

# Auswirkungen des Klimawandels auf das Grundwasser in Hessen

W4

MARIO HERGESELL & GEORG BERTHOLD

## 1 Einführung

Es ist unumstritten, dass der Klimawandel im vollen Gange ist. Der in diesem Jahr veröffentlichte vierte Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) sorgte weltweit für Aufsehen. Der Bericht dokumentiert in umfassender Weise die bereits beobachtbaren Auswirkungen des globalen Klimawandels.

Die Erwärmung des Klimasystems ist eindeutig. Dies ist aufgrund der Beobachtungen des Anstiegs der mittleren globalen Luft- und Meerestemperaturen, des ausgedehnten Abschmelzens von Schnee und Eis und des Anstiegs des mittleren globalen Meeresspiegels offensichtlich. Der größte Teil des Anstiegs der mittleren globalen Temperatur seit Mitte des 20. Jahrhunderts ist sehr wahrscheinlich durch den beobachteten Anstieg der anthropogenen Treibhausgaskonzentrationen verursacht. Das wichtigste anthropogene Treibhausgas ist Kohlendioxid.

Die Projektionen des IPCC für die weltweite Temperatur-

erhöhung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts reichen von 1,1 bis 6,4 Grad. Diese Projektionen basieren auf unterschiedlichen Annahmen über den demographischen, gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und technologischen Wandel. Für ein Ensemble unterschiedlicher Annahmen (Entwicklungstrends) hat das IPCC verschiedene, sogenannte **SRES-Emissionsszenarien** für den Zeitraum 2001 bis 2100 definiert. Welches dieser Emissionsszenarien zukünftig eintreten wird ist ungewiss, denn die Eintrittswahr-

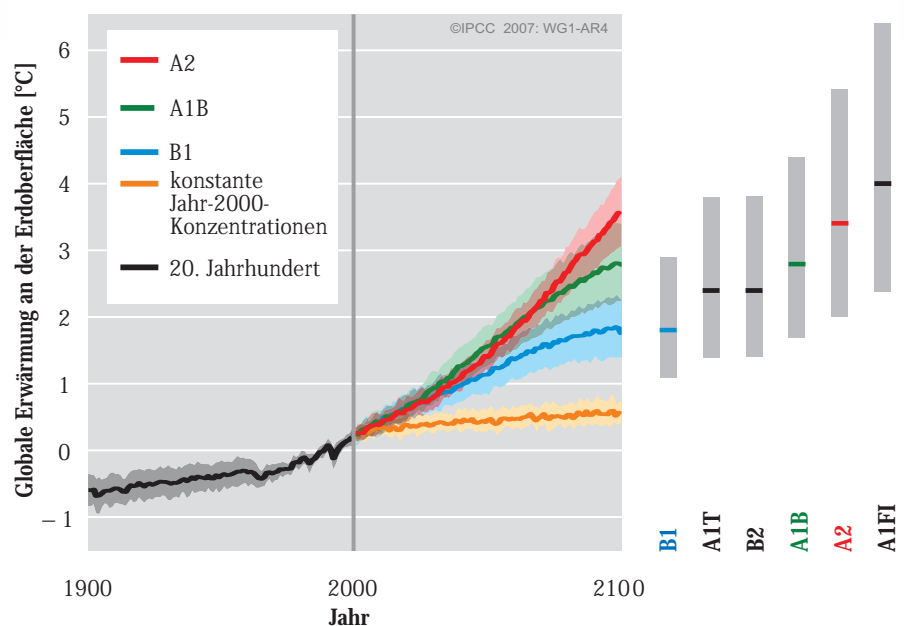


Abb. 1: Bandbreiten für die globale Erwärmung an der Erdoberfläche (Quelle: IPCC, 2007).

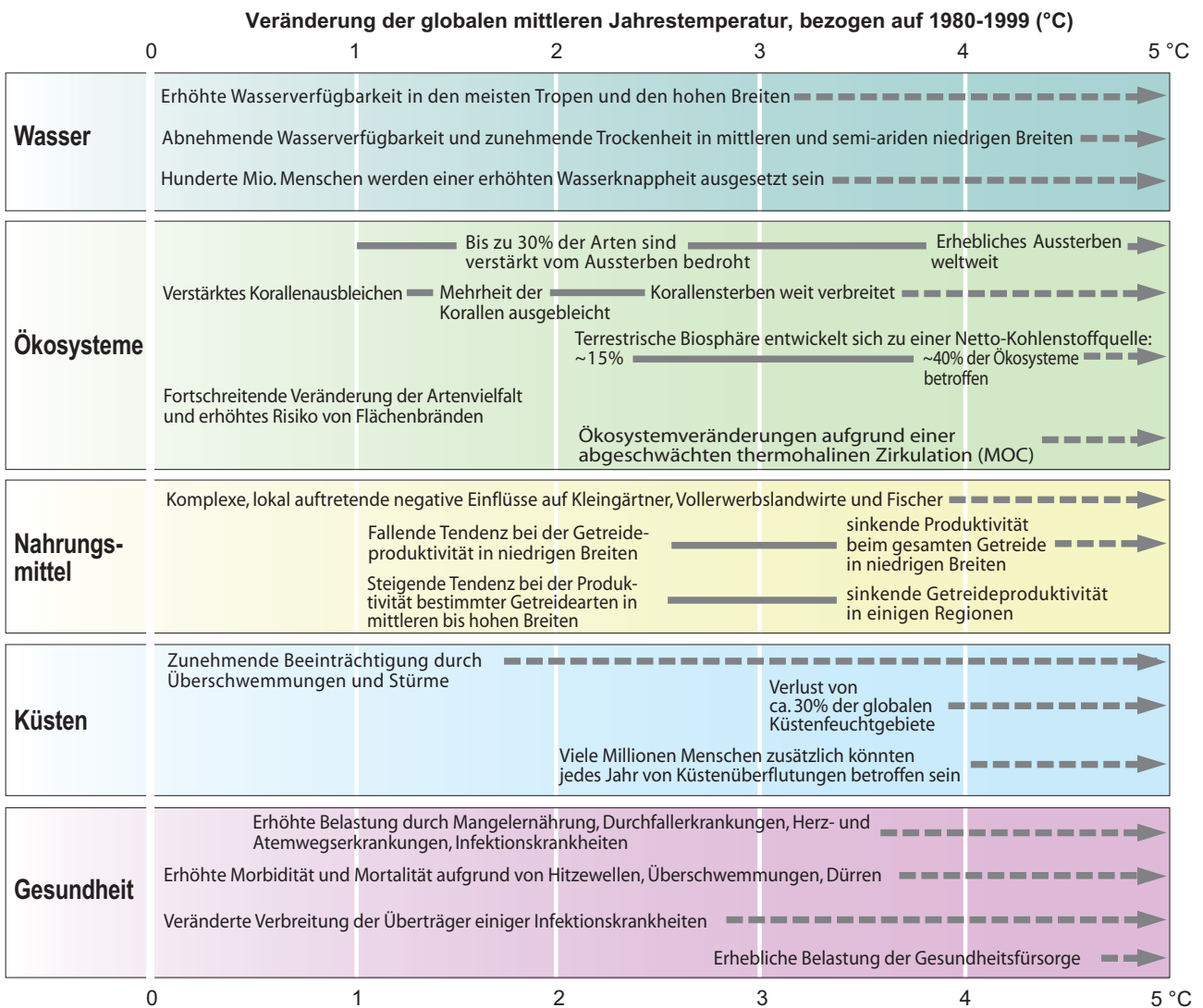
scheinlichkeit für die verschiedenen Szenarien ist gleich groß. Die SRES-Musterszenarien dienen als Antrieb für **Klimamodelle**, mit denen sich die globalen Temperatur- und Niederschlagstrends berechnen lassen. Die Kombination verschiedener Klimamodelle mit den unterschiedlichen Emissionsszenarien resultiert in einer Bandbreite von möglichen Entwicklungstrends. Die Projektionen sind daher nicht als Vorhersagen zu verstehen.

In Abb.1 sind globale Multimodell-Mittel der Erwärmung an der Erdoberfläche (relativ zu 1980–99) für die Szenarien A2, A1B und B1 als Verlängerungen der Simulationen für das 20. Jahrhundert dargestellt. Die Schattierung und die grauen Balken auf

der rechten Seite kennzeichnen die Bandbreiten für die sechs SRES-Musterszenarien. Der stärkste Temperaturanstieg ist für das Szenario A2 zu erwarten, der geringste Temperaturanstieg für das Szenario B1.

Der Klimawandel wirkt sich auf fast alle **Sektoren** aus. In Abb. 2 sind beispielhaft die möglichen globalen Auswirkungen des Temperaturanstiegs auf die Bereiche Wasser, Ökosysteme, Nahrungsmittel, Küsten und Gesundheit dargestellt.

Besonders bedeutsam sind die **Konsequenzen für den Wasserhaushalt**. Der Klimawandel verändert die räumliche und zeitliche Verteilung der Niederschläge, was zu einer Änderung der Abflussverhält-



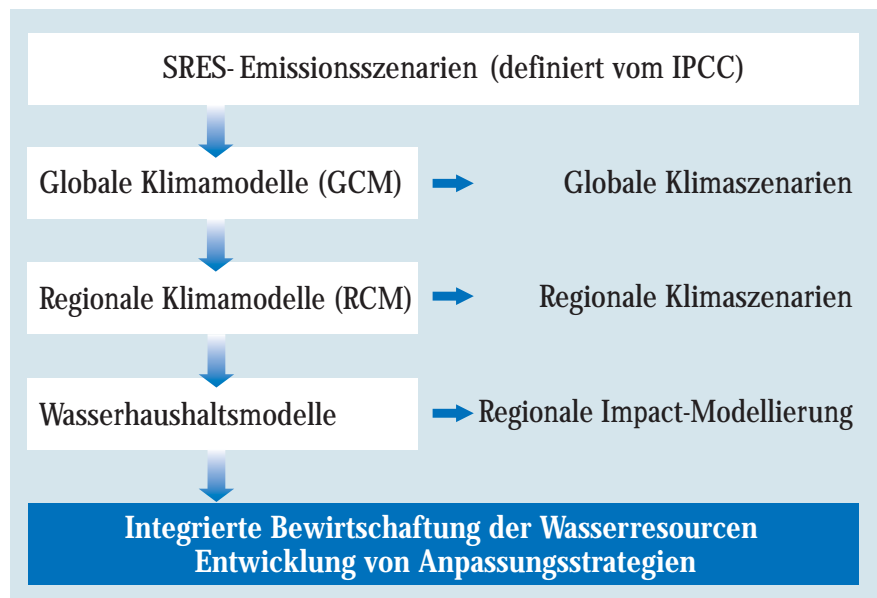
**Abb. 2:** Illustrative Beispiele für projizierte globale Auswirkungen von Klimaänderungen auf verschiedene Bereiche (Quelle: IPCC, 2007).

nisse und der Grundwasserneubildung führt. Die Häufung von extremen Hochwasserereignissen infolge von Starkniederschlägen und extremen Niedrigwasserabflüssen während längerer Trockenperioden gilt als wahrscheinlich. Während lang andauernder Dürreperioden und wegen des sich ändernden Niederschlags- und Abflussregimes wird es regional zu einer Verknappung der Wasserressourcen und einer Verschlechterung der Gewässerqualität und damit zu einer Gefährdung der Wasserversorgung kommen. Die Veränderungen im Wasserhaushalt haben Auswirkungen auf eine Vielzahl von Wassernutzungen und können zur Verschärfung von Nutzungskonflikten führen. Der Klimawandel wird auch ökonomische Konsequenzen für wasserabhängige Wirtschaftsbereiche wie die Landwirtschaft, Binnenschifffahrt, Elektrizitätswirtschaft und den Tourismus haben.

Um den Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt entgegenzuwirken, sind eine **integrierte Bewirtschaftung der Wasserressourcen** und die **Entwicklung von Anpassungsstrategien** erforderlich. Wegen der zunehmenden Bedeutung dieses Themas fand Anfang des Jahres im Rahmen der deutschen EU-Ratspräsidentschaft das internationale Symposium „Time to adapt. Climate Change and the European Water Dimension“ in Berlin statt. Während des mehrtägigen Symposiums diskutierten 250 Teilnehmer aus 24 EU-Mitgliedstaaten, der Schweiz und aus Norwegen sowie von europäischen und internationalen Organisationen die zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt und die Wasserwirtschaft.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt sind regional sehr unterschiedlich. Mit den derzeit verfügbaren **globalen Klimamodellen** lassen sich weltweit die räumlichen Verteilungsmuster für Temperatur und Niederschlag auf globaler Maßstabsebene gut abbilden. Die mittlere, horizontale Auflösung des globalen Klimamodells **ECHAM5** vom Max-Planck-Institut (MPI) in Hamburg beträgt

ca. 200 km. Für die Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt auf regionaler Maßstabsebene ist die Gitterweite der Globalmodelle jedoch viel zu groß. Deshalb wurden feinmaschige **regionale Klimamodelle** (Regionalisierungsverfahren) entwickelt, die die Klimaszenarien der Globalmodelle als Antrieb nutzen. Das durch die regionalen Klimamodelle ermöglichte Downscaling kann man sich wie das Reinzoomen mit einer Lupe vorstellen. Bei den regionalen Klimamodellen unterscheidet man zwischen statistisch-empirischen und dynamischen Downscaling-Verfahren. Die räumliche Auflösung des vom MPI entwickelten dynamischen Regionalmodells **REMO** hat deutschlandweit eine räumliche Auflösung von 10 km. Die regionalen Klimaszenarien des wetterlagenbasierten, statistischen Klimamodells **WETTREG** der Firma CEC Potsdam



**Abb. 3:** Hierarchie der Modellkette bei der hydrologischen Szenarienmodellierung.

GmbH liegen nicht als Rasterdaten sondern als Punktinformationen für die Messstationen des Beobachtungsmessnetzes des Deutschen Wetterdienstes (DWD) vor. Das Umweltbundesamt (UBA) hat mittlerweile auf der Grundlage von WETTREG und REMO zwei Datensätze regionaler Klimaszenarien, die auf den SRES-Emissionsszenarien B1, A1B und A2 und dem Globalmodell ECHAM5 basieren, für ganz Deutschland zur Verfügung gestellt. Diese hoch aufgelösten regionalen Klimaszenarien stellen die Grundlage für hydrologische Impact-Modellierung dar. Dabei dienen die regionalen Klimaszenari-

en wiederum als Antrieb für die hydrologischen Wasserhaushaltsmodelle. Die Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodellierung sind die Informationsbasis für die Implementierung einer integrierten Bewirt-

schaftung der Wasserressourcen und die Entwicklung von Anpassungsstrategien. In Abb. 3 ist die Hierarchie der Modellebenen für die regionale, hydrologische Szenarienmodellierung dargestellt.

## 2 Untersuchungen zu möglichen Auswirkungen einer Klimaänderung auf das Grundwasser in Hessen

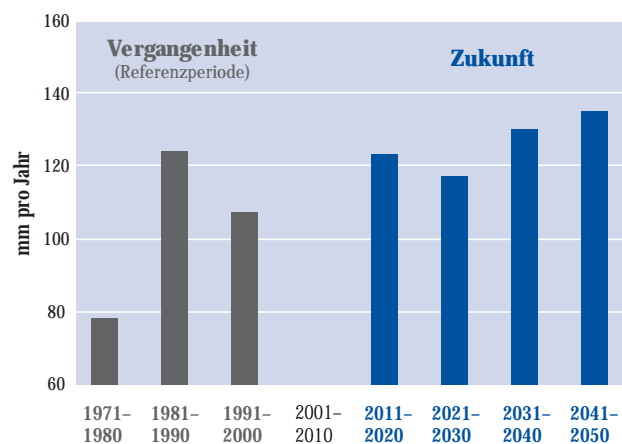
Das Grundwasser spielt in Hessen eine ganz besondere Rolle. Mehr als 95% der Trinkwasserversorgung wird durch das Grundwasser sichergestellt. Die zentrale hydrogeologische Größe in diesem Zusammenhang ist die Grundwasserneubildung. Regional differenzierte Grundwasserneubildungsraten dienen vor allem zur Abschätzung der erschließbaren Grundwassermengen und sind eine Voraussetzung für die nachhaltige Bewirtschaftung der natürlichen Grundwasserressourcen, wie sie von der EU-Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL) verlangt wird. Regional differenzierte Kenntnisse über die Grundwasserneubildung werden auch für die Abschätzung des Gefährdungspotenzials des Grundwassers durch den Eintrag von Schadstoffen, wie z.B. infolge Nitratauswaschung, benötigt. Deshalb ist es von großem Interesse, ob bzw. in welchem Umfang sich der Klimawandel auf das Grundwasser auswirkt.

Die ersten Untersuchungen zu möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf die Grundwasserneubildung in Hessen wurden im Rahmen des Integrierten Klimaschutzprogramms Hessen INKLIM 2012 (Baustein II) durchgeführt. INKLIM 2012 wurde vom Hessischen Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz (HMULV) im Frühjahr 2004 initiiert und im März 2006 abgeschlossen. Im Baustein II des integrierten Forschungsprojektes wurden der Klimawandel und die Klimafolgen in Hessen für verschiedene Bereiche untersucht. Neben dem Grundwasser wurden Teilprojekte für die Bereiche Flüsse, Boden, Pflanzenentwicklung, Forstwirtschaft, Landwirtschaft, Weinbau, Obstbau Natur/Artenvielfalt und Gesundheit durchgeführt.

Ausgangspunkt für alle Teilprojekte waren die Daten des globalen Zirkulationsmodells ECHAM4. Beim Regionalisierungsverfahren handelte es sich um die

wetterlagenbasierte statistische Methode WETTREG. Das zugrunde gelegte Szenario war das sog. B2-Szenario des IPCC, welches einen eher moderaten Zukunftspfad bezüglich der Entwicklung von Treibhausgas-Emissionen beschreibt.

Die im Rahmen von INKLIM 2012 durchgeführten ersten Untersuchungen für das Grundwasser machten deutlich, dass die für Hessen prognostizierte Klimaänderung einen wesentlichen Einfluss auf die Grundwasserneubildung ausüben wird. Die Modellergebnisse der Grundwasserneubildung für Gesamthessen sind in Abb. 4 dargestellt. Dabei entsprechen die Balken den Dekadenmittelwerten der Grundwasserneubildung (schwarz: Referenzperiode 1971–2000, blau: Zukunftszeitraum 2011–2050).



**Abb. 4:** Entwicklung der Grundwasserneubildung in Hessen (ECHAM4, B2-Szenario).

Sollte das B2-Szenario zukünftig eintreten, würde die mittlere Grundwasserneubildung um ca. 25 % zunehmen (Mittelwert der Referenzperiode: 101 mm/a, Mittelwert 2011–2050: 126 mm/a). Der Mittelwert des gesamten Zukunftszeitraums würde somit den Wert der Nassdekade 1981–1990 überschreiten; die

mittleren Verhältnisse der Zukunft würden also den Feuchtperioden der Vergangenheit entsprechen. Für die deutliche Zunahme der Grundwasserneubildung ist die Verlagerung des Niederschlags vom Sommer in das Winterhalbjahr verantwortlich, denn die Grundwasserneubildung findet überwiegend in den Wintermonaten statt. Die Grundwasserneubildungsraten sind allerdings regional sehr unterschiedlich ausgeprägt: Für das B2-Szenario würde sie fast überall in Hessen zunehmen, lediglich im Nordosten Hessens gäbe es Gebiete mit verringerter Grundwasserneubildung. Bei den hier genannten Modellergebnissen muss beachtet werden, dass im Rahmen von INKLIM (Baustein II) nur die Auswirkungen eines einzigen Szenarios untersucht wurden. Das hier zugrunde gelegte B2-Szenario stellt nur einen von 40 vom IPCC vorgegebenen Emissionspfaden mit gleicher Eintrittswahrscheinlichkeit dar. Auch wurden für die Grundwasserneubildung bisher nur die Mittelwerte für Dekaden ermittelt. Trotz Zunahme der mittleren Grundwasserneubildung ist wegen des häufigeren Wechsels zwischen Trocken- und Feuchtperioden mit extremen Schwankungen im Grundwasserhaushalt zu rechnen. Deshalb sollten die Ergebnisse auch nur als ein erster Startpunkt für weitere vertiefende Arbeiten verstanden werden.

Seit August 2006 wird das Projekt „**AnKliG – Anpassungsstrategien an Klimatrends und Extremwetter und Maßnahmen für ein nachhaltiges Grundwassermanagement**“ ([www.anklig.de](http://www.anklig.de)) durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Fördermaßnahme „*klimazwei*“ ([www.klimazwei.de](http://www.klimazwei.de)) gefördert. Projektpartner des Verbundprojektes sind neben dem HLOG die Hessenwasser GmbH & Co. KG sowie die Brandt Gerdes Sitzmann Umweltplanung GmbH (BGS Umwelt). In dem für 3 Jahre geplanten Projekt soll untersucht werden, inwieweit Klimatrends und Extremwetter den Grundwasserhaushalt beeinflussen und in welchem Maß Anpassungsstrategien für ein nachhaltiges Grundwassermanagement zu entwickeln sind.

Die Klimawirkungen auf den Grundwasserhaushalt sollen modellhaft für die Region Hessisches Ried und angrenzender Odenwald bis zum Jahr 2100 untersucht werden. Für die Simulation des Grundwasserhaushalts kommen Klimadaten, die auf drei unterschiedlichen SRES-Emissionsszenarien des beruhen,

zum Einsatz. Durch die Verwendung eines pessimistischen (A2), eines mittleren (A1B) und eines optimistischen Szenarios (B1) ist es möglich, die Spannweite der Klimaveränderung und deren Auswirkungen auf den Grundwasserhaushalt abzuschätzen. Für alle drei Szenarien ist für den Szenarienzeitraum von einer Temperaturzunahme, einer Abnahme der Sommerniederschläge und einer Zunahme der Winterniederschläge auszugehen (Abb. 5). Die Klimaszenarien, die auf dem globalen Klimamodell ECHAM5 und dem Regionalisierungsverfahren WETTREG basieren, stehen als kontinuierliche Zeitreihen auf Tageswertbasis zur Verfügung. Im Gegensatz zu den ersten Untersuchungen im Rahmen von INKLIM sollen nun auch verschiedene methodische Modellansätze (regionale Klimamodelle, Wasserhaushaltsmodelle) für die Modellierung des Grundwasserhaushalts unter geänderten klimatischen Randbedingungen zum Einsatz kommen. Neben den WETTREG-Klimaszenarien werden zusätzlich Klimadaten, die auf dem dynamischen regionalen Klimamodell CLM beruhen, für Sensibilitätsanalysen herangezogen. Hierdurch soll der Einfluss des Regionalisierungsverfahrens und der zeitlichen Auflösung verschiedener Wasserhaushaltsmodelle auf den Grundwasserhaushalt abgeschätzt werden. Auch liegt im Vergleich zu den bisherigen Untersuchungen der Fokus nicht auf der Modellierung der langjährigen Mittelwerte, sondern vielmehr auf extremen Einzeljahren bzw. Perioden extrem trockener oder extrem feuchter Witterungsabschnitte. Denn für die Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen sind weniger die Änderungen der Klimamittelwerte, sondern besonders die Extremzustände von Bedeutung.

Im **Hessischen Ried** wird Grundwasser im großen Umfang sowohl zur örtlichen als auch regionalen Wasserversorgung des Rhein-Main-Ballungsraums genutzt. Aufgrund vielfältiger Nutzungskonflikte in Folge der intensiven Grundwasserförderung wurden im Hessischen Ried frühzeitig Strategien und Maßnahmen für ein nachhaltiges Grundwassermanagement etabliert und im Jahr 1999 ein Grundwasserbewirtschaftungsplan aufgestellt. Das Hessische Ried ist durch eine große Schwankungsbreite in den Jahressummen der **Grundwasserneubildung** geprägt. Während in Trockenjahren die Grundwasserneubildung sehr gering ist bzw. gar nicht stattfindet, erreicht sie in Nassjahren mehrere 100 m/a. Entsprechend ausgeprägt sind auch die Schwankungen

der **Grundwasserstände** zwischen nassen und trockenen Witterungsperioden. Und es sind genau die witterungsbedingten Phasen niedriger bzw. hoher Grundwasserstände, die die Nutzungskonflikte zwischen Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Naturschutz auf der einen sowie Siedlungsschutz und Wasserversorgung auf der anderen Seite verschärfen. In Abb. 5 sind mögliche Nutzungskonflikte der verschiedenen Wirkbereiche eines nachhaltigen Grundwassermanagements dargestellt. Durch das Zusammenfallen hoher Grundwasserent-

nahmen mit dem Auftreten ausgeprägter Trockenperioden kam es Anfang/Mitte der 1970er und Anfang der 1990er Jahre zu einer deutliche Absenkung der Grundwasserstände im Hessischen Ried. Infolge der Grundwasserabsenkung wurden grundwasserabhängige Biotope und Waldgebiete geschädigt, es kam zu Setzrisschäden an Gebäuden und Infrastruktur und eine Umstellung der landwirtschaftlichen Beregnungstechnik auf Tiefbrunnen war erforderlich. Hohe Grundwasserstände im Hessischen Ried wurden in den Jahren 1957, 1983, 1988 und 1999-2003 be-



Abb. 5: Nutzungskonflikte zwischen den Wirkbereichen eines integrierten Grundwassermanagements.

obachtet. In diesen Zeiten kam es zu Kellervernässungen, Überflutung von Straßen, Vernässungen der landwirtschaftlichen Nutzflächen und zu einer Beeinträchtigung der biologischen Abwasserreinigung in Kläranlagen wegen der Verdünnung des Abwassers. Aufgrund der aktuellen Klimaszenarien gilt eine Entwicklung hin zu höheren Grundwasserständen im langjährigen Mittel als wahrscheinlich.

Im Odenwald ist die Wasserversorgung weitgehend dezentral organisiert. Für die dezentrale Wasserversorgung von Gemeinden könnte der prognostizierte Rückgang der Sommerniederschläge negative Auswirkungen haben. Insbesondere Quellen, die zur Trinkwasserversorgung herangezogen werden, könnten während der Sommermonate in ihrer Schüttung stark nachlassen, so dass die Trinkwassergewinnung erheblich beeinträchtigt bzw. gefährdet wäre.

Zusammenfassend sollen im Rahmen des BMBF-Projektes folgende Ziele im Sinn eines integrierten Grundwassermanagements erreicht werden:

- Quantifizierung der möglichen Änderung im Wasserverbrauch infolge der demografischen Entwicklung und des Ab- und Zuwanderungsverhaltens,
- Bewertung der Sicherheit dezentraler Wasserversorgungsstrukturen (Quellschüttungen des Odenwalds),
- Ermittlung des Einflusses von Klimatrends und Extremwetter auf Hoch-/Tiefstände des Grundwassers,
- Eingrenzung des zu erwartenden Ausmaßes von grundwasserverbundenen Nutzungskonflikten,
- Quantifizierung des geänderten Beregnungsbedarfs und der geänderten Infiltrationsmengen,
- Aufzeigen von Möglichkeiten und Grenzen einer gesteuerten Grundwasserbewirtschaftung zur Kompensation der Auswirkungen von Klimatrends und Extremwetter,
- Strategien zur Einbeziehung der klimabedingten Veränderungen im Grundwasserhaushalt in ein integriertes Wassermanagement.

Mögliche **Maßnahmen und Anpassungsstrategien** dürfen nicht separat für die betroffenen Bereiche (Abb. 5) entwickelt werden, sondern müssen im Gesamtzusammenhang gesehen und diskutiert werden. Wie die bereits bestehende Vernässungsproblematik im Hessischen Ried zeigt, ist ein nachträglich

ches Reagieren auf Veränderungen im Wasserhaushalt nur mit erheblichem Aufwand möglich. Bestehende Bauwerke können nur mit großem Aufwand gegen Vernässungen geschützt werden. Die prognostizierten Veränderungen hinsichtlich der Grundwasserneubildung sollten daher Eingang in die Planung und Ausgestaltung von regionalen Bewirtschaftungsplänen finden. Diese orientieren sich zurzeit überwiegend an der Aufrechterhaltung einer bestimmten Grundwasserneubildungsrate innerhalb eines Gebietes, die durch Wasserentnahmen nicht unterschritten werden soll. Zukünftig sollte hierbei verstärkt der Aspekt von Vernässungen bzw. verstärkter Auswaschungsgefahr von Schadstoffen betrachtet werden.

Bei der Ausweisung von Baugebieten bzw. Planung von Bauwerken sollte ein zukünftiges Ansteigen des Grundwasserstandes stärker Berücksichtigung finden. Baugebiete sollten möglichst nicht in stark vernässungsgefährdeten Gebieten ausgewiesen werden. Bei geplanten Bauwerken ist auf eine sachgerechte Abdichtung zu achten, auch wenn diese Maßnahmen die Bauvorhaben zunächst mit höheren Kosten belegen.

In der Trink- und Brauchwasserversorgung treten bezüglich der Grundwasserentnahmen relativ geringe Schwankungen auf. Der Bedarf an Trinkwasser wird wahrscheinlich in stärkerem Maße von der demographischen Entwicklung abhängen. Mögliche Anpassungsmaßnahmen für die Bereiche Wasserversorgung und Grundwasserbewirtschaftung wären zum Beispiel:

- Bau von Anlagen zur Grundwasseranreicherung,
- Ausbau des Verbundnetzes der Wasserversorger,
- Grundwasserstandsorientierte Verteilung der Fördermengen in Verbundwasserwerken.

Aus landbaulicher Sicht muss die Gefahr einer erhöhten Nitratauswaschung stärker als bisher berücksichtigt werden, da die prognostizierte Erhöhung der Grundwasserneubildung auch Gebiete mit intensiver Landnutzung (z. B. Wetterau, Limburger Becken, Kasseler Graben und Hessisches Ried) betrifft. In den auswaschungsgefährdeten Gebieten sollte daher die Zusammenarbeit zwischen Fachbehörden, Landwirtschaft und Wasserwirtschaft verstärkt werden bzw. der Eingangsgröße „Klimaänderung“ eine gewichtigere Rolle zukommen.

Unter den klimatischen Bedingungen des Hessischen Rieds ist eine wirtschaftliche Pflanzenproduktion schon jetzt nur durch die Verabreichung von Zusatzwassergaben möglich. Das Hessische Ried ist eine verbrauchernehe Region, in der zur Versorgung der Ballungsräume Rhein-Main und Rhein-Neckar neben traditionellen landwirtschaftlichen Kulturen Sonderkulturen mit einem vergleichsweise hohen Beregnungsbedarf angebaut werden. Die Grundwasserentnahmen für die benötigte Zusatzwassermenge liegen zwischen wenigen Mio. m<sup>3</sup>/a (Nassjahr) und rund 30 Mio. m<sup>3</sup>/a. Diese Zahlen belegen, dass die Witterung einen extremen Einfluss auf die verabreichte Menge an Zusatzwasser ausübt. Zudem verstärken sich in der landwirtschaftlichen Beregnung die Witterungseinflüsse auf das Grundwasser, da der Wasserbedarf in Trockenperioden am größten ist, wenn sich die Grundwasserstände als Folge verringerter Grundwasserneubildung ohnehin auf relativ niedrigem Niveau bewegen. Es ist anzunehmen, dass der Bedarf an Zusatzwasser bei den angebauten Kulturen im Sommerhalbjahr aufgrund der prognostizierten Klimaveränderung steigen wird. Dies betrifft sowohl die Anzahl der Beregnungsgaben (Menge, Zeitraum) pro Jahr als auch die Ausweitung der Beregnungsflächen. Mit dieser Entwicklung wäre ei-

ne erhebliche Zunahme des Zusatzwasserbedarfs in der Pflanzenproduktion verbunden.

Derzeit wird im HLUg eine Studie zur Abschätzung des zukünftigen Beregnungsbedarfs durchgeführt. In Form einer Bestandsaufnahme wird die Ist-Situation der landwirtschaftlichen Beregnung im Hessischen Ried erfasst:

- Erschlossene Beregnungsflächen und Beregnungsmengen in der Vergangenheit für Normal-, Nass- und Trockenjahre,
- Zusammenstellung des Wasserbedarfs (zeitlich und absolut) für verschiedene Kulturen.

Die im Rahmen von INKLIM II plus gewonnenen Erkenntnisse werden in das laufende BMBF-Projekt integriert.

Als mögliche Anpassungsmaßnahmen in der Landwirtschaft wären beispielhaft zu nennen:

- Optimierung der Beregnungstechnik,
- Optimierung der Beregnungssteuerung (zeitliche Platzierung),
- Anbau Dürre-resistenter Kulturen,
- Änderung der Fruchtfolge.

### 3 Schlussfolgerungen und Ausblick

Das laufende BMBF-Projekt setzt auf den im Rahmen von INKLIM gewonnenen Erkenntnissen auf und vertieft zusätzliche Aspekte. Da die Untersuchungen auf das Hessische Ried und den Odenwald begrenzt sind, sollten die entwickelten Methoden und Anpassungsstrategien anschließend auch auf die übrigen Gebiete Hessens übertragen werden.

Da die globalen und regionalen Klimamodelle fortwährend weiterentwickelt und verbessert werden, ist es erforderlich, auch die Wasserhaushaltsmodellierung fortzuführen. Nur so werden sich die derzeit noch große Fehlerbandbreite und die **Unsicherheiten** der in Abb. 3 dargestellten Modellkette verkleinern bzw. die Belastbarkeit der Modellergebnisse er-

höhen lassen. Zum jetzigen Zeitpunkt werden die natürlichen komplexen Prozesse und Kreisläufe der Atmosphäre, im Ozean und an der Landoberfläche in den Klimamodellen noch sehr stark vereinfacht abgebildet. Dies ist in erster Linie auf die unzureichende Gitterauflösung der heutigen Klimamodelle infolge begrenzter Rechnerkapazitäten zurück zu führen. Verschiedene Rückkopplungseffekte und Wechselwirkungen des Klimasystems sind noch nicht vollständig verstanden. Einige Prozesse lassen sich im Rechengitter der Globalmodelle noch nicht auflösen. Dies stellt besonders bei der Betrachtung von extremen Ereignissen eine deutliche Einschränkung dar. Doch gerade die Extremereignisse sind für den Menschen von besonderem Interesse. Fort-



schritte in der Vorhersagbarkeit extremer Ereignisse (Dürren, Hitzeperioden, Überschwemmungen, Stürme) sind nur durch den Ausbau der Rechnerkapazitäten möglich. Vorhersagen bezüglich Häufigkeiten und Ausprägungen extremer Witterungsereignisse stellt derzeit eine besondere Herausforderung für die Klimamodellierung dar.

Neben den Modellunsicherheiten sind auch die der Klimamodellierung zugrunde gelegten SRES-Emissionsszenarien mit Unsicherheiten behaftet. Zusätzliche Unsicherheiten stellen natürliche Klimaschwankungen dar, die die anthropogenen Trends überla-

gern. Bei der Entwicklung von Anpassungsstrategien muss den Unsicherheiten Rechnung getragen werden. Man spricht in diesem Zusammenhang deshalb auch von „Flexible and no regret“-Strategien.

Neben der Szenarienmodellierung sollte eine auf aktuellen Beobachtungsdaten basierende Wasserhaushaltsmodellierung kontinuierlich im Sinne eines **Monitorings** betrieben werden. Hierdurch lassen sich durch den Klimawandel bedingte Veränderungen frühzeitig erkennen und die Trends der Szenariensimulationen überprüfen.