

Petra Döll*

Szenarien der Wasserverfügbarkeit und Wassernutzung als Grundlage für eine integrative Wasserpolitik

Wasser ist eine knappe Ressource, die durch Steuerung von Angebot und Nachfrage bewirtschaftet werden sollte. Über die Verfügbarkeit von Wasser und insbesondere über seine Nutzung liegen derzeit aber nur unzureichende Informationen vor. Petra Döll zeigt an zwei unterschiedlichen Beispielen, wie eine auf Nachhaltigkeit ausgerichtete Wasserpolitik durch Szenarienanalysen unterstützt werden kann, die qualitative Elemente mit quantitativen Abschätzungen von Wasserverfügbarkeit und -nutzung verbinden.

1 Einleitung

Heutzutage ist es Allgemeingut, dass Wasser eine knappe Ressource ist, deren Nutzung optimiert werden sollte, um Wasserstress zu vermeiden. Von Wasserstress kann man immer dann sprechen, wenn für Mensch und Natur nicht genügend Wasser geeigneter Qualität zur Verfügung steht. Wasserwirtschaft beinhaltet also nicht mehr nur eine Angebotsoptimierung, wie es viele Jahrzehnte der Fall war, sondern auch ein Management des Wasserbedarfs.¹ Für ein auf Nachhaltigkeit ausgerichtetes Flusseinzugsgebietsmanagement, wie es z. B. mit der EU-Wasserrahmenrichtlinie angestrebt wird, sind daher zusätzlich zu Informationen zu den verfügbaren Wasserressourcen auch eine Vielzahl von Informationen zur Wassernutzung² und deren treibenden Kräften notwendig.

Im Hinblick auf eine integrierte Betrachtung von Wasserverfügbarkeit und Wassernutzung ist anzumerken, dass noch immer weit weniger Ressourcen (in Forschung und Administration) für die Analyse der Wassernutzung eingesetzt werden als für die Analyse der verfügbaren Wasserressourcen. So kann sich letztere auf ein Netz von Fließgewässer- und Grundwassermessstellen stützen, während die Datelage bezüglich der Wassernutzung als schlecht zu bezeichnen ist.³ Darüber hinaus existieren auch weit mehr hydrologische Modelle (Niederschlags-Abflussmodelle und Grundwassermodelle), die zur Abschätzung der Wasserverfügbarkeit verwendet werden können, als Modelle, die die Wassernutzung simulieren.

Die für eine integrative Wasserpolitik benötigten Informationen zu Wasserverfügbarkeit und Wassernutzung beziehen sich zum einen auf die historische Entwicklung, zum anderen, da es um Nachhaltigkeit geht, insbesondere auf mögliche

* Prof. Dr. Petra Döll ist Professorin für Hydrologie am Institut für Physische Geographie der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main (E-Mail: p.doell@em.uni-frankfurt.de).

1 Vgl. Lallana, C./Krinner, W./Estrella, T./Nixon, S./Leonard, J./Berland, M.: Sustainable water use in Europe. Part 2: Demand management. Kopenhagen 2001. (= European Environment Agency; Environmental issue report, Bd. 19). Verfügbar unter http://reports.eea.eu.int/Environmental_Issues_No_19/en.

2 Die Begriffe Wassernutzung und Wasserbedarf werden im Folgenden synonym verwendet.

3 Vgl. Krinner, W./Lallana, C./Estrella, T./Nixon, S./Zabel, T./Laffon, L./Rees, G./Cole, G.: Sustainable water use in Europe. Part 1: Sectoral use of water. Kopenhagen 1999. (= European Environment Agency Environmental Assessment Report, Bd. 1). Verfügbar unter <http://reports.eea.eu.int/binaryeenviasses01pdf/en>. Nur in den USA werden systematisch differenzierte Wassernutzungsstatistiken erhoben und zur Verfügung gestellt; dabei wird alle fünf Jahre, getrennt nach Sektoren und Herkunft des Wassers, die Wassernutzung in jedem der mehr als 3 000 Counties erfasst; vgl. United States Geological Survey (<http://water.usgs.gov/watuse/>).

zukünftige Entwicklungen. Aufgrund der Komplexität des Systems Mensch-Umwelt lassen sich jedoch weder Wasserverfügbarkeit noch Wassernutzung vorhersagen. Daher ist die Entwicklung von Szenarien, d.h. von plausiblen und konsistenten Bildern alternativer Zukünfte, die Methode der Wahl, um eine auf Nachhaltigkeit ausgerichtete und integrative Wasserpolitik zu unterstützen. Szenarien helfen bei der schwierigen gedanklichen Auseinandersetzung mit der inhärent unsicheren Zukunft. Sie zeigen auf, wie sich Wasserverfügbarkeit und Wassernutzung langfristig entwickeln können (z.B. aufgrund des anthropogenen Klimawandels und der Bevölkerungsentwicklung) und welche Folgen wasserpolitische Entscheidungen (wie z.B. die seit langem umstrittene Wasserüberleitung vom Norden in den Süden Spaniens), die heute getroffen werden, in einer fernen Zukunft haben können.

Szenarien beruhen - wenn auch manchmal nur implizit - auf einer Systemanalyse, bei der das betrachtete System und seine Komponenten definiert, die Interaktionen zwischen den Komponenten analysiert und die treibenden Kräfte identifiziert werden. Darauf aufbauend werden mögliche Entwicklungen der treibenden Kräfte beschrieben und deren Auswirkung auf die Systemkomponenten abgeleitet.

Szenarien können rein qualitativ sein, d.h. das Endprodukt ist ein Text, der erzählt, wie das betrachtete System in Zukunft möglicherweise aussehen wird. Sie können rein quantitativ sein, wenn sie die Ergebnisse von Simulationsmodellen sind, die einen zukünftigen Systemzustand berechnen. Für viele Problemstellungen am besten geeignet erscheinen qualitativ-quantitative Szenarien, in denen Erzählungen der Zukunft (Storylines) mit meist modellbasierten quantitativen Abschätzungen der Änderungen ausgewählter Systemindikatoren kombiniert werden.⁴ Dabei können je nach Problemstellung, Betrachtungsskala und Ressourcenlage die qualitativen und die quantitativen Anteile variieren. Für lokale Fragen wird oft der qualitative Anteil überwiegen, wenn z.B. mit Bürgerbeteiligung Storylines der zukünftigen Wasserver- und -entsorgung entwickelt werden und kein Geld für quantitative Abschätzungen zur Verfügung steht. Auf der Skala von Flusseinzugsgebieten oder noch größeren Einheiten kann es sinnvoll sein, mehr Ressourcen für die quantitativen Elemente der Wasserszenarien zu verwenden als für die qualitativen. Die Storylines dienen dann insbesondere dazu, die konsistente Anwendung der Simulationsmodelle zu unterstützen (z.B. die Bestimmung der verwendeten Modellparameter) und die doch meist komplexen Modellergebnisse besser kommunizierbar zu machen. Andererseits hilft die quantitative Modellierung, eventuelle Inkonsistenzen in den Storylines aufzudecken.

Im Folgenden werden, nach einer Beschreibung der Szenariomethodik im *Abschnitt 2*, zwei verschiedene Beispiele für die Erstellung von qualitativ-quantitativen Szenarien der Wasserverfügbarkeit und Wassernutzung dargestellt. Im ersten Beispiel (*Abschnitt 3*) geht es um die Unterstützung wasserwirtschaftlicher Entscheidungen auf regionaler Skala, in zwei Bundesstaaten im semi-ariden Nordosten Brasiliens. Dabei wurde eine Herangehensweise verwendet, wie sie zur Unterstützung des in der EU-Wasserrahmenrichtlinie vorgeschriebenen Flusseinzugsgebietsmanagement angepasst werden könnte. Im zweiten Beispiel (*Abschnitt 4*) geht es um globale bzw. kontinentale Szenarien, die in konsistenter Art und Weise die zukünftigen Entwicklungen in allen großen Flusseinzugsgebieten der Erde zeigen. Solchen

4 Vgl. Alcamo, J.: Scenarios as tools for international environmental assessment. Kopenhagen 2001. (= European Environment Agency; Environmental issue report, Bd. 24). Verfügbar unter http://reports.eea.eu.int/environmental_issue_report_2001_24/en.

makroskaligen Szenarien fehlt die Genauigkeit flusseinzugsgebietspezifischer Szenarien, sie liefern jedoch zusätzliche Informationen, die letztere allein nicht liefern können. Daher sind europäische Szenarien der zukünftigen Wassersituation eine notwendige Grundlage für die Wasserpolitik der EU, die ja eine für das Gesamtgebiet optimale Politik anstrebt und daher die Entwicklungen in allen Flusseinzugsgebieten Europas im Auge behalten muss.

2 Szenariomethodik

Qualitativ-quantitative Umweltszenarien werden erst seit einigen Jahren erstellt, weswegen es für deren Entwicklung noch keine allgemein festgelegte Methodik gibt. Die verwendete Methodik ist immer stark abhängig von der Fragestellung, der räumlichen Skala und den verfügbaren Ressourcen. Die unten aufgelisteten typischen Schritte bei der Erstellung qualitativ-quantitativer Umweltszenarien beruhen auf der Analyse einiger bislang durchgeführten Szenarioprojekte auf regionaler und globaler Skala. Auf regionaler Skala sind dies

- das EU-Projekt MEDACTION, das sich mit Landdegradation im Mittelmeerraum befasste,⁵ und
- das WAVES-Projekt, in dem für zwei Bundesstaaten im wasserknappen Nordosten Brasiliens integrierte Szenarien der Wasserverfügbarkeit, der Wassernutzung und Landnutzung bis zum Jahre 2025 entwickelt wurden.⁶

Die meines Wissens ersten globalskaligen qualitativ-quantitative Umweltszenarien sind die Szenarien des Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, die neben den Emissionen von Treibhausgasen und Sulfataerosolen auch die Entwicklung von Bevölkerung und Bruttoinlandsprodukt zwischen 1990 und 2100 beschreiben.⁷

Die Emissionsszenarien dienen insbesondere als Eingabe für globale Klimamodelle, die daraus Klimaszenarien berechnen. Mit Wasserverfügbarkeit und Wassernutzung befassen sich

- die Szenarien der globalen Wassersituation im Jahre 2025, die im Rahmen der World Water Vision entwickelt wurden,⁸ sowie
- die Szenarien des Global Environmental Outlook 3 des United Nations Environment Program.⁹

2.1 Methodische Schritte

Bei der Erstellung qualitativ-quantitativer Szenarien werden im Allgemeinen die folgenden Arbeitsschritte durchlaufen:

-
- 5 Siehe <http://www.icis.unimaas.nl/medaction/>
 - 6 Vgl. Döll, P./Krol, M.: Integrated scenarios of regional development in two semi-arid states of North-Eastern Brazil. In: Integrated Assessment. Jg. 3 (2002), H. 4, S. 308-320.
 - 7 Vgl. Nakicenovic, N./Swart, R. (Hrsg.): Emission Scenarios. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge 2000.
 - 8 Vgl. Cosgrove, W.J./Rijsberman, F.R.: World Water Vision: Making Water Everybody's Business. Earthscan, Großbritannien 2000. - Alcamo, J./Henrichs, T./Rösch, T.: World Water in 2025. Global modelling and scenario analysis for the World Water Commission on Water for the 21st Century. Wissenschaftliches Zentrum für Umweltsystemforschung, Universität Kassel. Kassel 2000. (= Kassel World Water Series, Bd. 2). Verfügbar unter <http://www.usf.uni-kassel.de/usf/archiv/dokumente.de.htm>.
 - 9 Vgl. United Nations Environment Programme UNEP: Global Environmental Outlook 3. Nairobi 2002. Verfügbar unter <http://www.grid.unep.ch/geo/geo3/index.htm>.

- 1) Identifizierung der Problemstellung sowie der am Szenarioprozess Beteiligten (WissenschaftlerInnen und Stakeholder¹⁰).
- 2) Definition des Systems (Systemkomponenten, treibende Kräfte) einschließlich der räumlichen und zeitlichen Ausdehnung und Auflösung (Anfangsjahr, Zeithorizont, Szenarioregionen).
- 3) Festlegung der Indikatoren des Systemzustands (abhängig von den mathematischen Modellen, die für die Quantifizierung zur Verfügung stehen).
- 4) Historische Analyse der Entwicklung der Systemindikatoren und der treibenden Kräfte.
- 5) Entwicklung der qualitativen Szenarien in der Form von Storylines.
- 6) Entwicklung der quantitativen Szenarien:
 - a) Quantifizierung der treibenden Kräfte ;
 - b) Berechnung der Indikatoren durch mathematische Modelle.
- 7) Bewertung der Szenarien.

Die Identifizierung der am Szenarioprozess beteiligten Personen (Schritt 1) ist vor allem dann von besonderer Bedeutung, wenn nicht nur WissenschaftlerInnen, sondern auch Stakeholder beteiligt sein sollen, d.h. Szenarien partizipativ erstellt werden sollen. So muss laut der EU-Wasserrahmenrichtlinie die Beteiligung der breiten Öffentlichkeit, einschließlich der Wassernutzer, bei der Erstellung und Aktualisierung der Bewirtschaftungspläne für die Einzugsgebiete sichergestellt werden.¹¹ Generell sollten Stakeholder bereits von Anfang an involviert sein, doch es kann sinnvoll sein, unterschiedliche Stakeholder in den verschiedenen Phasen zu involvieren (z.B. am Anfang eher die technischen ExpertInnen und bei der Bewertung dann auch die politischen EntscheidungsträgerInnen).

Im Schritt 2 wird das betrachtete System mit seinen Systemkomponenten und -grenzen definiert. Dazu gehört eine erste qualitative Analyse der wichtigsten Wechselwirkungen und treibenden Kräfte. Das Gesamtgebiet, für das die Szenarien erstellt werden, und die Szenarioregionen werden festgelegt. Als Szenarioregionen werden die Teilgebiete bezeichnet, für die unterschiedliche Entwicklungen der treibenden Kräfte angenommen werden und deren Entwicklung in den Storylines (zumeist) getrennt beschrieben wird. Darüber hinaus wird das Anfangs- und Endjahr der Szenarien bestimmt, sowie die Zeitschritte dazwischen (falls relevant).

Welche Systemindikatoren gewählt werden (Schritt 3), hängt ebenso von der Problemstellung wie von den mathematischen Modellen ab, die für die Berechnung zur Verfügung stehen. Oft sind die Möglichkeiten, aussagekräftige Systemindikatoren zu quantifizieren, stark durch die hohen Unsicherheiten der Modellergebnisse eingeschränkt. Diese Unsicherheiten liegen entweder an mangelndem Prozessverständnis oder einer schlechten Datenlage. Es ist wichtig, Unsicherheiten von Modellergebnissen im Szenarioprozess offen zu diskutieren, um erstens nicht eine falsche Sicherheit vorzutäuschen und zweitens die (langfristige) Glaubwürdigkeit des Szenarioprozesses nicht zu gefährden.

10 Der englische Begriff Stakeholder wird im Folgenden für die InteressenvertreterInnen verwendet, die am Szenarioprozess teilnehmen. Dazu gehören PolitikerInnen sowie VertreterInnen von Behörden, Wassernutzerorganisationen oder Bürgergruppen.

11 Vgl. Richtlinie 200/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. Absatz 46. Verfügbar unter <http://www.tu-harburg.de/~wwven/wrrl-de.pdf>.

Eine Analyse der historischen Entwicklung der treibenden Kräfte und Systemindikatoren (Schritt 4) ist eine wichtige Voraussetzung für die Entwicklung der qualitativen Szenarien (Schritt 5), da sie Trends und Zusammenhänge aufzeigt. Die Quantifizierung der treibenden Kräfte im Szenariozeitraum (Schritt 6a) muss auf der Grundlage der historischen Entwicklung geschehen, um glaubwürdig zu sein.

Bevor die qualitativen Szenarien, die Storylines, geschrieben werden können (Schritt 5), muss geklärt werden, welche Art von Szenarien erstellt werden sollen. So werden explorative von normativen Szenarien unterschieden. Bei ersteren werden ausgewählte Tendenzen in die Zukunft weitergeführt, bei letzteren werden Zielvorstellungen eines (meist erwünschten) Zustands erarbeitet, und dann wird zurückverfolgt, welche Schritte zur Erreichung des Zielzustands führen würden. Bei den oben genannten Szenarioprojekten wurden immer explorative Szenarien entwickelt. Interventionsszenarien dienen dazu, die Auswirkung einer konkreten Politikmaßnahme vor dem Hintergrund der alternativen Referenzszenarien zu analysieren und damit die Robustheit einer Politikmaßnahme zu überprüfen.¹² Dabei zeichnet sich jedes Interventionsszenario nur durch eine geringfügige Abweichung (nämlich die Intervention) vom jeweiligen Referenzszenario aus. Die drei oben genannten globalen Szenarioprojekte haben ausschließlich Referenzszenarien erstellt. Im regionalen WAVES-Projekt wurden zwei Referenzszenarien und eine Vielzahl von Interventionsszenarien entwickelt. Um der Idee der Szenarien als alternative Zukünfte gerecht zu werden, sollten immer mindestens zwei verschiedene (Referenz)Szenarien erstellt werden. Bei drei Szenarien besteht die Gefahr, dass eines als das „wahrscheinlichste“ betrachtet wird und den anderen nicht dieselbe Beachtung geschenkt wird.¹³ Für die Erstellung der Storylines werden, basierend auf der historischen Analyse (Schritt 4) und existierenden Zukunftsszenarien, die wichtigsten Unsicherheiten und Risiken der Zukunft identifiziert. Mögliche Fortentwicklungen der verschiedenen Systemkomponenten werden dann stimmig zu Storylines kombiniert. Die Storylines sollten möglichst alle treibenden Kräfte und Systemindikatoren behandeln, die jedoch nicht alle auch im nächsten Schritt quantifiziert werden müssen.

Für die Entwicklung der quantitativen Szenarien (Schritt 6) müssen zunächst die treibenden Kräfte quantifiziert werden (Schritt 6a). Im Kontext quantitativer Szenarien werden als treibende Kräfte all jene Größen definiert, die nicht von den verwendeten mathematischen Modellen berechnet werden, sondern als Eingaben benötigt werden. Sowohl die quantifizierten treibenden Kräfte als auch die von den Modellen berechneten Systemindikatoren (Schritt 6b) gehören zum quantitativen Teil der Szenarien.

Eine formale Bewertung der Szenarien bzw. ihrer Systemindikatoren kann die Szenarioanalyse unterstützen, insbesondere wenn es darum geht, eine optimale Intervention (Politikmaßnahme) zu identifizieren. Eine Bewertung hängt natürlich von den Zielen und Werten der Beteiligten ab, die zunächst offen diskutiert werden müssen.¹⁴ Sie wird zumeist im Bezug auf mehrere Bewertungskriterien durchgeführt werden, und die so genannte multikriterielle Analyse stellt eine Vielzahl von

12 Robust ist eine Maßnahme, die in möglichst vielen alternativen Szenarien positive Auswirkungen zeigt.

13 Vgl. Alcamo, J.: Scenarios as tools for international environmental assessment, a. a. O.

14 Vgl. Müller, F./Leupelt, M. (Hrsg.): Eco Targets, Goal Functions, and Orientors. Berlin 1998.

Methoden bereit, um die Bewertungskriterien miteinander zu kombinieren.¹⁵ Eine Monetarisierung der Kosten und Nutzen einer Intervention ist meist sehr schwierig.

Idealerweise verläuft ein Szenarioprozess iterativ. So kann die quantitative Analyse (Schritt 6) Inkonsistenzen in den Storylines (Schritt 5) aufzeigen, die dann modifiziert werden. Oder eine erste Bewertung (Schritt 7) führt zur Definition neuer Interventionen, so dass dann erneut die Schritte 5-7 durchlaufen werden.

2.2 Skalenproblematik

Die räumlichen, zeitlichen und institutionellen Skalen sind bei allen Umweltszenarien und insbesondere auch bei Szenarien der Wasserverfügbarkeit und Wassernutzung von großer Bedeutung. Bei Szenarien für Flusseinzugsgebiete, zum Beispiel, gibt es eine Vielzahl von Entwicklungen, die nicht durch Entscheidungen im Einzugsgebiet selbst bestimmt werden, sondern durch makroskalige Entwicklungen (z. B. nationale Gesetze, EU-Subventionen, globaler Handel landwirtschaftlicher Produkte, Klimawandel). Es ist daher sinnvoll, bei der Szenarioerstellung die problemrelevanten skalenübergreifenden Prozesse zu identifizieren, in den Storylines auszuformulieren und als treibende Kräfte zu quantifizieren. Auch die Erstellung konsistenter multiskaliger Szenarien kann hilfreich sein.¹⁶ Bei qualitativ-quantitativen Szenarien sind die räumlichen Einheiten, die bei den Storylines und der Quantifizierung der treibenden Kräfte verwendet werden, fast immer größer als die räumlichen Einheiten der Modelle, die die Systemindikatoren berechnen. Daher ist zur Bestimmung der Modelleingaben ein Herabskalieren notwendig, was zu unrealistischen Annahmen für die einzelnen Berechnungseinheiten führen kann. Es ist eine große Herausforderung, die Skalenproblematik den NutzerInnen von Szenarien transparent zu machen.

3 Szenarien der Wasserverfügbarkeit und Wassernutzung im semi-ariden Nordostbrasilien

Der semi-aride Nordosten Brasiliens ist die ärmste Region des Landes, und Wasserknappheit wird dort als ein starkes Entwicklungshemmnis betrachtet. Das Gebiet ist durch saisonal und interannuell stark schwankende Niederschläge und Abflüsse geprägt. In den Bundesstaaten Piauí und Ceará arbeiten rund 40 % der Beschäftigten in der Landwirtschaft, und 70 % davon betreiben Subsistenzwirtschaft. Weniger als 1 % der Ackerflächen sind bewässert, und die Ausdehnung der bewässerten Flächen wird als eine wichtige Strategie zur Verringerung der Anfälligkeit der Landwirtschaft gegenüber den stark variablen Niederschlägen betrachtet. Im Hinblick auf die Wasserversorgung ist insbesondere in Ceará der kristalline Untergrund problematisch, der nur wenig Grundwasser speichern kann, das oft salzig ist. In der Tro-

15 Vgl. Bell, M. L./Hobbs, B. F./Elliott, E. M./Ellis, H./Robinson, Z.: An evaluation of multi-criteria methods in integrated assessment of climate policy. In: *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*. Jg. 10 (2001), S. 229-256, DOI 10.1002/mcda.305. - Munda, G.: *Multicriteria Evaluation in a Fuzzy Environment: Theory and Applications in Ecological Economics*. Berlin 1995, behandelt die Equity-Analyse, die als eine Art der multikriteriellen Analyse betrachtet werden kann.

16 Vgl. Rotmans, J./Asselt, M. B. A. van/Anastasi, C./Rothman, D./Greeuw, S./Bers, C. van: *Integrated visions for a sustainable Europe: Summary of project results and visions*. Maastricht 2001. (= University of Maastricht, ICIS working paper).

ckenperiode zwischen Juni und Dezember steht dort nur das in mehr als 8 000 kleinen und großen Stauseen gespeicherte Wasser zur Verfügung.

Zur Unterstützung einer auf Nachhaltigkeit ausgerichteten Regionalplanung in Piauí und Ceará wurden im Rahmen des deutsch-brasilianischen WAVES-Programms¹⁷ qualitativ-quantitative Szenarien der Entwicklung in den beiden Bundesstaaten bis zum Jahre 2025 erstellt. Diese Szenarien umfassen die Problemfelder Wasserverfügbarkeit und Wassernutzung ebenso wie Landnutzung, Agrarökonomie und Migration.¹⁸ Es wurden zwei Referenzszenarien entwickelt, „Küstenboom und Cash Crops“ (RS A) und „Dezentralisierung - Integrierte ländliche Entwicklung“ (RS B), auf deren Hintergrund die Auswirkungen einer Reihe von Interventionen (Politikmaßnahmen) berechnet wurden. Aufbauend auf den Storylines wurde die Entwicklung der treibenden Kräfte quantifiziert, die dann als Eingaben für die verschiedenen Simulationsmodelle verwendet wurden. Diese Simulationsmodelle, die zu einem integrierten Modell verknüpft wurden, berechnen Indikatoren, die die Auswirkungen wasserwirtschaftlicher Maßnahmen beurteilen helfen.

3.1 Storylines

Die Storylines der beiden Referenzszenarien wurden so verfasst, dass jedes unterschiedliche heute sichtbare Trends fortführt. In RS A („Küstenboom und Cash Crops“) hält die starke ökonomische Entwicklung des Ballungsraums Fortaleza, der Hauptstadt von Ceará, an, die Bestrebungen, den Tourismus entlang der Küste auszubauen, zeigen Erfolg, und der Trend zu einer verstärkten Produktion von Cash Crops (insbesondere Früchte) für den brasilianischen und internationalen Markt verstärkt sich. RS B („Dezentralisierung - Integrierte ländliche Entwicklung“) nimmt die beginnende Stärkung der regionalen Zentren in Piauí und Ceará auf, die sich z. B. in der Gründung von Universitäten an diesen Orten und einer allgemeinen Erhöhung der Beliebtheit mittelgroßer Orte zeigt (als Gegenreaktion zur zunehmenden Unwirtlichkeit der Ballungsgebiete in Brasilien). *Tabelle 1* charakterisiert kurz die beiden Referenzszenarien. Die Storylines wurden nicht nur auf der Ebene des gesamten 400 000 km² umfassenden Untersuchungsgebiets formuliert, sondern konsistent auch für jede der acht Szenarioregionen, in die das Untersuchungsgebiet aufgeteilt wurde. Die Szenarioregionen unterscheiden sich in ihrer angenommenen zukünftigen Entwicklung und wurden nach administrativen Grenzen, der agrarökonomischen Situation und naturräumlichen Gegebenheiten (Niederschlag, Position im Flusseinzugsgebiet, geologischer Untergrund) definiert.

Da die möglichen Entwicklungen im Untersuchungsgebiet stark von globalen Entwicklungen (z. B. bezüglich des Klimawandels oder der agrarökonomischen Bedingungen) abhängig sind, wurden die beiden Referenzszenarien so formuliert, dass sie jeweils in ein existierendes globales Szenario eingebettet sind. Dies ist das globale Szenario A1 des IPCC im Falle von RS A, und das globale Szenario B2 im Falle von RS B. A1 beschreibt eine stark globalisierte Welt mit schnellem ökonomischen

17 Siehe unter <http://www.usf.uni-kassel.de/waves/>

18 Vgl. Döll, P./Krol, M.: Integrated scenarios of regional development in two semi-arid states of North-Eastern Brazil, a. a. O., für eine ausführliche Darstellung der integrierten Szenarien und ihrer Relevanz für eine integrative Wasserpolitik.

Tabelle 1: Charakteristika der beiden Referenzszenarien für die beiden brasilianischen Bundesstaaten Piauí und Ceará
(Zeitraum 1996/98 bis 2025)

Referenzszenario A "Küstenboom und Cash Crops"	Referenzszenario B "Dezentralisierung - Integrierte ländliche Entwicklung"
<ul style="list-style-type: none"> - starke wirtschaftliche Entwicklung in den Küstenregionen von Piauí und Ceará - Der Ballungsraum Fortaleza wächst sehr schnell - wo Wasser für Bewässerung verfügbar ist, ist die Produktion von Cash Crops durch große Betriebe bedeutender als die Subsistenzlandwirtschaft - der Markt für landwirtschaftliche Produkte ist überwiegend der reiche Süden Brasiliens und das Ausland - zentralistische Verwaltung bleibt dominant 	<ul style="list-style-type: none"> - Mittelzentren prosperieren (Infrastrukturverbesserungen) - die Veredelung landwirtschaftlicher Produkte durch Kleinbetriebe verstärkt sich - Mittelzentren werden zum Markt für lokale und regionale landwirtschaftliche Produkte - Dezentralisierung der Verwaltung und Zunahme lokaler Entwicklungsinitiativen - internationale Institutionen unterstützen die nachhaltige Entwicklung krisengeschüttelter Regionen
Quelle: Eigene Darstellung	

Wachstum weltweit, während B2 eine eher regionalisierte Welt annimmt, in der stärkerer Wert auf soziale Innovation und Umweltschutz gelegt wird.¹⁹

3.2 Quantifizierung

Für die quantitativen Szenarien wurde ein integriertes Modell entwickelt, das eine Reihe disziplinärer Modelle (Klima, Wasserverfügbarkeit, Wassernutzung, landwirtschaftliche Produktivität, Agrarökonomie und Migration) verknüpft und für jedes der 332 Munizipien des Untersuchungsgebiets entsprechende Systemindikatoren berechnet.²⁰ Für jede der acht Szenarioregionen musste die quantitative Entwicklung einer Vielzahl von treibenden Kräften festgelegt werden. Zunächst wurde, basierend auf historischen Analysen, den Storylines sowie den globalen Szenarien, die Entwicklung der wichtigsten treibenden Kräfte Bevölkerung, Pro-Kopf-Bruttoinlandsprodukt und bewässerte Flächen definiert. Im nächsten Schritt wurden alle übrigen treibenden Kräfte und Modellparameter konsistent quantifiziert. Der anthropogene Klimawandel wurde durch statistisches Herunterskalieren der Ergebnisse zweier globaler Klimamodelle (basierend auf einem Emissionsszenario) dargestellt.

Die Wasserverfügbarkeit wurde mit einem speziell für semi-aride Bedingungen entwickelten hydrologischen Modell berechnet, das auch die besonders in Ceará sehr wichtigen Stauseen berücksichtigt.²¹ Der Wasserbedarf wird durch das regio-

¹⁹ Eine detaillierte Beschreibung der globalen IPCC-Szenarien finden Sie in Nakicenovic, N./Swart, R. (Hrsg.): *Emission Scenarios*, a. a. O.

²⁰ Vgl. Krol, M.S./Jaeger, A./Bronstert, A.: *Integrated modelling of climate change impacts in North-Eastern Brazil*. In: Gaiser, T./Krol, M./Frischkorn, H./Araújo, J.C. de (Hrsg.): *Global Change and Regional Impacts*. Heidelberg 2003, S. 43-56.

²¹ Vgl. Güntner, A./Bronstert, A.: *Large-scale hydrological modelling of a semi-arid environment: model development, validation and application*. In: Gaiser, T./Krol, M./Frischkorn, H./Araújo, J.C. de (Hrsg.): *Global Change and Regional Impacts*. Heidelberg 2003, S. 217-228.

nalskalige Wassernutzungsmodell NoWUM simuliert, das die Wasserentnahmen und die konsumtive Wassernutzung (Anteil des entnommenen Wassers, das bei der Nutzung verdunstet) durch die Sektoren Bewässerung, Vieh, Haushalte, Industrie und Tourismus berechnet.²² Die räumliche Auflösung beider Modelle sind die 332 Munizipien des Untersuchungsgebiets, die zeitliche Auflösung beträgt einen Tag. Wasserverfügbarkeit und Bewässerungswassernutzung werden beide durch Klimavariabilität und den anthropogenen Klimawandel beeinflusst. Angesichts der hydrologischen Situation im Untersuchungsgebiet ist es sinnvoll, als Indikator für die Wasserverfügbarkeit den Stauseeinhalt zu Beginn der Trockenperiode zu verwenden. Daher ist die Wasserverfügbarkeit abhängig von Lage, Größe und Anzahl der Stauseen. Die Wassernutzung wird durch eine Vielzahl von treibenden Kräften bestimmt (vgl. Abb. 1). Im integrierten Modell werden das hydrologische und das Wassernutzungsmodell so mit einander gekoppelt, dass einerseits die berechneten Abflüsse und Stauseevolumina durch die konsumtive Wassernutzung reduziert werden und andererseits die durch NoWUM berechnete Wassernutzung gegebenenfalls reduziert wird, wenn die Wasserverfügbarkeit zu gering ist. Dabei werden zuerst die Bedarfe von Haushalten, Tourismus und Industrie gedeckt.

Abbildung 1: Schema des regionalen Wassernutzungsmodells NoWUM

Links sind die jeweiligen treibenden Kräfte angegeben, die für die Erstellung von Wassernutzungsszenarien quantifiziert werden müssen.

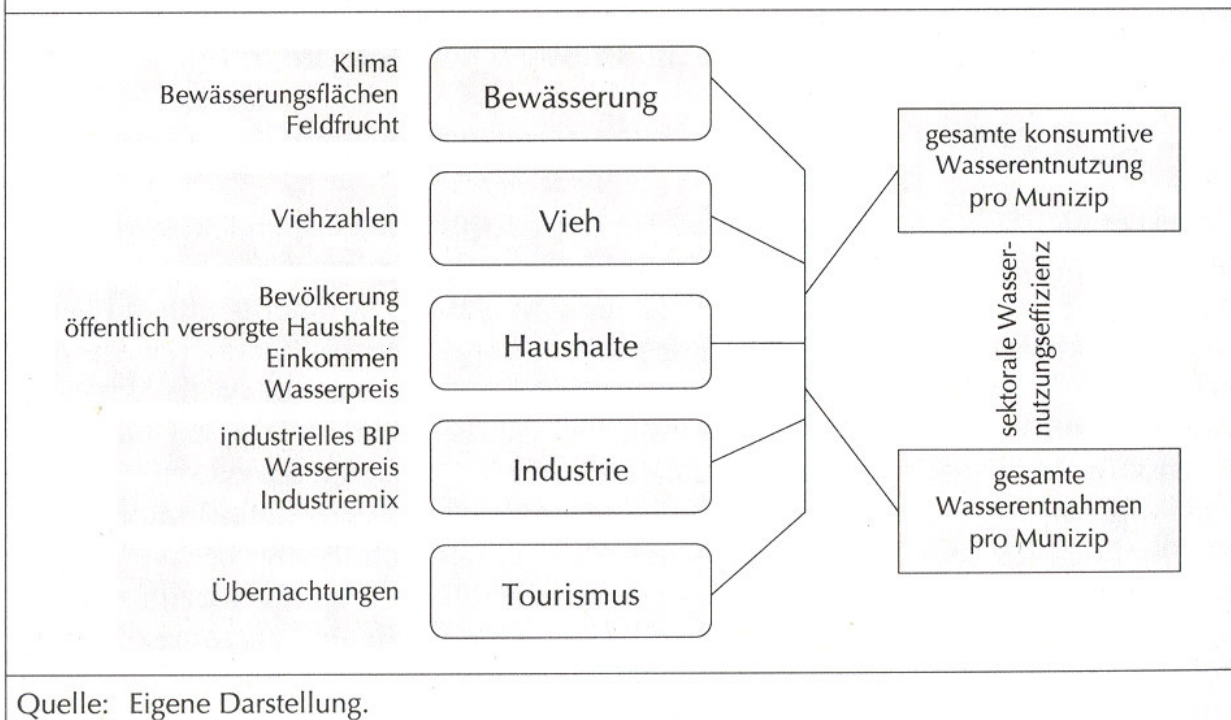
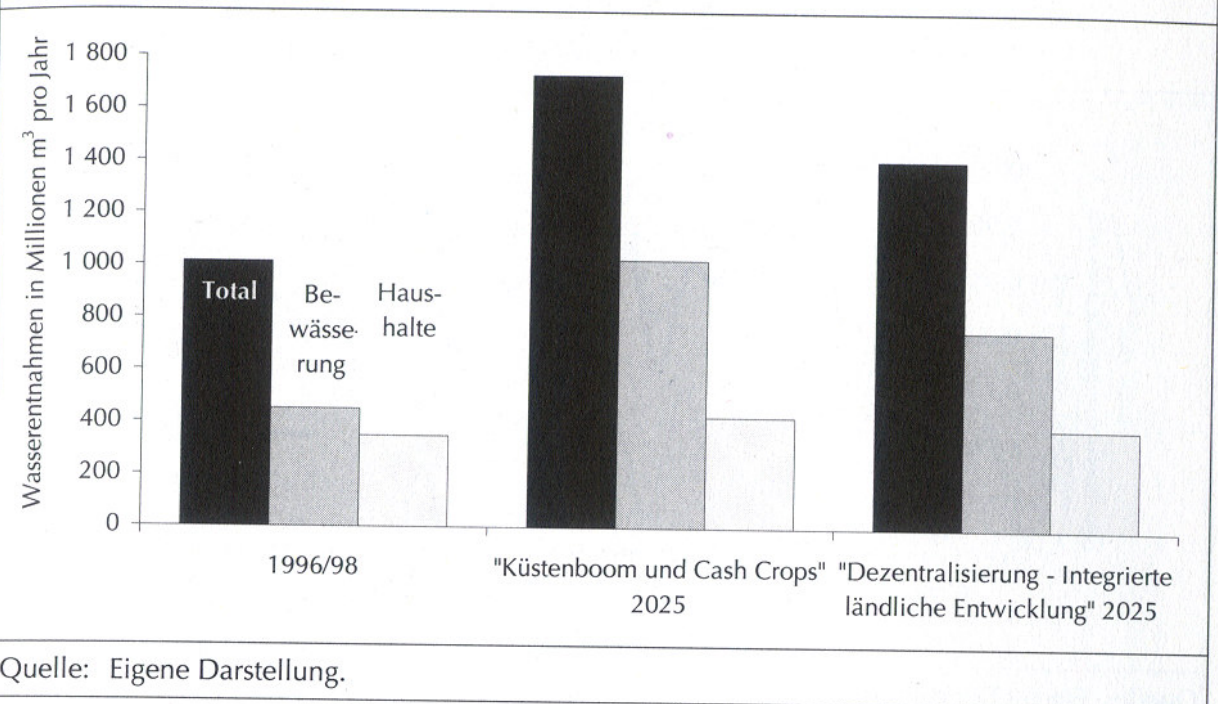


Abbildung 2 zeigt den heutigen und zukünftigen Wasserbedarf, wie er durch das Wassernutzungsmodell NoWUM berechnet wird. Dabei ist der sehr geringe Einfluss des Klimawandels auf den Bewässerungswasserbedarf (Änderung unter $\pm 5\%$ bis 2025) vernachlässigt worden. Die gesamten Wasserentnahmen sind im Jahr 2025 im Szenario RS A „Küstenboom und Cash Crops“ 71 % größer als 1996/98, im

22 Vgl. Döll, P./Hauschild, M.: Model-based scenarios of water use in two semi-arid Brazilian states. In: Regional Environmental Change. Jg. 2 (2002), H. 4, S. 150-162. DOI 10.1007/s10113-002-0046-z.

Abbildung 2: Wasserbedarf in Piauí und Ceará, Brasilien, 1996/98 und im Jahr 2025 (zwei Referenzszenarien)

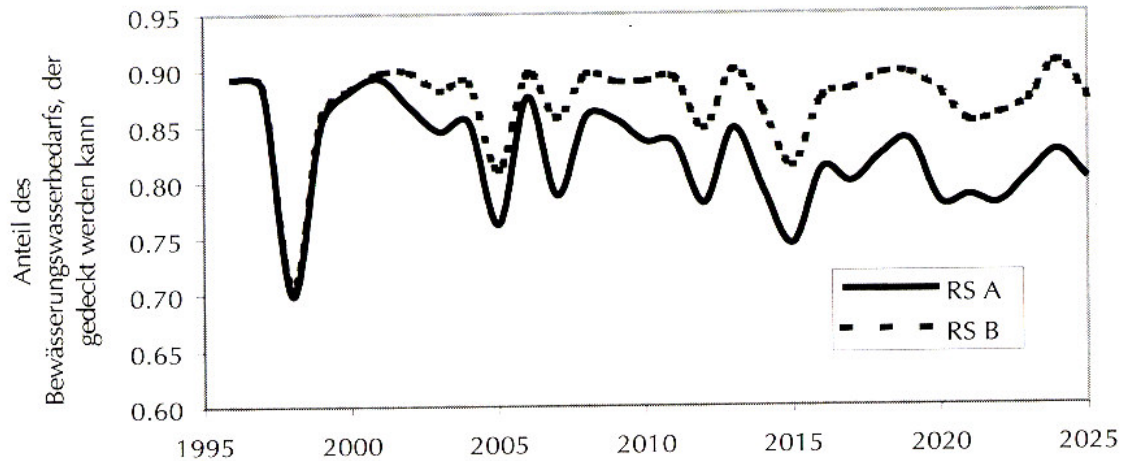
Szenario RS B „Dezentralisierung - Integrierte ländliche Entwicklung“ nur um 39 %. Der Bewässerungssektor verursacht jeweils 75-80 % der Zunahmen der gesamten Wasserentnahme. Der Anteil der Bewässerungswasserentnahme steigt von 45 % 1996/98 auf 59 % (RS A) und 54 % (RS B). Die stärkere Zunahme im Bewässerungssektor im Falle von RS A ist auf die stärkere Ausweitung der bewässerten Flächen zurückzuführen, wobei angenommen wird, dass bis 2025 alle bereits heute geplanten staatlichen Bewässerungsprojekte fertig gestellt sein werden. In RS B wird nur von der Umsetzung eines Viertels dieser Flächen ausgegangen, doch die Ausdehnung der privaten Bewässerung ist dafür stärker als in RS B. Die Wasserentnahmen im zweitwichtigsten Sektor, den Haushalten, steigen in RS A insbesondere aufgrund der höheren Einkommenszuwächse stärker als in RS B, aber auch, weil der Zuzug in die Küstenregion, in der heute der Pro-Kopf-Wasserverbrauch höher ist als im Hinterland, stärker ist. In beiden Szenarien nimmt der Pro-Kopf-Wasserverbrauch der öffentlich versorgten Bevölkerung aufgrund der angenommenen Preissteigerungen jedoch gegenüber heute ab.

Die Szenarien helfen u.a. bei der Beantwortung der folgenden zwei Fragen. Wird durch die modellierten Zunahmen des Wasserbedarfs in Zukunft noch häufiger als heute Wasserknappheit auftreten? Als Indikator für Wasserknappheit kann der Anteil des Bewässerungswasserbedarfs, der aufgrund der niedrigen Wasserverfügbarkeit nicht gedeckt werden kann, verwendet werden. Je größer dieser Anteil ist, umso weniger lohnen sich Investitionen in neue Bewässerungsflächen. Während in RS B der Anteil im Mittel bei 12 % bleibt (vgl. Abb. 3), führt der in RS A noch stärker zunehmende Bewässerungswasserbedarf im Trend zu einer deutlich niedrigeren Versorgungssicherheit, so dass im Durchschnitt für ca. 20 % der Bewässerungsflächen kein Wasser zur Verfügung gestellt werden kann.²³ Daraus kann man

23 Abbildungen 3 und 4 basieren auf Berechnungen mit dem integrierten Modell unter der Annahme eines Klimawandels (basierend auf Berechnungsergebnissen des globalen Klimamo-

Abbildung 3: Anteil des jährlichen Bewässerungswasserbedarfs, der gedeckt werden kann

Die starke interannuelle Variabilität dominiert, doch langfristig sinkt der Deckungsgrad in RS A aufgrund des höheren Bedarfs stärker als in RS B.



Quelle: Eigene Darstellung.

schließen, dass eine so starke Ausweitung der Bewässerungsinfrastruktur wie in RS A ineffizient ist.

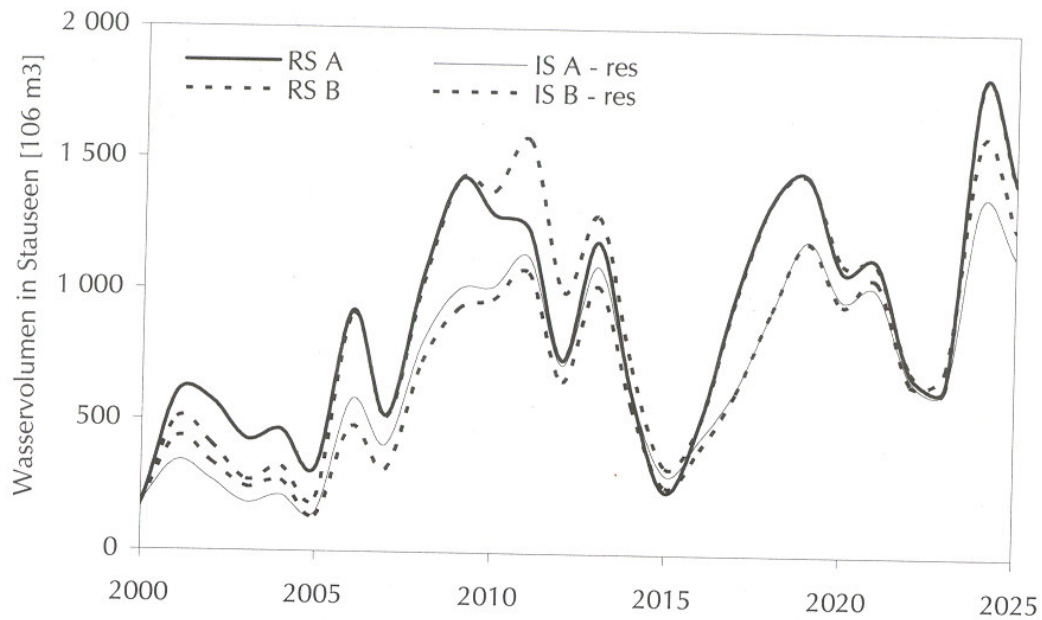
In welchem Maß kann durch den Bau zusätzlicher Stauseen die Wasserverfügbarkeit erhöht werden? In beiden Referenzszenarien wird davon ausgegangen, dass die jährlichen Investitionen in den Stauseebau auf dem heutigen Wert bleiben; die beiden Szenarien unterscheiden sich lediglich in der Reihenfolge der einzelnen Bauvorhaben, so dass in RS A zunächst die Stauseen in der Küstenzone gebaut werden. Um zu sehen, welchen Einfluss verringerte Investitionen auf die Wasserverfügbarkeit haben, werden zwei Interventionsszenarien berechnet, die sich von dem jeweiligen Referenzszenario lediglich dadurch unterscheiden, dass nur die Hälfte in den Bau von neuen Stauseen investiert wird. *Abbildung 4* zeigt, dass zumindest nach dem Jahre 2010 der verlangsamte Stauseebau kaum zu einer Verringerung der Wasserverfügbarkeit führt. Das liegt daran, dass die in den Referenzszenarien zusätzlich verfügbaren Speicherräume aufgrund des Wassermangels gar nicht mehr aufgefüllt werden können. Auch die Wasserknappheit, ausgedrückt durch den Anteil des Bewässerungswasserbedarfs, der nicht gedeckt werden kann, erhöht sich durch den reduzierten Stauseebau nur unwesentlich.

Darüber hinaus wurden die Auswirkungen weiterer wasserwirtschaftlicher Maßnahmen auf die Wassernutzung untersucht. Dazu gehören die Festsetzung der Wasserpreise für den Haushalts- und den Industriesektor und die Ausweitung der öffentlichen Wasserversorgung.²⁴

dells ECHAM4 des Max-Planck-Instituts für Meteorologie Hamburg). Der Klimawandel beeinflusst die Ergebnisse nur geringfügig.

24 Vgl. Döll, P./Hauschild, M.: Model-based scenarios of water use in two semi-arid Brazilian states, a. a. O.

Abbildung 4: Wasservolumen in Stauseen* zu Beginn der Trockenperiode, für die beiden Referenzszenarien sowie die Interventionsszenarien, in denen nur die Hälfte der jährlichen Investitionen in den Staudambau getätigt werden



* Nur in den Stauseen, die nach 1996 gebaut werden.
Quelle: Eigene Darstellung.

4 Globale Szenarien der Wasserverfügbarkeit und Wassernutzung

Der Mangel an Süßwasser guter Qualität wird inzwischen als ein globales Problem betrachtet. Globale Szenarien der Wasserverfügbarkeit und Wassernutzung weisen auf zukünftig möglicherweise kritische Einzugsgebiete hin, was von besonderer Bedeutung für internationale Geldgeber und die Entwicklungspolitik ist. Schließlich sind globale Szenarien für ein globales Wasserbedarfsmanagement sinnvoll, das auf einen optimalen Umgang mit „virtuellem“ Wasser abzielt. Die Wassernutzung der Bewohner eines Flusseinzugsgebiets beispielsweise in Mitteleuropa ist nämlich nicht auf das Wasser, das in demselben fließt, beschränkt. Dazu kommt das so genannte „virtuelle“ Wasser, das Wasser, das für die Herstellung eines konsumierten Produkts verwendet wurde. Aufgrund der weltweiten Handelsbeziehungen werden große Mengen virtuellen Wassers zwischen Einzugsgebieten und sogar Kontinenten transportiert. So wird durch den Verzehr eines Kilogramms Rindfleisch, das in Deutschland unter Einsatz von Futtermitteln aus Südamerika produziert wurde, indirekt ungefähr 10 m^3 Wasser in Südamerika verbraucht (Niederschlags- oder Bewässerungswasser). Diese Menge entspricht in etwa dem häuslichen Wasserverbrauch einer Person in Deutschland während zweieinhalb Monaten. Wurde das Futtermittel unter bewässerten Bedingungen erstellt, ist die Wasserverfügbarkeit im südamerikanischen Einzugsgebiet für die Trinkwasserversorgung um etwa diese 10 m^3 reduziert.

Bei den globalen Wasserszenarien steht entweder der Einfluss des Klimawandels auf Wasserverfügbarkeit und Bewässerungswasserbedarf im Vordergrund²⁵, oder die geänderte Wassernutzung aufgrund der Bevölkerungs-, Wirtschafts- und Technologieentwicklung. Mit Hilfe des globalen Wassermengenmodells WaterGAP 2 können Szenarien der Wasserverfügbarkeit und Wassernutzung in allen (großen) Einzugsgebieten der Erde in konsistenter Art und Weise quantifiziert werden. Dadurch können Einzugsgebiete, die unter einer Knappheit der Ressource Wasser leiden oder möglicherweise leiden werden, identifiziert werden. Die Wasserqualität wird allerdings noch nicht berücksichtigt, doch stellen die in WaterGAP 2 berechneten terrestrischen Wasserflüsse die Grundlage für eine zukünftige makroskalige Modellierung von Wasserqualitätsaspekten dar²⁶. Die Modellrechnungen stützen sich auf globalskalige Storylines. Dabei handelt es sich um die drei Storylines, die im Rahmen der World Water Vision über die Wassernutzung entwickelt wurden (ohne Betrachtung des Klimawandels)²⁷ und die vier (nicht wasser-spezifischen) IPCC Storylines.²⁸

WaterGAP 2 berechnet mit einer räumlichen Auflösung von 0,5° geographischer Länge mal 0,5° geographischer Breite Abflussbildung, Grundwasserneubildung und Durchfluss (hydrologisches Teilmodul) sowie die Wassernutzung in den Sektoren Landwirtschaft, Haushalte und Industrie (Wassernutzungsteilmodul) in allen Einzugsgebieten der Erde (vgl. Abb. 5).²⁹ Bei der Wassernutzung werden Wasserentnahme und konsumtive Wassernutzung (der Anteil des entnommenen Wassers, das während der Nutzung verdunstet) unterschieden. Die integrierte Modellierung von Hydrologie und Wassernutzung ermöglicht es, die Reduzierung des Durchflusses durch konsumtive Wassernutzung (insbesondere bei Bewässerung) zu simulieren. Durch Verknüpfung geeigneter Indikatoren der Wasserverfügbarkeit und Wassernutzung, wie sie durch das hydrologische und das Wassernutzungsmodul berechnet werden, können dann zusätzlich Indikatoren der Wasserknappheit quantifiziert werden.

Das hydrologische Modell WGHM (WaterGAP Global Hydrological Model) wurde für 724 Durchflussmessstellen weltweit derart angepasst, dass der simulierte langjährige mittlere Abfluss mit dem gemessenen übereinstimmt, wobei die Durchflussreduzierung durch Wassernutzung berücksichtigt wird. Eine Modellüberprüfung hat ergeben, dass der typische Niedrigwasserabfluss (auf Monatsbasis) sowie die interannuelle Variabilität des Durchflusses zufriedenstellend simuliert werden.³⁰ Der

25 Für große Gebiete ist der Einfluss von Landnutzungsänderungen auf die Wasserverfügbarkeit geringer als der des Klimawandels.

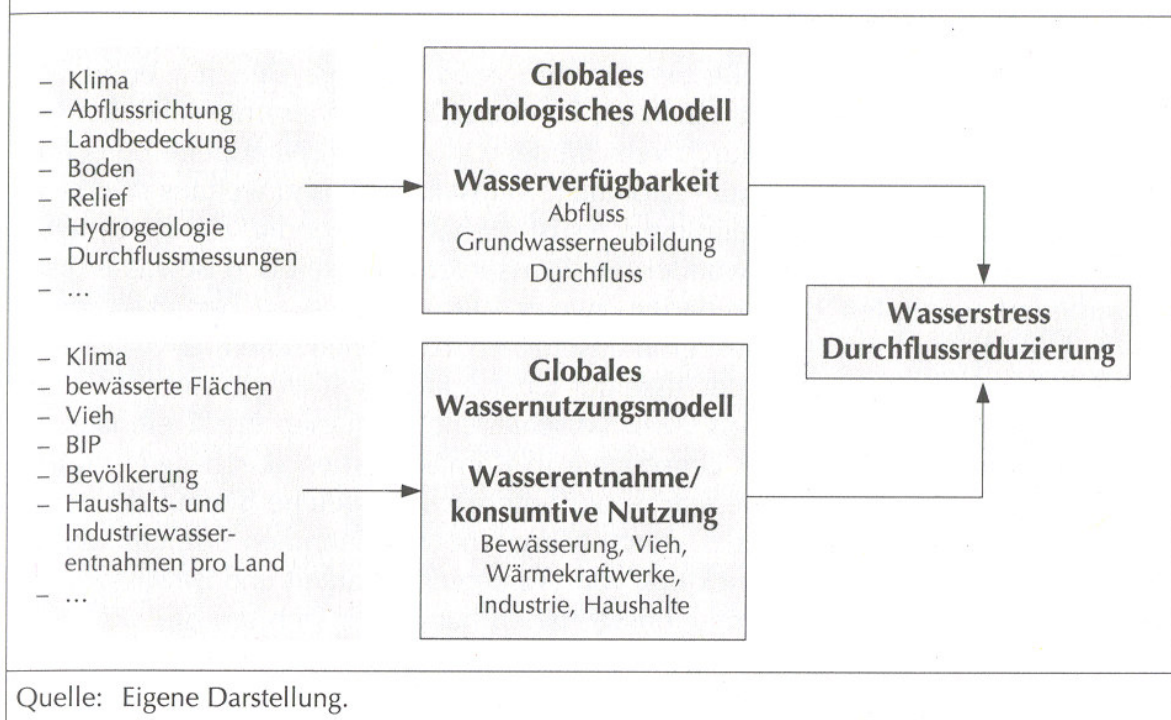
26 Zurzeit wird basierend auf WaterGAP 2 ein globales Modell des Stickstofftransports in die Küstengewässer entwickelt.

27 Vgl. Cosgrove, W.J./Rijsberman, F.R.: World Water Vision: Making Water Everybody's Business, a. a. O. - Alcamo, J./Henrichs, T./Rösch, T.: World Water in 2025, a.a.O.

28 Vgl. Nakicenovic, N./Swart, R. (Hrsg.): Emission Scenarios, a. a. O.

29 Vgl. Alcamo, J./Döll, P./Henrichs, T./Kaspar, F./Lehner, B./Rösch, T./Siebert, S.: WaterGAP 2: A model for global assessment of freshwater resources. In: Hydrological Sciences Journal. Jg. 48 (2003), H. 3, S. 317-338. - Lehner, B./Henrichs, T./Döll, P./Alcamo, J.: EuroWasser - Model-based assessment of European water resources and hydrology in the face of global change. Kassel 2001, Kap. 2. (= Kassel World Water Series, Bd. 5). Verfügbar unter <http://www.usf.uni-kassel.de/usf/archiv/dokumente.de.htm>.

30 Vgl. Döll, P./Kaspar, F./Lehner, B.: A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation. In: Journal of Hydrology. Jg. 270 (2003), H. 1-2, S. 105-134.

Abbildung 5: Das globale Wassermengenmodell WaterGAP 2

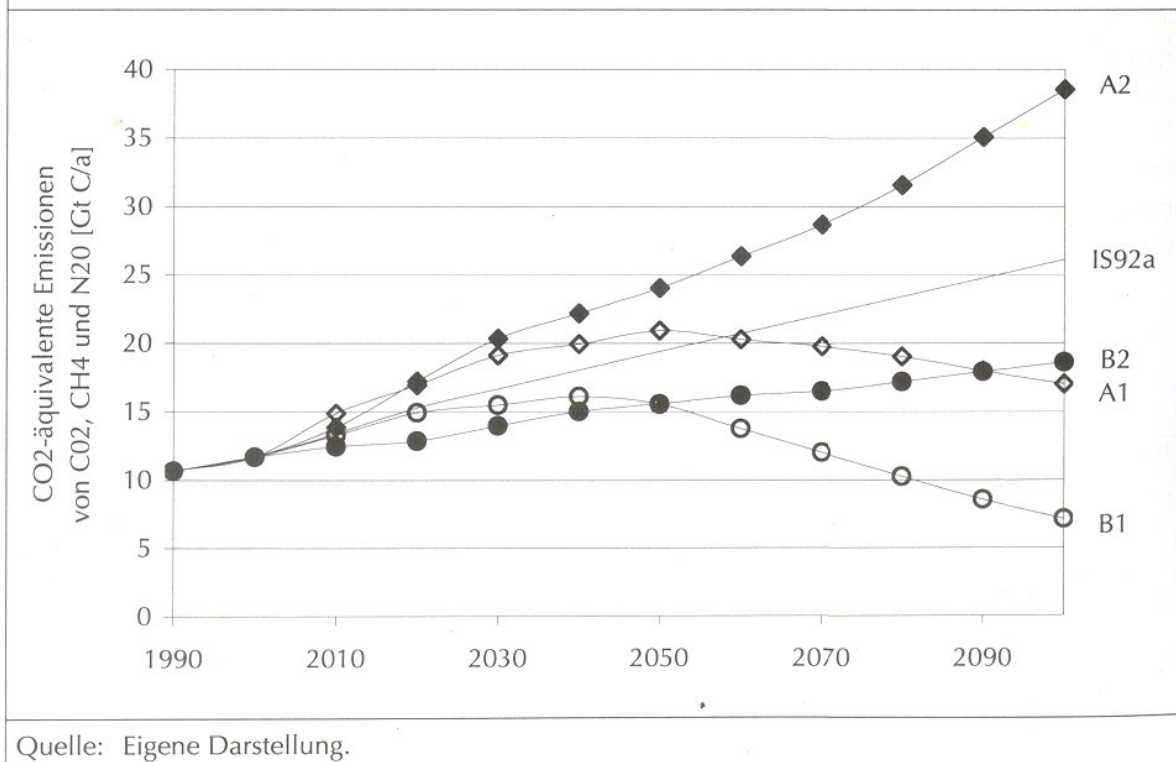
Wasserbedarf für Bewässerung wird durch das Modul GIM (Global Irrigation Model)³¹ berechnet, das auf einer globalen Karte der bewässerten Flächen 1995³² basiert und ebenso wie WGHM Zeitreihen von gemessenen monatlichen Klimadaten (1901-95)³³ verwendet. GIM berechnet die Anbaumuster, Wachstumsperioden und Bewässerungswasserbedarfe und unterscheidet zwischen Reis und anderen bewässerten Feldfrüchten. Das Modell ist u. a. gegen unabhängig geschätzte Netto-Bewässerungswasserbedarfe in den USA validiert. Die Industrie- und Haushaltswassernutzung in jeder Rasterzelle wird hauptsächlich als Funktion der Bevölkerungsdichte durch Interpolation von Länderwerten der Wasserentnahme bestimmt. Während die Länderwerte für 1995 Literaturdaten sind, werden sie für die Zukunft basierend auf den geänderten Wasserintensitäten (z. B. Pro-Kopf-Wasserverbrauch im Haushalt) und den treibenden Kräften (z. B. Bevölkerung) berechnet. Dabei wird die Wasserintensität als eine Funktion des Pro-Kopf-Bruttoinlandsprodukts und eines endogenen technologischen Wandels modelliert.³⁴

- 31 Vgl. Döll, P./Siebert, S.: Global modeling of irrigation water requirements. In: Water Resources Research. Jg. 38 (2002), H. 4, S. 8.1-8.10. DOI 10.1029/2001WR000355. - Döll, P.: Impact of climate change and variability on irrigation requirements: a global perspective. In: Climatic Change. Jg. 54 (2002), H. 3, S. 269-293.
- 32 Vgl. Döll, P./Siebert, S.: A digital global map of irrigated areas. In: ICID Journal. Jg. 49 (2000), H. 2, S.55-66.
- 33 Vgl. New, M./Hulme, M./Jones, P. D.: Representing twentieth century space-time climate variability. Part II: Development of 1901-96 monthly grids of terrestrial surface climate. In: Journal of Climate. Jg. 13 (2000), S. 2217-2238.
- 34 Vgl. Alcamo, J./Döll, P./Henrichs, T./Kaspar, F./Lehner, B./Rösch, T./Siebert, S.: WaterGAP 2: A model for global assessment of freshwater resources, a. a. O.

4.2 Einfluss des Klimawandels auf Wasserverfügbarkeit und Bewässerungswasserbedarf

Die durch globale Klimamodelle berechneten Niederschläge sind mit einer weit höheren Unsicherheit behaftet als z. B. die Temperaturen. Daher unterscheiden sich die für ein Emissionsszenario durch verschiedene globale Klimamodelle berechneten Niederschlagsänderungen auf regionalem Maßstab stark und weitaus stärker als die berechneten Temperaturänderungen. Es ist deshalb notwendig, für die Untersuchung des Einflusses des Klimawandels auf Wasserverfügbarkeit und Bewässerungswasserbedarf wenigstens die Szenarien zweier Klimamodelle zu berücksichtigen, um die Unsicherheiten zumindest grob abschätzen zu können. Die hier vorgestellte globalskalige Analyse (deren Ergebnisse der Übersichtlichkeit wegen nur für Europa gezeigt werden) umfasst erstmals zwei verschiedene Szenarien der Treibhausgasemissionen (in ihrer jeweiligen Umsetzung in Klimaszenarien durch zwei globale Klimamodelle). Ziel der Analyse war es, zu untersuchen, welche Bedeutung veränderte Emissionspfade, wie sie z. B. durch Klimaschutzmaßnahmen erreicht werden können, für die zukünftige Entwicklung von Wasserverfügbarkeit und Bewässerungswasserbedarf haben. Bei den Emissionsszenarien handelt es sich um die SRES Szenarien A2 und B2 des IPCC. Beide Szenarien gehen von einer eher regionalisierten Welt aus, wobei bei A2 die Betonung auf die ökonomische Entwicklung, bei B2 auf den Umweltschutz und soziale Innovation gelegt wird. Bei A2 werden die Treibhausgasemissionen 2030 als ca. doppelt so hoch wie 1990 angenommen, während bei B2, welches eine umweltschonende Entwicklung der Gesellschaft voraussetzt, die Emissionen nur um etwa ein Drittel erhöht sind (vgl. Abb. 6).

Abbildung 6: Die Treibhausgas-Emissionsszenarien des IPCC A1, A2, B1 und B2, ebenso wie das ältere IPCC IS92a Szenario, das die Grundlage fast aller publizierten Klimaszenarien bis 2001 war.



Der Einfluss des Klimawandels auf Wasserverfügbarkeit und Bewässerungswasserbedarf wird berechnet, indem die gemessenen historischen Zeitreihen von Niederschlag und Temperatur für die Klimanormale 1961-90 mit den durch die Klimamodelle berechneten langfristigen monatlichen Niederschlags- und Temperaturänderungen zwischen der Klimanormale und der jeweiligen zukünftigen Dekade (hier die 2020er und die 2070er Jahre) skaliert werden. Bei den verwendeten Klimamodellen handelt es sich um das Modell ECHAM4/OPYC des Max-Planck-Instituts für Meteorologie, Hamburg,³⁵ und das Modell HadCM3 des Hadley Centers, Bracknell, Großbritannien.³⁶

Indikatoren für die Wasserverfügbarkeit sind die langfristigen Jahresmittelwerte der Wasserressourcen in Flusseinzugsgebieten sowie der 90 % verlässliche monatliche Durchfluss Q_{90} in Rasterzellen. Q_{90} ist ein statistischer Niedrigwasserabfluss, der als Richtgröße für die Wasserversorgung geeignet ist; er berücksichtigt die Durchflussreduzierung durch konsumtive Wassernutzung stromauf.

Die mit WaterGAP 2 berechneten Änderungen beider Wasserverfügbarkeitsindikatoren bis zu den 2020er bzw. 2070er Jahren (prozentuale Änderungen der langjährigen Mittel des Abflusses in Einzugsgebieten) unterscheiden sich sehr stark je nach dem verwendeten Klimamodell. Sie sind stärker vom Klimamodell als von den doch deutlich unterschiedlichen Emissionsszenarien abhängig. Für große Gebiete der Erde führt das eine Klimamodell (für ein gegebenes Emissionsszenario) zu einer Abnahme der Indikatoren, während das andere zu einer Zunahme führt. So nehmen, nach dem HadCM3-Klimamodell, die Wasserressourcen im östlichen Australien sowie in Mittel- und in Südamerika bis hinunter zum Amazonas für beide Emissionsszenarien und Zeiträume stark ab, während sie nach dem ECHAM4-Modell zunehmen. Für das westliche Australien, Südchina und große Teile Nordamerikas verhält es sich genau umgekehrt. Beide Modelle führen zu beträchtlichen Abnahmen der Wasserressourcen im Nordosten Brasiliens und im südwestlichen Afrika, und zu beträchtlichen Zunahmen in den borealen Zonen.

Abbildung 7 zeigt die Änderungen der mittleren jährlichen Wasserressourcen bis zu 2020er Jahren (verglichen mit der Klimanormale 1961-90) für die Flusseinzugsgebiete Europas (Mittelwerte über jedes Einzugsgebiet), wie WaterGAP sie für die beiden Emissionsszenarien und ihre Umsetzung in Klimaszenarien durch die beiden Klimamodelle berechnet. Besonders eklatant sind die Diskrepanzen zwischen den auf HadCM3 und ECHAM4 beruhenden Änderungen für die iberische Halbinsel. Aufgrund stark erhöhter Winterniederschläge in HadCM3 erhöhen sich für dieses Modell die Wasserressourcen stark, während sie gemäß ECHAM4 stark abnehmen.

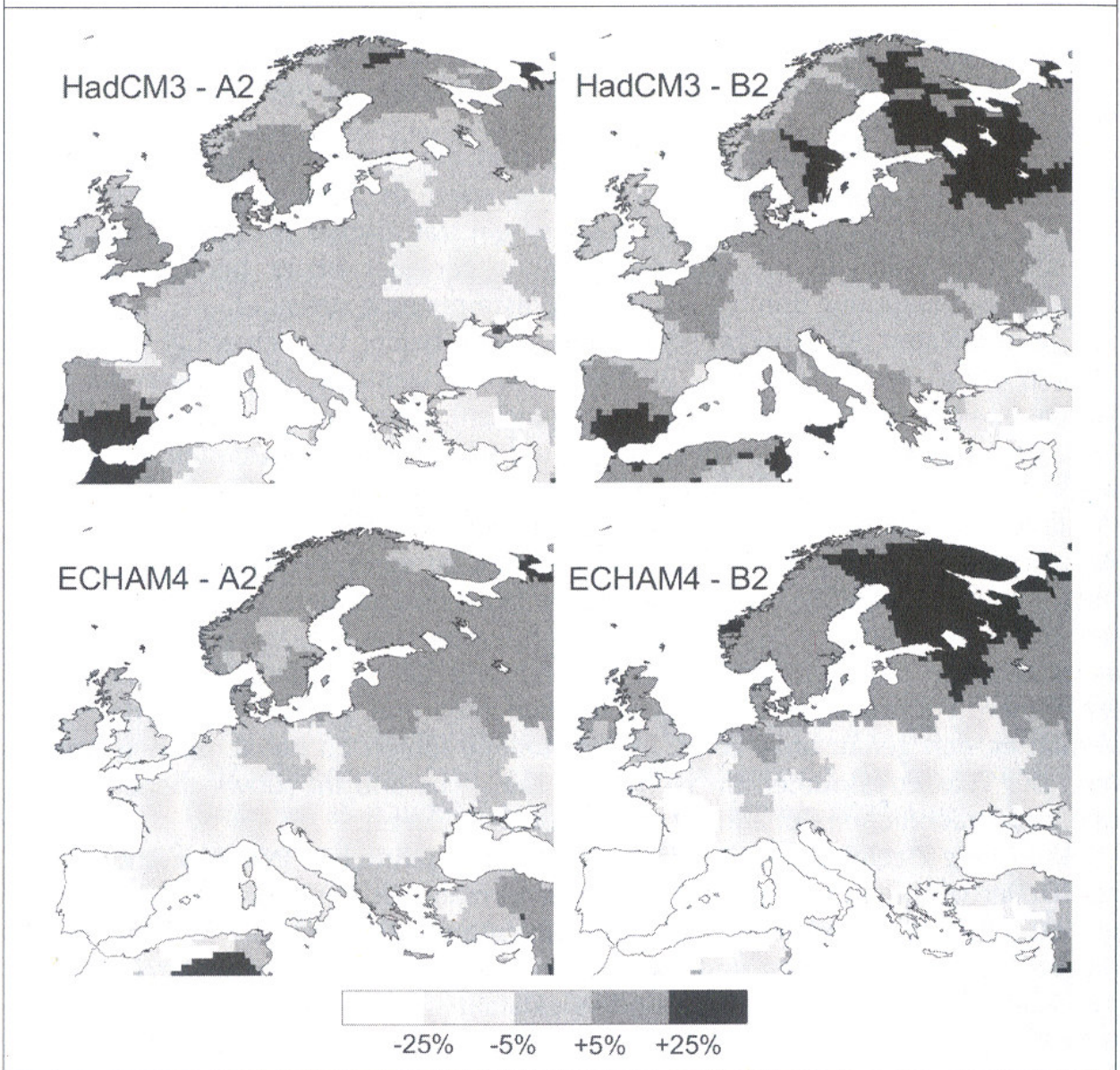
Vergleicht man jeweils die beiden Emissionsszenarien, so führen die geringeren Emissionen im Szenario B2 nicht zu geringeren Änderungen der Wasserressourcen als bei A2. Dies trifft sowohl für die 2020er als auch die 2070er Jahre zu. Die Änderungen bis zu den 2070er Jahren sind meist stärker als bis zu den 2020er Jahren.

35 Vgl. Röckner, E./Arpe, K./Bengtsson, L./Christoph, M./Claussen, M./Dümenil, L./Esch, M./Giorgetta, M./Schlese, U./Schulzweida, U.: The atmospheric general circulation model ECHAM-4: Model description and simulation of present day climate. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg 1996. (= MPI-Report, No. 218).

36 Vgl. Gordon, C./Cooper, C./Senior, C. A./Banks, H./Gregory, J. M./Johns, T. C./Mitchell, J. F. B./Wood, R. A.: The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. In: *Climate Dynamics*. Jg. 16 (2000), H. 2/3, S. 147-168.

Abbildung 7: Änderung der langfristigen Jahresmittelwerte der Wasserressourcen in den Einzugsgebieten Europas bis in die 2020er Jahre (bezogen auf die Klimanormale 1961-90)

Berechnung für die IPCC Emissionsszenarien A2 und B2 in ihrer Umsetzung in Klimaszenarien durch die globalen Klimamodelle HadCM3 und ECHAM4



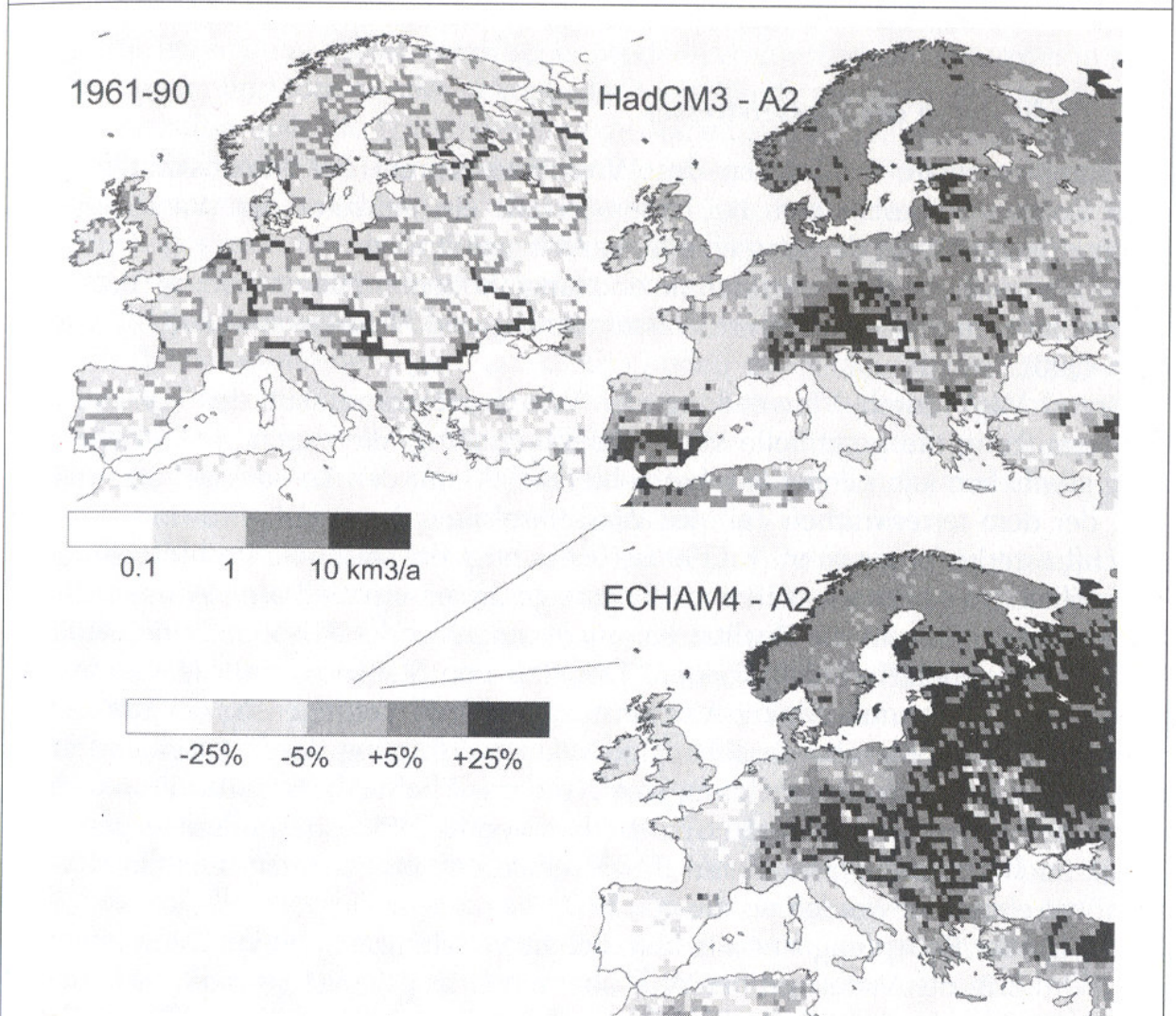
Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung.

Abbildung 8 zeigt den Wasserverfügbarkeitsindikator Q_{90} für alle Rasterzellen in Europa während der Klimanormale 1961-90, sowie die Änderungen bis zu den 2020er Jahren (Emissionsszenario A2, beide Klimamodelle). Größtenteils nimmt Q_{90} im Vergleich zum langjährigen Mittel überproportional zu oder ab. Die große Abhängigkeit der Ergebnisse vom gewählten Klimamodell bleibt bestehen.

Bezüglich des Netto-Bewässerungswasserbedarfs NBB ist es im Allgemeinen nicht so, dass in den Einzugsgebieten, in denen die (übers Jahr gemittelten) Wasserressourcen zunehmen, auch NBB abnimmt. Das liegt insbesondere daran, dass bei NBB nur die Klimaänderung während der Wachstumsperiode zum Tragen kommt. Auch daher hat die Unsicherheit der Klimamodelle bezüglich der Niederschlagsänderungen für NBB eine deutlich andere Wirkung als für die Wasserressourcen. So sind die Änderungen im NBB für die iberische Halbinsel sehr ähnlich, da HadCM3

Abbildung 8: 90% verlässlicher Monatsdurchfluss Q_{90} [km^3/a] als Indikator der Wasserverfügbarkeit je Rasterzelle während der Klimanormale 1961-90 (links). Änderung des Q_{90} bis in die 2020er Jahre (bezogen auf die Klimanormale 1961-90) (rechts).

Berechnung für das IPCC Emissionsszenario A2 in seiner Umsetzung in Klimaszenarien durch die globalen Klimamodelle HadCM3 und ECHAM4.



Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung.

vor allem im Winter, d. h. außerhalb der Wachstumsperiode, sehr viel höhere Niederschläge in den 2020er Jahren berechnet als ECHAM4, was zu einer starken Diskrepanz bei den Wasserressourcen führt. Im Großen und Ganzen sind die Bewässerungswasserbedarfe, die sich mit den ECHAM4- und HadCM3-Klimaänderungen berechnen, ähnlicher als die berechneten Wasserressourcen. Zum einen reagiert NBB sensitiver auf Temperaturänderungen als die Wasserressourcen, und deren Unsicherheit ist geringer als die Unsicherheit in den berechneten Niederschlagsänderungen. Zum anderen schätzt GIM nicht den Wasserbedarf für eine konstante Wachstumsperiode, sondern bestimmt eine optimale Wachstumsperiode als Funktion des Niederschlags und der Temperatur. In vielen Zellen führen unterschiedliche Klimaszenarien zu einer unterschiedlichen Verschiebung der Wachstumsperioden, was zu einer Angleichung der berechneten Wasserbedarfe führt. Im globalen Mittel erhöht sich NBB bei einer konstanter Bewässerungsfläche von ca. 2,5 Mio. km^2 bis

zu den 2020er Jahre von 1 131 km³/a für die Klimanormale 1961-90 um 1-3 % je nach Szenario und Klimamodell, und um 2-7 % bis zu den 2070ern (wobei HadCM3 B2 zu den größten Zunahmen führt). In Europa nimmt NBB fast überall zu, so z. B. in Spanien um 5-8 % bis zu den 2020er Jahren (je nach Klimamodell und Emissionsszenario) und um (-1)-10 % bis zu den 2070er Jahren. Die entsprechenden Werte für Frankreich sind 15-23 % und 30-50 %, da dort der typische Pro-Hektar-Wasserbedarf weit niedriger als in Spanien ist.

4.3 Indikatoren des Wasserstress

Als komplementäre Indikatoren des Wasserstress auf der Makroskala werden zwei Größen vorgeschlagen, bei denen jeweils ein Indikator der Wassernutzung durch einen Indikator der Wasserverfügbarkeit geteilt wird:

- der Quotient aus Wasserentnahme und langjährigem mittleren Abfluss (W-A);
- der Quotient aus konsumtiver Wassernutzung und Niedrigwasserdurchfluss Q_{90} (K-Q90).

Während W-A durch Verwendung der Wasserentnahme statt der konsumtiven Wassernutzung die potentielle Wasserverschmutzung, die durch eine Wassernutzung geschehen kann, integriert, betrachtet K-Q90 nur den Teil des benutzten Wassers, der dem terrestrischen Teil des Wasserkreislaufs entzogen wird und zu einer Durchflussreduzierung führt. K-Q90 berücksichtigt die saisonale und interannuelle Variabilität des Abflusses, während W-A die gesamten erneuerbaren Wasserressourcen einbezieht, die in der Realität vor allem aufgrund der Saisonalität der Abflussbildung nie genutzt werden können. Der Bau von Stauseen, der die Saisonalität vermindert, führt durch erhöhte Verdunstung zu einer Verringerung der Wasserressourcen, und die saisonal unabhängige Wasserversorgung durch Grundwasser ist durch die Grundwasserneubildung sowie die das Fließverhalten des Grundwasser begrenzt. Andererseits muss die Unsicherheit von K-Q90 insbesondere wegen Q_{90} , der ja auch von der unbekanntem Bewirtschaftung von Stauseen beeinflusst wird, als höher eingestuft werden als die von W-A.

Von großer Bedeutung sind die räumlichen Mittelungseinheiten für die Indikatoren. Wird z. B. der Mittelwert der W-A über ein Einzugsgebiet gewählt, so bedeutet das eigentlich, dass alle Teilgebiete unter demselben Stress leiden. Dies ist sicher nur sehr selten der Fall. Mit räumlich stärker aufgelösten Indikatoren nimmt die Aussageschärfe zu, die Unsicherheit aber ebenfalls, da z. B. in WaterGAP keine Fernwasserversorgung berücksichtigt wird.

5 Schlussfolgerungen

Die Erstellung qualitativ-quantitativer Szenarien der Wasserverfügbarkeit und Wassernutzung ist die Methode der Wahl zur Unterstützung einer auf Nachhaltigkeit ausgerichteten integrativen Wasserpolitik. In solchen Szenarien werden Erzählungen der Zukunft (Storylines) mit modellbasierten quantitativen Abschätzungen der Änderungen ausgewählter Systemindikatoren kombiniert, wobei je nach Problemstellung und Ressourcenlage der Anteil der modellbasierten Analysen flexibel gestaltet werden kann. Solche Szenarien sind (potenziell) aussagekräftiger, transparenter und konsistenter als rein qualitative oder rein quantitative Szenarien. Die gleichzeitige und gleichwertige Betrachtung von Wasserverfügbarkeit und Wassernutzung ist

notwendig für ein Wassermanagement, das nicht nur eine Bewirtschaftung der Wasserressourcen, sondern auch ein Wasserbedarfsmanagement umfasst.

Zur Unterstützung eines regionalen bzw. Flusseinzugsgebietsmanagements ist es wichtig, die Stakeholder in die Entwicklung der Szenarien einzubeziehen, insbesondere beim Schreiben der Storylines der Referenzszenarien, bei der Identifizierung interessanter Interventionen und bei der Bewertung der Szenarien. Nur dann werden die Szenarien einen tatsächlichen Einfluss auf die Wasserpolitik haben. Es wird die Entwicklung gebietspezifischer Modelle empfohlen, die entweder in Form eines integrierten Modells oder gekoppelter Modellläufe verknüpft werden. Eine offene Diskussion über die Unsicherheiten des quantitativen Szenarioteils unterstützt die Transparenz und Glaubwürdigkeit der Szenarien.

Im Mittelpunkt von Szenarien der Wasserverfügbarkeit steht oft die Auswirkung des anthropogenen Klimawandels auf Wasserverfügbarkeit und Bewässerungswasserbedarf in Flusseinzugsgebieten. Leider ist es zurzeit noch nicht möglich, die Auswirkungen unterschiedlicher zukünftiger Treibhausgasemissionen, d.h. den Erfolg von Emissionsminderungen, auf diese Größen quantitativ abzuschätzen. Dies liegt daran, dass die durch Klimamodelle berechneten Niederschläge mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Diese Unsicherheiten werden auch durch regionale angepasste Klimaszenarien nicht entscheidend verringert, da die Unsicherheit der globalen Klimamodelle auch regionale Klimaszenarien dominiert.

Zu beachten ist, dass verminderte Emissionen im Allgemeinen nicht zu geringeren Änderungen der Wasserverfügbarkeit und des Bewässerungswasserbedarfs führen werden. Damit unterscheidet sich die Problematik der klimabedingten Änderungen von Wasserressourcen und -bedarf z.B. deutlich vom Problem des Meeresspiegelanstiegs, der mit den Treibhausgasemissionen bzw. -konzentrationen positiv korreliert. Beim Meeresspiegelanstieg ist die Temperatur die dominante treibende Kraft, bei Wasserressourcen und -bedarf der Niederschlag. Zwar korreliert der Niederschlag im globalen Mittel ebenso wie die Temperatur positiv mit den Treibhausgaskonzentrationen (aufgrund der erhöhten Verdunstung). Auf regionaler Skala trifft dies jedoch für den Niederschlag nicht mehr zu; aufgrund der durch die Treibhausgase veränderten globalen atmosphärischen Zirkulation ergeben sich räumlich differenziert sowohl (starke) Zunahmen des Niederschlags als auch (starke) Abnahmen, und die Lage der Regionen mit Zu- und Abnahmen ändert sich mit der sich ändernden atmosphärischen Zirkulation. Allerdings ist es sehr wahrscheinlich, dass sich mit höheren Emissionen auch die Extremereignisse (Starkregen, Hochwasser, Dürren,) verstärken werden, was auch für Wasserverfügbarkeit negative Folgen haben wird. Eine räumlich differenzierte Quantifizierung solcher Extremereignisse ist aber mit noch weit höheren Unsicherheiten behaftet als die Quantifizierung mittlerer langfristiger Änderungen, wie sie in den *Abschnitten 3 und 4* diskutiert wurde.

Die Erstellung von Wassernutzungsszenarien ist aufgrund der Unsicherheiten bei der Wassernutzungsmodellierung selbst problematisch. Aufgrund der schlechten Datenlage bezüglich der Wassernutzung und der, im Vergleich zur hydrologischen Modellierung, weniger erforschten theoretischen Grundlagen stecken Wassernutzungsmodelle (abgesehen von Bewässerungsmodellen auf Feldskala) noch in ihren Kinderschuhen. Wegen der schlechten Datenlage, z.B. dem Fehlen historischer Zeitreihen, ist es zudem fast nie möglich, ein Wassernutzungsmodell zu validieren.

Aufgrund all der diskutierten Unsicherheiten stellt sich unwillkürlich die Frage, ob eine qualitativ-quantitative Szenarioanalyse tatsächlich hilfreich für eine integra-

tive und auf Nachhaltigkeit ausgerichtete Wasserpolitik sein kann. Sie kann es, denn sie produziert Wissen über die relevanten Einflussfaktoren und Problemlagen und unterstützt strategisches und integratives Denken. Die quantitative Modellierung kann zwar keine sicheren Aussagen über die Auswirkungen unterschiedlicher treibender Kräfte (z. B. Treibhausgasemissionen) oder Politikmaßnahmen (z. B. Wasserpreissteigerungen) auf Wasserverfügbarkeit und Wassernutzung machen, doch eine Modellierung ist bei komplexen Problemen der beste Ansatz, um vorhandenes Wissen und (verstreut) vorliegende Daten zu verknüpfen. Rein qualitative Szenarien können komplexe Prozesse (z. B. räumlich verteilte Prozesse) nur ungenügend erfassen. Schließlich ist es bei jeglicher (wasserpolitischer) Entscheidung wichtig, über die Unsicherheiten und Risiken, die diese Entscheidung betreffen, informiert zu sein. Qualitativ-quantitative Szenarioanalysen zeigen Unsicherheiten auf, und die Schlussfolgerung aus einer hohen Unsicherheit wird oft sein, dass das System flexibel und robust zu gestalten ist.

Zusammenfassung

Szenarien der Wasserverfügbarkeit und -nutzung sind geeignet, eine auf Nachhaltigkeit ausgerichtete integrative Wasserpolitik zu unterstützen. Stand der Wissenschaft sind qualitativ-quantitative Szenarien, in denen Erzählungen der Zukunft (Storylines) mit meist modellbasierten quantitativen Abschätzungen der Änderungen ausgewählter Systemindikatoren kombiniert werden. In diesem Beitrag wird die Methodik zur Entwicklung qualitativ-quantitativer Szenarien beschrieben. Eine Fallstudie für zwei Bundesstaaten im semiariden Nordosten Brasiliens illustriert die Methodik, die auch für die laut der EU-Wasserrahmenrichtlinie notwendige Erstellung von Bewirtschaftungsplänen für Flusseinzugsgebiete angepasst werden kann. Schließlich werden globale Szenarien der Wasserverfügbarkeit und -nutzung vorgestellt, die u. a. dazu dienen, Einzugsgebiete zu identifizieren, die zukünftig unter erhöhtem Wasserstress neigen könnten. Allerdings ist es zur Zeit noch nicht möglich, die Auswirkungen unterschiedlicher zukünftiger Treibhausgasemissionen auf Wasserverfügbarkeit und Bewässerungswasserbedarf zu quantifizieren, da die durch Klimamodelle berechneten Niederschlagsänderungen sehr unsicher sind.

Summary

Scenarios of water availability and water use are well suited to support a sustainability-oriented integrated water management. State-of-the-art qualitative-quantitative scenarios combine narratives of the future (storylines) with mainly model-based quantitative estimates of how selected system indicators will change. In this article, a method for developing qualitative-quantitative scenarios is described. A case study for two federal states in the semi-arid Northeast of Brazil illustrates the method, which could be adapted for the establishment of river basin management plans as required by the EU water framework directive. Finally, global-scale scenarios of water availability and use are presented, which serve to identify river basins which in the future might suffer from increased water stress. However, it is not yet possible to quantify the impact of different greenhouse gas emission scenarios on water availability and irrigation water requirements, as the uncertainty of the precipitation changes computed by climate models is very high.

