

Wasserhaushalt

*Harald Kunstmann, Peter Fröhle, Fred F. Hattermann, Andreas Marx,
Gerhard Smiatek, Christian Wanger*

- 16.1 Wissenschaftliche Grundlagen, Methoden und Unsicherheiten
der hydrologischen Klimaimpaktanalyse – 162**
- 16.2 Auswirkungen der Klimaänderung auf ausgewählte
Aspekte des Wasserhaushalts – 163**
 - 16.2.1 Beobachtungen – 163
 - 16.2.2 Projektionen für die Zukunft – 166
- 16.3 Wissenschaftliche Basis und Optionen von
Anpassungsmaßnahmen – 169**
- 16.4 Kurz gesagt – 170**
 - Literatur – 171

Wasser ist für den Menschen und seine Umwelt von zentraler Bedeutung. Seine jahreszeitliche Verfügbarkeit prägt Ökosysteme wie auch Kulturen und Gesellschaften. Die Herausforderung, zu viel, zu wenig oder zu schmutziges Wasser zu bewältigen, begleitet den Menschen seit Jahrtausenden. Mit der globalen Klimaänderung verändert sich auch der Wasserkreislauf, insbesondere die Quelle erneuerbaren Süßwassers, nämlich der Niederschlag. Grund ist die mit der globalen Erwärmung einhergehende Intensivierung des Wasserkreislaufs, die zu vergrößerten atmosphärischen Energieumsätzen führt. Aufgrund der Wechselwirkung von Atmosphärendynamik und Landoberflächen sind so in manchen Regionen heftigere Niederschläge, in anderen Regionen aber entgegengesetzte Extreme, nämlich längere und häufigere Trockenperioden und Dürren möglich. Die Abschätzung der zukünftigen räumlichen und zeitlichen Verteilung der terrestrischen Wasserverfügbarkeit gehört zu den zentralen wissenschaftlichen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts.

16.1 Wissenschaftliche Grundlagen, Methoden und Unsicherheiten der hydrologischen Klimaimpaktanalyse

Aussagen über die zu erwartenden Auswirkungen des globalen Klimawandels auf die regionale Hydrologie werden in der Regel auf der Basis von drei hierarchisch angeordneten Modellsystemen gewonnen. Das erste Modellsystem ist ein globales Klimamodell, das die klimatischen Folgen eines angenommenen Emissionsszenarios abschätzt. Seine Ergebnisse bilden den Antrieb für dynamische oder statistische regionale Klimamodellsysteme (► Kap. 4), die das regionale Klima auf Skalen bis zu einigen Kilometern beschreiben. Diese Resultate, also die so generierten meteorologischen Felder, z. B. von Niederschlag, Temperatur, aber auch Strahlung, Luftfeuchte und Wind, werden anschließend in hydrologische Modellsysteme unterschiedlicher Komplexität eingegeben, die nun die einzelnen Prozesse des hydrologischen Zyklus auf Skalen bis hin zu einigen zehn bis hundert Metern Auflösung simulieren. Auf dieser Basis werden dann lokale hydrologische Klimafolgeanalysen möglich.

Die Unsicherheiten in den so abgeleiteten hydrologischen Aussagen können gegenwärtig jedoch noch beträchtlich sein (Blöschl et al. 2010). Neben den inhärenten Unsicherheiten der beteiligten Modelle führen vor allem Mittelungen und Glättungen an den Modellrändern im Skalenübergang sowie eine fehlende Rückkopplung zwischen den drei hierarchisch angeordneten Modellen zu zusätzlichen Unsicherheiten.

Für die meisten in der hydrologischen Klimaimpaktanalyse eingesetzten hydrologischen Modelle sind Temperatur und Niederschlag die wichtigsten antreibenden Klimavariablen. Die möglichst genaue Abbildung ihrer raumzeitlichen Dynamik ist eine zentrale Anforderung an die regionale Klimamodellierung. Gegenwärtige regionale Klimasimulationen haben in der Regel Schwierigkeiten, die beobachteten statistischen Kenngrößen in den sogenannten Kontrollsimulationen befriedigend zu reproduzieren. Die Evaluierung zahlreicher regionaler Modelle mit Beobachtungen der Jahre 1961–2000 offenbart in Mitteleuropa Bandbreiten in der Reproduktion der gemessenen Werte in der

Größenordnung von 4–6 °C für die Temperatur des Monatsmittels und von mehr als 40 % im Niederschlag (z. B. Christensen et al. 2008). ■ Tab. 16.1 zeigt Bandbreiten der Abweichungen von simulierter Temperatur und Niederschlag für verschiedene Regionen. Abweichungen in den saisonalen Gebietsmittelwerten für den meteorologischen Winter (Dezember bis Februar) und Sommer (Juni bis August) von –4 bis 2,9 °C für die Temperatur und –54 bis 78 % im Niederschlag zeigen beispielhaft, dass regionale Klimamodelle für den Raum Deutschland beträchtliche Defizite aufweisen.

Die Anforderungen der hydrologischen Klimaimpaktanalyse und der hydrologischen Modelle gehen aber weit über die saisonalen Mittelwerte hinaus. Saisonalität, Frequenz und Intensität des simulierten Niederschlags sind ebenso wichtig wie die korrekte räumliche Verteilung. Regionale Untersuchungen zeigen, dass die Fehlerbandbreiten in der Reproduktion von spezifischen Größen der lokalen, kleinräumigen Klimavariabilität noch größer sind. Auch wenn gewisse Unsicherheiten in den meteorologischen Beobachtungen unterstellt werden können, sind diese Unsicherheitsspannen und Fehler aufgrund ihrer Größenordnung nicht zu vernachlässigen. Klimaantriebe für hydrologische Modellsysteme werden deshalb in gewissen Grenzen mithilfe von statistischen Verfahren nachträglich korrigiert.

In einer solchen statistischen Korrektur wird aus dem Vergleich der simulierten und der beobachteten Größen der gerichtete Fehler (Bias) berechnet und zur Ermittlung einer korrigierenden Transferfunktion eingesetzt, die wiederum auf die mit dem regionalen Klimamodell simulierten Daten angewandt wird (► Kap. 4).

Die so korrigierten meteorologischen Antriebsdaten können die Reproduktion hydrologischer Kenngrößen in hydrologischen Klimaimpaktsimulationen stark verbessern. Grundsätzlich problematisch ist dabei jedoch, dass die unterschiedlichen Zustandsgrößen (z. B. Temperatur und Niederschlag) in der Regel unabhängig voneinander biaskorrigiert werden und dadurch mögliche physikalische Abhängigkeiten der Variablen untereinander verlorengehen. Zudem wird davon ausgegangen, dass eine Stationarität der Modellfehler gegeben ist, dass sich die Modellfehler also mit der Zeit bzw. über die Simulationszeiträume hinweg und damit für die Zukunft nicht ändern. Gegenwärtig wird in der Anwendung korrigierter Datenensembles die optimale Lösung für den Antrieb in hydrologischen Simulationen gesehen: Ensembles, die aus mehreren regionalen Klimamodellen mit verschiedenen Kombinationen der antreibenden globalen Modelle und eventuell auch mit unterschiedlichen Biaskorrekturverfahren realisiert werden.

In Untersuchungen zur Auswirkung der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt müssen die hier genannten Einschränkungen der Leistungsfähigkeit regionaler Klimaprojektionen in jedem Fall berücksichtigt und in jeder Untersuchung auch transparent dargelegt werden.

■ **Tab. 16.1** Bandbreiten der Abweichungen von simulierten und beobachteten Temperaturwerten T und Niederschlagswerten N in verschiedenen Gebieten (Differenz zwischen den simulierten und den beobachteten Werten)

Gebiet	Parameter	Zeitraum	Mittelwert	Bandbreite	Einheit	Anzahl der Modelle	Quelle
Mitteleuropa	T	Winter	1,4	0,8–1,8	°C	15	Jacob et al. (2007)
	T	Sommer	0,5	–1–1,3	°C	15	
	N	Winter	51	21–93	%	15	
	N	Sommer	4	–18–35	%	15	
Deutschland	T	Jahr	–	–1,1–0,9	°C	2	Kotlarski et al. (2005)
	N	Jahr	–	–31–108	mm	2	
	T	Winter	–0,33		°C	9	Berg et al. (2013)
	T	Sommer	–1,1		°C	9	
	N	Winter	64		%	9	
	N	Sommer	33,6		%	9	
Alpen-Rhein	N	Winter	–	–54–47	%	10	Bülow et al. (2009)
	N	Sommer	–	28–22	%	10	
Main	N	Winter	–	–14–78	%	10	Krahe et al. (2009)
	N	Sommer	–	–20–34	%	10	

16.2 Auswirkungen der Klimaänderung auf ausgewählte Aspekte des Wasserhaushalts

16.2.1 Beobachtungen

■ Der Wasserhaushalt von Deutschland

Deutschland ist grundsätzlich ein wasserreiches Land. Pro Einwohner und Jahr stehen etwa 2300 m^3 Wasser zur Verfügung, was deutlich über dem Grenzwert von 1700 m^3 pro Jahr und Einwohner liegt, den die Weltorganisation für Meteorologie (*World Meteorological Organization*, WMO) als Grenzwert für Gebiete mit Wasserknappheit definiert hat (z. B. Falkenmark und Lindh 1976). Regional gibt es jedoch deutliche Unterschiede. Das obere Einzugsgebiet der Donau liegt mit 4000 m^3 pro Einwohner und Jahr weit über der WMO-Marke, das deutsche Einzugsgebiet des Rheins aufgrund der großen Bevölkerungsdichte mit 1450 m^3 pro Einwohner und Jahr aber darunter. Im kontinental geprägten Einzugsgebiet der Elbe beträgt der Wert sogar nur etwa 1000 m^3 pro Einwohner und Jahr.

Der Wasserkreislauf ist eng an das Klima gekoppelt. Durchschnittlich fallen in Deutschland ca. 770 mm Niederschlag pro Jahr; davon gelangen etwa 280 mm in die Oberflächengewässer und letztlich zum Meer. Der Rest wird durch Pflanzen aufgenommen oder verdunstet direkt vom Boden oder aus den Gewässern. Trends in der Temperatur und der Strahlung können als wichtigste Einflussgrößen für die Verdunstung ähnlich starke Auswirkungen auf den Landschaftswasserhaushalt haben wie Änderungen im Niederschlag.

Die jährlichen Niederschlagsmengen sind nicht gleichmäßig über Deutschland verteilt, und insbesondere im Osten gibt es Regionen, in denen die maximal mögliche Verdunstung den Niederschlag übersteigt. Dazu kommt, dass der Wasserbedarf der

Landschaft im Sommer durch den Wasserverbrauch der Pflanzen wesentlich höher ist als im Winter. Deshalb kann es auch in Deutschland in bestimmten Regionen oder Jahreszeiten zu Wassermangelsituationen kommen.

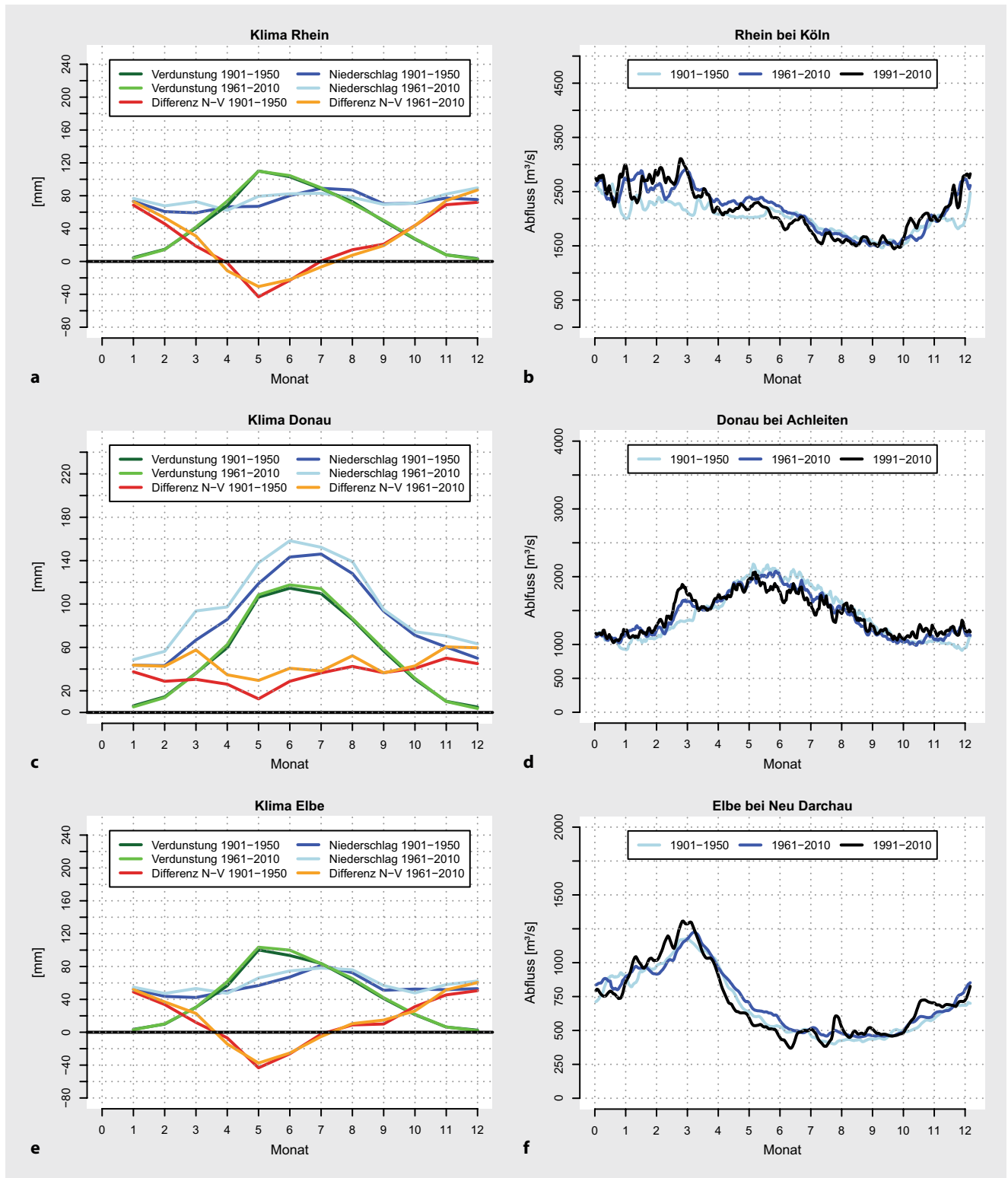
Untersucht man nun langjährige Veränderungen in den Wasserhaushaltsgrößen einer Region oder eines Einzugsgebiets, so muss berücksichtigt werden, dass neben dem Klima der Mensch nicht nur indirekt, sondern durch seine Aktivitäten in der Landschaft und durch Infrastrukturmaßnahmen (z. B. dem Bau von Talsperren und Rückhaltebecken) direkt in den Wasserhaushalt eingegriffen hat.

So zeigen beispielsweise Koch et al. (2010) für die Niedrigwasserabflüsse der Elbe, dass diese seit der Errichtung der Speicherkaskade in der Moldau zugenommen haben, obwohl die durchschnittlichen Abflüsse insgesamt keinen deutlichen Trend zeigen. Für das Abflussregime des alpinen Teils des Rheins zeigen Maurer et al. (2011) auf, dass der Rückgang der Abflüsse im Sommer und die Zunahme im Winter zwar einerseits durch die Temperaturerhöhung und eine damit einhergehende Häufung von Regenniederschlägen und Tauperioden bereits im Winter erklärt werden könnte. Andererseits kann aber auch die Bewirtschaftung von Talsperren im Alpenraum einen ähnlich starken Umverteilungseffekt haben.

Hattermann et al. (2012) zeigen, dass die von Petrow und Merz (2009) diskutierten Trends in den jährlichen Hochwasserabflüssen für den Zeitraum 1951–2002 ihre Ursache wahrscheinlich nicht im Wassermanagement oder Landschaftswandel haben, sondern auf Änderungen in den klimatischen Eingangsgrößen zurückgehen (► Kap. 10).

■ Mittlere Abflüsse und Abflussregime

■ **Abb. 16.1** zeigt die beobachteten Trends im Klima und im Abfluss für die Einzugsgebiete von Rhein, Donau und Elbe. Man



■ **Abb. 16.1** Änderungen von flächengewichtetem Niederschlag N , der aktuellen Verdunstung V , der Differenz von Niederschlag und Verdunstung $N-V$ (links) und dem beobachteten Abfluss (rechts) für die Einzugsgebiete von Rhein (a, b), Donau (c, d) und Elbe (e, f). (Klimadaten: Deutscher Wetterdienst, Abflussdaten: Global Runoff Data Centre)

sieht, dass im Einzugsgebiet des Rheins, der mit seinen Zuflüssen einen wesentlichen Teil Westdeutschlands umfasst, der Niederschlag im Winter und teilweise im Frühjahr in den vergangenen 50 Jahren leicht zugenommen und im Sommer abgenommen hat, wobei insgesamt weiterhin die meisten Niederschläge im Sommer fallen. Ebenfalls leicht zugenommen hat die Verdunstung, allerdings nicht so stark wie die Niederschläge, sodass im Rheineinzugsgebiet die Abflüsse im Winter relativ stark zugenommen haben. Dies ist in den vergangenen zwei Jahrzehnten besonders ausgeprägt. Im Sommer dagegen haben die Abflüsse etwas abgenommen. Die Tendenz einer Zunahme der winterlichen und einer Abnahme der sommerlichen Abflüsse ist, ebenfalls für die vergangenen zwei Jahrzehnte, noch stärker an der Elbe ausgeprägt. Für die meisten untersuchten Gebirgspegel in den Alpen finden Kormann et al. (2015) Trends in den Abflüssen besonders im Frühjahr und Frühsommer, was sie mit dem Klimawandel in Verbindung bringen. Für die Donau bei Achleiten, die aufgrund der Schneeschmelze in den Alpen ihre Abflussspitze in den Sommermonaten hat, erkennt man noch keine starken Trends. Gletscher- und Schneeschmelzanteile im Donau- bzw. Rheinabfluss werden ausführlich in den nationalen Berichten zum Klimawandel in Österreich (APCC 2014) und in der Schweiz (CCHydro 2012) erörtert.

■ Bodenfeuchte

Der Boden ist der wichtigste Umsatzraum für den Landschaftswasserhaushalt (► Kap. 20). Er bildet die Schnittstelle zwischen atmosphärischen und terrestrischen Prozessen und ist außerdem das Substrat für die ihn bedeckende Vegetation. Für die Wasserflüsse und Speicherung von Wasser entscheidend sind seine hydrologischen Eigenschaften, so z. B. für die Bildung von Oberflächenabfluss und damit für die Entstehung von Hochwasser (► Kap. 10). Zusammen mit der Vegetationsbedeckung steuert der Boden die Verdunstung und Abflussbildung in einem Flusseinzugsgebiet. Für die meteorologischen Prozesse ist er das „Gedächtnis des Niederschlags“, da er Niederschlagswasser speichert und über die Verdunstung zu einem späteren Zeitpunkt wieder abgibt. Die Bodenfeuchte steuert insbesondere die Aufteilung der solaren Nettostrahlung in die Flüsse fühlbarer und latenter Wärme sowie den Bodenwärmestrom. ■ Abb. 16.2 zeigt, dass für Deutschland kein einheitlicher Trend in der Veränderung der mittleren jährlichen Bodenfeuchte feststellbar ist. Während im Süden und Südwesten der Boden tendenziell feuchter wird, wird er im Osten und Nordosten eher trockener. Die Größenordnung bewegt sich in beiden Fällen bei ± 1 mm/Jahr.

■ Grundwasser

Stark anthropogen überprägt sind in Deutschland Trends in den Grundwasserständen. Durch Eindeichung von Auengebieten und Marschen zum Schutz der hier siedelnden Menschen und Entwässerung von landwirtschaftlichen Flächen zur Überführung von Weideland in Ackerland hat der Mensch großflächig in den Grundwasserhaushalt eingegriffen und reguliert seitdem künstlich den flurnahen Wasserstand. Für die weniger regulierten Grundwasserstände in den aus dem Pleistozän stammenden Hochlagen Nordostdeutschlands nahe der Wasserscheide gibt

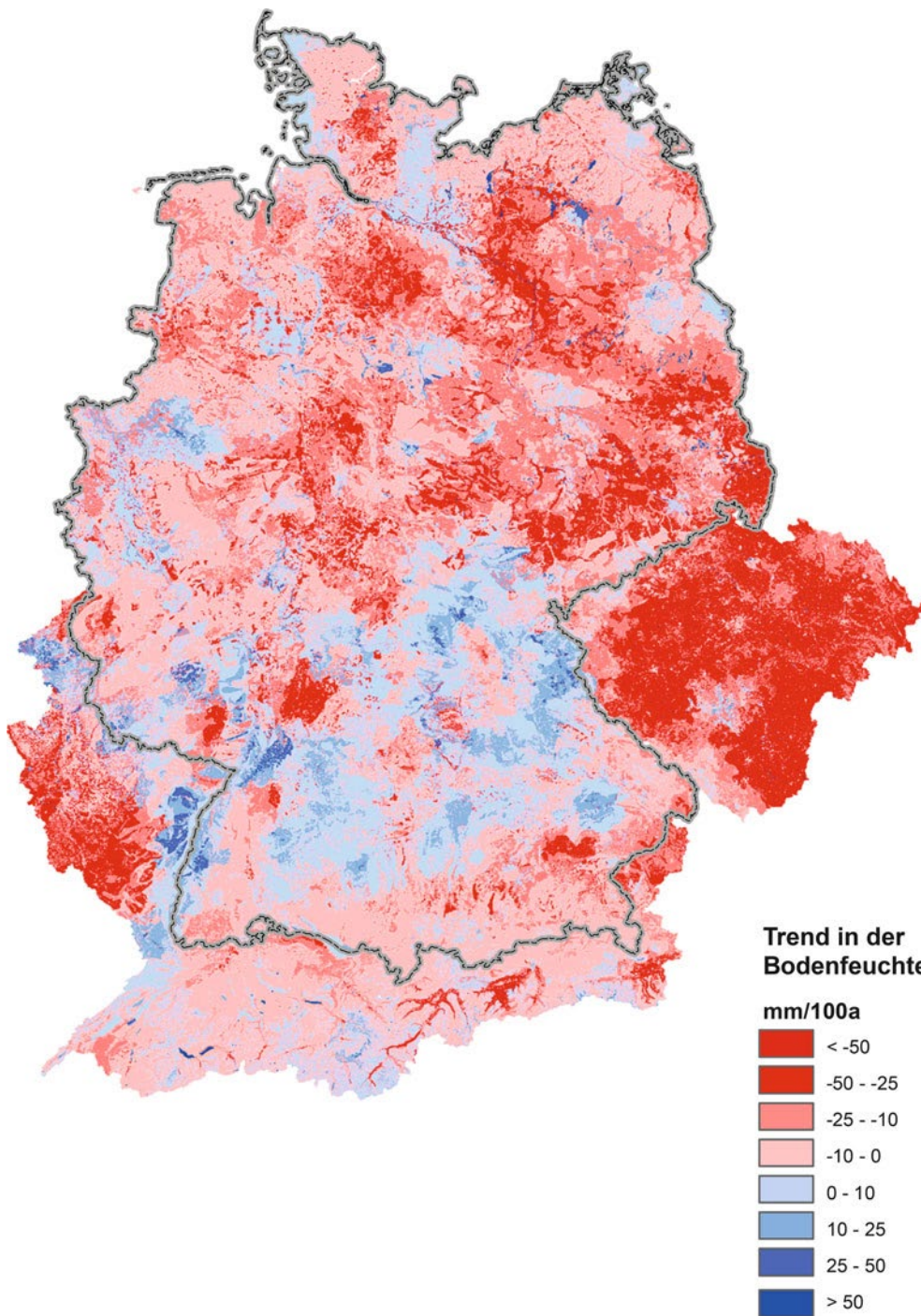
Lischeid (2010) maximale Absenkungen um bis zu 100 mm pro Jahr an. In Grundwassererneuerungsgebieten liegt die Abnahme des Grundwasserspiegels zwischen 10 und 30 mm pro Jahr. Etwa 75 % der Gesamtfläche Brandenburgs weisen eine Abnahme der Grundwasserstände auf (Lischeid 2010; Germer et al. 2011).

■ Schnee

Zur Veränderung der Schneedecke liegen insbesondere für einige Mittelgebirge Untersuchungen vor: ■ Abb. 16.3 zeigt verschiedene für die Entwicklung von Schnee wichtige klimatische Kenngrößen für den Feldberg (Baden-Württemberg, 1490 m) und für den Brocken (Sachsen-Anhalt, 1142 m) und die Perioden 1951/1990 und 1991–2012. Beide Beispiele zeigen, dass die mittlere Schneedecke in der zweiten Periode abgenommen und die schneefreie Zeit, bedingt durch die ebenfalls gezeigte Temperaturerhöhung, zugenommen hat, obwohl am Brocken auch der winterliche Niederschlag leicht angestiegen ist. In KLIWA (2005) wird das Langzeitverhalten der Schneedecke in Baden-Württemberg und Bayern analysiert. Es wird hier abgeleitet, dass der verbreitete Rückgang der Schneedeckendauer, vor allem in den tieferen Lagen, auf die erheblich angestiegenen Lufttemperaturen im Jahresabschnitt Dezember bis März zurückgeführt werden kann. Zeitreihenuntersuchungen der Maximalwerte des Wasseräquivalents einzelner Stationen zeigen, dass die im Bezugszeitraum 1951–1996 eingetretenen Rückgänge zwischen 25 und 60 % betragen. Für den deutschen Alpenanteil ist zurzeit keine Gesamtbetrachtung der Schneedeckenänderung vorhanden. Für die Entwicklung der Schneedecke in den Schweizer Alpen zeigen Scherrer et al. (2013), dass die Summen für den jährlich akkumulierten Neuschnee starke dekadische Schwankungen aufweisen, die ihr Minimum in den späten 1980er- und 1990er-Jahren hatten und seitdem wieder ansteigen, wobei die tiefer gelegenen Messstationen vom Rückgang stärker betroffen sind. In den österreichischen Alpen ist Niederschlag in fester Form, also als Schnee, besonders im Sommer, aber zum Teil auch im Winter zurückgegangen (Schöner et al. 2009; ► Kap. 7).

■ Seen

Ebenfalls schwierig, da stärker durch menschliche Eingriffe überprägt, ist die Untersuchung von Trends in der Wasserstandsentwicklung in Seen. Hupfer und Nixdorf (2011) berichten, dass seit mehr als 30 Jahren sinkende Seespiegel in Norddeutschland beobachtet werden. Allerdings waren für verschiedene Seen in Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern die Wasserstände im 20. Jahrhundert mehrfach auf einem ähnlich niedrigen Niveau wie in den vergangenen Dekaden (Kaiser et al. 2012). Periodische Seespiegelschwankungen mit Amplituden von 1–2 m sind ein Charakteristikum der durch Regen- und Grundwasserzufluss gespeisten Seen in dieser Region (Kaiser et al. 2014). In LUBW (2011) werden die Trends und Ursachen für insgesamt fallende Wasserspiegel im Bodensee im 20. Jahrhundert diskutiert, wobei eine Hauptursache in den Wassernutzungen im Einzugsgebiet gesehen wird. In der nahen Vergangenheit, in der es kaum noch gravierende menschliche Eingriffe gegeben hat, sind die Wasserstände eher konstant geblieben.



■ **Abb. 16.2** Trend der mittleren jährlichen Bodenfeuchte, abgeleitet aus dem hydrologischen Modell SWIM. (Fred F. Hattermann, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung)

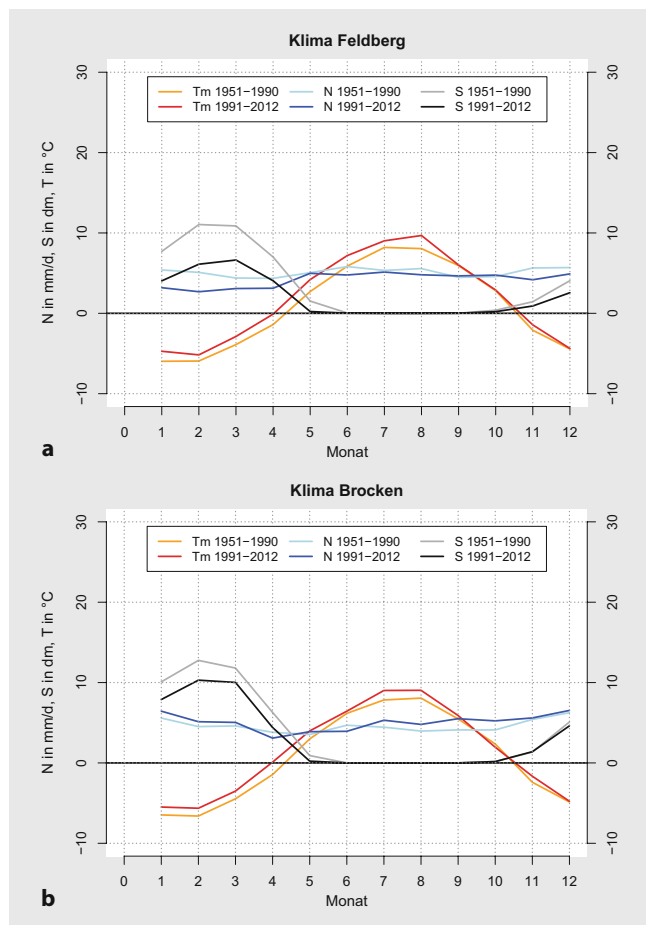
16.2.2 Projektionen für die Zukunft

Eine Vielzahl von Studien diskutiert die Unsicherheiten für die zukünftige Entwicklung der hydrologischen Prozesse und der Wasserressourcen in Deutschland (z. B. Maurer et al. 2011; Merz et al. 2012). Blöschl und Montanari (2010) sind der kontroversen Meinung, dass viele Studien die Unsicherheit der Modellergebnisse unterschätzen, die Auswirkungen für die Gesellschaft aber überschätzen. Die Formulierung von Emissionsszenarien selbst ist eine Möglichkeit, die Unsicherheit der Projektionen abzubilden, indem z. B. mittlere Szenarien und insbesondere Worst-Case-Szenarien ge-

bildet werden. Um außerdem eine gewisse Einschätzung der möglichen Unsicherheit der für jedes Szenario berechneten Modellprojektionen zu erlangen, haben sich Ensemble-Rechnungen etabliert.

■ Mittlere Abflüsse und Abflussregime

Die möglichen Folgen des Klimawandels auf den Rhein, die Donau und Teile der Elbe werden für zwei zukünftige Zeitperioden bis zum Ende dieses Jahrhunderts in KLIWAS (2011) umfassend untersucht. Hier wird ein hydrologisches Modell jeweils durch ein Ensemble von regionalen Klimamodellen angetrieben, und darauf aufbauend werden Bandbreiten der monatlichen Abfluss-



■ **Abb. 16.3** Mittlere monatliche Minimumtemperatur am Boden T_m , Niederschläge N und Schneedeckenhöhe S der Klimastationen Feldberg (a) und Brocken (b). (Klimadaten: Deutscher Wetterdienst)

änderungen ermittelt. Für den Rhein ergeben sich in der nahen Zukunft von 2021 bis 2050 im Mittel der Projektionen keine signifikanten Änderungen im Jahresabfluss, aber höhere Abflüsse im Winter- und niedrigere im Sommerhalbjahr. In der ferneren Zukunft bis 2100 würden die Abflüsse im Szenarienkorridor um 10–25% fallen, mit einer noch stärkeren Verlagerung der Abflüsse vom Sommer in den Winter (Nilson et al. 2011). Für die Donau zeigen Klein et al. (2011) mit demselben Szenarien- und Modellaufbau und für dieselben Szenarienperioden, dass die sommerlichen Abflüsse am Pegel Achleiten in naher Zukunft leicht fallen und die durchschnittlichen Jahresabflüsse in der ferneren Zukunft um bis zu 40% abnehmen werden, wobei insgesamt das Abflussregime einen stärker pluvialen Charakter annimmt und damit die sommerlichen Abflüsse relativ stark sinken. Kling et al. (2012) bestätigen diese Ergebnisse für die Donau bis Wien in hydrologischen Simulationen, angetrieben mit 21 Klimaprojektionen aus dem ENSEMBLES-Projekt und für das Szenario A1B.

Mit einem ähnlichen Ensemble von regionalen Klimamodellen, wie in KLIWAS (2011) beschrieben, kommen Hattermann et al. 2014 für den Rhein, die Elbe und die Donau zu sehr ähnlichen Ergebnissen (■ Abb. 16.4). Während die Abflüsse im Einzugsgebiet von Rhein und Donau im Winter zu- und im Sommer

abnehmen, besonders ausgeprägt in der zweiten Szenarienperiode zum Ende des Jahrhunderts (2061–2090), zeigt sich für die Elbe kein einheitliches Bild. Im Rhein dagegen nehmen gegen Ende des Jahrhunderts die Abflüsse insgesamt ab.

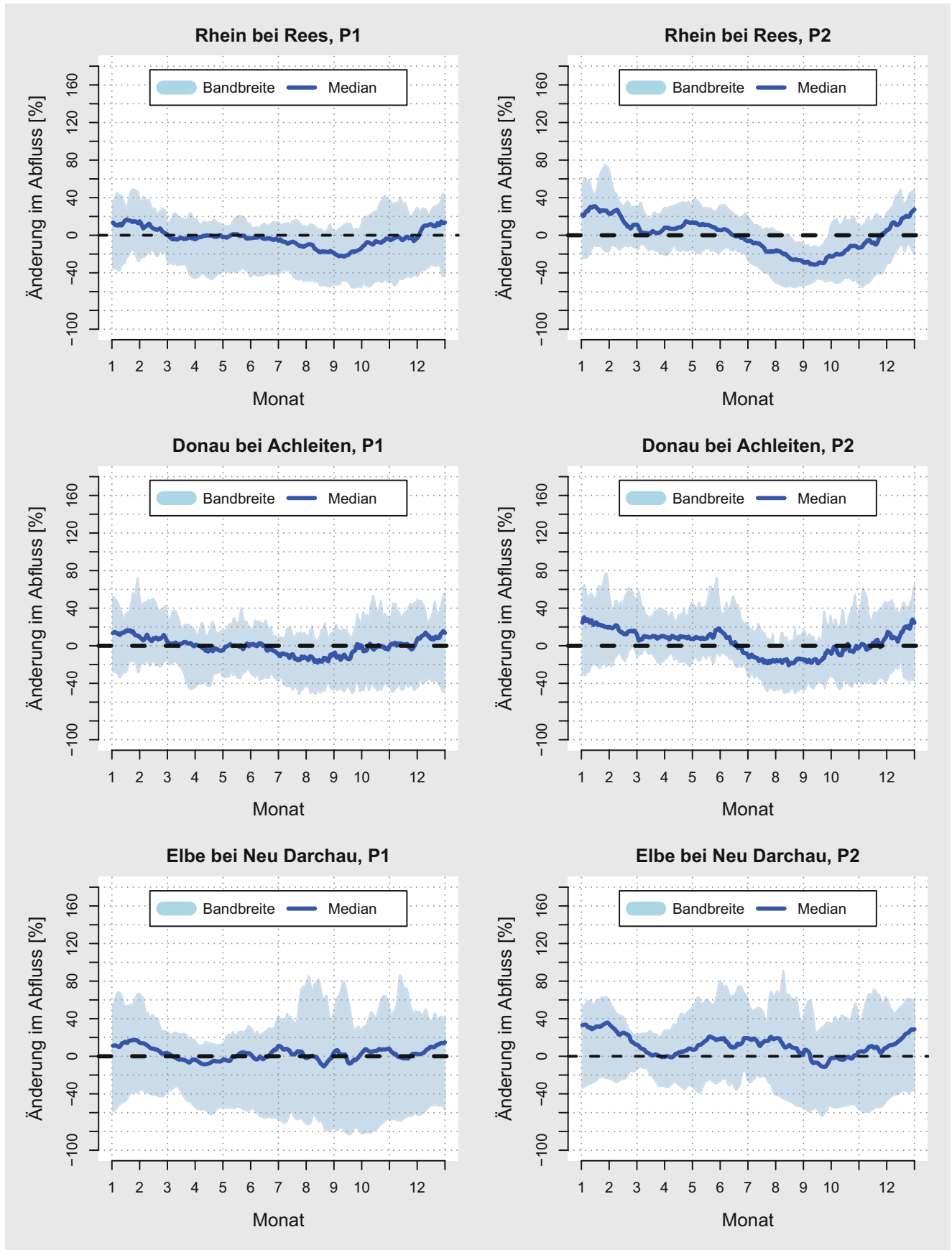
Speziell für die sommerlichen Niedrigwasserabflüsse in Mitteleuropa zeigen Feyen und Dankers (2009), dass diese an fast allen größeren Flüssen in Deutschland fallen werden. Huang et al. (2013) treiben ein hydrologisches Modell für die großen Flussgebiete in Deutschland durch Szenarienergebnisse (Szenario A1B) aus drei regionalen Klimamodellen an. Sie folgern, dass sich in der Mehrheit der Ergebnisse im Vergleich der Perioden 1961–2000 und 2061–2100 Niedrigwassersituationen in Zukunft häufen und länger dauern werden. Die Niedrigwasserperiode von Flüssen, die durch nival-pluviales Regime geprägt sind, verschiebt sich weiter in den späten Herbst.

In einer Studie, in der drei verschiedene hydrologische Modelle durch zwei regionale Klimamodelle angetrieben werden (Wagner et al. 2013), kommen Ott et al. (2013) für die Einzugsgebiete von Ammer, Mulde und Ruhr zu dem Schluss, dass die Unsicherheit der Änderung für die nahe Zukunft bis 2050 groß ist. Die Unterschiede des Klimaantriebs aus den zwei Regionalmodellen sind dabei größer als die der Ergebnisse der hydrologischen Modelle. Auch Vetter et al. (2013) berichten für ein Ensemble aus fünf regionalen Klimamodellen für das Szenario RCP 8.5, durch das drei hydrologische Modelle für drei Flussgebiete angetrieben werden, dass die durch den Klimaantrieb generierte Unsicherheit größer ist als die Unsicherheit, die durch die hydrologischen Modelle erzeugt wird.

Diese klimabedingte Änderung der Abflusscharakteristika in den großen Einzugsgebieten Deutschlands hin zu mehr pluvialen Regimen, wie sie schon Bormann (2010) für die beobachteten Abflüsse beschreibt, würde sich also für die Mehrheit der deutschen Einzugsgebiete und in der Mehrheit der Simulationsergebnisse in Zukunft fortsetzen: insgesamt weniger Abfluss im Sommer, teilweise eine Zunahme im Winter, höchster Abfluss früher im Jahr und der niedrigste Abfluss später im Jahr. Auch für Studien mit sehr hoch aufgelösten Klimaprojektionen (Kunstmann et al. 2004; Marx et al. 2008) für alpine Einzugsgebiete wird von zu erwartenden Abnahmen des Sommer- und Zunahme des Winterabflusses berichtet. Eine generelle Aussage zu klimabedingten Änderungen von extremen Hoch- und Niedrigwassersituationen in Deutschland ist dabei aber nicht möglich.

■ Grundwasser

Besonders sensitiv auf Änderungen im Klima reagiert die Grundwasserneubildung. Das liegt zum einen daran, dass zum Grundwasser nur der Teil des Niederschlags gelangt, der nicht durch die Pflanzen aufgenommen wird, oberflächlich verdunstet oder abgeflossen ist. Zum anderen ist die Jahreszeit mit der höchsten Grundwasserneubildung die vegetationsfreie Zeit, also der Winter. Durch die in vielen Regionen Deutschlands beobachtete Verlagerung von Niederschlag aus dem Sommer in den Winter kann die Grundwasserneubildung insgesamt steigen. Allerdings verringert sich die vegetationsfreie Zeit durch den Anstieg der Temperatur, und die Verdunstung steigt insgesamt. Hattermann et al. (2008) ermitteln für das deutsche Einzugsgebiet der Elbe einen



■ **Abb. 16.4** Änderung des Abflusses unter Emissionsszenario SRES A1B für den Rhein bei Rees, für die Donau bei Achleiten und für die Elbe bei Neu Darchau als Differenz zwischen der Referenzperiode 1981–2010 und der Simulationsperiode 2031–2060 (links) bzw. der Simulationsperiode 2061–2090 (rechts). (Verändert nach Hattermann et al. 2014)

Rückgang der Grundwasserneubildung um ca. 30 %. Barthel et al. (2011) zeigen die Änderung der Grundwasserneubildung für das obere Donaueinzugsgebiet bis zur österreichischen Grenze – hier unter Benutzung des regionalen Klimamodells REMO und des Szenarios A1B. Die Grundwasserneubildung nimmt als Ergebnis im Vergleich der Perioden 1971–2000 und 2011–2060 ab, und der Monat mit der höchsten Grundwasserneubildung verschiebt sich um bis zu 2 Monate in den Winter.

■ Schnee

Modellbasierte Klimaprojektionen zeigen eine Erhöhung der mittleren Temperatur und eine gewisse Steigerung der Winterniederschläge. Daraus wird auf eine weitere Verschiebung von Schneefall zu Regen und auf ein verstärktes Auftreten von Ereignissen geschlossen, in denen Regen auf die vorhandene Schneedecke fällt (Schneider et al. 2013). Für den alpinen Raum zeigen Steger et al. (2013) eine relative Abnahme des Schnees bis Mitte des 21. Jahrhunderts in der Größenordnung von 40–80 % bezogen auf die Referenzperiode 1971–2000. Die größten Veränderungen finden in Gebieten bis zu einer Höhe von 1500 m statt. Sauter et al. (2010) berechnen für den Schwarzwald eine Abnahme der Schneetage mit einer Schneedecke von mehr als 10 cm um bis zu 66 %. Besonders betroffen sind auch hier Bereiche bis 1000 m. Schneider et al. (2013) erwarten in der Zukunft keine substanzielle Beeinflussung der Abflüsse durch Schnee, gleichwohl führen geringerer Schneefall und eine frühere Schneeschmelze zu einer Vorverlagerung der Abflüsse im Jahr (Wolf-Schumann und Dumont 2010) und zu einem leicht erhöhten Potenzial für die Wasserkraftnutzung. Regional kann auch Regen, der auf eine vorhandene Schneedecke fällt, den Winterabfluss erhöhen und seine Variabilität verändern (► Kap. 7).

■ Küstengewässer

Der Anstieg des mittleren Meeresspiegels wird seit Jahrzehnten für die Weltmeere, aber auch für die deutsche Nord- und Ostsee beobachtet und beschrieben. Seit den 1950er-Jahren wurde für küstenwasserbauliche Fragestellungen von einem sogenannten säkularen Meeresspiegelanstieg von 25 cm/Jahrhundert in der Nordsee und von rund 15 cm/Jahrhundert in der Ostsee ausgegangen. Aktuelle Untersuchungen gehen für die Zukunft von einem beschleunigten Meeresspiegelanstieg auch in der Nord- und Ostsee aus (IPCC 2013; BACC 2008). Die meisten Angaben für den Meeresspiegelanstieg bis Ende des 21. Jahrhunderts liegen in einer Größenordnung von unter einem Meter. Einzelne Autoren geben teilweise deutlich höhere Werte für den zu erwartenden Meeresspiegelanstieg an (► Kap. 9).

Zusätzlich zu den Änderungen des mittleren Wasserstands sind zukünftig auch Veränderungen des Seegangsklimas zu erwarten, die im Wesentlichen aus den Veränderungen der Windgeschwindigkeiten und der Windrichtungen resultieren. Für die deutsche Nordsee und für die deutsche Ostsee wurden auf der Grundlage von Ergebnissen des Modells COSMO-CLM mittlere Anstiege der signifikanten Wellenhöhen in einer Größenordnung von 5–10 % abgeschätzt.

16.3 Wissenschaftliche Basis und Optionen von Anpassungsmaßnahmen

Die Anpassung fokussiert in Deutschland auf die Abwehr von Hochwasser, auf die Wasserqualität, den Umgang mit Niedrigwassersituationen und den Küstenschutz. Anpassungsmaßnahmen reichen hier von der Erarbeitung von Handlungsstrategien über verändertes Management bis hin zu technischer Anpassung. In der Bundesrepublik Deutschland liegen für Gewässer Zuständigkeiten von der Bundes- über die Landesebene bis hin zu den Kommunen vor. Daher kommt der vertikalen Integration – oder *multilevel governance*, also dem Zusammenspiel der zuständigen Ebenen – eine besondere Bedeutung zu (Beck et al. 2011). ■ Tab. 16.2 gibt einen grundsätzlichen Überblick über mögliche Anpassungsoptionen, technische Maßnahmen und Managementstrategien.

Auf Bundesebene wurde mit der Deutschen Anpassungsstrategie (DAS 2008) der Rahmen zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels gesetzt, und mit dem Aktionsplan Anpassung (2011) wurden die in der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel genannten Ziele und Handlungsoptionen mit konkreten Aktivitäten unterlegt. In direkter Bundesverantwortung im Projekt KLIWAS werden z. B. wissenschaftliche Grundlagen erarbeitet, um die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf die schiffbaren Gewässer und die Wasserstraßeninfrastruktur in Deutschland abzuschätzen. Hieraus wird schließlich der konkrete Anpassungsbedarf abgeleitet, und es werden Anpassungsoptionen erarbeitet. Die Integration von Anpassungserfordernissen in Normen und technische Regelwerke wird durch die neue Technische Regel Anlagensicherheit (TRAS) „Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Niederschläge und Hochwasser“ angestrebt. Damit werden Betreiberpflichten hinsichtlich der Berücksichtigung der Gefahrenquellen durch Niederschläge und Hochwasser durch einen grundsätzlich anzuwendenden Aufschlag für Neuanlagen und eine Nachrüstungspflicht bis 2050 konkretisiert (Aktionsplan Anpassung 2011).

Die Länder Baden-Württemberg und Bayern sowie der Deutsche Wetterdienst kamen im Dezember 1998 zum Kooperationsvorhaben „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft (KLIWA)“ zusammen, dem sich 2007 auch Rheinland-Pfalz angeschlossen hat. Dieses hat zu einer Fokussierung auf die Erhöhung der Resilienz geführt, indem beispielsweise der „Lastfall Klimaänderung“ in die Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes eingegangen ist. So wird in Bayern z. B. auf den Scheitelabfluss eines hundertjährigen Hochwassers ein Klimafaktor von 15 % aufgeschlagen. Die Infobox zeigt konkret die bereits erfolgten und die zukünftig geplanten Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel im Wasserbereich am Beispiel Bayerns auf.

Für den Bereich der Küstengewässer wird insbesondere in den KLIMZUG-Vorhaben RAdOst, KLIMZUG-Nord sowie Nordwest 2050 eine Vielzahl von Anpassungsoptionen an die Auswirkungen des Klimawandels wissenschaftlich, aber auch in einem Netzwerk-Bildungsprozess und in sogenannten Lern- und Aktionsallianzen auf den relevanten gesellschaftli-

■ Tab. 16.2 Anpassungsoptionen, technische Maßnahmen und Managementstrategien. (Hattermann et al. 2011)

Hochwasserschutz	<p>Wiederherstellung der natürlichen Rückhalteräume und Erhöhung der Infiltrationskapazität, z. B. Auenrenaturierung und Änderung der Landnutzung</p> <p>Einschränkung der Siedlung und Bebauung in Risikogebieten</p> <p>Standards im Bausektor wie Objektschutz, Oberflächendurchlässigkeit und Dachbegrünungen</p> <p>Verbesserung des technischen Hochwasserschutzes, z. B. Erhöhung von Deichen, Erhöhung des Speicherraums und Erneuern von Entwässerungssystemen</p> <p>Verbesserung der Prognoseverfahren und des Informationsflusses</p> <p>Verbesserung der Versicherungen gegen Hochwasserschäden</p> <p>Aufhebung des Anschluss- und Benutzungszwangs der öffentlichen Regenwasserkanalisation in den Ortssatzungen</p> <p>Berücksichtigung von abflussmindernden Maßnahmen bei der Bauleitplanung</p>
Trockenheit und Niedrigwasserschutz	<p>Verbesserung technischer Maßnahmen zur Erhöhung der Wasserverfügbarkeit, z. B. Vorratsmengen, Wassertransfers, und künstliche Grundwasseranreicherung</p> <p>Steigerung der Effizienz der Wassernutzung, z. B. durch bessere Wasserinfrastruktur, Nutzung von Grauwasser und effizientere landwirtschaftliche Bewässerung</p> <p>Wirtschaftliche Anreize, etwa durch Wasserpreisgestaltung</p> <p>Beschränkung von Wasser in Zeiten der Knappheit</p> <p>Landschaftsplanerische Maßnahmen zum Schutz des Wasserhaushalts, z. B. Änderung der Landnutzung, Waldumbau und weniger Flächenversiegelungen</p> <p>Verbesserung der Prognoseverfahren, Überwachung des Informationsflusses</p> <p>Verbesserung der Versicherungsangebote gegen Dürreschäden</p>
Allgemeine Maßnahmen zur Anpassung	<p>Sensibilisierung, Informationskampagnen</p> <p>Aufbau finanzieller Ressourcen</p>

chen sowie administrativen Ebenen diskutiert. Im Projekt RAD-Ost werden auf Gebietsebene konkrete Anpassungsoptionen für Hochwasser- und Küstenschutzanlagen an der deutschen Ostseeküste gegeben (Fröhle 2012), die zudem Anforderungen aus der touristischen Nutzung sowie aus Sicht des Natur- und Umweltschutzes einbeziehen. Auf administrativer Ebene wird derzeit von den Küstenschutzbehörden der Küstenländer Niedersachsen, Bremen, Hamburg, Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern für die Bemessung von Deichen, Hochwasserschutzdünen sowie anderen Hochwasserschutzanlagen erstmals einheitlich ein sogenannter Klimazuschlag für den Bemessungshochwasserstand von 0,5 m angenommen. Angesichts der Projektionen des mittleren globalen Meeresspiegelanstiegs im 21. Jahrhundert von bis zu 1 m (IPCC 2013) ist dieser Wert als sehr niedrig einzuschätzen weshalb der Klimazuschlag mindestens 1 m betragen sollte.

den. Regionale Klimaprojektionen und Ensembleauswertungen auf der Basis unterschiedlicher Klimaszenarien und Modellsysteme zeigen, dass die mittleren Abflüsse z. B. an Rhein und Donau im Winter zu- und im Sommer weiter abnehmen werden. Bei starker regionaler Differenzierung wird insgesamt eine Entwicklung hin zu mehr pluvialen Regimen erwartet, und die höchsten mittleren Abflüsse werden früher im Jahr auftreten. Für Küstengewässer wird ein verändertes Seegangsklima erwartet, u. a. ein mittlerer Anstieg der Wellenhöhen um bis zu 10 %.

16.4 Kurz gesagt

Mit der globalen Erwärmung verändert sich der Wasserhaushalt. Dies kann regional sehr unterschiedlich sein. Regionale Klimamodelle zeigen für Deutschland weiterhin große gerichtete Fehler in der Reproduktion des Jetztzeitklimas. Während für die Temperaturen Fehler von bis zu 1 °C ausgemacht werden können, werden saisonale Niederschläge um bis zu 60 % von den Modellen über- oder unterschätzt. Rhein und Elbe zeigen wie die meisten Flüsse in Deutschland eine Zunahme der mittleren winterlichen Abflüsse und einen Rückgang im Sommer. Gebirgspegel in den Alpen zeigen Zunahmen mittlerer Abflüsse eher im Frühjahr. Insgesamt sind Änderungen im Abflussregime aber noch nicht stark ausgeprägt. Für einige Pegel kann kein statistisch signifikanter Trend abgeleitet wer-

Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel im Wasserbereich am Beispiel des Freistaats Bayern

Zur Stärkung des natürlichen Rückhalts, also um Niederschläge im Einzugsgebiet zurückhalten und um Hochwasserswellen dämpfen zu können, wurden von 2001 bis 2010:

- 55 km Deich zurückverlegt und 230 ha Auwald aufgeforstet,
- 764 km Gewässer und 1883 ha Ufer renaturiert,
- mehr als 8 Mio. m³ ungesteuerter Rückhalteraum aktiviert.

Der technische Hochwasserschutz erhöht das Schutzniveau. Überregional wirkende Hochwasserspeicher und gesteuerte Flutpolder werden deshalb als unerlässlich angesehen, wenn bei einem großen Hochwasser die Rückhalteräume in der Fläche gefüllt sind. Seit dem Hochwasser 2013 hat die Überlastfall-

betrachtung von Schutzanlagen einen neuen Stellenwert bekommen, also die gezielte Umleitung von Flusswasser auf landwirtschaftliche Flächen, um die Hochwasserspitze zu verringern. Von 2001 bis 2010 wurden z. B.:

- 400.000 Einwohner vor Hochwasser und 45.000 Einwohner vor Wildbächen (Hochwasser und Muren) sowie vor Lawinen geschützt,
- 78 km Schutzmauern, 107 km Deiche, 5 km mobile Schutzwände errichtet,
- 8,6 Mio. m³ Rückhalteraum und ein gesteuerter Flutpolder mit 6,6 Mio. m³ Volumen geschaffen.

Hochwasservorsorge und Hochwasserrisikomanagement sind weitere wesentliche Bestandteile des Hochwasserschutzes, um

mit unvermeidbaren Restrisiken umgehen zu können.

- Die „Bayerische Plattform Naturgefahren“ bündelt deshalb im Internet alle Informations- und Warndienste wie z. B. Hochwassernachrichtendienst, Niedrigwasserinformationsdienst und Georisiken.
 - Die Überschwemmungsgebiete aller größeren Gewässer wurden detailliert ermittelt. Mit den betroffenen Kommunen wird eine Bewertung der örtlichen Hochwasserrisiken durchgeführt.
- Der beim Hochwasser 2013 bewährte Hochwassernachrichtendienst wird hinsichtlich Langfristvorhersage und größere Genauigkeit zukünftig weiter verbessert.

Literatur

Aktionsplan Anpassung (2011) Aktionsplan Anpassung der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel vom Bundeskabinett am 31. August 2011 beschlossen

APCC (2014) Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC). Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien

BACC (2008) Assessment of climate change for the Baltic Sea basin, Series: Regional climate studies, BACC Author Team. Springer, Berlin, Heidelberg
 Barthel R, Reichenau T, Muerth M, Heinzler C, Schneider K, Hennicker R, Mauser W (2011) Folgen des Globalen Wandels für das Grundwasser in Süddeutschland – Teil 1: Naturräumliche Aspekte. Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie 16:247–257. doi:10.1007/s00767-011-0179-4

Beck S, Bovet J, Baasch S, Reiß P, Görg C (2011) Synergien und Konflikte von Strategien und Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel. UBA-FBNr: 001514. FKZ: 3709 41 126 Climate Change 18. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

Berg P, Wagner S, Kunstmann H, Schädler G (2013) High resolution regional climate model simulations for Germany: Part I – validation. Clim Dyn 40:401–414

Blöschl G, Montanari A (2010) Climate change impacts – throwing the dice? Hydrol Process 24(3):374–381. doi:10.1002/hyp.7574

Bormann H (2010) Runoff regime changes in German rivers due to climate change. Erdkunde 64(3):257–279. doi:10.3112/erdkunde.2010.03.04

Bülow K, Jacob D, Tomassini L (2009) Vergleichende Analysen regionaler Klimamodelle für das heutige und zukünftige Klima KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland. 1. Statuskonferenz, 18.–19. März 2009.

CCHydro (2012) Effects of climate change on water resources and waters. Synthesis report on “Climate change and hydrology in Switzerland” (CCHydro) project. Federal Office for the Environment FOEN, Bern (<http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01670/index.html?lang=en>)

Christensen JH, Boberg F, Christensen OB, Lucas-Picher P (2008) On the need for bias correction of regional climate change projections of temperature and precipitation. Geophys Res Lett 35. doi:10.1029/2008GL035694

DAS (2008) Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel, vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossen. <http://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/anpassung-an-den-klimawandel/>

Falkenmark and Lindh (1976), quoted in UNEP/WMO. “Climate change 2001: Working group II: Impacts, adaptation and vulnerability”. UNEP. Retrieved 2009-02-03

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

Fröhle P (2012) To the effectiveness of coastal and flood protection structures under terms of changing climate conditions. Proc 33rd International Conference on Coastal Engineering, ICCE, Santander, Spain, 2012, July 1–6.

Germer S, Kaiser K, Bens O, Hüttl RF (2011) Water balance changes and responses of ecosystems and society in the Berlin- Brandenburg region, Germany – a review. Erde 142(1/2):65–95

Hattermann FF, Post J, Krysanova V, Conradt T, Wechsung F (2008) Assessment of water availability in a Central European river basin (Elbe) under climate change. Adv Clim Change Res 4:42–50

Hattermann FF, Weiland M, Huang S, Krysanova V, Kundzewicz ZW (2011) Model-supported impact assessment for the water sector in Central Germany under climate change – a case study. Water Resour Manage 25:3113–3134

Hattermann FF, Kundzewicz ZW, Vetter HST, Kron W, Burghoff O, Hauf Y, Krysanova V, Gerstengarbe F-W, Werner P, Merz B, Bronstert A (2012) Flood risk in holistic perspective – observed changes in Germany. In: Changes of flood risk in Europe. IAHS Press, Wallingford, S 212–237

Hattermann FF, Huang S, Koch H (2014) Climate change impacts on hydrology and water resources in Germany. Meteorol Z. doi:10.1127/metz/2014/0575

Huang S, Krysanova V, Hattermann FF (2013) Projection of low flow conditions in Germany under climate change by combining three RCMs and a regional hydrological model. Acta Geophys 61(1):151–193. doi:10.2478/s11600-012-0065-1

Hupfer M, Nixdorf B (2011) Zustand und Entwicklung von Seen in Berlin und Brandenburg. Materialien der Interdisziplinären Arbeitsgruppen, IAG Globaler Wandel – Regionale Entwicklung. Diskussionspapier, Bd. 11. Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin

IPCC (2013) Summary for policymakers. In: Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (Hrsg) Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

Jacob D, Barring L, Christensen OB, Christensen JH, de Castro M, Déqué M, Giorgi F, Hagemann S, Hirschi M, Jones R, Kjellström E, Lenderink G, Rockel B, Sanchez E, Schär C, Seneviratne SI, Somot S, van Ulden A, van den Hurk B (2007) An inter-comparison of regional climate models for Europe: model performance in present-day climate. Clim Chang 81:31–52

Kaiser K, Lorenz S, Germer S, Juschus O, Küster M, Libra J, Bens O, Hüttl RF (2012) Late Quaternary evolution of rivers, lakes and peatlands in northeast Germany reflecting past climatic and human impact – an overview. E&G Quaternary Science Journal 61(2):103–132. doi:10.3285/eg.61.2.01

Kaiser K, Koch PJ, Mauersberger R, Stüve P, Dreibrodt J, Bens O (2014) Detection and attribution of lake-level dynamics in northeastern central Europe in recent decades. Reg Environ Change 14:1587–1600

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-Tagungsband „Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland“ 2. Statuskonferenz, 25. und 26. Oktober 2011. BMVBS, Berlin
- Kling H, Fuchs M, Paulin M (2012) Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *J Hydrol* 424(425):264–277. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.01.011
- KLIWA (2005) Langzeitverhalten der Schneedecke in Baden-Württemberg und Bayern. Eigenverlag, München
- KLIWAS (2011) Tagungsband „Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland“. 2. KLIWAS (Klima, Wasser, Schifffahrt) -Statuskonferenz, 25. und 26. Oktober 2011. BMVBS, Berlin
- Koch H, Wechsung F, Grünewald U (2010) Analyse jüngerer Niedrigwasserabflüsse im tschechischen Elbeinzugsgebiet. *Hydrol Wasserbewirtsch* 54(3):169–178
- Kormann C, Francke T, Bronstert A (2015) Detection of regional climate change effects on alpine hydrology by daily resolution trend analysis in Tyrol, Austria. *J Water Clim Change* 6(1):124–143
- Kotlarski S, Block A, Böhm U, Jacob D, Keuler K, Knoche R, Rechid D, Walter A (2005) Regional climate model simulations as input for hydrological applications: evaluation of uncertainties. *Adv Geosci* 5:119–125
- Krahe P, Nilson E, Carambia M, Maurer T, Tomassini L, Bülow K, Jacob D, Moser H (2009) Wirkungsabschätzung von Unsicherheiten der Klimamodellierung in Abflussprojektionen – Auswertung eines Multimodell-Ensembles im Rheingebiet. *Hydrol Wasserbewirtsch* 53(5):316–331
- Kunstmann H, Schneider K, Forkel R, Knoche R (2004) Impact analysis of climate change for an Alpine catchment using high resolution dynamic downscaling of ECHAM4 time slices. *Hydrol Earth Syst Sci* 8:1031–1045
- Lischeid G (2010) Landschaftswasserhaushalt in der Region Berlin-Brandenburg. Materialien der Interdisziplinären Arbeitsgruppen IAG Globaler Wandel – Regionale Entwicklung. Diskussionspapier, Bd. 2. Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin (http://www.mugv.brandenburg.de/cms/media.php/lbm1.a.3310.de/udb_wasser.pdf)
- LUBW (2011) Langzeitverhalten der Bodensee-Wasserstände. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe
- Marx A, Mast M, Knoche R, Kunstmann H (2008) Global climate change and regional impact on the water balance – Case study in the German alpine area. *Wasserwirtschaft* 98(9):12–16
- Maurer T, Nilson E, Krahe P (2011) Entwicklung von Szenarien möglicher Auswirkungen des Klimawandels auf Abfluss- und Wasserhaushaltskenngrößen in Deutschland. *acatech Materialien*, Bd. 11. Eigenverlag, München
- Merz B, Maurer T, Kaiser K (2012) Wie gut können wir vergangene und zukünftige Veränderungen des Wasserhaushalts quantifizieren? *Hydrol Wasserbewirtsch* 56(5):244–256
- Nilson E, Carambia M, Krahe P, Larina M, Belz JU, Promny M (2011) Ableitung und Anwendung von Abflussprojektionen für verkehrswasserwirtschaftliche Fragestellungen am Rhein. In: KLIWAS-Tagungsband „Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland“ 2. Statuskonferenz, 25. und 26. Oktober 2011. BMVBS, Berlin
- Ott I, Duethmann D, Liebert J, Berg P, Feldmann H, Ihringer J, Kunstmann H, Merz B, Schaedler G, Wagner S (2013) High resolution climate change impact analysis on medium sized river catchments in Germany: An ensemble assessment. *J Hydrometeorol*. doi:10.1175/JHM-D-12-091.1
- Petrow T, Merz B (2009) Trends in flood magnitude, frequency and seasonality in Germany in the period 1951–2002. *J Hydrol* 371(1–4):129–141
- Sauter T, Weitzenkamp B, Schneider C (2010) Spatio-temporal prediction of snow cover in the Black Forest mountain range using remote sensing and a recurrent neural network. *Int J Climatol* 30:2330–2341. doi:10.1002/joc.2043
- Scherrer SC, Wüthrich C, Croci-Maspoli M, Weingartner R, Appenzeller D (2013) Snow variability in the Swiss Alps 1864–2009. *Int J Climatol*. doi:10.1002/joc.3653
- Schneider C, Laizé CL, Acreman RMC, Flörke M (2013) How will climate change modify river flow regimes in Europe? *Hydrol Earth Syst Sci* 17:325–339. doi:10.5194/hess-17-325-2013
- Schöner W, Auer I, Böhm R (2009) Long term trend of snow depth at Sonnblick (Austrian Alps) and its relation to climate change. *Hydrol Process* 23(7):1052–1063
- Steger C, Kotlarski S, Jonas T, Schär C (2013) Alpine snow cover in a changing climate: a regional climate model perspective. *Clim Dyn* 41:735–754. doi:10.1007/s00382-012-1545-3
- Vetter T, Huang S, Yang T, Aich V, Gu H, Krysanova V, Hattermann FF (2013) Intercomparison of climate impacts and evaluation of uncertainties from different sources using three regional hydrological models for three river basins on three continents. *Impacts World 2013*, International Conference on Climate Change Effects, Potsdam.
- Wagner S, Berg P, Schädler G, Kunstmann H (2013) High resolution regional climate model simulations for Germany: Part II – Projected climate changes. *Clim Dyn* 40(1):415–427. doi:10.1007/s00382-012-1510-1
- Wolf-Schumann U, Dumont U (2010) Einfluss der Klimaveränderung auf die Wasserkraftnutzung in Deutschland. *Wasserwirtschaft* 8:28–33

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Etwasige Abbildungen oder sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende oder der Quellreferenz nichts anderes ergibt. Sofern solches Drittmaterial nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht, ist eine Vervielfältigung, Bearbeitung oder öffentliche Wiedergabe nur mit vorheriger Zustimmung des betreffenden Rechteinhabers oder auf der Grundlage einschlägiger gesetzlicher Erlaubnisvorschriften zulässig.