang des durchschnittlichen Wasserbedarfs erwartet (Herber et al. 2008). Gründe dafür sind der prognostizierte Bevölkerungsrückgang und eine effizientere Wassernutzung (beispielsweise durch vermehrte Regenwassernutzung oder den Einsatz verbrauchsarmer Haushaltsgeräte). Trotzdem werden höchstwahrscheinlich wachsende Bedarfsspitzen aufgrund der erwarteten Zunahme von Trockenperioden und heißen Tage (Tage mit $T > 30^{\circ}\text{C}$) auftreten (Terink et al. 2009, Kluge et al. 2007). Dies gilt vor allem für touristische Ziele wie den Bayerischen Wald und Oberpfälzer Wald. Die größte Herausforderung für kleine Wasserversorger wird es sein, für die zu erwartenden Entnahmemengen ausreichend Aufbereitungs- und Reservekapazität zu gewährleisten (Lühr et al. 2011).

Box 5: Dürre

Wilhite & Glantz (1985) kategorisieren Dürre in vier Kategorien: die meteorologische, hydrologische, landwirtschaftliche und sozioökonomische Dürre. Die ersten drei Kategorien beziehen sich auf Dürren, die durch physikalische Phänomene hervorgerufen werden. Die letzte Kategorie betrifft die Auswirkungen des Wasserdefizits auf sozioökonomische Systeme.

Eine Zusammenstellung von weiteren Dürre-Definitionen ist Bender & Schaller (2014) zu entnehmen.

Für Nordrhein-Westfalen wird erwartet, dass es keine Trinkwasserengpässe durch den Klimawandel in naher Zukunft geben wird (Peterwitz & Böddeker 2008), da die Auswirkungen des Klimawandels durch einen anhaltenden Bevölkerungsrückgang kompensiert werden. Zudem zeigen einzelne Projektionen, dass bis zum Jahr 2050 von einer Zunahme der Grundwasserneubildungsrate auszugehen ist (Herrmann et al. 2014a). Für Ostdeutschland wird ebenfalls von keinem weit verbreiteten Rückgang der Wasserverfügbarkeit ausgegangen, allerdings können einzelne Wassernutzungen (wie im Havel-Einzugsgebiet oder in Teilen von Brandenburg und Sachsen) auch stärker beeinträchtigt werden (Scherzer et al. 2010, Küchler 2005).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Folgen die Wassernutzer besonders dort stark treffen werden, wo es bereits schon heute Engpässe in trockenen Sommern gibt (PIK 2010).

Grundwasserstände und Quellschüttungen

Grundwasser ist eine wichtige Wasserressource in Deutschland. Über 75% der Wasserversorgung werden durch Grund- oder Quellwasser gedeckt (Quelle: Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft BDEW). Generell lassen sich saisonale Veränderungen an den Grundwasserganglinien anthropogen unbeeinflusster Messstellen beobachten. Hohe Grundwasserstände bzw. Schüttungsmaxima von Quellen treten in der Regel zwischen März und Mai auf. Messungen in Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz (Zeitreihen von 1951 – 2010) verdeutlichen, dass bei der Hälfte der Brunnen eine Tendenz zum früheren Auftreten des Höchstwasserstandes beobachtet werden kann (AK KLIWA 2011). Darüber hinaus weist die Hälfte der Messstellen eine Vergrößerung der Schwankungsbreite der Grundwasserstände auf. Studien für Hessen zeigen, dass der Klimawandel bislang keinen wesentlichen Einfluss auf die mittleren Grundwasserstände sowie die Verfügbarkeit des Grundwassers hat. Wegen der zu erwartenden Tendenz einer Umverteilung der Niederschläge von Sommer auf Winter sowie eine Zunahme der Anzahl und Länge von Trockenperioden wird allerdings langfristig auch hier mit einer Zunahme der natürlichen Grundwasserspiegelschwankungen gerechnet (Brahmer 2006, AnKliG 2010).

Die Auswertung des zeitlichen Verlaufs der Quellschüttungen ist wegen der individuellen Charakteristika der einzelnen Quellen jedoch nur beschränkt aussagekräftig (AnKliG 2010). Generell können Dürren und extreme Trockenjahre leicht an Schüttungsganglinien identifiziert werden, wobei größere Einzugsgebiete eine puffernde Wirkung zeigen. Im Odenwald ist in der Dekade 1998 – 2008 eine Abnahme der Quellschüttung zu beobachten. Da im Zeitraum 1965 bis 2008 die Temperatur einen ansteigenden Trend aufweist, wurde dies als ein Beleg für die Folgen des Klimawandels auf die Quellschüttung interpretiert (AnKliG 2010).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass ein Anstieg der Schwankungsbreiten bei den Grundwasserständen mehr als wahrscheinlich ist. Aussagen zu lokalen Trends sind jedoch nicht möglich. Steigende Grundwasserentnahmen im Sommer, wie beispielsweise für die Trinkwasserversorgung oder zur Bewässerung der Landwirtschaft, werden diese Schwankungsbreite in einzelnen Regionen zusätzlich vergrößern. Für die

Grundwasserbewirtschaftung werden die größten Herausforderungen bei der Deckung von Spitzenbedarfen sowie der Überbrückung von Perioden mit geringem Grundwasserdargebot liegen.

Wasserqualität bei Grund- und Oberflächenwasser

Die Wasserqualität wird direkt durch chemische, physikalische und biologische Prozesse gesteuert. Geogene und anthropogene Quellen sowie Mischungsvorgänge sind für die jeweilige Wasserbeschaffenheit verantwortlich. Aufgrund der zahlreichen, komplexen und nichtlinearen Prozesse sowie den Wechselwirkungen zwischen geogenen Stoffen, Nährstoffen und Fremdstoffen (z.B. Pflanzenschutzmittel) ist es sehr unsicher, wie sich die Wasserqualität in der Zukunft entwickeln wird (Wilby et al 2006).

Der projizierte Anstieg des Meeresspiegels wird die Salzwasser-Süßwasser-Grenze bei Küstenaquiferen weiter ins Inland verschieben (Quevauviller 2010). Starkregenereignisse und Überschwemmungen werden einen vermehrten Sediment- und Nährstoffeintrag in Flüsse, Seen und Stauseen verursachen. Durch den Sedimenteintrag gelangen zusätzlich Schadstoffe ins Wasser, die die Wasserqualität beeinträchtigen (Petry 2009), wobei erhöhte Stickstoff- und Phosphor-Konzentrationen neben der Wärmebelastung einen zusätzlichen Stress für die Ökosysteme bedeuten.

Legt man die Projektionen für zukünftige Winter zugrunde, so werden durch die steigenden Temperaturen, die Niederschläge überwiegend in Form von Regen fallen. Als Folge dessen steigen die Grundwasserneubildungsraten aber auch der Eintrag von Nitrat in das Grundwasser an, wodurch sich die Stickstoff-Problematik weiter verschärfen wird (Berthold & Hergesell 2005, Grocholl 2011).

Fazit

Auch wenn die Wasserverfügbarkeit und die Deckung des Wasserbedarfs deutschlandweit als unkritisch zu betrachten ist, so gibt es dennoch – aufgrund der unregelmäßigen Verteilung – Regionen, die zukünftig vor große Herausforderungen gestellt werden. Schon heute führen länger andauernde Trockenperioden in Teilen Brandenburgs und im Osten Bayerns zur Wasserknappheit (Zebisch et al. 2005). Hinsichtlich der Folgen des Klimawandels, weisen Wasserversorger im ländlichen Raum, in Mittelgebirgsregionen und mit dezentralen Wasserversorgungsstrukturen die größten Vulnerabilitäten auf, da dort den Wasserversorgern nur eine Art der Wasserressource zur Verfügung steht und deren Ausfall nicht kompensiert werden kann. Allerdings können auch größere Wasserversorger – insbesondere durch Überflutungen nach Starkregenereignissen – betroffen werden (Bender & Jacob 2016). Deshalb ist es für alle Wasserversorger wichtig, sich intensiver als bisher mit den Folgen des Klimawandels auseinander zu setzen.

3.6 Hochwasserrisiko

Die Hauptauslöser für Überschwemmungen sind extreme Niederschläge beziehungsweise in Küstennähe eine Sturmflut. Wichtige Bedingungen, die die Größe und das Ausmaß von Überschwemmungen steuern, sind a) die Entwässerungseigenschaften innerhalb des Einzugsgebietes beziehungsweise der Teileinzugsgebiete, b) das Wasserspeichervermögen des Bodens und der Deckschichten sowie c) die Vorsättigung des Bodens zu Beginn des Niederschlagsereignisses. Beispielsweise war das Donau- und Elbe-Hochwasser 2013 in Deutschland das Ergebnis großer flächenhafter Niederschlagsmengen (mehr als 50 mm in vier Tagen), die auf wassergesättigte Böden fielen.

Verantwortlich für die Häufigkeit von Hochwasserereignissen sind Landnutzungsänderungen im Einzugsgebiet, Hochwasserschutzmaßnahmen beziehungsweise der Bau von Talsperren und Stauseen. Allerdings ist es nicht immer möglich, die Effekte einzelner Maßnahmen in Bezug auf Häufigkeit und Ausmaß von Ereignissen zu quantifizieren (Merz et al. 2012). Längere Messreihen und Aufzeichnungen historischer Hochwasserereignisse verdeutlichen, dass es schon immer Phasen mit größerer und kleinerer Hochwasserhäufigkeit gab (Sturm et al. 2001). Diese natürliche Variabilität erschwert die Zuordnung, inwieweit der Klimawandel das Auftreten von Hochwasserereignissen beeinflusst. Bei der Auswertung der Daten muss vor allem die Interpretation der extremen Abflussmengen mit Sorgfalt durchgeführt werden, da eine hydro-dynamische Dämpfung infolge der Überströmung von Deichen auftritt (Görgen et al. 2010). Dies mag ein Grund dafür sein, dass Aussagen über hydrologische Extremereignisse oft widersprüchlich sind (Petry 2009).

Untersuchungen zu den Veränderungen von Hochwasserabflüssen in Deutschland zeigen für den Zeitraum 1951 – 2002 an einem Drittel der Messpunkte in West- und Süddeutschland eine Erhöhung der jährlichen Maximalwerte (Petrow & Merz 2009). Diese Ergebnisse werden durch AK KLIWA (2011) bestätigt. Ihre Analyse für den Zeitraum 1932 – 2010 zeigt für Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz ebenfalls eine lokal steigende Tendenz für den Winter, beziehungsweise einen moderaten Anstieg für den Sommer. Auffallend ist hierbei, dass sich in vielen Flussgebieten die Hochwasserabflussmenge nach dem Jahr 2000 verändert hat.

Obwohl ein leichter Anstieg des Wintermaximums für den Rhein in Nordrhein-Westfalen zu beobachten ist, zeigt sich kein eindeutiger Trend für mittlere und kleinere Hochwasserereignisse (Köppke & Sterger 2011).

Aus den verfügbaren Beobachtungsdaten für das Donauegebiet lässt sich kein Trend für einen veränderten Hochwasserabfluss ableiten (AK KLIWA 2002, RZD 1986, Köppke & Sterger 2011). Jedoch zeigt sich an den meisten Messstellen für die letzten Jahre eine Tendenz für ein häufigeres Auftreten von Hochwasser (Scherzer et al. 2010).

Zukünftig wird sich wegen der mildereren Winter ein Rückhalt von Wasser in Form von Schnee verringern. Dies bedeutet, dass der Niederschlag sofort als Abfluss zur Verfügung steht, was die Hochwassersituation im Winter in Rheinland-Pfalz, Hessen und Nordrhein-Westfalen verschärfen könnte (Krahe et al. 2004). Dafür wird sich das Hochwasserrisiko im Frühjahr vermindern, da der Schneeschmelze ein geringeres Schneevolumen zur Verfügung steht.

Allerdings gibt es keine verlässlichen Aussagen über Art, Intensität und Auswirkungen künftiger Hochwasserereignisse in der nahen Zukunft (Köppke & Sterger 2011, Görgen et al. 2010, CHR, 2010).

Für die ferne Zukunft zeigen die Projektionen für das Rheineinzugsgebiet (Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz, Hessen und Nordrhein-Westfalen) einen Anstieg der Häufigkeit und Höhe der Spitzenabflussmengen (Görgen et al. 2010, CHR, 2010, Te Linde et al. 2012). In Baden-Württemberg und Sachsen-Anhalt wird eine Zunahme der kleineren und mittleren Hochwasserereignisse projiziert (Kropp et al. 2009, Köppke & Sterger 2011). Für Sachsen-Anhalt gibt es ein robustes Klimasignal, das einen Anstieg der Häufigkeit von kleinen und mittleren Winterhochwässern zeigt. Allerdings können keine Aussagen für extreme Hochwasserereignisse getroffen werden (Kropp et al. 2009). Für das Donaugebiet lässt sich dagegen keine zukünftige Entwicklung von Hochwasserereignissen ableiten (GLOWA-Danube 2009).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass Abflusscharakteristika von Flusssystemen je nach den örtlichen Gegebenheiten und der Größe der verschiedenen Einflussfaktoren sehr individuell reagieren. Neben den Folgen des Klimawandels gibt es noch viele andere Antriebskräfte, die die Hochwasserhäufigkeit steuern. Dennoch lässt sich aus den verwendeten Klimaprojektionen eine Zunahme von Winterhochwasser ableiten (Lehner et al. 2001, Schönwiese et al. 2006).

3.7 Schneebedingungen in Bergregionen

Die Alpen sind besonders anfällig für die Folgen des Klimawandels. Der projizierte Anstieg der Temperatur wird zu einer Abnahme der Schneedecke in niedrigen Lagen sowie dem Abschmelzen der Gletscher und Permafrostgebiete in höheren Lagen führen (GLOWA-Danube 2009, Agrawala 2007). Es wird damit gerechnet, dass die Schneebedeckung in den mittleren Lagen um mehrere Wochen abnehmen wird (Martin & Etchevers 2005). Zusätzlich wird die Schneegrenze bis 2050 um 200m ansteigen (Kajfez-Bogata 2007). Diese Veränderungen werden direkt die alpennahen Abflüsse im Einzugsgebiet von Rhein und Donau beeinflussen. Sommerabflüsse werden ab-, Winterabflüsse zunehmen.

Basierend auf den Projektionen werden die Gletscher im südlichen Teil des Einzugsgebietes der Oberen Donau bis zur Periode 2035 – 2045 fast vollständig verschwunden sein. Allerdings zeigen Simulationen, dass die im Gletscher gespeicherte Wassermenge für die Wasserführung der Donau keine entscheidende Rolle spielt (GLOWA-Danube 2009).

Für andere Bergregionen, wie dem Schwarzwald oder dem Bayerischen Wald, zeigen die Projektionen ebenfalls, dass sich die Schneedecke dort in Zukunft verringern wird (AK KLIWA 2012).

4. Empfehlungen

4.1 Allgemeines

Die Folgen des Klimawandels werden den Wasserkreislauf und somit alle terrestrischen Wassersysteme in vielfältiger Weise beeinflussen. Ungeachtet aller Maßnahmen zum Klimaschutz werden immer noch große Mengen an Treibhausgasen emittiert. Somit werden klimatische Veränderungen unausweichlich sein, an die es sich anzupassen gilt. Ziel der Anpassung ist es einerseits die Folgen abzuschwächen und Schäden zu vermindern sowie andererseits, mögliche Vorteile zu nutzen.

Die Abschätzung der Folgen des Klimawandels ist allerdings nur dann zielführend, wenn alle relevanten Auswirkungen und Nebeneffekte erfasst werden (Laaser et al. 2009). Dasselbe gilt auch für die Wechselwirkungen zwischen Klimaschutz- und Anpassungsmaßnahmen, die es ebenfalls zu berücksichtigen gilt. Aber nicht nur die Maßnahme an sich, sondern auch die Governance-Strukturen und die Entscheidungsprozesse, die der Umsetzung zugrunde liegen, spielen eine wichtige Rolle (Adger et al. 2005). So ist eine der Grundvoraussetzungen bei der Planung und Umsetzung integrativer Ansätze, eine gemeinsame Sprache, in der alle wichtigen Arbeitsparameter klar definiert sind. Wie unterschiedlich einzelne Begriffe, Schwellenwerte und Indices definiert sind, ist beispielsweise bei Bender & Schaller (2014) dokumentiert.

Ein häufig verwendeter Ansatz bei der Suche nach der „richtigen“ Anpassungsmethode ist die Suche nach "good practice" oder "best-practice" Beispielen. Allerdings zeigt die Erfahrung, dass es keinen ultimativen Lösungsansatz beziehungsweise kein Universalkonzept gibt, da die jeweiligen Anpassungsmaßnahmen stark von den ortsspezifischen Verhältnissen geprägt werden. Darüber hinaus basieren die „best-practice“-Studien meistens auf sehr gut geförderten Forschungsprojekten, die über ausreichend Personal und genügend finanzielle Mittel für die Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen verfügen. Folglich ist für eine gleichartige Umsetzung auch ein ähnlich großer Aufwand hinsichtlich personeller und finanzieller Ressourcen notwendig, um den gesamten Prozess kopieren beziehungsweise transferieren zu können (vorausgesetzt alle Rahmenbedingungen sind gleich). Dies ist in der Praxis aber so gut wie nie gegeben.

Die Bewertung von Anpassungsmaßnahmen erfolgt basierend auf folgenden allgemeinen Kriterien: a) Wirksamkeit der Maßnahmen, b) auftretende Nebeneffekte (No-Regret-Maßnahmen), c) Kosten und Nutzen, d) maßgebliche Rahmenbedingungen und e) Definition verwendeter Begrifflichkeiten.

Ein weiteres Problem bei der Umsetzung von Anpassungs- wie auch Klimaschutzmaßnahmen ist die Tatsache, dass viele theoretische Ansätze in der Praxis nicht umzusetzen sind, da die Maßnahmen nicht von der lokalen Politik getragen werden, administrative Zuständigkeiten ungeklärt sind, nicht-wissenschaftliche Wechselwirkungen bei der Planung nicht berücksichtigt wurden oder aber ein „Kümmerer“ fehlt, der den allgemeinen Fortschritt überwacht und gegebenenfalls neue Impulse setzt.

4.1.1 Verringerung der Flusserwärmung

Die Stromerzeugung und viele Produktionsprozesse erfordern einen zuverlässigen Zugriff auf große Mengen Wasser, zumeist Flusswasser. Generell wird hierbei der größte Anteil für Kühlprozesse verwendet. Alle im Gebrauch befindlichen Kühlsysteme haben – ohne Ausnahme – direkte Auswirkungen auf die Umwelt. Für offene Durchlaufsysteme wird kaltes Wasser aus einem natürlichen Wasserkörper entnommen und warmes Wasser nach Durchlaufen des Systems zurückgeleitet. Eine viel diskutierte Option, um die Wirkung des Warmwassereintrags in die Flüsse aus der Industrie zu minimieren, ist die Verwendung von Kühltürmen. Die Trockenkühlung erzielt hierbei deutliche Wassereinsparungen, allerdings werden relativ niedrige Umgebungstemperaturen für die Kondensationsprozesse benötigt. Dieses Kriterium ist im Sommer, wenn die meiste Kühlung gebraucht wird, jedoch nicht erfüllt. Eine Folge ist, dass Trockenkühlsysteme während der heißesten Tage des Jahres 10 – 15% weniger Energie produzieren. Die Option, Nasskühltürme einzusetzen, hat mehrere kosten- und energieeffizienzbedingten Nachteile, wie beispielsweise hohe Kapitalkosten sowie eine potenziell reduzierte Stromerzeugungskapazität an heißen Tagen (Bushart 2014).

Gangbare Alternativen sind der Einsatz behandelten Abwasser aus umliegenden Städten, Industrieanlagen oder Kohlebergwerken (Sieber 2013) oder die Verwendung alternativer Kühltürme und Technologien (Ott & Richter 2008, de Bruin et al. 2009). Zusätzlich müssen alle Maßnahmen von einer stärkeren Regulierung in Bezug auf kritische Wassertemperaturen begleitet werden, da die Überschreitung der Grenzwerte zu irreversiblen Schäden in den betroffenen Lebensräumen führen kann (Scherzer et al. 2010).

4.1.2 Wassereinsparung in der Landwirtschaft

Regionale Klimaprojektionen für Europa zeigen eine Zunahme meteorologischer Dürren („medium confidence“) (Kovats et al. 2014). In Folge dessen wird sich in vielen Regionen der Bewässerungsbedarf erhöhen. Allerdings wird die Bewässerung, insbesondere in den heißen Sommermonaten, durch eine Minderung der zur Verfügung stehenden Wasserressourcen und dem steigenden Bedarf in konkurrierenden Sektoren wie Energie und Naturschutz sowie in den Städten, eingeschränkt sein.

Wasser ist ein limitierender Faktor für viele landwirtschaftliche Betriebsabläufe. Es wird prognostiziert, dass der Wasserbedarf in der Landwirtschaft auch dort wachsen wird, wo bisher noch keine Bewässerung stattgefunden hat (Verband der Landwirtschaftskammern 2010). Aktuell und auch in der Zukunft wird das Wasser nicht in allen Regionen zu gleichen Maßen zur Verfügung stehen. Daher ist eine effiziente Nutzung, wie etwa der Umstieg zur Mikrobewässerung oder der Einsatz neuer Techniken zur Landbewirtschaftung, wie konservierende Bodenbearbeitung oder „Strip-Till-Methode“, empfohlen (Grocholl 2011, Chen & Weil 2010, Pinnekamp et al. 2008, Hermann & Claupein 2008, Gustmann et al. 2008, Küchler 2005). Nach AnKlig (2010) wird für einige Regionen erwartet, dass eine feste Installation von Bewässerungssystemen erforderlich sein wird. Für Bayern empfiehlt das Bayerische Landesamt für Umwelt für wasserarme Gebiete die Verwendung von Grundwasser minderer Qualität (Göttle 2008). Die Auswahl hitze- und trockenheitsresistenter

Kulturen kann ebenfalls einen wichtigen Teil zum „Verdunstungs-Management“ beitragen, insbesondere dort, wo der Ackerbau über Regenbewässerung erfolgt. Pflanzenzüchtung und die Entwicklung resistenter Sorten bildet eine weitere mögliche Option.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass zukünftig für die Landwirtschaft weniger Wasser für die Bewässerung zur Verfügung stehen wird. Somit sind effiziente Herangehensweisen gefragt, um das vorhandene Wasser möglichst lange im System halten zu können. Dazu müssen z.B. bestehende Managementtechniken optimiert werden. Auch die Züchtung widerstandsfähiger Nutzpflanzen kann dazu ein Beitrag sein. Zusätzlich sollte man versuchen, neue Wasserressourcen (z.B. gereinigtes Abwasser) zu nutzen. Wie bei allen Anpassungsmaßnahmen gilt aber auch hier, dass es keine Universallösung gibt, die überall eine hohe Effizienz aufweist. Vielmehr müssen Maßnahmen auf die lokalen Verhältnisse, Bedarfe und konkurrierenden Nutzungen zugeschnitten werden. Ausgangspunkt dazu kann ein Integriertes Wasserressourcenmanagement (IWRM) bzw. Flusseinzugsgebiet Management („Watershed Management“) sein, das jedoch auch über Ländergrenzen hinweg umgesetzt werden muss.

4.1.3 Die Wasserversorgung der Zukunft

Durch den Klimawandel wird sich die Wasserverfügbarkeit bei der Flusswasserentnahme und von Grundwasserressourcen verringern („medium confidence“) (Kovats et al. 2014). Trotzdem wird in Deutschland für die Wasserwirtschaft keine grundlegende Neuausrichtung erforderlich sein. Schon in der Vergangenheit haben Trinkwasserversorger gezeigt, dass sie mit kritischen Situationen (z.B. Trockenperioden oder Niedrigwasser in Flüssen) umgehen können und dass die Aufrechterhaltung zentraler Funktionen der Wasserversorgung gewährleistet bleibt beziehungsweise Störungen in der Infrastruktur relativ schnell zu beheben sind (WVGW 2011).

Schon heute ist eine große Herausforderung für jeden Wasserversorger, wie Bedarfsspitzen gedeckt werden können. Diese Problematik wird sich durch den Klimawandel noch weiter verschärfen. Schon heute wird deshalb die Notwendigkeit diskutiert, ob nicht die Wasserentnahme per Gesetz neu reguliert werden sollte, damit Lastspitzen jederzeit abgedeckt werden können. Um Nachteile für konkurrierende Nutzungen so klein wie möglich zu halten oder um die Aufrechterhaltung von Mindestabflussmenge in Fließgewässern sicherzustellen, könnte solch ein Schritt nur im Rahmen eines integrierten Wasserressourcenmanagement erfolgen. Als ein weiterer wichtiger Bedarf wird die Verlängerung der zeitlichen Festsetzung der Wasserrechte angesehen, da 30 Jahre zur Kalkulation von Großinvestitionen nicht ausreichen. In diesem Fall bewegt man sich dann allerdings in Zeitspannen, in denen man die Folgen des Klimawandels nicht mehr ignorieren kann. Folglich ist es dringend erforderlich über klimawandeltaugliche Wasserversorgungsstrukturen nachzudenken, was bisher – wenn überhaupt – nur ansatzweise auf der Agenda der Wasserwirtschaft steht. Deutlich weiter ist man in einigen Regionen Deutschlands bei der nachhaltigen Nutzung von Wasserressourcen, was allerdings auch als Anpassungsmaßnahmen gesehen werden kann, vor allem dort wo Wasser in Zukunft knapper werden wird (siehe Box 6).

Kleinere lokale Wasserversorger müssen sich aufgrund zukünftiger Herausforderungen darüber Gedanken machen, wie sie es schaffen können, stets ausreichend Entnahmemengen, Aufbereitungskapazität und Reservekapazität bereitstellen zu können. Dazu werden in vielen Fällen flexiblere Wasserverteilungssysteme, wie beispielsweise größere Verbundsysteme, von Nöten sein. Allerdings sollte die Nutzung der Wasserressourcen, abgesehen von den Kosten, in allen Teilen des Netzwerks nachhaltig erfolgen. Außerdem gilt es bei der Planung schon im Vorfeld zu berücksichtigen, dass zur Sicherstellung einer allzeit guten Wasserqualität täglich eine Rohrdurchspülung erfolgen muss, was lokal dazu führen kann, dass die dafür verwendete Wassermenge den Wasserbedarf in den Versorgungsgebieten übersteigt (AnKliG 2010).

Box 6: Nachhaltiger Wasserkreislauf in der Region Berlin und Brandenburg

Südlich von Berlin wird behandeltes Abwasser über Gräben und Kanäle im Oberstrom von Berlin in den Fluss Dahme geleitet. Aus dem Flusswasser wird über Uferfiltration wieder Trinkwasser gewonnen. Zusätzlich sorgt das Wasser, das auf seinem Weg durch Gras- und Sumpfland fließt, für eine Verbesserung der dortigen hydrologischen Situation. Die Nutzung von Oberflächenwasser zur Trinkwasserversorgung und das Einleiten von gereinigtem Abwasser in die Flussläufe werden auch als semi-geschlossener Wasserkreislauf bezeichnet. Es wird erwartet, dass das kontrollierte Einleiten gereinigten Abwassers für die Region Berlin und Brandenburg im Hinblick auf die Folgen des Klimawandels noch an Bedeutung zunehmen wird (Laaser et al. 2009).

4.1.4 Vorausschauende, nachhaltige Managementstrategien

Eine Kombination aus Wasserspeicherung und Einsparmaßnahmen ist eine der praxistauglichsten, sofortwirkenden und kostengünstigen Möglichkeiten auf klimabedingte Wasserknappheit zu reagieren. Derzeit werden Dämme, Stauseen und natürliche Feuchtgebiete als Retentionsräume verwendet und dienen somit dem Hochwasserschutz. Dagegen ist die Aufrechterhaltung von Mindestabflussmengen, die für viele Ökosysteme lebensnotwendig sind, eine weitaus schwierigere Herausforderung. Um ihr zu begegnen, muss eine Reservoir-Managementstrategie entwickelt werden, die auf lokaler und regionaler Ebene arbeitet und durch künstliche Grundwasseranreicherung, Wassertransfer oder eine Steigerung der Effizienz der Wassernutzung begleitet wird (Kropp et al. 2009).

Ausgehend vom Standpunkt der Bewirtschaftung ist ein ganzheitlicher Ansatz unter Einbeziehung aller Wassernutzungen angeraten. Die Bewirtschaftung der Wasserressourcen sollte zunächst auf die Unterstützung der Systemdynamik abzielen. Allerdings muss schon frühzeitig auf die projizierten Veränderungen reagiert werden, da Eingriffe in den Wasserkreislauf erst mit einer zum Teil erheblichen zeitlichen Verzögerung von mehreren Jahren bis Jahrhunderten zum Tragen kommen. Nicht nur für aquatische Ökosysteme, sondern bei allen zukünftigen wasserrelevanten Fragestellungen können auf lange Sicht nur integrierte Maßnahmen helfen, um grundwasserabhängige Prozesse und System zu unterstützen (Haase et al. 2012, Steinel et al. 2012).

4.1.5 Auf Hochwasser vorbereitet sein

Der Meeresspiegelanstieg und die Zunahme von Extremniederschlägen werden das Risiko von Küsten- und Flusshochwasser in Europa erhöhen („high confidence“) (Kovats et al. 2014). Die Hochwasser an Donau und Elbe im Juni 2013 haben gezeigt, dass es nicht ausreicht, sich ausschließlich auf die Dämme für den Hochwasserschutz zu verlassen. Ein vielversprechender und kostengünstiger Ansatz ist es die Kapazität der Rückhalteflächen zu erhöhen. Dies kann durch die Reaktivierung von Überschwemmungsflächen wie Auen und Altarme, durch den Bau neuer Rückhaltebecken oder durch die Erhöhung der Infiltrationskapazität des Oberbodens durch angepasste Landnutzung erreicht werden. Allerdings gibt es für fast alle Maßnahmen, die in einem Flusssystem entwickelt oder umgesetzt werden, stets ein hohes Konfliktpotential zwischen lokalen Interessen und einem gebietsweiten Wassermanagement (Te Linde et al. 2012).

Eine weitere Maßnahme, die jedoch von vielen Gemeinden kritisch gesehen wird, ist die Beschränkung beziehungsweise das Verbot der Bebauung in Risikogebieten. Vor allem die Reaktivierung ehemaliger Überschwemmungsflächen ist mehr als nur Hochwasserschutz. Nach ökologischen Gesichtspunkten entsteht eine Win-Win-Situation, da dadurch die Voraussetzungen für die Entwicklung von Feuchtbiotopen, Buschland und Auenwälder geschaffen werden.

Urbane Überflutungen haben eine andere Dimension als die Ausuferung von Fließgewässern, dennoch sind die Herausforderungen dieselben. Jeder Abwasserkanal hat eine begrenzte Kapazität zur Wasserableitung. Das Regenwasservolumen, das sich ansammeln kann, ist dagegen praktisch unbegrenzt. Wenn das System nicht mehr in der Lage ist, Wasser aufzunehmen, läuft es über, was auch zu Verschmutzungen führen kann, wenn Abwasser mitenthalten ist. Bemühungen, die Bodeninfiltration zu erhöhen und temporäre Retentionsräume in Städten zu schaffen, sind Anpassungsmaßnahmen, die in Zukunft noch an Bedeutung gewinnen werden. Mögliche Maßnahmen umfassen den Regenrückhalt in Parkanlagen oder auf Sportplätzen, die Entsiegelung von Parkplätzen (einschließlich der Verwendung von „Mulden-Rigolen-Systemen“), sowie den Ausbaus von Bioretentions-Zellen, begrünten Mulden oder Gründächern. Alle Maßnahmen müssen auf die jeweilige Situation vor Ort zugeschnitten werden. Darüber hinaus sollte auch stets kommuniziert werden, dass man nie in der Lage sein wird, das Auftreten von Überschwemmungen in städtischen Gebieten komplett zu verhindern.

Die Hochwasservorsorge steht im Spannungsfeld zwischen staatlicher Vorsorge und eigenverantwortlichem Handeln des Bürgers (LAWA 1995). Da Eigenverantwortung aber nur dort greifen kann, wo der Bürger die Zusammenhänge verstanden hat, gilt es das eigenverantwortliche Handeln zu stärken. Dies kann durch Veranstaltungen wie Diskussionsforen, durch die Verteilung leicht verständlicher Broschüren oder durch andere informierende Produkte und Dienstleistungen angeregt und gestärkt werden. Im Rahmen der „Risikovorsorge“ können auch Abschlüsse von Elementarversicherungen ein Anreiz sein, um die wirtschaftlichen Auswirkungen wasserbezogener Katastrophen auszugleichen.

4.2 Bedarf für Monitoring und freien Zugang zu Daten

Die größten Herausforderungen für den Wassersektor sind der demografische Wandel, Änderungen der Flächennutzung, adaptive Kosten von Ökosystemdienstleistungen und der Klimawandel. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, sind noch mehr Informationen, als aktuell zugänglich, notwendig. So gibt es eine steigende Nachfrage nach regionalen Informationen, die von Rohdaten bis zu regionalen oder lokalen "Hot Spot"-Karten, zum Beispiel für die Bewässerung, reichen. Auch der Wissenstransfer ist wichtig, um Stressindikatoren oder Sensitivitätsparameter zu identifizieren. Unter anderem müssen folgende Fragen beantwortet werden: Was geschieht nach einer langanhaltenden Trockenperiode? Wie wird Deutschland davon betroffen? Was ist kostengünstiger: Anpassung oder nichts tun? Antworten auf diese Fragen oder Abschätzungen der zukünftigen Anforderungen sind mit Ungewissheiten verbunden, die als Hindernisse beispielsweise für Vermögensanlagen oder bei administrativen Prozessen wahrgenommen werden.

Um bessere Entscheidungen für die Zukunft treffen zu können, werden von Seiten der Datennutzer kleinere Ergebnisbandbreiten gewünscht. Deren Verringerung ist bezogen auf die Komponente „Auswirkungen des Klimawandel“ aber nur dann (wenn überhaupt) möglich, wenn das Systemverständnis in Bezug auf die Modellierung des Einflusses von Wetter- und Klimaveränderungen auf den Wasserkreislauf weiter verbessert wird. Dennoch bleibt immer die Ungewissheit, wie sich unsere Zukunft wirtschaftlich und ökologisch gesehen entwickeln wird. Insbesondere bei der Nutzung von Klimaprojektionen – hier im Rahmen der Planung von Anpassungsmaßnahmen und des Risikomanagements – ist es dabei besonders wichtig, immer ein möglichst großes Ensemble von Modellsimulationen zu verwenden, da einzelne Projektionen nicht repräsentativ sind und die daraus ableitbaren Trends irreführend sein können (Bender & Jacob 2016).

Darüber hinaus existiert ein großer Bedarf von Seiten der Wissenschaft nach verbesserten und intensivierten Monitoringmethoden mit Bezug auf Wasser in terrestrischen Systemen, insbesondere für klimasensible Parameter. Die Basis zur Bewertung, Kalibrierung und Optimierung von Klima- und Wirkmodellen sowie zum Erkennen räumlicher und zeitlicher Trends bilden lange Zeitreihen verschiedener Beobachtungsdaten. Beobachtungen und beobachtete Trends sind Grundvoraussetzung für ein adaptives Management. Allerdings gibt es aktuell bei vielen Beobachtungsprogrammen, vor allem von öffentlicher Seite, Einsparungen, die den Messaufwand und die Aufrechterhaltung von Monitoring-Standorten betreffen. Somit geht diese Arbeit auf Firmen oder Forschergruppen über. Dies wirft jedoch die Fragen auf: Wer ist der Eigentümer der Monitoring-Daten? Wer sind die Verantwortlichen? Wo finde ich Informationen und sind die Daten kostenlos? Die beste Lösung wären frei zugängliche Datenbanken oder Portale, bei denen man verschiedene Datensätze abrufen kann. Erste Ansätze dazu gibt es in den Niederlanden und Dänemark.

Weiterhin besteht ein Bedarf a) die Standards für Speicherung und den Zugriff zu definieren, b) die Datenspeicherung zu unterstützen, c) die Datenverfügbarkeit zu verbessern und d) die Bemühungen hinsichtlich eines guten Monitorings aufrechtzuerhalten und zu optimieren. Anfang 2014 wurde eine Arbeitsgruppe von der "Allianz der Forschungseinrichtungen" ins

Leben gerufen, um das Potenzial für die Einrichtung einer deutschlandweiten, fächerübergreifenden Forschungsinfrastruktur mit dem Fokus „Terrestrische Systeme“ zu untersuchen. Die Schwerpunkte der Initiative liegen in der Vernetzung von Monitoringmaßnahmen von Behördenseite und der Wissenschaftscommunity sowie im Zugang zu Umweltdaten. Die Aktivitäten dieser Arbeitsgruppe basieren auf dem DFG-Strategiepapier vom Januar 2013: „Langzeitperspektiven und Infrastruktur terrestrischer Forschung Deutschlands – ein systemischer Ansatz“.

4.3 Identifikation und Förderung von No-Regret-Maßnahmen

Ein wichtiger Aspekt für die Planung von Anpassungsstrategien ist die Förderung von Maßnahmen, von denen man unabhängig von den Folgen des Klimawandels profitiert – die so genannten No-Regret Maßnahmen. Obwohl das Bewerben dieser Maßnahmen zur Anpassung einen erheblichen Mehrwert darstellt, einschließlich der Diskussion über die Kosten des Klimawandels, sind sie jedoch kein Ersatz für Risiko- und Gefährdungsbetrachtungen (Martin 2012). No-Regret-Maßnahmen müssen – wie alle Anpassungsmaßnahmen – auf den jeweiligen Einsatz und auf die ortsspezifischen Aspekte zugeschnitten werden. Die Machbarkeit der Umsetzung muss vor dem Hintergrund bestehender Hindernisse und möglicher Konflikte betrachtet werden. Aus diesem Grund gibt es keine allgemeine Liste von Aktivitäten, die überall durchführbar sind. Viele Aktivitäten, wie die Modernisierung alter Regenwassermanagement-Systeme auf den heutigen Stand der Technik, die Kontrolle von Leckagen in Wasserleitungen oder die Wartung und Instandhaltung von Entwässerungsrinnen, werden aus Sicht der Kosten-Nutzen-Analyse, auch ohne Berücksichtigung des Klimawandels, fast immer als gute Investition angesehen. So kann beispielsweise der Aufbau einer zusätzlichen Bewässerungsinfrastruktur eine No-Regret-Maßnahme in Regionen darstellen, die bereits heute mit Wasserknappheit konfrontiert sind. In anderen Gebieten könnte sie aufgrund der hohen Investitionskosten nur dann sinnvoll sein, wenn der Klimawandel tatsächlich zu einem Rückgang der Niederschläge führt (UKCIP 2005).

4.4 Verstärkte Nutzung risikobasierter Ansätze

Ein risikobasierter Ansatz sollte flexibel, dynamisch und zukunftsorientiert sein, um beispielsweise extremen Wasserbedingungen auch in Ermangelung präziser Klimaprojektionen angemessen begegnen zu können. Dabei sollte auch klar kommuniziert werden, dass ein „null-Risiko“ auf keinen Fall garantiert werden kann und dass die Verringerung oder Vermeidung von Risiken stets mit Kosten verbunden ist.

Bei der Planung und Umsetzung von Maßnahmen sollten diese niemals isolierte Aktionen darstellen, sondern in einem größeren Kontext stehen. Zudem darf der Klimawandel nicht als ausschließlicher Risikotreiber betrachtet werden, da sozio-ökonomische Trends, Naturphänomene, schlechtes Management, Landnutzungsänderungen oder andere

Aktivitäten weitere Antriebskräfte sein können, die oftmals die dominanteren Größen darstellen.

Bei allen Planungen gilt es auch darauf zu achten, dass Bemühungen, negative Auswirkungen für eine Nutzergruppe – beispielsweise Landwirte – zu mindern, die Situation für andere Gruppen (Wasserversorger) oder Systeme (Süßwasser-Ökosysteme) verschlechtern kann. Eine Gewichtung dieser Zielkonflikte und Risikotransfers kann dazu beitragen, „Win-Win-Strategien“ zu identifizieren und Ineffizienz und Ungerechtigkeiten beim Management des Wasserrisikos zu reduzieren (OECD 2013). Allerdings ist die Ermittlung der Akzeptanz und Erträglichkeit eines bestimmten Risikos einer der schwierigsten und umstrittensten Aspekte des risikobasierten Ansatzes (Klinke & Renn 2012).

Die Akzeptanz der Folgen des Klimawandels und der damit verbundenen Verluste spiegelt das vorhandene Bewusstsein wider, dass spezifische Maßnahmen erforderlich sind, um eine identifizierte Risikostufe zu unterschreiten. Dies kann auch die Annahme miteinbeziehen, dass es sich bei einigen betroffenen Vermögenswerten nicht lohnt, beziehungsweise nicht lohnen würde, sie angesichts der Klimarisiken zu erhalten und dass Alternativen berücksichtigt werden sollten (UKCIP 2005). Im Vorfeld dieser Entscheidung ist es notwendig, die vertretbaren Schäden zu definieren.

4.5 Gestaltung flexibler Infrastrukturen

Alle Sektoren mit Bezug zu Infrastrukturen müssen sich der Frage stellen, ob letztere auch in Zukunft sicher sind. Da sämtliche Annahmen auf den Veränderungen der letzten 30 bis 50 Jahre beruhen, muss untersucht werden, ob sich die derzeitigen Trends auch in Zukunft fortsetzen oder verändern werden. Im Hinblick auf Anpassungsstrategien, die die Ergebnisbandbreiten der Zukunftsszenarien in ihre Betrachtung miteinbeziehen, gibt es deshalb einen großen Bedarf für flexible Lösungsansätze. Diese erlauben es den Akteuren, frühzeitig auf spezifische Situationen zu reagieren, und sie bieten Raum für Erweiterungen, um zukünftigen Veränderungen entgegenzutreten zu können.

Flexible Handlungsoptionen werden durch eine Beurteilung dessen eingeführt, was heutzutage als sinnvoll erachtet wird. Allerdings sind sie so konzipiert, dass sie inkrementelle Änderungen, einschließlich neuer Vorgehensweisen, neuen Wissens und neuer Technologien, berücksichtigen können (UKCIP 2005). Um eine solche flexible Struktur zu implementieren, sind jedoch Schulungen erforderlich, um zu zeigen, wie man mit der ungewissen Zukunft umgehen muss. Zudem ist das Grundverständnis notwendig, um die passenden Maßnahmen auswählen und den richtigen Prozess starten zu können.

Entscheidungsträger, sowohl in der Wirtschaft als auch in der Verwaltung, werden sich mit dem Gedanken anfreunden müssen, dass klimawandelbezogene Fragestellungen nur mit Hilfe von Risikomanagementkonzepten zu beantworten sind. Der Einsatz von ausschließlich No-Regret-Strategien kann dies dagegen nicht leisten.

Da Organisationsstrukturen und Managementprozesse in der Lage sein müssen, alle Krisen bewältigen zu können, braucht das Design der gesamten Infrastruktur eine hohe Flexibilität und ausreichend Pufferkapazitäten zur Bewältigung erwarteter und unerwarteter Situationen.

4.6 Verbesserung der Steuerungskompetenz für Anpassungsmaßnahmen

Der Begriff „Governance“ bezieht sich auf die Art und Weise, wie sich Akteure über verschiedene Ebenen hinweg – von der lokalen bis zur internationalen – gegenseitig beeinflussen und wie dieses Zusammenspiel durch verschiedene Regelsätze gelenkt wird, sei es formell (z. B. durch das Wasserrecht) oder informell (z.B. durch soziale Normen).

„Adaptive Governance“ ist ein kontinuierlicher Problemlösungsprozess, der neuartige Interaktionsformen an der Schnittstelle Wissenschaft-Politik-Gesellschaft beinhaltet. Hierbei geht es um einen Prozess, der mit Ergebnisvarianzen und Veränderungen umgehen kann, da er das Lernen durch Partizipation und praktische Erfahrung ermöglicht (Munaretto et al. 2012). Im Zusammenhang mit dem Klimawandel wird die Wasser-Governance zunehmend mit Ergebnisunschärfen konfrontiert, die kurzfristig nicht zu reduzieren sind (zum Beispiel Ungewissheiten bei der Projektion von Niederschlägen, des Abflussverhaltens oder der Intensität und Häufigkeit von Extremereignissen) und mit politischen Entscheidungen, die so lange nicht verändert werden, bis besseres Wissen zur Verfügung steht (Twin2Go 2011). Die Ungewissheit wird durch gemeinsam definierte und neu zu definierende Probleme und Lösungen im politischen Entscheidungsprozess reduziert, da dadurch dort neues Wissen generiert wird.

Viele aktuelle Probleme bei der Bewirtschaftung der Wasserressourcen kann dem Versagen der Governance und nicht der Ressource an sich zugeschrieben werden. Wasser-Governance bezieht sich hierbei auf das gesamte Spektrum von politischen, sozialen, wirtschaftlichen und administrativen Systemen, die sich vor Ort um die Entwicklung und Bewirtschaftung der Wasserressourcen und die Bereitstellung von Wasserdienstleistungen auf verschiedenen Gesellschaftsebenen kümmern (Twin2Go 2011). Die Folgen des Klimawandels werden voraussichtlich die Bewirtschaftung der Wasserressourcen weiter verkomplizieren. Viele fortlaufende internationale politische Prozesse liefern weitere Rahmenbedingungen und Möglichkeiten, eine Steuerungskompetenz von Anpassungsmaßnahmen zu erhöhen, wie etwa die Formulierung der Bewirtschaftungspläne für die Flusseinzugsgebiete im Rahmen der EU-Wasserrahmenrichtlinie.

Die Einbindung von Interessengruppen ist ein wesentliches Element des Anpassungsmanagements. Für Wassermanager und Entscheidungsträger spielt die Machbarkeit der Umsetzung einer Anpassungsmaßnahme ebenfalls eine wichtige Rolle (Lasser et al. 2009). Zur Entscheidungsfindung werden Bottom-up-Ansätze empfohlen, da die in Netzwerken geäußerten Bedürfnisse eine gute Hilfe für Entscheidungsträger darstellen, um Mittel für die Unterstützung sinnvoller Maßnahmen zuzuweisen.

5. Zusammenfassung

- In Deutschland ist seit 1900 die mittlere Temperatur in allen Jahreszeiten angestiegen, Dieser ansteigende Temperatortrend wird sich, wie Projektionen zeigen, auch in Zukunft fortsetzen.
- Seit Beginn des 20. Jahrhunderts ist in Deutschland eine saisonale Verschiebung in Form von weniger Sommer- und mehr Winterniederschlägen zu beobachten. Dieser Trend wird sich in Zukunft weiter fortsetzen. Als Folge dessen werden sich auch das Abflussverhalten von Flüssen und der Jahresgang der Grundwasserneubildung verändern.
- In den letzten Jahrzehnten haben sich die Niedrigwasserperioden bei den meisten Flüssen verlängert und die Anzahl der Tage mit Schneebedeckung ist zurückgegangen.
- Die Ergebnisse von Klima- und Wirkmodellen sind Projektionen und keine Vorhersagen.
- Ergebnisse einzelner Klimamodellsimulationen oder aus nur einer Modellkette sind nicht repräsentativ. Es wird empfohlen ein Multiszenario zu nutzen, um repräsentative Ergebnisse zu erhalten.
- Die Folgen des Klimawandels sorgen für eine zusätzliche Belastung der Wasserfauna und –flora. Allerdings verlangen sie keine fundamentale Neuausrichtung des Wassersektors in Deutschland.
- Es gibt kein Universalkonzept, um sich dem Klimawandel anzupassen. Jeder Fall muss individuell betrachtet werden, um den regionalen Rahmenbedingungen Rechnung zu tragen.
- Die erfolgreiche Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen bedarf neben dem Grundverständnis der Gesamtproblematik auch die Anwendung flexibler Vorgehensweisen sowie ausreichender Pufferkapazitäten, um mit erwarteten und unerwarteten Situationen umgehen zu können.
- Um sich den zukünftigen Herausforderungen stellen zu können, sind für die terrestrischen Wassersysteme mehr gut aufbereitete Informationen notwendig, als zurzeit zur Verfügung stehen. Dies schließt ebenfalls die Homogenisierung von Definitionen oder von Referenz- und Projektionszeiträumen mit ein.

6. Literaturverzeichnis

Adger, W.N., Agrawala, S., Mirza, M.M.Q., Conde, C., O'Brien, K., Pulhin, J., Pulwarty, R., Smit, B. & Takahashi, K. (2007): Assessment of adaptation practices, options, constraints and capacity. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. – In: Parry, M.L., Canziani, O. F., Palutikof, J.P., van der Linden, P. J. & Hanson, C. E. [eds.]: Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 717-743.

Agrawala, S. (2007): Klimawandel in den Alpen – Anpassung des Wintertourismus und des Naturgefahrenmanagements. - OECD-Studie 2007, 7S.

AK KLIWA (2012): Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. – KLIWA-Berichte Heft 17, 112 S.

AK KLIWA (2011): Klimawandel in Süddeutschland. – Veränderungen von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen. – KLIWA-Monitoringbericht 2011, 40 S.

AK KLIWA (2008): Klimawandel in Süddeutschland - Veränderung der Kenngrößen Lufttemperatur, Niederschlag und Hochwasserabfluss. Klimamonitoring im Rahmen des Kooperationsvorhabens. – KLIWA –Monitoringbericht 2008, 24 S.

AK KLIWA (2007): Zum Einfluss des Klimas auf den Bodensee. – KLIWA-Berichte Heft 11, 99 S.

AK KLIWA (2005): Langzeitverhalten der Lufttemperatur in Baden-Württemberg und Bayern. - KLIWA-Projekt A 1.2.3: Analyse zum Langzeitverhalten von Gebietsmittelwerten der Lufttemperatur. – Technical Report, Heft 5, 76 S.

AK KLIWA (2002): Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse in Baden-Württemberg und Bayern. - KLIWA Projekt A 2.1.3. – KLIWA-Berichte, Heft 2, S.53.

AnKliG (2010): Anpassung an Klimatrends und Extremwetter. Anpassungsstrategien an Klimatrends und Extremwetter und Maßnahmen für ein nachhaltiges Grundwassermanagement. – AnKliG-Bericht, 130 S.

ARL (2009): Ergebnisse der Umfrage „Klimawandel in der Regionalplanung“ des ARL-AK „Klimawandel und Raumplanung“. – Bericht 17 S.

ATT, BDEW, DBVW, DVGW, DWA & VKU (2008): Branchenbild der deutschen Wasserwirtschaft 2008, 103 S.

Auerswald, H. & Vogt, G. (2010): Zur Klimasensibilität der Wirtschaft in der Region Dresden. – ifo Dresden berichtet 3/2010, 15-23.

Baldy, A. (2012): Untersuchung zur Anfälligkeit des Wasserhaushaltes gegenüber dem Klimawandel in der Oberlausitz. - Präs. 2. KliWES-Workshop, http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/wasser/download/6_Baldy_2012-06-28.pdf (Stand 07.08.13).

Barnett, T., Adam, J. & Lettenmaier, D. (2005): Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. – Nature, 438, 303–309, doi:10.1038/nature04141.

Bates, B., Kundzewicz, Z., Wu, S. & Palutikof, J. [eds.] (2008): Climate Change and Water. – Technical Paper VI, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Secretariat, Geneva, 210 pp.

Bender, S. & Jacob, D. (2016): Die Aussagekraft von Klimaprojektionen für zukünftige Herausforderungen der Trinkwasserversorgung in Deutschland. - gwf-Wasser /Abwasser 4/2016, 362-368.

Bender, S. & Schaller, M. (2014): Vergleichendes Lexikon – Wichtige Definitionen, Schwellenwerte und Indices aus den Bereichen Klima, Klimafolgenforschung und Naturgefahren“. – Climate Service Center, 126 S.

Bender, S., Bowyer, P. & Schaller, M. (2012): Bedarfsanalyse Klimawandel – Fragen an die Land- und Wasserwirtschaft. - CSC Report 4, 68 S.

Beniston, M., Stephenson, D. B., Christensen, O. B., Ferro, C.A.T., Frei, C., Goyette, S., Halsnaes, K., Holt, T., Jylha, K., Koffi, B., Palutikof, J., Schöll, R., Semmler, T. & Woth, K. (2007): Future extreme events in Europe climate: an exploration of regional climate model projections. – Clim. Change, 81, 71 – 95, doi:10.1007/s10584-006-9226-z.

Belz, J. U. (2010): Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert – Analyse, Veränderungen, Trends. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 54, Heft 1, 4-17.

Berg, P., Moseley, C. & Haerter, J. O. (2013): Strong increase in convective precipitation in response to higher temperatures. – Nature Geoscience, Vol.6, 181-185, DOI: 10.1038/NCEO1731.

Bernhofer, C., Goldberg, V., Franke, J., Surke, M. & Adam, J. (2008): REKLI - Sachsen-Anhalt II, Regionale Klimadiagnose für Sachsen-Anhalt. – Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, 70 S.

Berthold, G. & Hergesell, M. (2005): Flächendifferenzierte Untersuchungen zu möglichen Auswirkungen einer Klimaänderung auf die Grundwasserneubildung in Hessen. Klimafolgen in der Wasserwirtschaft (Grundwasser). – Abschlussbericht INKLIM 2012, HLUG (eds.), 16 - 21.

BfG (2006) [Bundesanstalt für Gewässerkunde, Hrsg.]: Niedrigwasserperiode 2003 in Deutschland, Ursachen-Wirkung-Folgen. – Mitteilung Nr. 27, 162-194.

BfG (2003) [Bundesanstalt für Gewässerkunde, Hrsg.]: GLOWA Elbe I, Teilaufgabe 2.3: Ballungsraum Berlin/Untere Havel. – Schlussbericht, 81-86.

BfG (2002) [Bundesanstalt für Gewässerkunde, Hrsg.]: Das Augusthochwasser 2002 im Elbgebiet. – Broschüre der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, 48 S.

BMU (2008) [ed. Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety]: Grundwasser in Deutschland. – Reihe Umweltpolitik, 72 S.].

BMVBS (2007) [Hrsg.: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung]: Schifffahrt und Wasserstraßen in Deutschland Zukunft gestalten im Zeichen des Klimawandels Bestandsaufnahme, 57 S.

Brahmer, G. (2006): Klimawandel und seine Konsequenzen für die Wasserwirtschaft in Hessen. – In: KLIWA-Heft 10, Fachvorträge beim KLIWA-Symposium am 25. und 26.10.2006 in Stuttgart, 211 – 222.

Brasseur, G.P., Jacob, D. & Schuck-Zöller, S. [Hrsg.] (2017): Klimawandel in Deutschland - Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. 368 S.

BUND (2009) [Hrsg. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland]: Wärmelast Rhein. – BUND Hintergrund, 71 S.

Bushart, S. (2014): Advanced cooling technologies for water savings at coal-fired power plants. – Coverstone, Vol. 2, 1, 52-57.

Chen, G. & Weil, R. R. (2010): Penetration of cover crop roots through compacted soils. – Plant and Soil 331: 31–43.

CHR (2010): Assessment of Climate Change Impacts on Discharge in the Rhine River Basin: Results of the RheinBlick2050 Project. – CHR report, I-23, 229 p.

Christensen, J. H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., Jones, R., Koli, R. K., Kwon, W.-T., Laprise, R., Rueda, V M., Mearns, L., Menéndez, C. G., Räisänen, J., Rinke, A., Sarr, A. & Whetton, P. (2007): Regional climate projections. - Climate Change 2007: The Physical Science Basis. – In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. & Miller, H. L. [eds.]: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of IPCC, 847-940.

Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.-L., Fichefet, T., Friedlingstein, P., Gao, X., Gutowski, W.J., Johns, T., Krinner, G., Shongwe, M., Tebaldi, C., Weaver, A.J. & Wehner, M.: (2013): Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. - In: Stocker, T.F., et al. (eds.): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contrib. of WG I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 1029 - 1136.

de Bruin, K., Dellink, R.B. & Ruijs, A. (2009): Adapting to climate change in The Netherlands: an inventory of climate adaptation options and ranking of alternatives. – *Clim. Chang.* 95:23–45, doi:10.1007/s10584-009-9576-4

Della-Marta, P. M., Haylock, M.R., Luterbacher, J. & Wanner, H. (2007): Doubled length of western European summer heat waves since 1880. – *J. Geophys. Res. Atmos.*, 112, D15103.

Dessai, S., Hulme, M., Lempert, R. & Pielke jr., R. (2009): Do We Need Better Predictions to Adapt to a Changing Climate?, – *Eos, Transactions, Vol. 90/13*, American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 111-112.

Dextrase, A.J. & Mandrak, N.E. (2006): Impacts of alien invasive species on freshwater fauna at risk in Canada. – *Biological Invasions* 8: 13-24.

Döll, P. & Flörke, M. (2005): Global-Scale Estimation of Diffuse Groundwater Recharge. – Frankfurt Hydrology Paper 03, 21 p. Institute of Physical Geography, Frankfurt University, Frankfurt am Main, Germany.

DWA (2011) [Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hrsg.]: Wirkung und Folgen möglicher Klimaänderungen auf den Grundwasserhaushalt, 143 pp, Hennef.

ENSEMBLES (2009): Climate change and its impacts at seasonal, decadal and centennial timescales. – Final report ENSEMBLES, 164 p.

Euro-limpacs (2009): Integrated Project to evaluate the Impacts of Global Change on European Freshwater Eco-systems. – Final activity report project Euro-limpacs, 164 S.

Feld, Ch. & Hering, D.: (2008): Community structure or function: effects of environmental stress on benthic macro-invertebrates at different spatial scales. – *Freshwater Biology*, Vol. 52 (7), 1380-1399.

Feldmann, H., Schädler, G., Panitz, H.-J. & Kottmeier, Ch. (2012): Near future changes of extreme precipitation over complex terrain in Central Europe derived from high resolution RCM ensemble simulations. – *Int. J. of Climatology*, DOI: 10.1002/joc.3564, (Stand 06.07.13).

Feyen, L. & Dankers, R. (2009): Impact of global warming on streamflow drought in Europe. – *J. Geophys. Res.*, 114, D17116, doi:10.1029/2008JD011438.

Fischer, E. M. & Schär, C. (2010): Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves. – *Nature Geosci.*, 3, 398–403.

Fox, D. (2007): Back to the No-analog Future? – *Science*, Vol. 316, pp. 823-825.

Franke, J., Goldberg, V. & Bernhofer, C. (2006): Risiken des regionalen Klimawandels in Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen. – *Wiss. Zeitschrift der TU Dresden* 55 S.

Froend, R.H. & Zencich, S. (2001): Phreatophytic Vegetation and Groundwater Study. Phase 1. – Report to Water Corporation of Western Australia, Report No 2001 – 12.

Gädecke, A., Koch, H., Pohle, I. & Grünewald, U. (2012): Veränderungen des Wasserhaushalts bei Nutzung unterschiedlicher regionaler Klimamodelle für ein Teileinzugsgebiet der Spree. – 2. KliWES Workshop, Dresden. http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/wasser/download/7_Gaedeke_2012-06-28.pdf

Galbraith, D., Levy, P.E., Sitch, S., Huntingford, C., Cox, P., Williams, M. & Meir, P. (2010): Multiple mechanisms of Amazonian forest biomass losses in three dynamic global vegetation models under climate change. – *New Phytologist*, Vol. 183, Nr. 3, 647-665.

Galil, B.S., Nehring, S. & Panov, V. E. (2007): Waterways as invasion highways – Impact of climate change and globalization. – In: Nentwig, W. [Hrsg.]: *Biological Invasions*, 59-74.

Gerstengarbe, F.-W., Badeck, F., Hattermann, F., Krysanova, V., Lahmer, W., Lasch, P., Stock, M., Suckow, F., Wechsung, F., Werner, P.C. (2003): Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven. Gerstengarbe, F.-W.: PIK Report, 83 Potsdam, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung.

GLOWA-Danube (2009): GLOWA-Danube Kernaussagen (http://www.glowa-danube.de/publikationen/kernaussagen/GLOWA-Danube_Kernaussagen.pdf) (Stand:06.07.13)

GLOWA-Elbe Memorandum 11.10.2009: http://www.glowa-elbe.de/pdf/glowaiiii/elbe_memorandum.pdf. (Stand 04.07.2013)

Görgen, K., Lippmann, G., Beersma, J., Brahmer, G., Buiteveld, H., Carambia, H., de Keizer, O., Krahe, P., Nilson, E., Lammersen, R., Perrin, C. & Volken, D. (2010): Assessment of Climate Change Impacts on Discharge in the Rhine River Basin: Results of the RheinBlick2050 Project. – Report No. I-23 of the CHR, 211 p.

Göttle, A. (2008): Konsequenzen für die wasserwirtschaftliche Infrastruktur. - In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 24.08, Klimawandel – Was kann die Wasserwirtschaft tun? 157 S.

Gosling, S. N. & Arnell, N. W. (2011): Simulating current global river runoff with a global hydrological model: model revisions, validation, and sensitivity analysis. – *Hydrol. Process.*, 25, 1129–1145.

Griebler, C. & Lueders, T. (2009): Microbial biodiversity in groundwater ecosystems. – *Freshwater Biol.* 54 (4): 649-677.

Grocholl, J. (2011): Effektive Wassernutzung im Ackerbau Nord-Ost-Niedersachsens: Möglichkeiten zur Anpassung an den prognostizierten Klimawandel – Literaturübersicht. Bericht für KLIMZUG-NORD, 32 p.

Gustmann, K., Schneider, M., Wagner, P., Hofmann, B. & Christen, O. (2008): Erste Ergebnisse zur Streifenbearbeitung bei Mais unter verschiedenen Standortbedingungen im mitteldeutschen Trockengebiet.-In : Mitt. Ges. Pflanzenbauwissenschaften, 20, S. 29-30.

Haase, P., Hering, D., Hoffmann, A., Müller, R. Nowak, C., Pauls, St., Stoll, St. & Straile D. (2012): Auswirkungen auf limnische Lebensräume. – In: Mosbrugger, V., Brasseur, G., Schaller, M. & Stribney, B. [Hrsg.]: Klimawandel und Biodiversität – Folgen für Deutschland, 91-105.

Hagemann, S., Chen, C., Clark, D.B., Folwell, S., Gosling, N., Haddeland, I., Hanasaki, N., Heinke, J., Ludwig, F., Voss, F. & Wiltshire, A.J., (2013): Climate change impact on available water resources obtained using multiple global climate and hydrology models. – Earth Syst. Dynam., 4, 129–144, 2013, doi:10.5194/esd-4-129-2013.

Hagemann, S., Chen, C., Haerter, J. O., Gerten, D., Heinke, J. & Piani, C. (2011): Impact of a statistical bias correction on the projected hydrological changes obtained from three GCMs and two hydrology models. – J. Hydrometeorol., 12, 556–578, doi:10.1175/2011JHM1336.1, 2011.

Hartmann, D. L., Klein Tank, A.M.G., Rusticucci, M., Alexander, L.V., Brönnimann, S., Charabi, Y., Dentener, F.J., Dlugokenky, D.R., Easterling, D.R., Kaplan, A., Soden, B.L., Thorne, P.W., Wild, M., & Zhai, P.M. (2013): Observations: Atmosphere and Surface. - In: Stocker, T.F.; et al. (eds.): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contrib. of WG I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate, 159 – 254.

Hattermann, F., Kundzewicz, Z.W., Huang, S., Vetter, T., Gerstengarbe, F.-W. & Werner, P. (2012a):

Climatological drivers of changes in flood hazard in Germany. – Acta Geophysica vol. 61, no. 2, Apr. 2013, pp. 463-477, DOI: 10.2478/s11600-012-0070-4.

Hattermann, F., Kundzewicz, Z.W., Huang, S., Vetter, T., Kron, W., Borghoff, O., Merz, B., Bronstert, A., Krysanova, V., Gerstengarbe, F.-W., Werner, P. & Hauf, Y. (2012b): Flood risk from a holistic perspective – observed changes in Germany. – In: Z.W. Kundzewicz [ed.]: Changes in Flood Risk in Europe, 212-237, DOI: 10.1201/b12348-14.

Hattermann, F., Huang, S. & Koch, H. (2010): Simulation der Wirkung von Klimaänderungen und Klima-modellunsicherheit auf den Wasserhaushalt für deutsche Flusseinzugsgebiete. – In: Kaier, K., Libra, J., Merz, B., Bens, O. & Hüttl, R.F.: Aktuelle Lösungen im Wasserhaushalt von Nordostdeutschland. Trends, Ursachen, Lösungen. 49-59.

Hattermann, F. (2005): Integrated modelling of Global Change impacts in the german Elbe river basin. –Dissertation, Universität Potsdam, 189 S.

Hennegriff, W., Kolokotronis, V. & Ihringer, J. (2007): Prognose der künftigen Entwicklung der Niedrig-wasserverhältnisse in Baden-Württemberg infolge des Klimawandels. - In:

Einfluss von Bewirtschaftung und Klima auf Wasser- und Stoffhaushalt von Gewässern, Beiträge zum Tag der Hydrologie 2007, Band 2. 95-98.

Herber, W., Wagner, H. & Roth, U. (2008): Die Wasserbedarfsprognose als Grundlage für den Regionalen Wasserbedarfsnachweis der Hessenwasser GmbH & Co. KG. – gwf/Wasser und Abwasser, 149. Nr. 5, 426-434.

Herrmann, F., Chen, S., Kunkel, R. und Wendland, F. (2014a): Auswirkungen von Klimaänderungen auf das nachhaltig bewirtschaftbare Grundwasserdargebot und den Bodenwasserhaushalt in NRW. – Bericht an das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, 27 S.

Herrmann, F., Chen, S., Hübsch, L., Engel, N., Kunkel, R., Müller, U., Vereecken, H., Wendland, F. (2014b): Auswirkung von möglichen Klimaänderungen auf den Bodenwasserhaushalt und die Grundwasserneubildung in der Metropolregion Hamburg. – In: Kaden, S., Dietrich, O. Theobald, S. [Hrsg.]: Wassermanagement im Klimawandel – Möglichkeiten und Grenzen von Anpassungsmaßnahmen. oekom Verlag, 37-57.

Herrmann, F., Chen, S., Kunkel, R. und Wendland, F. (2013a): Quantifizierung und Bewertung des innerjährlichen Abflussgeschehens und der Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt in Niedersachsen und Bremen. – Bericht an das Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz Hannover, an das Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) Hannover und den Geologischer Dienst der Hansestadt Bremen.

Herrmann, F., Chen, S., Heidt, L., Elbracht, J., Engel, N., Kunkel, R., Müller, U., Röhm, H., Vereecken, H., Wendland, F. (2013b): Zeitlich und räumlich hochaufgelöste flächendifferenzierte Simulation des Landschafts-wasserhaushalts in Niedersachsen mit dem Model mGROWA. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 57(5): 206-224.

Herrmann, W. & Claupein, W. (2008): Strip-Till bei Zuckerrüben - Neue Möglichkeiten mit automatischen Lenksystemen. – Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften und der Gesellschaft für Pflanzenzüchtung, 59-60.

Hertwig, T. (2004): Parametrisierung, Anpassung und Kalibrierung des Bodenwasserhaushaltsmodells WaSiM-ETH für das Einzugsgebiet der Parthe sowie Berechnung von drei Landnutzungsszenarien auf Grundlage der Klimaprognose von Sachsen. – Abschlussbericht Beak-Nr. 2004_0085, KLiWEP Teil 1, 143 S.

Holsten, A., Vetter, T., Vohland, K. & Krysanova, V. (2009): Impact of climate change on soil moisture dynamics in Brandenburg with a focus on nature conservation areas. – Ecol. Modell. 220 (17): 2076-2087.

Horsten, T., Krahe, P., Nilson, E., Belz, J.U., Ebner von Eschenbach, A.-D. & Larina, M. (2011): Auswirkungen des Klimawandels an der Elbe. - In: KLIWAS-Tagungsband Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland, 2. Statuskonferenz, 93-97.

Huang, S., Krysanova, V., Österle, H. & Hattermann, F. F. (2010): Simulation of spatiotemporal dynamics of water fluxes in Germany under climate change. – Hydrol. Processes 24 (23): 3289-3306.

ICPR (2011): Study of Scenarios for the Discharge Regime of the Rhine state: April 2011. – ICPR-report No. 188, 28 S.

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

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

IPCC (2014b): Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)], 688 p.

IPCC (2014c): Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)].

IKSR (2009): Analyse des Kenntnisstands zu den vorherigen Veränderungen des Klimas und zu den Auswirkungen der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt im Rhein- Einzugsgebiet – Literaturlauswertung. IKSR Bericht Nr. 174. 67 S.

IMPACT2C-Team (2015): IMPACT2C web –atlas (platform CMS/GIS) – Url.: www.atlas.impact2c.eu

Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, A.B., Bouwer, L.M., Braun, A., Colette, A., Dequeue, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Hänsler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kroner, N., Kotlarski, S., Kriegsmann, A., Martin, E., van Meijgaard, E., Moeseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussanna, J-F., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B., Yiou, P. (2014): EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research Regional Environmental Changes. Vol. 14, Issue 2, pp. 563-578.

Jacob D, Bülow K, Kotova L, Moseley C, Petersen J & Rechid D (2012): Regionale Klimaprojektionen für Europa und Deutschland: Ensemble Simulationen für die Klimafolgenforschung. CSC Report 6, 48 S. Climate Service Center Hamburg.

Kajfez-Bogata, L. (2007): How will the Alps Respond to Climate Change? Scenarios for the Future of Alpine Water. - alpine space - man & environment, vol. 3: The Water Balance of the Alps, 43 – 51.

Kay, A.L., Davies, H.N., Bell, V.A. & Jones, R.G. (2009): Comparison of uncertainty sources for climate change impacts: flood frequency in England. – Climatic Change, 92(1-2):41-63.

KHR/CHR (2007) [Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes]: Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert – Analyse, Veränderung, Trends. Bericht Nr. I-22, 377 S.

Klämt, A. (2000): Langzeitverhalten der potentiellen Verdunstung und der klimatischen Wasserbilanz Ergebnisse aus KLIWA. – In: KLIWA-Symposium vom 29./30.11.2000 in Karlsruhe, KLIWA-Bericht 1, 81-91.

Klein, B., Maurer, T., Nilson E. & Krahe, P. (2012): Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf das Abfluss-regime im Donau-Abschnitt Straubing – Vilshofen bis zur Mitte des 21.Jahrhunderts – BfG-Kurzbericht, 25 S.

Klein, B., Lingemann, I., Krahe, P. & Nilson, E. (2011): Einfluss des Klimawandels auf mögliche Änderungen des Abflussregimes an der Donau im 20. und 21. Jahrhundert. – In: KLIWAS: Auswirkungen des Klima-wandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland, 2 Statuskonferenz, 111-116.

Klinke, A. & Renn, O. (2012): Adaptive and Integrative Governance on Risk and Uncertainty. – Journal of Risk Research, Vol. 15/3, Routledge, London, pp. 273-292, <http://dx.doi.org/10.1080/13669877.2011.636838>.

KLIWAS (2011): Wasserstandsmeldung zum Klimawandel. Ergebnisse, Vorträge und Stimmen zur 2. KLIWAS-Statuskonferenz, 21 S.

Kluge, T., Deffner, J., Götz, K., Liehr, S., Michel, B., Michel, F. & Rüttrich, W. (2007): Wasserbedarfsprognose 2030 für das Versorgungsgebiet der Hamburger Wasserwerke GmbH (HWW). – ISOE-COOPERATIVE Infrastruktur und Umwelt-Ergebnisbericht, 28 S.

Koehler, G. M., Schwab, W., Finke, W. & Belz, J. U. (2007): Überblick zur Niedrigwasserperiode 2003 in Deutschland: Ursachen-Wirkungen-Folgen. – In: Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 3, 118-130.

Köppke, K.-E. & Sterger, O. (2011): Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Niederschläge und Hochwasser – Forschungsbericht, 133 S.

Kovats, R.S., Valentini, R., Bouwer, L.M., Georgopoulou, E., Jacob, D., Martin, E., Rounsevell, M. & Soussana, J-F. (2014): Europe- In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contrib. of WGs II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Baros, V.R.; et. Al. (eds.)], pp. 1267-1326.

Krahe, P., Eberle, M., Richter, K.-G. & Wilke, K. (2004): Simulation des Wasserhaushaltes für das Rheingebiet. –In: KLIWA-Heft 4: "Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft - Fachvorträge beim KLIWA-Symposium am 3. und 4.5.2004 in Würzburg", 129 – 133.

Kropp, J., Roithmeier, O., Hattermann, F., Rachimow, C., Lüttger, A., Wechsung, F., Lasch, P., Christiansen, E.S., Reyer, C., Suckow, F., Gutsch, M., Holsten, A., Kartschall, T., Wodinski, M., Hauf, Y., Conradt, T., Österle, H., Walther, C., Lissner, T., Lux, N., Tekken, V., Ritchie, S., Kossak, J., Klaus, M., Costa, L., Vetter, T. & Klose, M. (2009): Klimawandel in Sachsen-Anhalt - Verletzlichkeiten gegenüber den Folgen des Klimawandels. – Abschlussbericht des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK), 449 S.

Krüger, A., Ulbrich, U. & Speth, P. (2001): Groundwater recharge in Northrhine-Westfalia predicted by a statistical model for greenhouse gas scenarios. - Phys. Chem. Earth Part B 26 (11-12): 853 – 861.

Krysanova, V., Hattermann, F. & Habeck, A. (2005): Expected changes in water resources availability and water quality with respect to climate change in the Elbe River basin (Germany). - Nordic Hydrol. 36 (4): 321 – 333.

Küchler W. (2005): Klimawandel in Sachsen – Sachstand und Ausblick, Dresden, 75-91.

Kuhn, K. (2009): Projektvorstellung KLIWES - Abschätzung der Auswirkung der für Sachsen prognostizierten Klimaveränderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt in den Einzugsgebieten sächsischer Gewässer. -Auftaktveranstaltung am 4. November 2009, 33S.

Kunkel, R., Wendland, F., Röhm, H. & Elbracht, J. (2012): Das CLINT-Interpolationsmodell zur Regionalisierung von Klimadaten und WETTREG-Klimaprojektionen für Analysen zum regionalen Boden- und Grundwasserhaushalt in Niedersachsen und Bremen. GeoBerichte - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, 20: 6-31.

Laaser, C., Leipprand, A., de Roo, C. & Vidaurre, R. (2009): Report on good practice measures for climate change adaptation in river basin management plans. – EEA-report, ETC/Water Task: 1.5.4 Water and climate change, 116 S.

LAWA (2010): Strategiepapier "Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft" Bestandsaufnahme und Handlungsempfehlungen, beschlossen auf der 139. LAWA-VV, März 2010, (Hrsg.: Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft), 36 S.

LAWA (1995): Leitlinien für zukunftsweisenden Hochwasserschutz. 30 S., [Hrsg. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser]

Lehner, B., Henrichs, T., Döll, P. & Alcamo, J. (2001): EuroWasser – Model-based assessment of European water resources and hydrology in the face of global change. – Kassel World Water Series. Report No 5, Report A0104. <http://www.usf.unikassel.de/usf/archiv/dokumente/> (Stand: 02.07.2013).

Leipprand, A., Kadner, S., Dworak, T., Hattermann, F., Post, J., Krysanova, V., Benzie, M. & Berglund, M. (2008): Impacts of climate change on water resources – adaption strategies for Europe. – UBA, Research Report 205 21 200, UBA-FB 001175. <http://www.umweltdaten.de/> (Stand: 02.07.2013).

Le Quesne, T., Matthews, J.H., von der Heyden, C., Wickel, A.J., Wilby, R., Hartmann, J., Pegram, G., Kistin, E., Blate, G., de Freitas, G.K., Levine, E., Guthrie, C., McSweeney, C. & Sindor, N. (2010): Flowing Forward: Fresh-water Ecosystem Adaptation to Climate Change in Water Resources Management and Biodiversity Conservation. – Water Working Note, No. 28, World Bank Group, Washington, DC.

LFULG (2012) [Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Hrsg.]: Kompendium Klima – Sachsen im Klimawandel. – Online-Dokument Stand November 2012.

LUA (2006) [Landesumweltamt Brandenburg Hrsg.]: Daten zum integrierten Klimaschutzmanagement im Land Brandenburg. – Fachbeiträge des Landesumweltamtes, Heft 104., 55-57.

Ludwig, R., Soddu, A., Duttmann, R., Baghdadi, N., Benabdallah, S., Deidda, R., Marrocu, M., Strunz, G., Wendland, F., Engin, G., Paniconi, C., Prettenthaler, F., Lajeunesse, I., Afifi, S., Cassiani, G., Bellin, A., Mabrouk, B., Bach, H. & Ammerl, T. (2010): Climate-induced changes on the hydrology of mediterranean basins - a research concept to reduce uncertainty and quantify risk. – Fresenius Environmental Bulletin, 19(10a): 2379-2384.

Ludwig, F. & Moench, M. (2009): The Impacts of Climate Change on Water. – In: Ludwig, F., Kabat, P., van Schaik, P. and van der Valk, M. [eds.]: Climate Change Adaptation in the Water Sector, Earthscan, London and Washington, DC., pp. 35-50.

Lühr, O., Apfel, D. & Schneider, J. (2011): Standort- und marktbezogene Betroffenheit der regionalen Wirtschaft durch den Klimawandel. – dynaklim-Publikation, 9, 52 S.

Lünich, K. & Steinl, Ch. (2011): KliWES – Abschätzung der für Sachsen prognostizierten Klimaänderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt in den Einzugsgebieten sächsischer Gewässer Teil 1: Wasserhaushalt, Kernkomponente. – Schriftenreihe des LfULG, Heft 44, 66 S.

Mahammadzadeh, M., Chrischilles, E. & Biebler, H. (2013): Klimaanpassung in Unternehmen und Kommunen-Betroffenheiten, Verletzlichkeiten und Anpassungsbedarf. Analysen. – Forschungsberichte aus dem Institut der deutschen Wirtschaft Köln Nr. 83, 185 S.

Martin, E. & Etchevers, P. (2005): Impact of climatic change on snow cover and snow hydrology in the French Alps. - In: Huber, U.M., Bugmann, H. & Reasoner, M.A. [eds.]: Global Change and Mountain Regions (A State of Knowledge Overview). pp. 235-242.

Martin.S. (2012): No Regrets Adaptation Actions: Stop Saying That. – Shaun Martin, June 2012, Climate Prep Blog Roll, <http://www.climateprep.org/2012/06/12/no-regrets-adaptationactions-stop-saying-that>.

Mastrandrea, M.D., Field, C.B., Stocker, T.F., Edehofer, O., Ebi. K.L., Frame, D.J., Held, H., Kriegler, E., Mach, K.J., Matschoss, P.R., Plattner, G.-K., Yohe, G. W. & Zwiers, F. W. (2010): Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Consistent Treatment of Uncertainties., 4p.

Merz, B., Kaiser, K., Bens, O., Emmermann, R., Flühler, H., Grünwald, U. & Negendank, J. F. W. (2012): Klimawandel und Wasserhaushalt - In: Hüttl, R. F.& Bens, O. [eds.], Georessource Wasser - Herausforderung Globaler Wandel, 24-90.

Messer, J., Ohlenbusch, R. & Getta, M. (2013): Klimawandelbedingte Veränderungen der Grundwasser-neubildung im urbanen Raum am Beispiel des Emschergebeites. – dynaklim-Publikation 33, 24 S.

Messer, J., Ohlenbusch, R. & Getta, M. (2011): Entwicklung eines instationären Prognosewerkzeuges zur Berechnung der Klimawandelbedingten Veränderungen der Grundwasserneubildung. – dynaklim-Publikation 14, 27 S.

Met Office (2010): Met Office Science strategy 2010-2015. – Met Office Paper, 15 p.

Michel, G., Malard, F., Deharveng, L., Di Lorenzo, T., Sket, B. & De Broyer, C. (2009): Reserve selection for conserving groundwater biodiversity. – Freshwater Biol. 54 (4): 861-876.

Munaretto, S., Siciliano, G. & Turvani, M. (2012): Learning to adapt to climate change: a framework for integrating adaptive governance and participatory multi-criteria method. – Proc. Symp. The Governance of Adaptation, 78.

Mudelsee, M., Deutsch, M., Börngen, M. Tetzlaff, G. (2006): Trends in flood risk of the river Werra (Germany) over the past 500 years. – Hydrological Sciences Journal 51 (5), 818-833.

Mudelsee, M., Börngen, M., Tetzlaff, G. & Grünwald, U. (2003): No upward trends in occurrence of extreme floods in central Europe. – Nature Vol. 425,166-168.

MUNLV (2007) [Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Hrsg.] Klimawandel in Nordrhein-Westfalen – Wege zu einer Anpassungsstrategie, 15-18.

Nakicenovic, N., Davidson, O., Davis, G., Grübler, A., Kram, T., Lebre La Rovere, E., Metz, B., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Sankovski, A., Shukla, P., Swart, R., Watson, R. & Dadi, Z. (2000): Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 599 pp.

Nilson, E., Carambia, M., Krahe, P., Larina, M., Belz, J.U. & Promny, M. (2011): Ableitung und Anwendung von Abflussszenarien für verkehrswasserwirtschaftliche Fragestellungen am Rhein. – In: KLIWAS- Tagungsband Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland, 2. Statuskonferenz, 59-63.

OECD (2013): Studies in Water and Climate Change Adaptation. Policies to navigate uncharted waters – OECD studies on water, 224 S.

O'Reilly, C.M., Alin, S.R., Plisnier, P.-D., Cohen, A.S. & Mc Kee, B.A. (2003): Climate change decreases aquatic ecosystem productivity of Lake Tanganyika, Africa. – Nature 424, 766-768.

Ott, H.E & Richter, C. (2008): Anpassung an den Klimawandel-Risiken und Chancen für deutsche Unternehmen. – Wuppertal papers, Nr. 171, 26 S.

Ott, J. (2007): Hat die Klimaänderung eine Auswirkung auf das Netz Natura 2000? – Erste Ergebnisse aus Untersuchungen an Libellenzönosen dystropher Gewässer im Biosphärenreservat Pfälzerwald. – In: Balzer, S., Dieterich, M. & Beinlich, B. [Hrsg.]: Natura 2000 und Klimaänderungen. Naturschutz und Biologische Vielfalt 46: 65-90.

Perkins, S. E., Alexander, L.V. & Nairn, J.R. (2012): Increasing frequency, intensity and duration of observed global heatwaves and warm spells. - Geophys. Res. Lett., 39. L20714.

Petersen, B. & Ssymank, A. (2007): Die Feuchtgebiete internationaler Bedeutung und das Schutzgebietsnetz Natura 2000 in Deutschland. – Natur und Landschaft 82 (11): 494-501.

Peterwitz, U. & Bøddeker, M. (2008): Aktuelle Tendenzen und mögliche Folgen des Klimawandels für die Wassergewinnung – Fallbeispiel aus NRW. – In: 41. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft, Aachen, S. 23/4.

Petrow, T. & B. Merz (2009): Trends in flood magnitude, frequency and seasonality in Germany in the period 1951-2002. – Journal of Hydrology, 371(1-4):129-141.

Petry, D. (2009): Klimawandel und Trinkwasserversorgung: Auswirkungen, Handlungsbedarf, Anpassungsmöglichkeiten. – energie wasser-praxis, 10/2009, 49-56.

Pfeifer, S., Bülow, K., Gobiet, A., Hänsler, A., Mudelsee, M., Otto, J., Rechid, D., Teichmann, C. & Jacob, D. (2015): Robustness of Ensemble Climate Projections Analyzed with Climate Signal Maps: Seasonal and Extreme Precipitation for Germany. - Atmosphere 2015, 6, 677-698; doi:10.3390/atmos6050677

PIK (2010) [Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V, Hrsg.]: Wirkungen des globalen Wandels auf den Wasserkreislauf im Elbegebiet – Ergebnisse und Konsequenzen. – GLOWA Elbe III -Synthesebericht 2009, 55 S.

Pinnekamp, J., Köster, S., Siekmann, M. & Staufer, P. (2008): Klimawandel und Siedlungswasserwirtschaft. – In: 41. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft, Aachen, S. 3/2.

Pöhler, H., Chmielewski, F.-M., Jasper, K., Henniges, Y. & Scherzer, J. (2007): KliWEP - Abschätzung der Auswirkungen der für Sachsen prognostizierten Klimaveränderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt im Einzugsgebiet der Parthe Weiterentwicklung von WaSiM-ETH: Implikation dynamischer Vegetationszeiten und Durchführung von Testsimulationen für sächsische Klimaregionen. – Abschlussbericht, 74 S.

Quevauviller, Ph. (2010): Water Sustainability and Climate Change in the EU and Global Context – Policy and Research Responses. – IEST Vol. 31, RSC Publishing, Cambridge, 1-24 <http://pubs.rsc.org> | doi:10.1039/9781849732253-00001

Rechid, D., Petersen, J., Schoetter, R. & Jacob, D. (2014): Klimaprojektionen für die Metropolregion Hamburg. - Berichte aus den KLIMZUG-NORD Modellgebieten, Band 1, 59 S.

Reiter, A., Weidinger, R. & Mauser, W. (2012): Recent Climate Change at the Upper Danube - A temporal and spatial analysis of temperature and precipitation time series. – Climatic Change (2012) 111:665–696.

Roberts, M., Promny, M. & Vollmer, S. (2011): Morphologische Klima-Projektionen im Hinblick auf die vielfältigen Nutzungsansprüche der Bundeswasserstraße Elbe. – In: Tagungsband KLIWAS: Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland, 2. Statuskonferenz, 98 – 102.

Rosenzweig, V., Elliott, J., Deryng, D., Ruane, A.C., Müller, Ch., Arneth, A., Boote, K.J., Folberth, C., Glotter, M., Khabarov, N., Neumann, K., Piontek, F., Pugh, T.A.M., Schmid, E., Stehfest, E., Yang, H. & Jones, J.W. (2014): Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison.- PNAS, Vol. 111 no. 9, 3268–3273.

Rowell, D. P. (2005): A scenario of European climate change for the late 21st century: Seasonal means and interannual variability. – Clim. Dyn., 25, 837– 849, doi:10.1007/s00382-005-0068-6.

RZD (1986) [Hrsg.: Regionale Zusammenarbeit der Donauländer, Bay. Landesamt f. Wasserwirtschaft, München und IHP/OHP-Sekretariat]: Die Donau und ihr Einzugsgebiet – Eine hydrologische Monographie. 166 - 178.

Schädler, G., Feldmann, H., Panitz, H.-J., Kottmeier, Ch. & Früh, B. (2010): Hochauflösende regionale Simulationen künftiger Starkniederschlagsereignisse in Baden-Württemberg (ReSiPrec). – Technical report, 72 S.

Scherzer, J., Grigoryan, G., Schultze, B., Stadelbacher, V., Niederberger, J., Pöhler, H., Disse, M., Jacoby, C. & Heinisch, T. (2010): WASKlim Entwicklung eines übertragbaren Konzeptes zur Bestimmung der Anpassungsfähigkeit sensibler Sektoren an den Klimawandel am Beispiel der Wasserwirtschaft. – UBA-Texte 47/2010, 234 S.

Schmidt, C. K, Lange, F., Brauch, H. & Kuhn, W. (2003) Experiences with riverbank filtration and infiltration in Germany. – DVGW-Water Technology Center (TZW), 17 p. Karlsruhe.

Schmidt, H. u.a. : Globale Sicht des Klimawandels. – In: Brasseur, G., Jacob, D. [Hrsg.]: Klimabericht für Deutschland, Kap. 2, 2017 (in Vorb.)

Schneider, W. (2010): Wird es zukünftig Probleme mit dem Grundwasser in Harburg geben? – Vortrag vom. 02.11., Klimzug macht Station in Harburg, <http://klimzug-nord.de/file.php/2010-11-23-Praesentation-Schneider-TUHH-KLIMZUG-macht-Station>.

Schönwiese, C.-D. & Janoschitz, R. (2008): Klima-Trendatlas Deutschland 1901-2000. – Bericht Nr. 4, Inst. Atmosph. u. Umwelt Univ. Frankfurt/M., 2. Aufl., 64 pp.

Schönwiese, C.-D., Staeger, T. & Trömel, S. (2006): Klimawandel und Extremereignisse in Deutschland: Klimastatusbericht 2005, 7-17.

Scibek, J., Allen, D. M., Cannon, A. J. & Whitfield, P. H. (2007): Groundwater- surface water interaction under scenarios of climate change using a high-resolution transient groundwater model. – J. Hydrol. 333 (2-4): 165-181.

Sieber, J. (2013): Impacts of, and adaptation options to, extreme weather events and climate change concerning thermal power plants. – Climatic Change (2013), pp. 1-12, doi:10.1007/s10584-013-0915-0

SMUL (2005) [Hrsg.:Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft]: Klimawandel in Sachsen. Sachstand und Ausblick, Dresden. – Online-Dokument: 111 S. (http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/klima/Klimawandel_ges%281%29.pdf), (Stand: 03.06.2013)

Sommer, Th., Feige, H., Klöcking, B., Knoblauch, S., Maier, U., Müller, M., Pfützner, B., Wechsung, F. & Clausung, Th. (2003): Die Wirkung des Globalen Wandels im Unstrut Einzugsgebiet. – Abschlussbericht; GLOWA-Elbe Teilprojekt Unstrut; 07 GWK 03, 126-131.

Spekat, A., Enke, W. & Kreienkamp, F. (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2. Umweltbundesamt & Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH.

Staben, N. & Nahrstedt, A.: Anpassungsoptionen der Trinkwassergewinnung und – aufbereitung an sich ändernde Rahmenbedingungen. – dynaklim-Publikation Nr. 53, 2014.

Steinel, A., Houben, G. & Himmelsbach, Th. (2012): Auswirkungen auf das Grundwasser. – In Mosbrugger, V., Brasseur, G., Schaller, M. & Stribney, B. [Hrsg.]: Klimawandel und Biodiversität – Folgen für Deutschland, 57-90.

Straile, D., Joehnk, K. & Rossknecht, H. (2003): Complex effects of winter warming on the physico-chemical characteristics of a deep lake. – Limnology and Oceanography 48, 1432-1438.

Sturm, K., Glaser, R., Jacobeit, J., Deustch, M., Brazdil, R., Pfister, Ch., Luterbacher J. & Wanner, H. (2001): Hochwasser in Mitteleuropa seit 1500 und ihre Beziehung zur atmosphärischen Zirkulation. – Petermann Geogr. Mitt., 145:14-23.

Te Linde, A.H., Moorsm E.J., Droogers, P., Bisselink, B., Becker, G., ter Maat, H. & Aerts, J.C.J.H. (2012): ACER: developing Adaptive Capacity to Extreme events in the Rhine basin. – ACER-report KvR 046/12, 53 S.

Terink, W., Hurkmans, R. W. R. L. & Uijlenhoet, R. (2009): Estimation of water balance uncertainties based on climate ensemble – Application of the Variable Infiltration Capacity model in combination with climate scenarios to the Rhine basin. – Report of NeWater project, D. 2.2.5, 77 p.

Thies, H., Nickus, U., Mair, V., Tessadri, R. Tait, D., Thaler, B. & Psenner, R. (2007): Unexpected response of high alpine lake waters to climate warming. – Environmental Science and Technology 41: 7424-7429.

Twin2Go (2011): Responding to climate change: towards more adaptive water governance systems. – Twin2Go Policy brief 1,4 S.

UNFCCC (2011) [United Nations Framework Convention on Climate Change]: Water and Climate Change Impacts and Adaptation Strategies. – Technical Paper, 22 November, FCCC/TP/2011/5, <http://unfccc.int/resource/docs/2011/tp/05.pdf>.

UKCIP (2005): Identifying adaptation options. – UKCIP-Report 34p.

Veijalainen, N., Lotsari, E., Alhob, P. & Vehviläinen, J.K.B. (2010): National scale assessment of climate change impacts on flooding in Finland. – Journal of Hydrology, 391(3-4):333-350.

Verband der Landwirtschaftskammern (2010): Klimawandel und Landwirtschaft. Anpassungsstrategien im Bereich Pflanzenbau – Fachinformationen, 11 S.

Vörösmarty, C.J., McIntyre, P.B., Gessner, M.O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Glidden, S., Bunn, S.E., Sullivan, C.A., Liermann, C.R. & Davies, P.M. (2010): Global threats to human water security and river biodiversity. – Nature 467 (7315): 555-561.

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

Wilby, R.L., Whitehead, P.G., Wade, A.J., Butterfield, D., Davies, R.J. & Watts, G. (2006): Integrated modelling of climate change impacts on water resources and quality in a lowland catchment: River Kennet, UK. – J. Hydrol. 330 (1-2): 204 – 220.

Wilby, R.L. (2005): Uncertainty in water resource model parameters used for climate change impact assessment. – Hydrol. Processes, 19, 3201– 3219, doi:10.1002/hyp.5819.

Wilhite, D.A. & Glantz, M.H. (1985): Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. – Water International 10(3):111–120.

Wixwat, T. (2009): Mögliche Auswirkungen einer Klimaänderung auf die Grundwasserneubildung in Niedersachsen. - GeoBerichte, 12 Hannover, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie.

Wurbs, D. (2005): Vergleichende Untersuchungen zu den Folgewirkungen zu Klima und Landnutzungs-änderungen auf den Wasserhaushalt in Flusseinzugsgebieten. – Diss. Universität Halle-Wittenberg, 119 S.

WVGW (2011) [Hrsg. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH]: Profile of the German Water Sector 2011. – WVGW-Report, 103 S.

Zebisch, M., Grothmann, T., Schröter, D., Hasse, C., Fritsch, U. & Cramer, W. (2005): Klimawandel in Deutschland. Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. – Climate Change, 08/05, 203 S. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung.

Zierl, B. & Bugmann, H. (2005): Global change impacts on hydrological processes in Alpine catchments. - Water Resources Research 41(W02028): 1-13, 10.1029/2004WR003447.

Anhang 1: Wie muss man die Synthese-Karten lesen?

Die in diesem Bericht abgebildeten Karten veranschaulichen die Synthese der regionalen Informationen hinsichtlich der wichtigsten Parameter für die terrestrischen Wassersysteme. Jede Abbildung besteht aus zwei Deutschlandkarten: a) Karte der Bundesländer und b) Karte der großen Flusseinzugsgebiete. Diese Darstellungsweise wurde gewählt, da die Studien auf verschiedene Betrachtungsebenen fokussiert waren. Wenn keine zusätzlichen Angaben gemacht werden, so ist das Ergebnis repräsentativ für das gesamte Bundesland bzw. Einzugsgebiet. Ist ein Flussname angegeben, so ist das Ergebnis nur für diesen Fluss gültig. Jede Karte enthält zwei Arten von Informationen, die Flächenfarbe und ein „Wandel-Meter“. Die Flächeninformation umfasst alle Trends, die in diesem Bericht zitiert wurden. Die projizierten Parameter erzeugen eine Fläche, die von roten Markern begrenzt wird. Je größer die daraus resultierende Fläche ist, desto größer ist die Bandbreite der Ergebnisse.

Wichtig: Den einzelnen „Wandel-Metern“ liegt jeweils eine unterschiedliche Anzahl von Projektionen zu Grunde, so dass die Flächen nicht direkt miteinander vergleichbar sind.

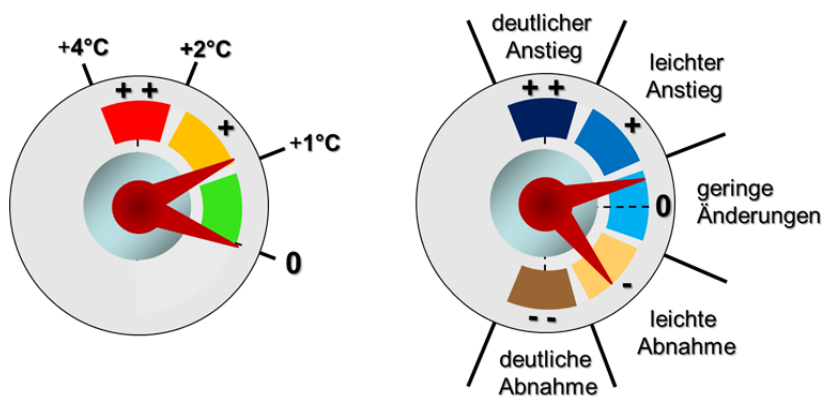


Abb.19: Wandel-Meter

Farbskala der Kartensignatur für Temperatur

- **Starker Anstieg** (stark steigende Tendenz im Vergleich zu derzeitigen Bedingungen: $\Delta T > 2.1^\circ\text{C}$)
- **Anstieg** (steigende Tendenz im Vergleich zu derzeitigen Bedingungen: $2^\circ\text{C} < \Delta T > 1.1^\circ\text{C}$)
- **Kleine Änderungen** (im Vergleich zu derzeitigen Bedingungen: $1^\circ\text{C} < \Delta T < -1^\circ\text{C}$)
- **Kein klarer Trend** (Berichte zeigen widersprüchliche Aussagen)
- **Nicht berücksichtigt** (keine Informationen für die Abbildung verwendet)

Farbskala der Kartensignatur für andere Parameter

- **Anstieg** (stark steigende Tendenz im Vergleich zu derzeitigen Bedingungen: $\Delta x > 15,1\%$)
- **Kleine Änderungen** (im Vergleich zu derzeitigen Bedingungen: $-15\% < \Delta x < 15\%$)
- **Abnahme** (abnehmende Tendenz im Vergleich zu derzeitigen Bedingungen: $-15,1\% > \Delta x$)
- **Kein klarer Trend** (Berichte zeigen widersprüchliche Aussagen)
- **Nicht berücksichtigt** (keine Informationen für die Abbildung verwendet)

“Wandel-Meter” für Temperatur	“Wandel-Meter” für andere Parameter
Grün: (ΔT : 0°C bis 1°C)	Deutlicher Anstieg, “++”: (Δx : $50,1\%$ bis 100%)
Gelb, “+”: (ΔT : $1,1^\circ\text{C}$ bis 2°C)	Leichter Anstieg, “+”: (Δx : $15,1\%$ bis 50%)
Rot, “++”: (ΔT : $2,1^\circ\text{C}$ bis 4°C)	Geringfügige Änderungen, “0”: (Δx : -15% bis 15%)
	Leichte Abnahme, “-”: (Δx : -50% bis $-15,1\%$)
	Deutliche Abnahme, “--”: (Δx : -100% bis $-50,1\%$)



Kontakt:

Climate Service Center Germany (GERICS)

Fischertwiete 1 | 20095 Hamburg | Germany

Tel +49 (0)40 226 338-0 | Fax +49 (0)40 226 338-163

www.climate-service-center.de

Eine Einrichtung des

 **Helmholtz-Zentrum
Geesthacht**

Zentrum für Material- und Küstenforschung

ISSN 2509-386X