

F02 B 31
UB/TIB Hannover

Schlussbericht zum Vorhaben

**„Einfluss des Klimawandels auf Wasserverfügbarkeit und Hochwasser
in Deutschland und Europa: eine integrierte Analyse“**

Kurztitel „EuroWasser“

im Rahmen des BMBF - Projektverbunds

**„Auswirkungen des Klimas und der Landnutzung sowie ihrer Änderungen auf
die Wasserverfügbarkeit und auf Hochwasserereignisse in Europa“**



J. Alcamo, P. Döll und B. Lehner
Zentrum für Umweltsystemforschung
Universität Gesamthochschule Kassel
Kassel, Juni 2001

UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK
HANNOVER
TECHNISCHE
INFORMATIONSBIBLIOTHEK

UB/TIB Hannover 89
121 031 659



INHALT

1 KURZE DARSTELLUNG	3
1.1 AUFGABENSTELLUNG	3
1.2 VORAUSSETZUNGEN ZUR DURCHFÜHRUNG DES VORHABENS	4
1.3 PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS	5
1.4 WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND ZU PROJEKTBEGINN	8
1.5 VERWENDETE FACHLITERATUR	10
1.6 ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN	14
2 EINGEHENDE DARSTELLUNG	15
2.1 ERZIELTE ERGEBNISSE	15
2.1.1 WEITERENTWICKLUNG UND ANPASSUNG DES MODELLS WATERGAP	15
2.1.2 VERGLEICH VON WATERGAP MIT MESOSKALIGEN MODELLEN FÜR ELBE UND ODER	17
2.1.3 WASSERVERFÜGBARKEIT UND WASSERSTRESS	20
2.1.4 HOCHWASSER	22
2.1.5 NIEDRIGWASSER UND DÜRREN	24
2.1.6 WASSERKRAFTPOTENTIAL	26
2.1.7 ZUSAMMENFASSUNG	28
2.2 NUTZEN UND VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE	30
2.3 FORTSCHRITTE BEI ANDEREN STELLEN	32
2.4 EIGENE VERÖFFENTLICHUNGEN UND VORTRÄGE	33
3 ANLAGE I: ERFOLGSKONTROLLBERICHT	35
3.1 BEITRAG ZU DEN FÖRDERPOLITISCHEN ZIELEN DES FÖRDERPROGRAMMS	35
3.2 WISSENSCHAFTLICHER ERFOLG DES VORHABENS	35
3.3 VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE	36
3.4 ARBEITEN, DIE ZU KEINER LÖSUNG GEFÜHRT HABEN	36
3.5 PRÄSENTATIONSMÖGLICHKEITEN FÜR MÖGLICHE NUTZER	37
3.6 EINHALTUNG DER AUSGABEN- UND ZEITPLANUNG	37
4 ANLAGE II: KURZFASSUNG	38
4.1 BERICHTSBLATT	39
4.2 DOCUMENT CONTROL SHEET	40

1 KURZE DARSTELLUNG

1.1 Aufgabenstellung

Als zentrale Aufgabe des durchgeführten Vorhabens sollten vorhandene Klimadaten und Klimamodelle genutzt werden, um in einem integrierten Ansatz die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserdargebot, Wassernutzung, Wasserkraftpotential und Hochwasser in Deutschland und im übrigen Europa zu analysieren. Im Laufe des Projekts wurde diese Aufgabenstellung noch um den Aspekt des Niedrigwassers erweitert. Durch die großskalige Modellierung sollten überschlägige, jedoch europaweit konsistente Aussagen zur Entwicklung der Wassersituation gemacht werden. Es sollten dabei diejenigen Einzugsgebiete identifiziert werden, die in ihrer Entwicklung im Hinblick auf die oben genannten Aspekte als kritisch einzustufen sind.

Als Einzelziele wurden festgelegt:

- Die Wirkung des Klimawandels auf das Wasserdargebot und die Änderung der Wassernutzung in Deutschland und Europa abzuschätzen,
- dadurch die möglichen Änderungen der Wasserverfügbarkeit (d.h. auch der Wasserknappheit), des Wasserkraftpotentials und der Hochwasserhäufigkeit zu analysieren, im Laufe des Projekts erweitert um den Aspekt der Dürrehäufigkeit,
- die politikrelevanten Projektergebnisse zum Einfluss des Klimawandels auf die Wasserressourcen Entscheidungsträgern und Experten in Deutschland und Europa zur Kenntnis zu bringen,
- im Rahmen des Projektverbunds Methoden zu entwickeln, um die Ergebnisse und Informationen von Wassermodellen unterschiedlichen Maßstabs vergleichen und bewerten zu können, und durch die gewonnen Erkenntnisse eine Verbesserung der großskaligen Modellierung für Deutschland und das übrige Europa zu erreichen, und
- anhand von Sensitivitätsanalysen die relative Bedeutung verschiedener Parameter und Randbedingungen für die Unsicherheit bei den berechneten Werten des Wasserdargebots und der Wassernutzung zu bestimmen und damit zur Entwicklung verbesserter Modelle beizutragen.

Um diese Ziele zu erreichen, musste das am Zentrum für Umweltsystemforschung an der Universität Gesamthochschule Kassel (GhK) entwickelte Wassermodell WaterGAP (Kurzbeschreibung s. Abschnitt 2.1.1) auf das Untersuchungsgebiet Europa angepasst, zur Durchführung von Hoch- und Niedrigwasserberechnungen weiterentwickelt und zur Bestimmung der Wassernutzung aktualisiert und verfeinert werden.

Im Rahmen des Projektverbunds mit dem Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) und dem GKSS Forschungszentrum Geesthacht (GKSS) (Ziele und nähere Beschreibung des

Projektverbunds siehe gemeinsamer Schlussbericht vom Juli 2001) sollte gleichzeitig ein Vergleich des makroskaligen Modells WaterGAP, das in relativ grober räumlicher Auflösung weltweite bzw. europaweite Berechnungen anstellt, mit dem mesoskaligen Wassereinzugsgebietsmodell ARC/EGMO (Modell des PIK), bzw. dem noch höher auflösenden, detaillierten Modellsystems GESIMA/SEWAB/TOPMODEL (GKSS) durchgeführt werden. Als Untersuchungsgebiet wurden die beiden großen europäischen Einzugsgebiete Elbe und Oder ausgewählt. Mithilfe der skalenübergreifenden Vergleiche der Modellergebnisse sollten mögliche Defizite in WaterGAP aufgezeigt und schließlich korrigiert werden. Im letzten Schritt sollten dann mit dem verbesserten, auf Europa abgestimmten WaterGAP der Abfluss sowie die Wassernutzung für alle anderen europäischen Einzugsgebiete berechnet werden, um mit den erhaltenen Informationen die zukünftige Wasserverfügbarkeit, das Wasserkraftpotential sowie die Hochwasser- und Dürrehäufigkeiten für Europa abschätzen zu können.

1.2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens

Der organisatorische Rahmen für die Durchführung der Arbeiten wurde durch das Zentrum für Umweltsystemforschung, eine interdisziplinäre Forschungseinrichtung der Universität Gesamthochschule Kassel, gewährleistet. Über Kooperationen mit einer Vielzahl von Institutionen im In- und Ausland ist das Zentrum in die internationale Umweltforschung eingebunden. Das Vorhaben war dabei in die Arbeiten einer Forschungsgruppe eingebettet, deren Aufgabenfeld in der Entwicklung neuer Ansätze zur Modellierung großflächiger Umweltprobleme, wie z.B. Klimawandel, Nahrungsmittelverfügbarkeit, Wasserknappheit oder die Gefährdung natürlicher Ökosysteme liegt. Diese Arbeiten konzentrieren sich hauptsächlich auf die Integration von Wissen sowohl aus den Sozial- als auch aus den Naturwissenschaften in umfassende "integrierte Modelle" und auf die Anwendung dieser Modelle zur Unterstützung nationaler und internationaler Umweltpolitik.

Die Erfahrungen der Antragsteller (Prof. Alcamo und Dr. Döll) auf den Gebieten der Anwendung des Integrated Assessment (integrierte Analyse) auf großskalige Umweltprobleme, der Verknüpfung von Klimaforschung mit Klimapolitik sowie der Modellierung von Wasser- und Stofftransport bildeten die fachliche Basis für das Vorhaben. Prof. Alcamo ist u.a. auch als wissenschaftlicher Berater in den laufenden internationalen Klimaverhandlungen tätig.

Für die Berechnungen von Wasserdargebot (hydrologischer Abfluss) und Wasserbedarf stand das am Zentrum entwickelte integrierte globale Wassermmodell WaterGAP zur Verfügung, das bereits in zahlreichen anderen Projekten erfolgreich angewendet wurde.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Im folgenden werden kurz die Arbeiten dargestellt, wie sie im Vorhaben geplant und ausgeführt wurden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird dazu die im ursprünglichen Projektantrag vorgenommene Einteilung in 13 Arbeitsaufgaben aufgegriffen. Grundsätzlich wurde der zeitliche Rahmen für die Durchführung der Arbeitsvorgaben innerhalb des Projekts im wesentlichen eingehalten.

Tabelle 1. Arbeitsplan mit geplantem und tatsächlichem Ablauf.

Arbeitsaufgabe		Quartal								
		1/99	2/99	3/99	4/99	1/00	2/00	3/00	4/00	1/01
1	Projektkoordination									
2	Verbreitung der Projektergebnisse									
3	Erstellen (Bereitstellen) der Klimaszenarien									
4	Erstellen der Szenarien der "driving forces"									
5	Harmonisierung der Wassermodelle									
6	Modifizierung von WaterGAP									
7	Berechnung des durchschnittlichen Abflusses									
8	Berechnung Niedrig- und Hochwasserabflüsse									
9	Berechnung Wassernutzung und -verfügbarkeit									
10	Berechnung des Wasserkraftpotentials									
11	Berechnung Hochwasser- und Dürrehäufigkeit									
12	Unsicherheitsanalysen									
13	Gemeinsame Evaluierung (Projektverbund)									

Geplant

Tatsächlicher Ablauf

1.3.1999

28.2.2001

Projektbeginn

Projektende

➤ **Arbeitsaufgabe 1: Projektkoordination**

Prof. Alcamo koordinierte das Vorhaben and der GhK und übernahm die Organisation zweier zentraler Projektverbund-Treffen in Kassel (15.4.1999 und 2.2.2000) sowie die Koordination der gemeinsamen Zwischen- und Schlussberichte des Projektverbunds.

➤ **Arbeitsaufgabe 2: Verbreitung der Ergebnisse**

Ziel dieser Arbeitsaufgabe war und ist es, die Ergebnisse des Vorhabens so weit wie möglich in Deutschland und Europa zu verbreiten. Diese Aufgabe wurde bereits intensiv wahrgenommen (vgl. Literatur- und Vortragsliste in Abschnitt 2.4) und wird noch weiter fortgeführt werden.

➤ **Arbeitsaufgabe 3: Erstellung (Bereitstellung) der Szenarien zum Klimawandel**

Ziel dieser Teilaufgabe war es, die Daten der Klimaszenarien aufzubereiten, die für die Simulationen mit WaterGAP benötigt werden. Da jedoch die im ursprünglichen Projektantrag vorgesehene Kooperation mit dem Max-Planck Institut (MPI) Hamburg zur Untersuchung der Kopplung von Klimamodellen und Wassermodellen vom Zuwendungsgeber gestrichen wurde, entfiel die Durchführung von zusätzlichen Simulationsläufen im Rahmen eines regionalen Klimamodells speziell für Europa. Als Ersatz wurde für alle Modellrechnungen auf bereits existierende Resultate von globalen Klimamodellen zurückgegriffen, ohne diese Modelle weiter regional untersuchen oder bewerten zu können. Dazu wurden die Modelle ECHAM4 des MPI Hamburg (Roeckner et al. 1996) und HadCM3 des Hadley Centre, Bracknell, (Gordon et al. 1999) ausgewählt und zur Verarbeitung in WaterGAP aufbereitet.

➤ **Arbeitsaufgabe 4: Erstellung der Szenarien der „driving forces“**

Ziel dieser Arbeitsaufgabe war es, weitere Daten (neben den Klimadaten) bereitzustellen, die von WaterGAP benötigt werden, um Abfluss und Wassernutzung kalkulieren zu können. Hier sind insbesondere die Bevölkerungsentwicklung, die Veränderung des Bruttosozialprodukts, Daten und Szenarien zu strukturellem und technologischem Wandel sowie zum Landnutzungswandel zu nennen. Aus Mangel an ausreichend realistischen und zuverlässigen globalen Landnutzungsszenarien, musste auf diesen letzten Aspekt in den weiteren Berechnungen jedoch verzichtet werden (vgl. auch Abschnitt 3.4).

➤ **Arbeitsaufgabe 5: Harmonisierung und Vergleich der Ergebnisse der Wassermodelle**

Ziel dieser Teilaufgabe war es, im Rahmen des Projektverbunds die Modelle WaterGAP, ARC/EGMO und GESIMA/SEWAB/TOPMODEL aufeinander abzustimmen (Datenkompatibilität und Datenaustausch) und ihre Ergebnisse zu vergleichen. Durch die Konzentration der Untersuchungen auf zeitlich begrenzte Perioden und auf die beiden Einzugsgebiete der Oder und der Elbe wurden dabei einheitliche Rahmenbedingungen für den Vergleich geschaffen. Die Ergebnisse zu dieser Arbeitsaufgabe sind insbesondere im gemeinsamen Schlussbericht des Projektverbunds dargestellt.

➤ **Arbeitsaufgabe 6: Anpassung von WaterGAP zur Anwendung auf Deutschland und Europa**

Ziel dieser Teilaufgabe war es, das Modell WaterGAP zu modifizieren und dahingehend weiterzuentwickeln, die Bedingungen in Einzugsgebieten in Deutschland und Europa besser abbilden zu können. Diese Aufgabe erwies sich als unerwartet umfangreich. So wurde zum einen das Wassernutzungsmodul vollständig überarbeitet bzw. in großen Teilen neu entwickelt. Zum anderen wurde in der Komponente der Wasserverfügbarkeit, neben der Überarbeitung einzelner hydrologischer Parameter, insbesondere das laterale Fließrichtungsmodell umfangreich korrigiert sowie Feuchtgebiete, Seen und Stauseen mittels neuentwickelter Datengrundlagen und makroskalig ausgerichteter Konzepte in das Modell integriert. Darüber hinaus wurde eine neue Bewässerungskarte für Europa erstellt.

➤ **Arbeitsaufgabe 7: Berechnung der Änderung des durchschnittlichen Abflusses**

Ziel dieser Teilaufgabe war es, die Veränderungen des durchschnittlichen Abflusses und der Wassernutzung zu berechnen, die durch die Änderungen des Klimas verursacht werden. Dazu wurden die Daten aus den Teilaufgaben 3 und 4 verwendet. Als Voraussetzung zur Berechnung des durchschnittlichen Abflusses musste die verbesserte Version von WaterGAP zunächst kalibriert werden, wozu die Daten von 126 ausgewählten Europäischen Abflusspegeln (bereitgestellt vom Global Runoff Data Center, GRDC 2000) verwendet wurden. Für die unkalibrierten Gebiete wurde eine Regionalisierung des Abflusskoeffizienten mittels multipler Regression durchgeführt.

➤ **Arbeitsaufgabe 8: Berechnung der veränderten monatlichen Hoch- und Niedrigwasserabflüsse**

In diesem Arbeitsschritt wurden einerseits die mit WaterGAP erhaltenen Daten (Monatswerte) speziell im Hinblick auf die Veränderungen der Hoch- und Niedrigwasserabflüsse ausgewertet (z.B. kontinentale Karten, die den Monat mit dem höchsten bzw. niedrigsten mittleren Abfluss sowie dessen Veränderung zeigen). Andererseits mussten für die späteren Analysen der Hochwasserhäufigkeiten auch Tageswerte mit WaterGAP berechnet werden (vgl. Arbeitsaufgabe 11).

➤ **Arbeitsaufgabe 9: Bestimmung der Änderungen von Wassernutzung und Wasserverfügbarkeit**

In dieser Arbeitsaufgabe wurden zunächst die zukünftigen Änderungen in der Wassernutzung (Wasserentnahmen) mit WaterGAP berechnet. Durch den Vergleich von Wasserdargebot und Wassernutzung kann ein Maß für die Wasserverfügbarkeit erhalten werden. Um auszudrücken, ob die Wasserversorgungssituation kritisch ist, wurde ein Kritikalitätsindex eingeführt, der als Quotient aus Wasserentnahme und erneuerbarem Wasserdargebot definiert ist. Diese Definition sollte im Rahmen der Arbeitsaufgabe neu gefasst werden, um den deutschen und europäischen Verhältnissen besser gerecht zu werden. Dieser Arbeitsschritt führte zwar zu neuen, teils komplexen Ansätzen der Definition von Wasserstress bzw. Wasserkritikalität, die Aufgabenstellung konnte jedoch nicht endgültig und zufriedenstellend gelöst werden (vgl. Abschnitt 3.4). Deshalb wurde letztendlich in der Ergebnisdarstellung auf bestehende Ansätze zurückgegriffen, um eine leichtere Vergleichbarkeit mit anderen Studien zu ermöglichen.

➤ **Arbeitsaufgabe 10: Bestimmung der Veränderung der Wasserkraftpotentiale**

Ziel dieser Arbeitsaufgabe war es, aus den veränderten Abflüssen, wie sie in den Aufgaben 7 und 8 berechnet wurden, mögliche Veränderungen der Wasserkraftpotentiale abzuleiten. Dazu wurden neue Datensätze generiert, welche Lage, Leistung und Typ der bestehenden Wasserkraftwerke in Europa beinhalten. Basierend auf Annahmen zur unterschiedlichen Arbeitsweise und Effizienz von Laufkraftwerken und Speicherkraftwerken konnten durch Einsetzen der veränderten monatlichen Abflussbedingungen veränderte Wasserkraftpotentiale abgeleitet werden.

➤ **Arbeitsaufgabe 11: Bestimmung der Änderung von Hochwasser- und Dürrehäufigkeiten**

Ziel dieser Teilaufgabe war es, aus den Veränderungen des Abflusses, wie sie in den Aufgaben 7 und 8 berechnet wurden, mögliche Veränderungen in den Häufigkeiten von Hoch- und Niedrigwasserereignissen bzw. hydrologischen Dürren abzuleiten (letzteres wurde erst im Laufe des Projekts als zusätzliches Ziel aufgenommen). Dazu mussten neue globale Konzepte und programmtechnische Umsetzungen entwickelt werden, um aus den (grundsätzlich fehlerbehafteten) Tages- und Monatswerten, wie sie im Modell WaterGAP berechnet werden, entsprechende Häufigkeitsverteilungen zu ermitteln. Ziel war dabei weniger eine detaillierte Analyse der absoluten Änderungen von einzelnen Hochwasser- oder Dürreereignissen für jedes Wassereinzugsgebiet in Deutschland und Europa. Es sollten vielmehr Ergebnisse vorgelegt werden, die eine erste Abschätzung erlauben, in welchen Gebieten aufgrund des Klimawandels eine signifikante Verschärfung der Hoch- oder Niedrigwassersituation zu erwarten ist.

➤ **Arbeitsaufgabe 12: Beurteilung der Unsicherheiten**

Die Ergebnisse des Modells WaterGAP sind aufgrund der Größenordnung und der Komplexität der Prozesse, die simuliert werden, fehlerbehaftet. Deshalb stellte die Analyse der Unsicherheiten eine wichtige Teilaufgabe des Projektes dar. Neben den Vergleichen mit Modellen auf niedrigeren Skalenebenen im Rahmen des Projektverbunds wurden, soweit möglich, in den einzelnen Arbeitsschritten zielgerichtete Evaluationen durchgeführt, z.B. durch Vergleiche mit Pegel-Messdaten. Darüber hinaus wurde eine umfangreiche Unsicherheitsanalyse des Modells WaterGAP durchgeführt. Die Ergebnisse werden im Rahmen einer Promotionsschrift veröffentlicht werden (geplant Ende 2001).

➤ **Arbeitsaufgabe 13: Gemeinsame Evaluierung der Ergebnisse des Projektverbunds im Hinblick auf die Skalenproblematik**

Diese Arbeitsaufgabe wurde im Rahmen des Projektverbundes gemeinsam mit PIK und GKSS durchgeführt. Die Ergebnisse sind im gemeinsamen Schlussbericht dargestellt.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn

➤ **Klimawandel und Klimamodellierung**

Es wird erwartet, dass sich das Klima im kommenden Jahrhundert aufgrund der Emission von Treibhausgasen ändern wird. Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) hat dazu eine Anzahl von Szenarien bezüglich möglicher Emissionsverläufe entwickelt, auf deren Basis Klimamodelle die zukünftigen Klimaverhältnisse abschätzen können (IPCC 1996, IPCC 2000). Als Klimaberechnungen standen uns zu Projektbeginn bzw. im Laufe des Projekts die Ergebnisse der beiden Globalen Zirkulationsmodelle (GCMs) ECHAM4 (MPI Hamburg; Roeckner et al. 1996) und HadCM3 (Hadley Centre, Bracknell, England; Gordon et al. 1999) für die Zeitschnitte 2021 bis 2030 sowie 2061 bis 2071 zur Verfügung.

➤ ***Wasserverfügbarkeit (Wasserdargebot und Wassernutzung) und Hydrologie***

Eine angemessene Betrachtungseinheit des Problems der Wasserverfügbarkeit und der Hydrologie in Europa sind die großen Wassereinzugsgebiete. Studien über den Einfluss des Klimawandels auf das Wasserdargebot und die Hydrologie wurden für einzelne Einzugsgebiete, bereits durchgeführt (z.B. Ott et al. 1991 (Mosel, Deutschland); Vehviläinen und Huttunen 1994 (Vuoksi, Finnland); Broadhurst und Naden 1996 (Severn, Großbritannien)). Für diese Studien wurden hydrologische Modelle des jeweiligen Einzugsgebiets entwickelt und der Einfluss des Klimawandels auf den Abfluss bestimmt. Krahe und Grabs (1996) haben ein Wasserbilanzmodell mit einer Auflösung von 0.5° für den gesamten mitteleuropäischen Raum entwickelt und es anhand der Abflussdaten des Rheins, der Weser, der Ems, der Elbe und des deutschen Teils der Donau validiert. Arnell (1998, 1999) bzw. Arnell et al. (1999) untersuchten die Auswirkung des Klimawandels auf europäische Wasserressourcen ebenfalls mithilfe rasterbasierter Modellansätze. Cohen (1995) gibt einen Überblick über Forschungsergebnisse zum Einfluss des Klimawandels auf das Wasserdargebot.

Der Überblick zeigt, dass Forschungsbedarf dahingehend bestand und besteht, den Einfluss des Klimawandels auf die Wasserressourcen nicht nur in einzelnen Einzugsgebieten Deutschlands und/oder Europas zu analysieren, sondern flächendeckend. Im Hinblick auf die Anwendbarkeit der Analyse ist es darüber hinaus nicht nur notwendig, Abflussänderungen abzuschätzen, wie dies bereits getan wurde, sondern auch die Änderungen in der Wassernutzung zu bestimmen, um auf zukünftige Probleme in der Wasserversorgung hinweisen und so die ökonomischen Folgen des Klimawandels besser bewerten zu können. Integrierte kontinentale Studien über die Auswirkungen des Klimawandels auf Hochwasserhäufigkeiten, Dürrehäufigkeiten sowie Wasserkraftpotentiale stellten und stellen dabei großteils wissenschaftliches Neuland dar.

➤ ***Modellgrundlagen WaterGAP***

Die für das Vorhaben erforderlichen Berechnungen wurden mit dem Modell WaterGAP durchgeführt, das an der GhK zur Abschätzung der Wasserknappheit unter dem Einfluss des globalen Wandels entwickelt und in anderen Projekten bereits erfolgreich angewendet wurde. Das Modell berechnet das weltweite erneuerbare Wasserdargebot sowie die weltweite Wassernutzung in einer Auflösung von 0.5° geographischer Länge mal 0.5° geographischer Breite. Dabei ist jede Berechnungszelle einem Wassereinzugsgebiet und einem Land zugeordnet, so dass Aussagen über beide Mittelungseinheiten gemacht werden können. WaterGAP ist in zwei Kern-Modelle untergliedert: in die Berechnung des Wasserdargebots (Hydrologie-Modell) und die Berechnung der Wassernutzung (Wassernutzungs-Modell).

Zu Projektbeginn bzw. im Laufe des Projekts standen als Datengrundlage für die Validierung des Modells WaterGAP Abflussdaten von weltweit 724 Pegeln (davon 126 in Europa) zur Verfügung, die vom Global Runoff Data Centre (GRDC) in Koblenz gesammelt wurden. Die Kalibrierung der Wassernutzung beruht größtenteils auf regionalspezifischen Daten von Shiklomanov (1997, 2000a, 2000b).

1.5 Verwendete Fachliteratur

Die folgende Liste stellt lediglich einen Auszug dar. Eigene Veröffentlichungen, die im Rahmen des Vorhabens erfolgten, sind in Abschnitt 2.4 aufgeführt.

- Alcamo, J., Leemans, R., Kreileman, E. (eds.) (1998): Global Change Scenarios of the 21st Century. Results of the IMAGE 2.1 Model. Pergamon.
- Alcamo, J., Döll, P., Kaspar, F. und Siebert, S. (1997): Global Change and Global Scenarios of Water Use and Availability: An Application of WaterGAP 1.0, WZ-Bericht A9701, Wissenschaftliches Zentrum für Umweltsystemforschung, Universität Gh Kassel.
- Allen, R.G., Gichuki, F.N., Rosenzweig, C. (1991): CO₂-induced climatic changes in irrigation-water requirements. *J. Water Res. Planning and Management*, 114, 157-178.
- Arnell, N. W., Grabs, W., Mimikou, M., Schumann, A., Reynard, N. S., Kaczmarek, Z., Oancea, V., Buchtele, J., Kasperek, L., Blazoka, S., Starosolszky, O., Kuzin, A. (1999): Effect of climate change on hydrological regimes and water resources in Europe. Projects EV5V-CT93-0293 and EV5V-CT94-0114. Summary Report, University of Southampton, .
- Arnell, N.W. (1999): A simple water balance model for the simulation of streamflow over a large geographic domain. *J. Hydrol.* 217, 314-335.
- Arnell, N.W. (1998): The effect of climate change on hydrological regimes in Europe: a continental perspective. *Global Environmental Change*, 9, 5-23.
- Arnell, N. W. (1995a): Socio-economic impacts of changes in water resources due to global warming. In Oliver, H.R. and S.A. Oliver: The Role of Water and the Hydrological Cycle in Global Change: Proceedings of the NATO Advanced Study Institute, Il Ciocco, Lucca, Italy, May 2 - June 6, 1994. NATO ASI Series I 31, Springer, Berlin 429-457.
- Arnell, N.W. (1995b): Grid mapping of river discharge. *J. Hydrol.* 167, 39-56.
- Arnell, N.W. (1994): Variations over time in European hydrological behaviour: a spatial perspective. In FRIEND: Flow Regimes from International Experimental and Network Data. IAHS 221: 179-184.
- Bergström, S. (1996): BALTEX -the Baltic Sea Experiment. WMO/IAHS Workshop on Continental-scale hydrological models: Charting the Future, 11-13 Nov. 1996, Wallingford, UK, Institute of Hydrology.
- Bergström, S. (1994): The HBV model. In V.P. Singh (ed): Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications: 443-476.
- Bradford, R.B. (2000): Drought events in Europe. In Vogt, J.V., Somma, F. (eds.): Drought and Drought Mitigation in Europe. Advances in Natural and Technological Hazards Research, Vol. 14, pp. 7-20. Kluwer Academic Publishers.
- Broadhurst, P., Naden, P. (1996): Development of a physically-based continental-scale hydrological model. WMO/IAHS Workshop on Continental-scale hydrological models: Charting the Future, 11-13 Nov. 1996, Wallingford, UK, Institute of Hydrology, 75.
- Bronstert, A. (1995): Statusbericht zum Rundgespräch "Hochwasser in Deutschland unter Aspekten globaler Veränderungen". PIK-Report 17. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam.
- Bundesamt für Statistik (1996): Statistical Yearbook. Metzler-Poeschel.
- Cohen, S.J. (1995): Potential changes in hydrological systems. In Oliver, H.R. and S.A. Oliver: The Role of Water and the Hydrological Cycle in Global Change: Proceedings of the NATO Advanced Study Institute, Il Ciocco, Lucca, Italy, May 2 - June 6, 1994. NATO ASI Series I 31, Springer, Berlin.
- Cosgrove, W. J., and Rjisberman, F. R. (2000): World Water Vision - Making Water Everybody's Business. Earthscan Publications Ltd., London.
- Christensen, J.H., Machenhauer, B., Jones, R.G., Schär, C., Ruti, P.M., Castro, M., Visconti, G. (1996): Validation of present-day regional climate simulations over Europe: LAM simulations with observed boundary conditions. *Clim. Dyn.*, 13, 489-506.

- Demuth, S., Stahl, K. (eds.) (2001): Assessment of the Regional Impact of Droughts in Europe. Final Report to the European Union, ENV-CT97-0553, Institute of Hydrology, University of Freiburg, Germany.
- Döll, P., Kaspar, F., Alcamo, J. (1999): Computation of global water availability and water use at the scale of large drainage basins. *Mathematische Geologie*, 4, 111-118.
- DVWK (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.) (1998): How to work out a Drought Mitigation Strategy. Guidelines for water management 309/1998. An ICID (International Commission on Irrigation and Drainage) Guide: Bonn.
- EIA (U.S. Energy Information Administration) (1998): International Energy Annual 1998, Electricity. EIA, Department of Energy. <http://www.eia.doe.gov/emeu/iea/elec.html>.
- EEA (European Environment Agency) (1999): Environment in the European Union at the turn of the century - Environmental Assessment Report No.2, European Environment Agency, Copenhagen.
- EEA (European Environment Agency) (1995): Europe's Environment: The Dobbris Assessment. Copenhagen.
- Eppel, D., H. Kapitza, M. Claussen, D. Jacob, W. Koch, L. Levkov, H.-T. Mengelkamp, N. Werrmann (1995): The non-hydrostatic mesoscale model GESIMA. Part II: Parameterizations and Applications, *Beitr. Phys. Atmos.*, 68, 1, 15-42
- ESRI (1998): ArcAtlas. http://www.esri.com/data/catalog/esri/esri_aa.html.
- ESRI (1993): Digital Chart of the World 1:1 M.
- ESRI (1992): ArcWorld 1:3 M Continental Coverage.
- FAO (1995): Digital Soil Map of the World and Derived Soil Properties, CD-ROM Version 3.5, FAO, Rome.
- Fekete, B.M., Vörösmarty, C.J., Grabs, W. (1999): Global composite runoff fields of observed river discharge and simulated water balances. Report No. 22, Global Runoff Data Centre, Koblenz, Germany.
- Gallopín, G., Rijsberman, F. (1999): Three global scenarios. Report to the World Commission on Water for the 21st Century.
- Garrido, A., Gómez-Ramos, A. (2000): Socio-economic aspects of droughts. In Vogt, J.V., Somma, F. (eds.): Drought and Drought Mitigation in Europe. *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, Vol. 14, pp. 197-207. Kluwer Academic Publishers.
- GlobalARC GIS Database (1996): by CRSSA, Rutgers University and U.S. Army CERL.
- Gordon, C., Cooper, C., Senior, C. A., Banks, H., Gregory, J. M., Johns, T. C., Mitchell, J. F. B., Wood, R. A. (2000): The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics* (16), 147-168.
- GRDC (Global Runoff Data Centre) (2000): Observed river discharges. Global Runoff Data Centre, Koblenz, Germany.
- Haberlandt, U. (1999): Klimadatensatz für die „Elbe-Ökologie“ (ELBCLI, Ver. 1, 3/99), Nutzer-Dokumentation, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
- ICOLD (International Commission on Large Dams) (1998): Word Register of Dams (CD-ROM), Paris, France.
- IPCC (2001): Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Report of Working Group II for the Third Assessment Report of the IPCC, Summary for Policymakers. <http://www.ipcc.ch/pub/wg2SPMfinal.pdf>.
- IPCC (2000): Special Report on Emissions Scenarios, Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC (1996): Climate Change 1995 - The Science of Climate Change. Cambridge University Press.
- IPCC (1992): Climate Change 1992 - The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment, Cambridge University Press, Cambridge.
- Jones, J.A.A. (1997): Global Hydrology: processes, resources and environmental management. Longman, England.
- Kennett-Smith, A., Cook, P.G., Walker, G.R. (1994): Factors affecting groundwater recharge following clearance in the south western Murray Basin. *J. Hydrol.* 154, 85-105.
- Kapitza, H. und D. Eppel (1992): The non-hydrostatic mesoscale model GESIMA. Part I: Dynamical Equations and Tests, *Beitr. Phys. Atmos.*, 65, 2, 129-146

- Kattenburg, A., Giorgi, F., Grassl, H., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Stouffer, R. J., Tokioka, T., Weaver, A. J., and Wigley, T. M. L. (1996): Climate Models - Projections of Future Climate. Climate Change 1995 - The Science of Climate Change. The Second Assessment Report of the IPCC: Contribution to Working Group I, J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenburg, and K. Maskell (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, 285-357.
- Krahe, P., Grabs, W. (1996): The development of a GIS-supported water balance model as a tool for the validation of climate models and hydrometeorological datasets. WMO/IAHS Workshop on Continental-scale hydrological models: Charting the Future, 11-13 Nov. 1996, Wallingford, UK, Institute of Hydrology, 71-72.
- Krysanova, V., Müller-Wohlfeil, D.I., Becker, A. (1996): Integrated Modelling of Hydrology and Water Quality in Mesoscale Watersheds. PIK Report No.18, July 1996, 32p.
- Kwadijk, J., van Deursen, W. (1993): Development and testing of a GIS based water balance model for the river Rhine drainage basin. In: Kwadijk, J.: The impact of climate change on the discharge of the River Rhine. Proefschrift Universiteit Utrecht.
- Legates, D.R., Willmott, C.J. (1990): Mean seasonal and spatial variability in gauge-corrected, global precipitation. Int. J. Climatology 10, 111-117.
- Machenhauer, B., Windelband, M., Botzet, M., Christensen, J.H., Jones, R., Déqué, M., Cacciamani, C., Visconti, G. (1997): Validation and intercomparison of present-day regional climate and climate change simulations over Europe. MPI report in Vorbereitung (Manuskript enthalten im Endbericht des EG-RACCS-Projekts).
- Mengelkamp H.-T., Warrach, K., Raschke, E. (1999): SEWAB – a parameterization of the surface energy and water balance for atmospheric and hydrologic models, Adv. Water Res., 23, 165-175
- Möhle, K.-A. (1988): Water use, water use development, rational use of water in public water facilities and services. Report of the German Environmental Agency UBA FB 87 052: Berlin.
- National Drought Mitigation Center (2001): A Comparison of Droughts, Floods and Hurricanes in the U.S., compiled by C. Knutson. <http://enso.unl.edu/ndmc/impacts/compare.htm>.
- New, M., Hulme, M., Jones, P.D (2000): Representing twentieth century space-time climate variability. Part II: Development of 1901-96 monthly grids of terrestrial surface climate. J. Climate 13, 2217-2238.
- Ott, M., Su, Z., Schumann, A.H., Schultz, G.A. (1991): Development of a distributed hydrological model for flood forecasting and impact assessment of land use change in the international Mosel basin. Proceedings of the International Symposium on Hydrology for the Water Management of Large River Basins, Vienna. IAHS Publication No. 201, Wallingford, Great Britain..
- Ozga-Zielinska, M., Brzenzinski, J., Feluch, W. (1994): Meso-scale hydrologic modeling for climate impact assessments: A conceptual and a regression approach. CP-94-10 IIASA, Laxenburg, Austria.
- Parry, M. (2000): Assessment of Potential Effects and Adaptations for Climate Change in Europe. Jackson Environment Institute, Norwich.
- Pfützner B., Lahmer W., Becker A. (1997): ARC/EGMO - Programmsystem zur GIS-gestützten hydrologischen Modellierung. Kurzdokumentation zur Version 2.0
- Raskin, P., Gleick, P., Kirshen, P., Pontius, G., Strzepek, K. (1997): Water Futures: Assessment of Long-Range Patterns and Problems. Stockholm Environment Institute, Box 2142, S-103 14 Stockholm, Sweden, Stockholm.
- Raskin, P. (ed.) (1997): Comprehensive assessment of the freshwater resources of the world. Stockholm Environment Institute. Box 2142. S-103 14, Stockholm, Sweden.
- Rijsberman, F. R. (2000): World Water Scenarios: Analyses. World Water Vision Unit, Paris.
- Roeckner, E., Arpe, K., Bengtsson, L., Christoph, M., Claussen, M., Dümenil, L., Esch, M., Giorgetta, M., Schlese, U., Schulzweida, U. (1996): The atmospheric general circulation model ECHAM-4: Model description and simulation of present day climate. MPI-Report No. 218, MPI für Meteorologie, Hamburg.

- Shuttleworth, W.J. (1993): Evaporation. In: Maidment, D.R (ed.): Handbook of Hydrology, pp. 4.1 - 4.53, McGrawHill, 1993.
- Shiklomanov, I. A. (2000a): Appraisal and Assessment of World Water Resources. *Water International*, 25(1), 11-32.
- Shiklomanov, I. (2000b): World water resources and water use: Present assessment and outlook for 2025 (supplemented by CD-ROM: Shiklomanov, I., World freshwater resources, available from: International Hydrological Programme, UNESCO, Paris), in Rijsberman, F.R. (ed.): *World Water Scenarios: Analysing Global Water Resources and Use*, Earthscan Publications, London.
- Shiklomanov, I. (1999): Assessment of water resources and water availability in the world. Report to the World Water Commission, October, 1999.
- Shiklomanov, I. (1997): Assessment of Water Resources and Water Availability of the World. Stockholm Environment Institute, Box 2142, S-103 14 Stockholm, Sweden, Stockholm.
- Smith, M. (1992): CROPWAT - A computer program for irrigation planning and management, FAO Irrigation and Drainage Paper, 46, Rome, Italy, 1992.
- Solley, W.B., Pierce, R.S., Perlman, H.A. (1998): Estimated use of water in the United States in 1995, USGS Circular 1200. (<http://water.usgs.gov/public/watuse/>), 1998.
- Stanners, D., Bourdeau, P. (1995): *Europe's Environment - The Dobris Assessment*. Earthscan Publications, London, 676.
- Tallaksen, L.M. (2000): Streamflow drought frequency analysis. In Vogt, J.V., Somma, F. (eds.): *Drought and Drought Mitigation in Europe. Advances in Natural and Technological Hazards Research*, Vol. 14, pp. 103-117. Kluwer Academic Publishers.
- Tate, E.L., Gustard, A. (2000): Drought definition: A hydrological perspective. In Vogt, J.V., Somma, F. (eds.): *Drought and Drought Mitigation in Europe. Advances in Natural and Technological Hazards Research*, Vol. 14, pp. 23-48. Kluwer Academic Publishers.
- UCTE (Union for the Coordination of Transmission of Electricity) (1998): *UCPTE Annuaire Statistique / Statistisches Jahrbuch / Statistical Yearbook 1998*, Luxembuorg.
- UDI (Utility Data Institute) (2000): *World Electric Power Plants Database*. Platts Energy InfoStore, <http://www.platts.com>.
- USGS (United States Geological Survey) (2000): *HYDRO1k* (available online at <http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30/hydro/>).
- van Woerden, J. W., Diederiks, J., Goldewijk, K., Klein (1995): *Data Management in Support of Integrated Environmental Assessment and Modelling at RIVM - Including the 1995 RIVM Catalogue of International Data Sets*. RIVM Report No. 402001006.
- Vehviläinen, B., Huttunen, M. (1994): Climate change and water resources in Vuoksi watershed. In Kanninen M., Heikinheimo, P. (Hrsg.): *The Finnish research programme on climate change. Second Report*. Publications of the Academy of Finland 1/94.
- Vörösmarty, C.J., Sharma, K., Fekete, B., Copeland, A.H., Holden, J., Marble, J., Lough, J.A. (1997): The storage and aging of continental runoff in large reservoir systems of the world. *Ambio*, 26: 210-219.
- Watson R.T., Zinyowera M.C., Moss R.H. (eds.) (1997): *The Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability*. IPCC Special Report, Summary for Policymakers. [http://www.ipcc.ch/pub/regional\(E\).pdf](http://www.ipcc.ch/pub/regional(E).pdf).
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen) (1997): *Welt im Wandel: Wege zu einem nachhaltigen Umgang mit Süßwasser. Jahresgutachten 1997*. Springer. Erscheint im Spätherbst.
- WCMC (World Conservation Monitoring Centre) (1999): *Wetlands Dataset*, Cambridge, UK.
- World Bank (1996): *World Development Report 1996*. Oxford University Press.
- World Resources Institute (1998): *World Resources 1998-99*, Oxford University Press, New York, USA.
- World Resources Institute (1996): *World Resources 1996-97- A Guide to the Global Environment: The Urban Environment*. Oxford University Press.

1.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des BMBF-Projektverbunds „Auswirkungen des Klimas und der Landnutzung sowie ihrer Änderungen auf die Wasserverfügbarkeit und auf Hochwasserereignisse in Europa“ fand eine intensive, interdisziplinäre und erfolgreiche Zusammenarbeit statt mit den Projektpartnern

- **Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)**,
Projekt 01 LA 9810: „Wasserverfügbarkeit und Hochwasserabfluss (Elbe- und Odergebiet) in Abhängigkeit von Klima und Landnutzung und deren Änderungen“ und
- **GKSS Forschungszentrum Geesthacht (GKSS)**,
Projekt 01 LA 9840: „Modellierung des Abflusses im Oberlauf der Oder für Extremereignisse“.

Koordiniert von Prof. Alcamo wurden in mehreren Treffen und Diskussionen die inhaltlichen und fachlichen Vorgehensweisen und Ergebnisse formuliert (vgl. gemeinsamer Zwischenbericht vom Mai 2000 und gemeinsamer Schlussbericht vom Juli 2001).

Darüber hinaus fanden informelle Treffen, Diskussionen sowie (kostenfreier) Daten- und Informationsaustausch statt, u.a. mit:

- Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) in Koblenz (Global Runoff Data Center GRDC),
- Deutscher Wetterdienst (DWD) in Offenbach (Global Precipitation Climatology Centre GPCC und Meteorological Data Centre BALTEX),
- Deutsches Klimarechenzentrum in Hamburg,
- Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET) in Kassel,
- Centre for Ecology and Hydrology (CEH) in Wallingford, England,
- sowie mit zahlreichen anderen deutschen und internationalen Organisationen, Forschungseinrichtungen und Universitäten.

2 EINGEHENDE DARSTELLUNG

2.1 Erzielte Ergebnisse

Eine detaillierte Darstellung aller erzielten Ergebnisse des Vorhabens wird in Form eines eigenen Bandes innerhalb der *Kassel World Water Series* publiziert (Zentrum für Umweltsystemforschung, Universität Kassel). Dieser Band (Lehner et al. 2001: EuroWater – Model-based assessment of European water resources and hydrology in the face of global change) ist derzeit in Arbeit, die Veröffentlichung ist für August 2001 geplant.

An dieser Stelle sollen daher lediglich in Form eines umfassenden Überblicks möglichst knapp und prägnant die wesentlichen Ergebnisse des Vorhabens vorgestellt werden, während auf detaillierte Beschreibungen von methodischen Lösungsansätzen und Modellkonzepten verzichtet wird.

2.1.1 Weiterentwicklung und Anpassung des Modells WaterGAP

WaterGAP (Döll et al. 1999, Alcamo et al. 2000a), ein globales Modell zur Berechnung von Wasserdargebot und Wassernutzung, wurde ursprünglich entwickelt, um sowohl die heutige Situation der Wasserressourcen zu bewerten, als auch die Folgen des Globalen Wandels auf das Problem der Wasserknappheit abzuschätzen. Mit einer räumlichen Auflösung von 0.5° wurde das Raster-basierte Modell speziell danach ausgerichtet, das charakteristische großskalige Verhalten des Wasserkreislaufs der Erde nachzubilden, einschließlich des anthropogenen Einflusses. WaterGAP simuliert die Auswirkungen des demographischen, sozioökonomischen und technologischen Wandels auf die Wassernutzung, ebenso wie die Auswirkungen von Klimawandel und Klimavariabilitäten auf das Wasserdargebot und den landwirtschaftlichen Bewässerungsbedarf. WaterGAP besteht aus zwei Kern-Modellen, dem Globalen Hydrologie-Modell und dem Globalen Wassernutzungs-Modell. Das Globale Wassernutzungs-Modell wiederum ist aus vier Untermodulen aufgebaut, welche die Sektoren Haushalt, Industrie, landwirtschaftliche Bewässerung und Viehbestand repräsentieren.

Im Rahmen des hier beschriebenen Vorhabens wurde das ursprüngliche WaterGAP in wesentlichen Elementen weiterentwickelt und verbessert, was schließlich zur Version 2.1 des Modells führte. Das Globale Wassernutzungs-Modell von WaterGAP 2.1 wurde vollständig überarbeitet und in großen Teilen neu konzipiert. Als zentrale Veränderung im Bewässerungs-Modell wurde eine neue, hochauflösende Bewässerungskarte für Europa entwickelt (Siebert und Döll 2001). Als bedeutendste Veränderungen im Globalen Hydrologie-Modell von WaterGAP 2.1 sind die Entwicklung einer neuen globalen Fließrichtungskarte in 0.5° -Auflösung (Döll und Lehner 2001) sowie die Entwicklung eines umfassenden globalen Datensatzes zu Feuchtgebieten, Seen und Stauseen (Lehner und Döll 2001) zu nennen. Daneben wurde das Hydrologie-Modell von WaterGAP 2.1 mithilfe der Abflussmessungen von weltweit 724 Pegelstationen (davon 126 in Europa), deren zugehörige Einzugsgebiete mehr als 50% der Landoberfläche der Erde (ohne Antarktis und Grönland) abdecken, neu kalibriert.

WaterGAP 2.1 stellt somit ein einzigartiges integriertes globales Wassermodell dar, welches sich insbesondere durch folgende Eigenschaften auszeichnet:

- Nach unserem Wissen stellt WaterGAP 2.1 das einzige globale Modell dar, welches Wasserdargebot (in Form von Oberflächenabfluss, Grundwasserneubildung und Durchfluss im Gewässer) und Wassernutzung (sektoriell unterteilt) sowohl auf Zell-, Einzugsgebiets- und Länderebene berechnen kann.
- Durch die neu entwickelte globale Fliessrichtungskarte ist es einerseits möglich, den lateralen Fluss zwischen den Zellen und entlang des Flusslaufs zu simulieren, und andererseits die Einzugsgebiete für unterschiedliche Analysen flexibel auszuwählen oder zu unterteilen.
- WaterGAP 2.1 beinhaltet ein globales hydrologisches Modell, das gegen Abflussmessungen von über 50% der globalen Landoberfläche kalibriert ist.
- WaterGAP 2.1 basiert auf den jeweils besten, teils selbstentwickelten globalen Datensätzen, die derzeit zur Verfügung stehen.
- Das Hydrologie-Modell von WaterGAP 2.1 berechnet neben dem natürlichen auch den tatsächlichen Abfluss, indem es die Verminderung des natürlichen Abflusses durch anthropogenen Wasserverbrauch berücksichtigt.
- WaterGAP 2.1 berücksichtigt den Einfluss von Klimavariabilitäten auf das Wasserdargebot und auf die Bewässerungswassernutzung.
- In WaterGAP 2.1 sind Abhängigkeiten von den wichtigsten treibenden Kräfte des Globalen Wandels integriert, wodurch es ermöglicht wird, Szenarien des Globalen Wandels zu generieren.

Hinsichtlich der Qualität der Modellergebnisse muss grundsätzlich danach unterschieden werden, ob es sich um Szenarien-Rechnungen für die Zukunft handelt, oder ob heutige bzw. historische Bedingungen nachgebildet werden. Während die Güte der Szenarien-Ergebnisse stark von der Qualität der Annahmen der treibenden Kräfte abhängt, können für die Modellierung historischer oder heutiger Situationen folgende Aussagen getroffen werden: Das Globale Hydrologie-Modell ist in der Lage, jährliche Mittelwerte des Abflusses zu berechnen, während Tageswerte nicht nachvollzogen werden können (daher sind insbesondere Hochwasserberechnungen auf statistische Ansätze beschränkt). Die Modellierung monatlicher Werte ist mit mehr Unsicherheiten behaftet als die Modellierung von Jahreswerten, liefert jedoch in den meisten Fällen dennoch zufriedenstellende Ergebnisse. Eine Validierung des Globalen Bewässerungs-Modells zeigte allgemein gute Übereinstimmungen mit unabhängigen Schätzungen des Bewässerungswasserbedarfs. Die Wassernutzungs-Module für Haushalt und Industrie konnten hingegen mangels unabhängiger Daten bislang nicht validiert werden.

Zur Abschätzung der Qualität des Globalen Hydrologie-Modells wurde der Nash-Sutcliffe Koeffizient C_{NS} bestimmt, der die Effizienz des Modells als Verhältnis der Anpassungsgüte des Modells zur Varianz der Messdaten (Jahreswerte der Abflussmessungen) angibt. Ist C_{NS}

größer als 0.5, so wird die zwischen-jährliche Variabilität des Abflusses durch das Modell gut beschrieben. Liegt C_{NS} unter 0, wurde die Variabilität nicht erfasst. Für große Teile Europas ergab sich ein C_{NS} -Wert über 0.5 (vgl. Abb. 1), auch in Gebieten, in denen die Kalibration des Modells nur mithilfe eines Korrekturfaktors möglich war. Die in Abbildung 1 untersuchten 126 Einzugsgebiete stellen gleichzeitig den Kalibrationsbereich des hydrologischen Modells in Europa dar. Für alle übrigen Gebiete wurde der Abflusskoeffizient mittels multipler Regression regionalisiert.

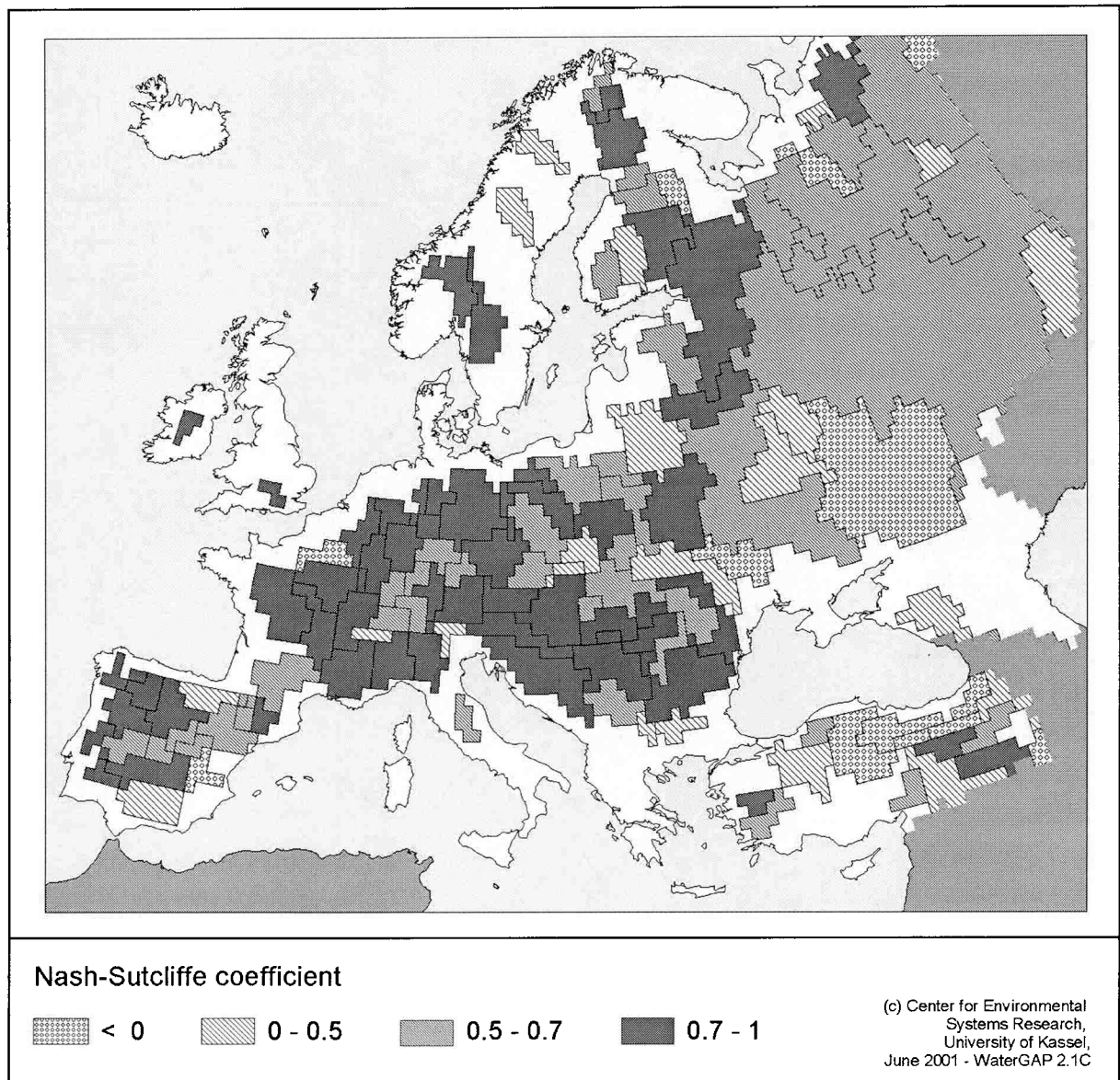


Abbildung 1. Nash-Sutcliffe Koeffizient für jährliche Abflusswerte in den 126 zur Kalibration verwendeten Einzugsgebieten Europas (für den Kalibrationszeitraum, wo möglich 1961-90).

2.1.2 Vergleich von WaterGAP mit mesoskaligen Modellen für Elbe und Oder

Im Rahmen des Projektverbunds mit den Projektpartnern Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) und GKSS Forschungszentrum Geesthacht (GKSS) wurden skalenübergreifende Vergleiche mit drei hydrologischen Modellen durchgeführt. Während

beim makroskaligen Modell WaterGAP (GhK) das Zeitintervall einen Monat beträgt, liegt den Simulationen mit den mesoskaligen Modellen ARC/EGMO (PIK) bzw. GESIMA/SEWAB (GKSS) eine zeitliche Auflösung im Tages- bis Minutenbereich zugrunde. Auf der räumlichen Skala unterscheiden sich die Modelle analog. Als Untersuchungsraum wurde für den Vergleich von WaterGAP und ARC/EGMO der deutsche Teil des Einzugsgebiets der Elbe gewählt, der Vergleich WaterGAP und GESIMA/SEWAB umfasst das gesamte Einzugsgebiet der Oder. Ein Beispiel des Modellvergleichs ist in Abbildung 2 dargestellt.

Aus den Resultaten der Modellvergleiche kann eine qualitative Güte der Niederschlags-Abfluss-Simulation mit dem makroskaligen Modell WaterGAP für unterschiedlich große Einzugsgebiete und unterschiedliche Zeiteinheiten abgeleitet werden. Für die Bewertung dieser Güte ist die Zielsetzung der makroskaligen Modellierung von entscheidender Bedeutung. Dem Anspruch, langfristige Abflusstrends, Mittelwerte und Schwankungen für großräumige Gebiete ausreichend genau abzuschätzen, wird WaterGAP gerecht. Deutlichere quantitative Abweichungen treten dagegen für einzelne Jahreswerte, Monatsmittelwerte oder kleinräumige Einheiten auf. Hierbei ist jedoch zu bedenken, dass es sich bei den zum Vergleich herangezogenen Größen aus ARC/EGMO und GESIMA/SEWAB ebenfalls um Modellergebnisse handelt, die, wenngleich höherauflösend berechnet, ihrerseits mit Unsicherheiten behaftet sind.

Im untersuchten Beispiel kann zwar eine Tendenz, jedoch kein eindeutiger Nachweis für einer Verbesserung der makroskaligen Modellierung in WaterGAP durch die Verwendung höher aufgelöster Eingangsdaten des Niederschlags abgeleitet werden. Als wichtiger Faktor muss dabei die makroskalige Prozessbehandlung der hydrologischen Abläufe gesehen werden, die auf die entsprechenden Inputs von räumlich und zeitlich gemittelten Werten abgestimmt ist. Grundsätzlich sind quantitative Unterschiede in den Eingangsdaten der verschiedenen Modelle festzustellen, die einen deutlichen Einfluss auf die weiteren Berechnungsergebnisse zeigen. So führen etwa die niedrigeren (unkorrigierten) Niederschläge im makroskaligen Modell WaterGAP zu einer konsequenten Unterschätzung der Evapotranspiration.

Als zusammenfassendes Ergebnis aus den durchgeführten Vergleichen von hydrologischen Modellen auf unterschiedlichen Skalenebenen können die Eignungsbereiche der untersuchten Modelle abgeleitet werden. Für detaillierte, zeitlich und räumlich begrenzte Einzugsgebietsstudien zeigt das makroskalige Modell WaterGAP klare Einschränkungen bezüglich der quantitativen Genauigkeit. Unabhängig von der Skalenfrage sind in Studien zu langfristigen und großräumigen Auswirkungen des Klimawandels die entscheidenden Unsicherheiten jedoch häufig bereits durch die Input-Daten vorgegeben. Die Berechnungen auf der Makroskala werden daher für viele Fragestellungen der Klimafolgenforschung als ausreichend beurteilt und haben gegenüber kleinereisalen bzw. einzugsgebietspezifischen Modellen den Vorteil, auf effiziente Weise großräumig konsistente und vergleichbare Ergebnisse zu liefern. Für weiterführende, integrierte Studien wird ein konzertiertes Anwenden verschiedenskaliger Modelle empfohlen.

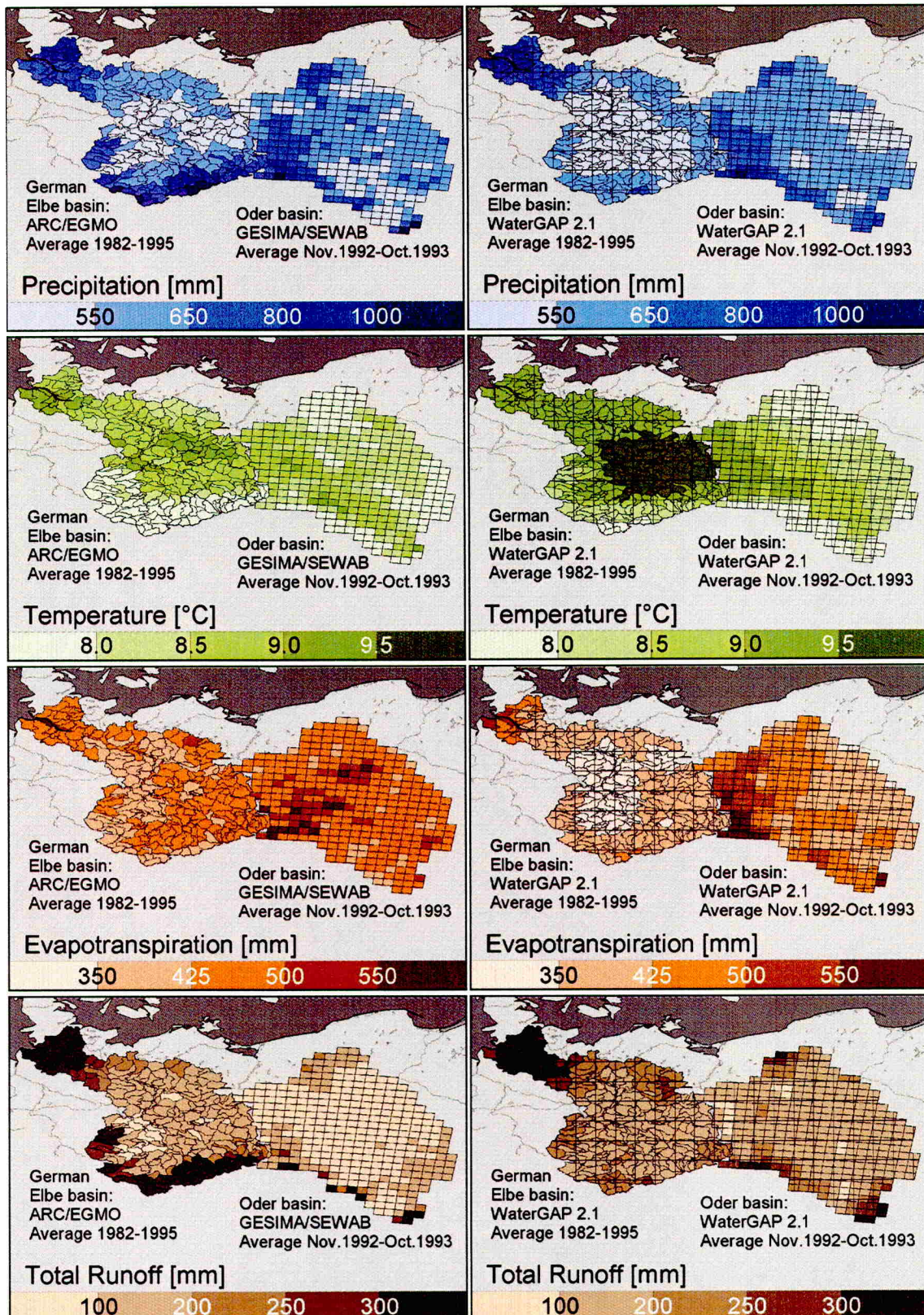


Abbildung 2. Vergleich der räumlichen Verteilungsmuster unterschiedlicher hydrologischer Größen für verschiedenskaligen Modelle und unterschiedliche Zeiträume. Linke Spalte: Modelle ARC/EGMO (deutsche Elbe) und GESIMA/SEWAB (Oder), rechte Spalte: Modell WaterGAP 2.1, disaggregiert.

2.1.3 Wasserverfügbarkeit und Wasserstress

Verschiedene aktuelle Studien haben die gegenwärtige Situation Europas in bezug auf den vorhandenen „Wasserstress“ (definiert als Verhältnis von Wasserdargebot und Wasserbedarf) untersucht. Unseres Wissens wurden jedoch im Rahmen des hier beschriebenen Vorhabens erstmalig integrierte Szenarien-Analysen durchgeführt, welche die Änderungen des Wasserdargebots (verursacht durch den Klimawandel) und die Änderungen im Wasserbedarf (verursacht durch sozio-ökonomische Faktoren) in einer konsistenten Weise verbinden. Darüber hinaus bezogen vorangegangene Studien ihre Untersuchungen in der Regel auf Länder als grundlegende Verwaltungseinheit der Wasserressourcen. In den hier vorgestellten Untersuchungen werden dagegen die Möglichkeiten des globalen Wassermodells WaterGAP genutzt, wodurch es möglich wird, die Ergebnisse auch auf der Einzugsgebietsebene auszuwerten und darzustellen, welche meist als die geeignetere Basiseinheit für Fragen des Wassermanagements angesehen wird.

Trotz der teils beträchtlichen Abweichungen innerhalb der gegebenen Klimawandel-Szenarien zweier unterschiedlicher globaler Klimamodelle (GCMs) bezüglich der berechneten zukünftigen Änderungen in den Klimavariablen (insbesondere im Niederschlag), kann übereinstimmend festgestellt werden, dass die jährlich erneuerbaren und zugänglichen Wasserressourcen in Nord- und Nord-Ost-Europa zunehmen, während sie in Süd- und Süd-Ost-Europa zurückgehen. Unter der Annahme des hier untersuchten IPCC-IS92a/Baseline-A Szenarios kann eine ähnlich klare räumliche Unterteilung bezüglich der Wassernutzung beobachtet werden, in erster Linie bedingt durch die Annahmen zu den treibenden Kräften („driving forces“): Aufgrund des ökonomischen Wachstums und den Zunahmen in der Elektrizitätsproduktion steigen die Wasserentnahmen an, wobei dieser Anstieg in Ost-Europa deutlich verstärkt auftritt. Demgegenüber führen insbesondere Einsparungen im industriellen Sektor zu einem Rückgang im Wasserbedarf insbesondere im westlichen Europa (EU). Insgesamt ergeben die Berechnungen etwa eine Verdopplung der Wasserentnahmen für ganz Europa, wobei der Großteil dieses Anstiegs in Ost-Europa zu verzeichnen ist.

Werden die Trends von Wasserdargebot und Wasserentnahmen überlagert, so ergibt sich eine starke Zunahme des Drucks auf die Ressource Wasser für große Teile Ost-Europas, primär verursacht durch den Anstieg im Wasserbedarf (vgl. Abb. 3). Auch in den mediterranen Gebieten nimmt der Wasserstress zu, hier jedoch meist verursacht durch den Rückgang im Wasserdargebot, welcher die gleichzeitige Reduzierung im Wasserbedarf übersteigt. Demgegenüber geht der Wasserstress in vielen Einzugsgebieten im Bereich West-Zentral-Europas zurück. Insgesamt ergibt sich eine Netto-Zunahme der Einzugsgebietsfläche, die von hohem Wasserstress betroffen ist, von heute einem Fünftel der Fläche Europas auf zukünftig ein Drittel im repräsentativen Jahr 2075 (mittleres Jahr für das Jahrzehnt 2071 bis 2080).

Die genannten Resultate sollten jedoch zurückhaltend bewertet werden, da es sich lediglich um die Ergebnisse eines einzigen Szenarios handelt. Die Abschätzung ist in erster Linie darauf ausgerichtet, einen Überblick über die heutige Wasserstress-Situation zu liefern und

einen generellen Eindruck zu vermitteln, in welche Richtung der Druck auf die Ressource Wasser unter sehr spezifischen Szenario-Annahmen gehen könnte. Es wäre wünschenswert, diese Szenario-Analysen mit den neueren Annahmen zum Klimawandel basierend auf dem IPCC *Special Report on Emission Scenarios* zu wiederholen, sobald Daten für die treibenden Kräfte und die zugehörigen Klimabedingungen zur Verfügung stehen. Die Entwicklungen in der Wassernutzung zeigten sich sehr sensitiv auf die treibenden Kräfte, andere Szenario-Annahmen können daher zu stark abweichenden Ergebnissen führen. Zusätzlich werden fundierte Annahmen bezüglich einer Ausdehnung der Bewässerungsflächen benötigt, da heute die landwirtschaftliche Bewässerung den Großteil der Wassernutzung in vielen Einzugsgebieten darstellt, die unter hohem Wasserstress leiden (z.B. Spanien, Türkei). Neben den Szenario-Annahmen und Eingangsdaten sind auch die Berechnungen des Modells WaterGAP grundsätzlich fehlerbehaftet, da die beitragenden Prozesse komplex und im Modell oft schwierig zu beschreiben sind.

Insgesamt bestätigt die durchgeführte Studie, dass für die Analyse der Auswirkungen des Globalen Wandels neben den klimatischen Änderungen die Bedeutung von sozio-ökonomischen Effekten nicht deutlich genug betont werden kann.

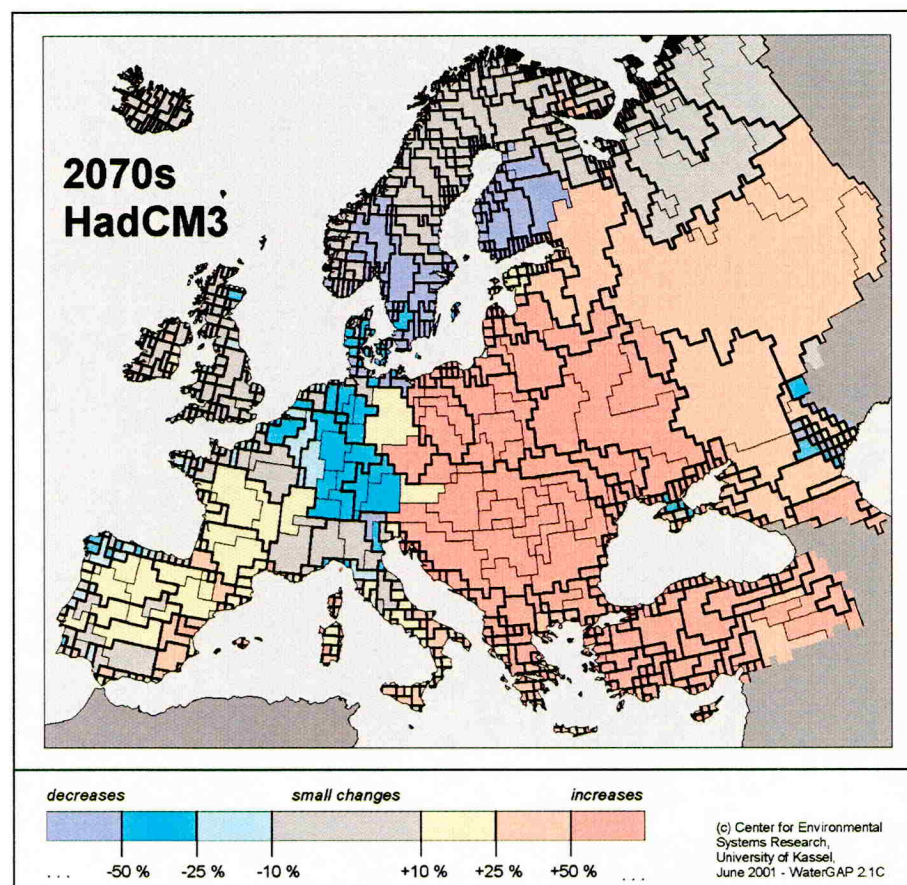


Abbildung 3. Änderung im Wasserstress für Europa (repräsentatives Jahr 2075), berechnet aus den kombinierten Änderungen von Wasserdargebot und Wasserbedarf, basierend auf den treibenden Kräften des IPCC-IS92a/Baseline-A Szenarios und den Berechnungen des Klimamodells HadCM3.

2.1.4 Hochwasser

Im Rahmen des hier beschriebenen Vorhabens wurde ein Konzept entwickelt, um die Auswirkung des Klimawandels auf zukünftige Hochwasserhäufigkeiten mittels eines konsistenten Ansatzes für ganz Europa abzuschätzen. Um die Eignung des Modells WaterGAP speziell im Hinblick auf die Simulation von Hochwasserabflüssen zu evaluieren, wurde zunächst untersucht, inwieweit die Berechnungen von WaterGAP mit den Hochwasserwahrscheinlichkeiten übereinstimmen, die von gemessenen Werten abgeleitet werden können. Dies führte im Wesentlichen zu folgenden Ergebnissen:

- Aufgrund der Verwendung von pseudo-täglichen Niederschlagsdaten (stochastisch ermittelt aus Monatswerten) ist WaterGAP nicht in der Lage, explizit einzelne Hochwasserereignisse (im zeitlichen Bereich von Stunden oder Tagen) zu berechnen.
- Bei der Simulation von statistischen Hochwasserkennwerten (z.B. 100-jährliches Hochwasser) ist die quantitative Genauigkeit von WaterGAP eingeschränkt. In einem Vergleich mit 21 ausgewählten europäischen Pegelmessstationen (Daten bereitgestellt vom GRDC) wurden die Scheitelabflüsse von Hochwasserereignissen mit Wiederkehrzeiten von 100 Jahren sowohl teils deutlich über- als auch unterschätzt. Die mittlere Abweichung aller Pegel bewegte sich dennoch in akzeptablen Bereichen.
- Durch die Anwendung der „Index-Flood“ Methode konnte für 17 der 21 Testgebiete eine akzeptable bis sehr gute Übereinstimmung der normalisierten (relativen) Hochwasser-Häufigkeitsverteilungen gezeigt werden, die aus modellierten und aus gemessenen Daten ermittelt wurden.

In anderen Worten: WaterGAP scheint in der Lage zu sein, die relative, einzugsgebietscharakteristische Verteilung von Hochwasserhäufigkeiten abzuschätzen, zeigt aber weniger Zuverlässigkeit bei der Berechnung von Absolutwerten.

Basierend auf diesen Resultaten wurden mithilfe von WaterGAP heutige und zukünftige Hochwasserhäufigkeiten für ganz Europa berechnet und die relativen Veränderungen ausgewertet. Als übereinstimmende Ergebnisse der Anwendung zweier unterschiedlicher Klimamodelle (HadCM3 und ECHAM4) sowie des IPCC-IS92a/Baseline-A Szenarios für Änderungen in der Wassernutzung können die folgenden Aussagen für ein repräsentatives Jahr 2075 zusammengefasst werden:

Die verwendeten Klimaszenarien deuten eine Veränderung der Hochwasserhäufigkeiten für nahezu das gesamte Gebiet Europas an (vgl. Abb. 4). Für Süd- und Zentral-Europa ist dabei tendenziell ein Rückgang der Hochwasserhäufigkeiten zu beobachten. Den stärksten Trend hin zu ansteigenden Hochwasserhäufigkeiten bzw. Hochwasserabflüssen zeigt Nord-Ost-Europa, insbesondere Schweden, Finnland und Russland. In diesen Regionen wird ein Anstieg der Scheitelabflüsse eines heute 100-jährlichen Hochwassers um bis zu 25% und mehr berechnet (ein heute 100-jährliches Hochwasser würde 2075 alle 10 Jahre auftreten). Auch einige kleinere Regionen, wie das Einzugsgebiet der Weichsel in Polen, Irland und Portugal zeigen deutliche Indikatoren für eine Verschärfung des Hochwasserrisikos.

Für die Bewertung der genannten Resultate muss jedoch deutlich auf die Grenzen der Modellierung von Hochwassergefahren auf der globalen Skale hingewiesen werden. Die Berechnungen sind grundsätzlich fehlerbehaftet, da die beitragenden Prozesse komplex und im Modell oft schwierig zu beschreiben sind. „In Fließgewässersystemen greifen viele komplexe Wechselwirkungen ineinander, und während Klima die treibende Kraft sein mag, gibt es auch einen beträchtlichen ‚kulturellen Einfluss‘ in europäischen oder anderen Flussgebieten ... , wodurch es schwierig sein kann, zwischen Veränderungen in den Hochwasserhäufigkeiten zu unterscheiden, die klimatisch bedingt sind, und jenen, die durch menschliche Aktivitäten verursacht werden. Häufig sind die Veränderungen eine Mischung aus beiden Effekten“ (Jones, 1997).

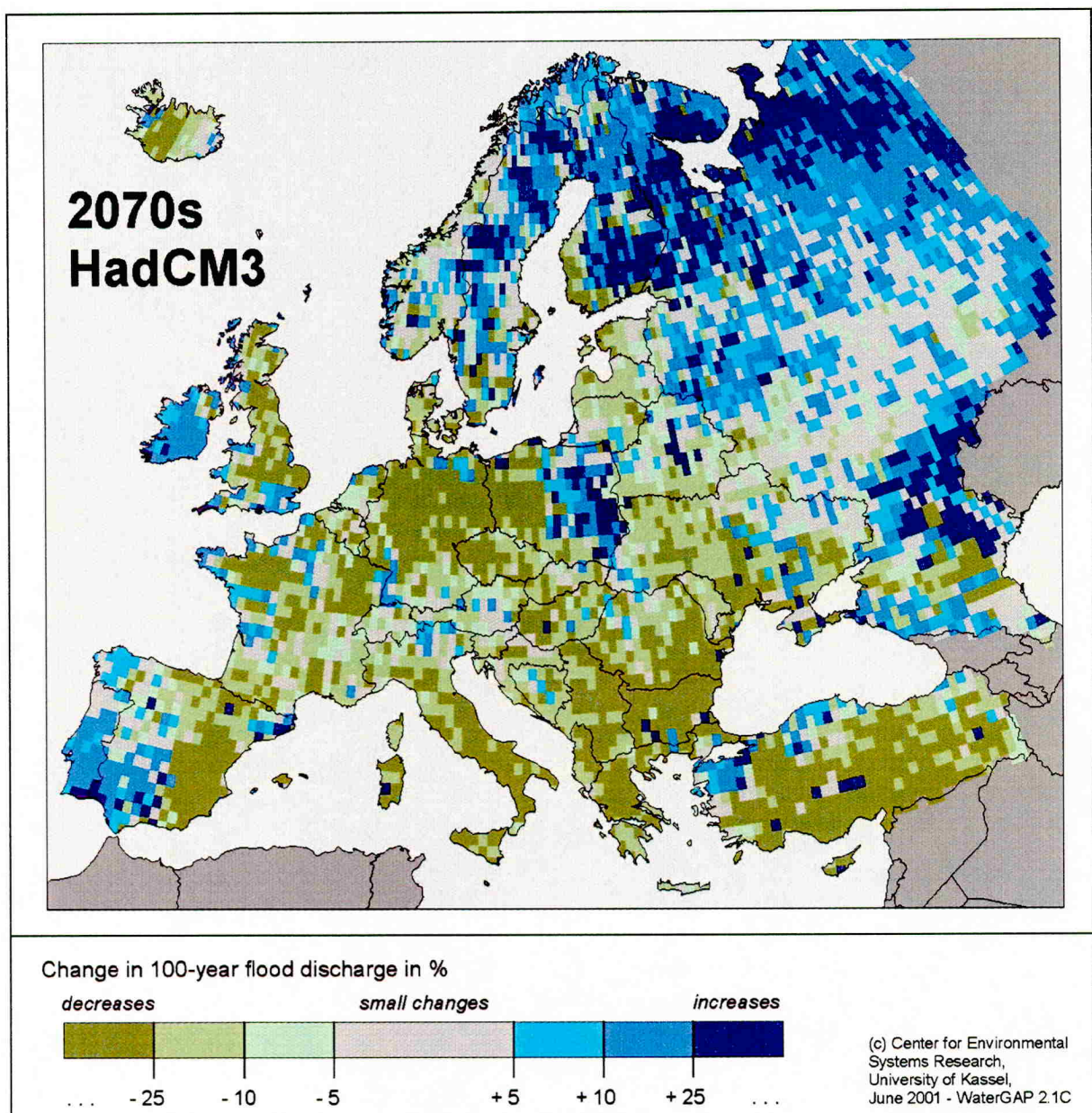


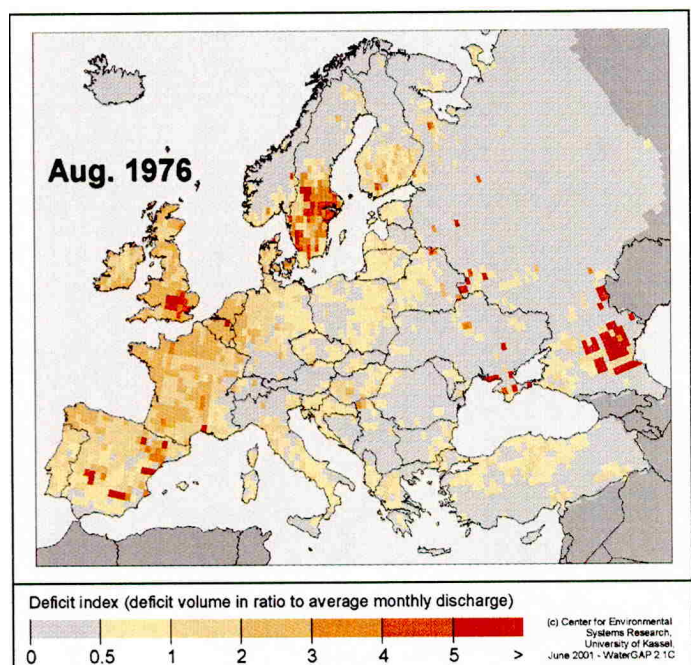
Abbildung 4. Änderung des Abflusses eines 100-jährlichen Hochwassers für Europa (repräsentatives Jahr 2075), basierend auf den treibenden Kräften des IPCC-IS92a/Baseline-A Szenarios sowie den Berechnungen des Klimamodells HadCM3.

2.1.5 Niedrigwasser und Dürren

Neben den Hochwasseranalysen wurde im Rahmen des hier beschriebenen Vorhabens auch ein analoges Konzept entwickelt, um die Auswirkung des Globalen Wandels auf zukünftige Niedrigwasser- bzw. hydrologische Dürrehäufigkeiten mittels eines konsistenten Ansatzes für ganz Europa abzuschätzen. Um die Eignung des Modells WaterGAP speziell im Hinblick auf die Simulation von Niedrigwasserabflüssen zu evaluieren, wurde zunächst untersucht, inwieweit die Berechnungen von WaterGAP mit den Dürrewahrscheinlichkeiten übereinstimmen, die von gemessenen Werten abgeleitet werden können. In einem Vergleich mit 30 ausgewählten europäischen Pegelmessstationen (Daten bereitgestellt vom GRDC) zeigte WaterGAP durchwegs gute Übereinstimmungen mit den gemessenen Daten.

Abbildung 5 zeigt beispielhaft die Dürresituation für August 1976, wie sie mit WaterGAP berechnet wurde. Dazu musste zunächst das Defizitvolumen berechnet werden, definiert als zeitlich-andauernde Unterschreitung eines Abfluss-Schwellenwertes, hier gewählt als Median aller Monatsabflüsse im Zeitraum 1961-90. Um einen normierten Defizit-Index zu erhalten, wurde das Defizitvolumen durch den langjährigen mittleren Monatsabfluss geteilt. Der Sommer 1976 wird für Europa in der Literatur als außergewöhnlich trocken beschrieben, mit schweren Dürren von Skandinavien bis Frankreich, insbesondere in Schweden, Dänemark, den Niederlanden, Nord-Frankreich, England, Schottland und Irland, später auch auf Ost-Europa übergreifend, wobei „die Auswirkungen, bis hin zu Versorgungseinschränkungen, den Süd-Osten Englands am schwersten trafen“ (Bradford, 2000). Die gute Übereinstimmung der Abbildung 5 mit der beschriebenen Situation erhöht das Vertrauen in das Modell, die gewählte Methodik und den angewandten Schwellenwert.

Abbildung 5. Dürresituation in Europa im August 1976, berechnet mit WaterGAP 2.1.



Basierend auf diesen Resultaten wurden mithilfe von WaterGAP heutige und zukünftige Dürrehäufigkeiten für ganz Europa berechnet und die relativen Veränderungen ausgewertet. Als übereinstimmende Ergebnisse der Anwendung zweier unterschiedlicher Klimamodelle (HadCM3 und ECHAM4) sowie des IPCC-IS92a/Baseline-A Szenarios für Änderungen in der Wassernutzung können die folgenden Aussagen für ein repräsentatives Jahr 2075 zusammengefasst werden:

Die Dürrehäufigkeiten reagieren sehr sensitiv sowohl auf Schwankungen im Klima als auch in der Wassernutzung. Die verwendeten Szenarien deuten dabei eine Veränderung der Dürrehäufigkeiten für nahezu das gesamte Gebiet Europas an (vgl. Abb. 6). Für Nord- und kleinere Gebiete Zentral-Europas (Deutschland, Alpengebiet) ist dabei tendenziell ein Rückgang der Hochwasserhäufigkeiten zu beobachten. Den stärksten Trend hin zu ansteigenden Dürrehäufigkeiten zeigt Süd-Europa, insbesondere Portugal, Spanien, der Westen Frankreichs und der Westen der Türkei, sowie Teile im östlichen Zentral-Europa, insbesondere die Einzugsgebiete von Oder und Weichsel in Polen. In diesen Regionen wird ein Anstieg des Defizitvolumens (Dürreintensität) einer heute 100-jährlichen Dürre von bis zu 25% und mehr berechnet (eine heute 100-jährliche Dürre würde 2075 alle 10 Jahre auftreten). Weitere Gebiete wie Großbritannien, Italien, Griechenland, die Balkan-Region und große Teile im östlichen Zentral-Europa zeigen deutliche Indikatoren für eine Verschärfung der Dürregefahr.

Wie bei den Hochwasserberechnungen, dürfen aber auch für die Bewertung der hier beschriebenen Dürregefahren die Grenzen der Modellierung auf der globalen Skale nicht vergessen werden. Insbesondere „leidet die Analyse von hydrologischen Dürren in vielen Fällen unter anthropogenen Einflüssen (Urbanisierung, Einleitungen, Wasserentnahmen), wodurch eine Berechnung des Dürreausmaßes erschwert wird“ (Tate und Gustard, 2000).

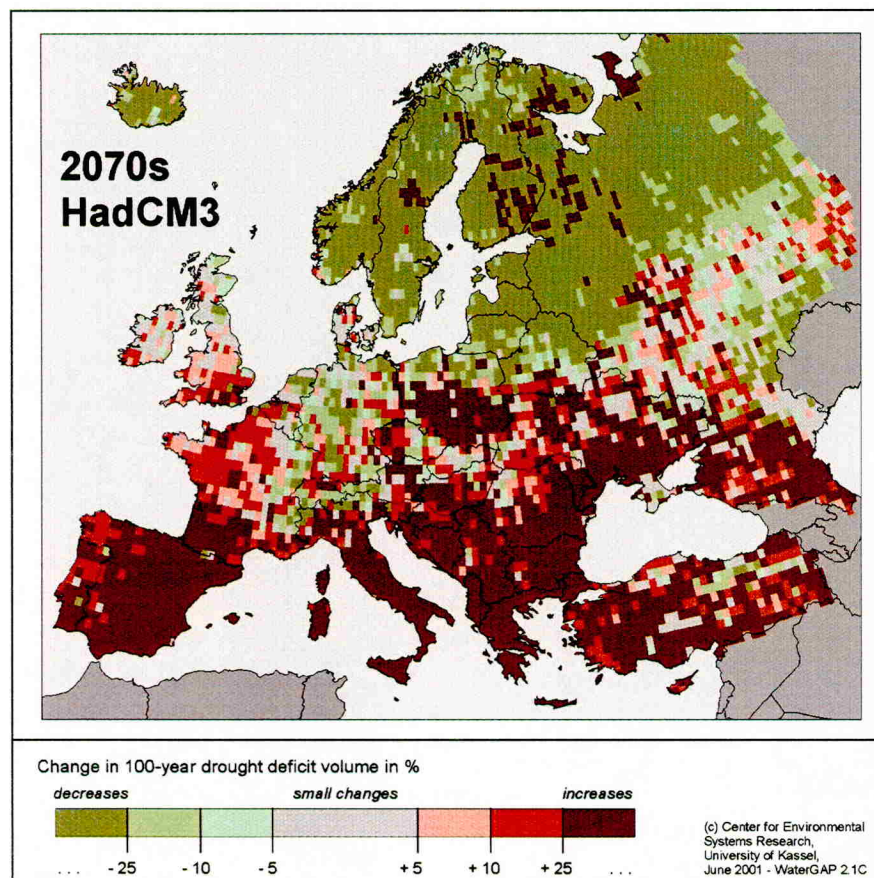


Abbildung 6. Änderung des Defizitvolumens (Dürreintensität) einer 100-jährlichen Dürre für Europa (repräsentatives Jahr 2075), basierend auf den treibenden Kräften des IPCC-IS92a/Baseline-A Szenarios sowie den Berechnungen des Klimamodells HadCM3.

2.1.6 Wasserkraftpotential

Neben den Hoch- und Niedrigwasseranalysen wurde im Rahmen des hier beschriebenen Vorhabens ein Konzept entwickelt, um die Auswirkung des Globalen Wandels auf das zukünftige Potential zur Stromerzeugung aus Wasserkraft mittels eines konsistenten Ansatzes für ganz Europa abzuschätzen. Dazu wurden zunächst verschiedene Datensätze aufbereitet und GIS-basiert verknüpft (ESRI 1998, USGS 2000, UDI 2000) um einen Datensatz aller existierenden Wasserkraftwerke Europas mit Informationen zu Lage, installierter Leistung (in MW), mittleren Höhe und mittlerer Hangneigung des Gebiets (5km x 5km), in welchem sich das Kraftwerk befindet, zu erhalten. Insgesamt wurden auf diese Weise ca. 6000 Einzelkraftwerke für Europa identifiziert, deren gesamte Maximalleistung die von unterschiedlichen Betreiberorganisationen genannten Länderwerte sehr gut wiedergeben.

Um aus dem zukünftig veränderten Abfluss, der mithilfe von WaterGAP auf Monatsbasis berechnet werden kann, mögliche Veränderungen der Wasserkraftpotentiale abzuleiten, wurden zwei Typen von Wasserkraftwerken unterschieden:

- **Speicherkraftwerke** (einschließlich Pumpspeicherkraftwerken), die als großvolumige Stauanlagen den Abfluss langfristig aufnehmen und geregelt zur Stromerzeugung nutzen können, und
- **Laufwasserkraftwerke**, welche nur ein minimales Stauvolumen aufweisen und in der Regel aus Gründen der Wirtschaftlichkeit in ihrer Grundlast danach bemessen sind, den Abfluss von Hochwasserperioden ungenutzt überströmen zu lassen.

Während angenommen wurde, dass europäische Speicherkraftwerke tendenziell in der Lage sind, auch erhöhte Abflussmengen z.B. durch optimierte Speicherbewirtschaftung zurückhalten und nutzen zu können (pers. Kommunikation mit Institut für Solare Energieversorgungstechnik, ISET, Kassel), sind Laufkraftwerke durch ihren oberen Abflussschwellenwert begrenzt. Dieser wurde im Rahmen dieser Studie festgelegt als der zweithöchste mittlere Monatabfluss des langjährigen Jahresregimes. Zur Unterteilung aller Wasserkraftwerke in Lauf- und Speicherkraftwerke wurde zunächst 348 Kraftwerken im UCTE-Gebiet (v.a. Süd-West-Europa) unter Zuhilfenahme unterschiedlicher Datenquellen (UCTE 1998, EIA 1998) ein „wahrscheinlichster“ Typ zugewiesen. Diese Klassifikation wurde dann mittels Diskriminanzanalyse für alle übrigen Kraftwerke regionalisiert. Das statistische Modell konnte basierend auf den Variablen Leistung, Höhe und Neigung (je höher und/oder steiler ein Gebiet desto besser wird die Eignung für Speicherkraftwerke eingeschätzt) 81% der ursprünglich gruppierten Fälle korrekt klassifizieren. Aus der Typisierung, den angelegten Kriterien (obere Begrenzung der Laufkraftwerke) und den Abflussberechnungen von WaterGAP für den jeweiligen Standort der Anlage (vgl. Abb. 7) konnte schließlich für unterschiedliche Szenarien (Klima- und Wassernutzungsänderungen) eine relative Änderung der installierten Leistung und damit des Wasserkraftpotentials der vorhandenen Kraftwerke abgeschätzt und für einzelne Länder zusammengefasst werden.

Für das ausgewählte Klimamodell HadCM3 sowie das IPCC-IS92a/Baseline-A Szenario der Wassernutzung ist für ein repräsentatives Jahr 2075 generell eine Abnahme des gegebenen Wasserkraftpotentials für Süd-Europa und eine Zunahme für Nord-Europa um jeweils bis zu mehr als 25% zu beobachten (vgl. Tab. 2). Diese Ergebnisse sind jedoch, wie bereits bei Wasserstress-, Hoch- und Niedrigwasseranalysen zuvor, unter Berücksichtigung der Unsicherheiten im Modell und in den Annahmen der Szenarien zu bewerten. Darüber hinaus sei betont, dass es sich bei den durchgeführten Studien um Änderungen im Wasserkraftpotential *bestehender* Anlagen handelt. Der Neubau von Wasserkraftwerken konnte aufgrund fehlender Daten nicht berücksichtigt werden.

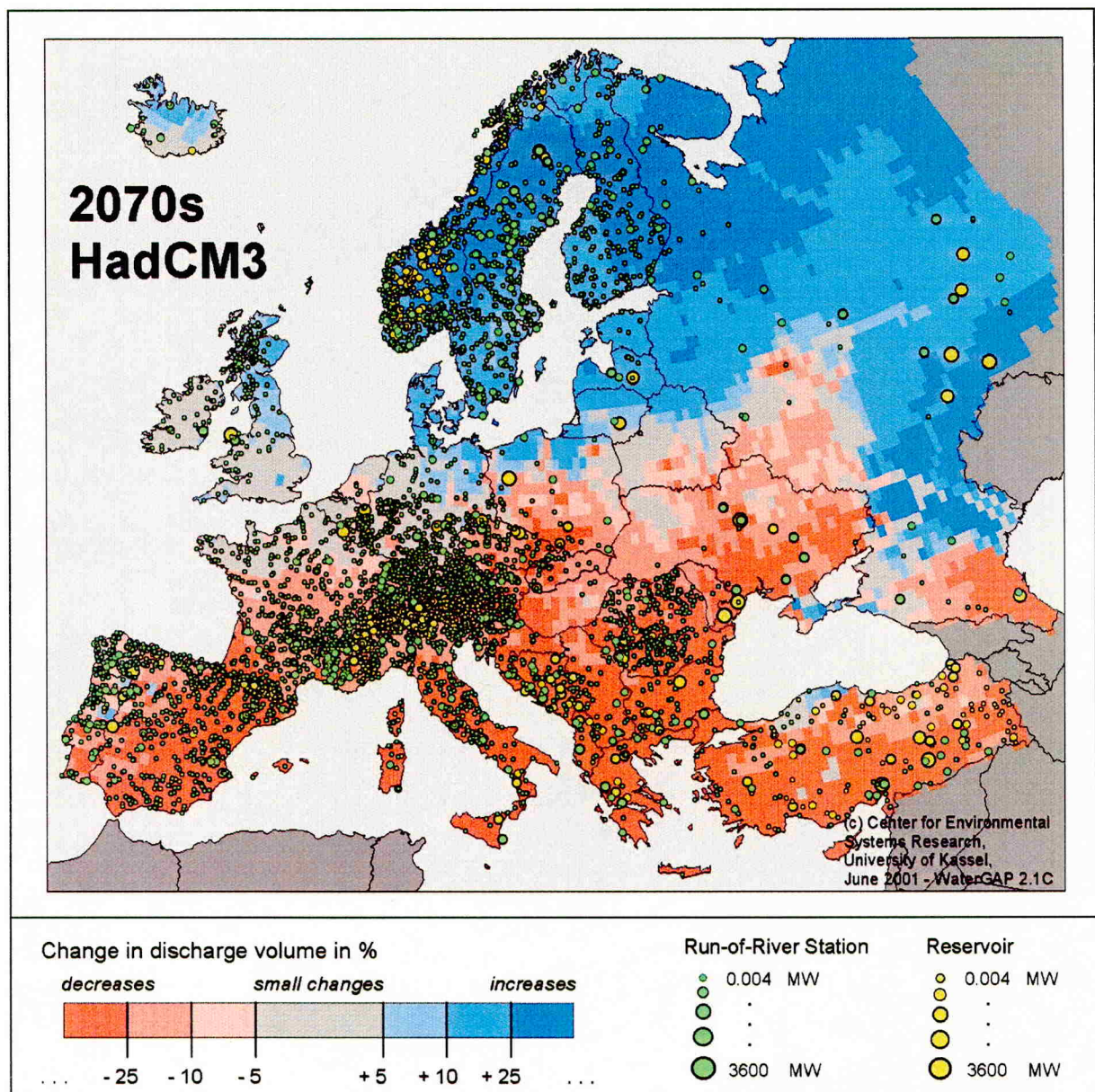


Abbildung 7. Berechnung der Änderung des Wasserkraftpotentials für Europa: Für das repräsentative Jahr 2075 werden, basierend auf den treibenden Kräften des IPCC-IS92a/Baseline-A Szenarios sowie den Berechnungen des Klimamodells HadCM3, mithilfe von WaterGAP Änderungen im Abfluss bestimmt, welche sich auf die Energiegewinnung der Wasserkraftwerke auswirken.

2.1.7 Zusammenfassung

Im durchgeführten Vorhaben wurde, auf bestehenden Grundlagen aufbauend, eine Verbesserung, Weiterentwicklung und Validierung des integrierten globalen Wassermodells WaterGAP erreicht. WaterGAP 2 stellt ein einzigartiges Modell zur Berechnung des Wasserdargebots und der Wassernutzung sowohl auf Zell-, Einzugsgebiets- und Länderebene dar, das es erlaubt, die Folgen des Globalen Wandels auf die Ressource Wasser auf kontinentalem und globalem Maßstab abzuschätzen.

Durch skalenübergreifende Vergleiche mit den räumlich und zeitlich höher auflösenden Modellen der Projektpartner im zugehörigen BMBF-Projektverbund, in welchen das Vorhaben eingebunden war, konnte für die Testgebiete der Elbe und Oder gezeigt werden, dass WaterGAP dem Anspruch, langfristige Abflusstrends, Mittelwerte und Schwankungen für großräumige Gebiete ausreichend genau abzuschätzen, gerecht wird. Für detaillierte Einzugsgebietsstudien sind dagegen klare Einschränkungen festzustellen. Unabhängig von der Skalenfrage sind in Studien zu langfristigen und großräumigen Auswirkungen des Klimawandels die entscheidenden Unsicherheiten jedoch häufig bereits durch die Input-Daten vorgegeben. Die Berechnungen auf der Makroskala werden daher für viele Fragestellungen der Klimafolgenforschung als ausreichend beurteilt und haben gegenüber kleinskaligen bzw. einzugsgebietsspezifischen Modellen den Vorteil, auf effiziente Weise großräumig konsistente und vergleichbare Ergebnisse zu liefern. Für weiterführende, integrierte Studien wird ein konzertiertes Anwenden verschiedenskaliger Modelle empfohlen.

Im Vorhaben wurden zunächst bestehende Anwendungskonzepte von WaterGAP modifiziert und verfeinert, insbesondere die Berechnung der Wasserkritikalität (Wasserstress) und ihrer Änderung für Europa, berechnet aus dem Verhältnis von Wasserdargebot und Wasserbedarf. Darüber hinaus wurden erstmalig neue Konzepte entwickelt, um die Auswirkungen des Globalen Wandels auf zukünftige Hochwasser- und Dürrehäufigkeiten sowie auf das Wasserkraftpotential mittels eines konsistenten Ansatzes für ganz Europa abzuschätzen. Diese makroskaligen Entwicklungen und Analysen stellten weitgehend wissenschaftliches Neuland dar. Die Ergebnisse sind insbesondere für behördliche und politische Entscheidungsträger von großer Bedeutung, da dadurch eine Einschätzung künftiger Konflikt- und Risikosituationen auf nationaler und internationaler Ebene unterstützt wird.

Basierend auf dem IPCC-IS92a/Baseline-A Szenario für Änderungen in der Wassernutzung sowie auf den Berechnungen zweier unterschiedlicher Klimamodelle (HadCM3 und ECHAM4) wurden Berechnungen für zwei Zeitschnitte (2020er und 2070er Jahre) durchgeführt und ausgewertet. Tabelle 2 zeigt für ausgewählte Länder die Resultate der Studien zu Wasserstress, Wasserkraftpotential, Hochwasser- und Dürrierisiko für ein Klimaszenario (HadCM3) und einen Zeitschnitt (2070er). Als übereinstimmende Ergebnisse der Anwendung beider Klimamodelle können die folgenden Aussagen zusammengefasst werden, die sich für ein repräsentatives Jahr 2075 entsprechend den getroffenen Szenario-Annahmen und Voraussetzungen ergeben würden:

- Als Reaktion auf die veränderten Niederschlagsmengen nimmt generell die Wasserverfügbarkeit in Nord-Europa zu und geht in Süd-Europa zurück.
- Die Kritikalität der Wasserversorgungssituation verschärft sich im Osten Europas, in erster Linie bedingt durch den für dort simulierten starken Anstieg in der Wassernutzung.
- Aufgrund höherer Niederschläge und veränderter Schneeschmelzen nimmt das Hochwasserrisiko in Nord-Europa zu. Auch einzelne Flussläufe wie die Weichsel in Polen und der mittlere Rhein reagieren sensitiv.
- Niedrigwassersituationen bzw. hydrologische Dürren treten vermehrt im Süden und Osten Europas auf, wobei neben den verminderten Niederschlägen auch die erhöhte Wassernutzung im Osten Europas einen starken Einflussfaktor darstellt.
- Das Potential der bestehenden Wasserkraftanlagen zur Stromerzeugung nimmt, in starker Korrelation zur Wasserverfügbarkeit, in Nord-Europa zu und geht im Süden zurück.
- Die Situation der Wasserressourcen und der Hydrologie Deutschlands erweist sich im Vergleich zu anderen europäischen Ländern als relativ stabil.

Tabelle 2. Änderungen im Wasserstress, Wasserkraftpotential, Hochwasser- und Dürrierisiko für ausgewählte Länder Europas, basierend auf den treibenden Kräften des IPCC-IS92a/Baseline-A Szenarios sowie den Berechnungen des Klimamodells HadCM3 für ein repräsentatives Jahr 2075.

LAND	Wasserstress		Wasserkraft- potential	Hochwasserrisiko	Dürrierisiko
	Anteil der Landesfläche unter hohem Wasserstress 1995	2075	Zu- / Abnahme der bestehenden Maximalleistung	Anteil der Landesfläche mit Zunahme des 100-jährlichen Hochwasserabflusses um mehr als 10%	Anteil der Landesfläche mit Zunahme der 100-jährlichen Dürreintensität um mehr als 10%
DEUTSCHLAND	9 %	24 %	-3 %	5 %	20 %
FINNLAND	2 %	0 %	+19 %	58 %	0 %
FRANKREICH	18 %	16 %	-19 %	7 %	62 %
GROSSBRITANNIEN	21 %	19 %	+5 %	18 %	27 %
NORWEGEN	0 %	0 %	+25 %	22 %	0 %
POLEN	0 %	84 %	-15 %	34 %	56 %
PORTUGAL	44 %	50 %	-22 %	65 %	92 %
RUMÄNIEN	2 %	100 %	-30 %	1 %	82 %
RUSSLAND	15 %	19 %	+16 %	48 %	16 %
SPANIEN	75 %	78 %	-35 %	19 %	99 %
TÜRKEI	49 %	86 %	-38 %	8 %	82 %
UNGARN	0 %	52 %	-1 %	5 %	80 %

Allen durchgeführten Untersuchungen des Vorhabens ist dabei zu eigen, dass die Resultate äußerst zurückhaltend bewertet werden sollten. Zum einen sind die Berechnungen grundsätzlich fehlerbehaftet, da die beitragenden Prozesse komplex und im Modell oft schwierig zu beschreiben sind. Zum anderen handelt sich um Ergebnisse, die lediglich für die vorausgesetzten Szenario-Annahmen gelten. Die Abschätzungen sind in erster Linie darauf ausgerichtet, einen Überblick über die heutige Situation der Wasserressourcen und der Hydrologie in Europa zu liefern und einen generellen Eindruck zu vermitteln, in welche Richtung der Druck auf die Ressource Wasser unter den getroffenen spezifischen Annahmen gehen könnte. Es wäre wünschenswert, diese Analysen mithilfe aktualisierter und erweiterter Datengrundlagen bzw. speziell mit den neueren Annahmen zum Klimawandel basierend auf dem IPCC *Special Report on Emission Scenarios* (IPCC 2000) zu wiederholen, sobald Daten für die treibenden Kräfte und die zugehörigen Klimabedingungen zur Verfügung stehen.

2.2 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Das Vorhaben lieferte politikrelevante Ergebnisse über die möglichen Auswirkungen des Klimawandels bzw. des Globalen Wandels auf die Wasserverfügbarkeit (Wasserkritikalität), das Wasserkraftpotential und die Hoch- und Niedrigwasserhäufigkeiten in Deutschland und Europa. Dies beinhaltet Informationen für folgende Nutzergruppen:

- Für Wasserressourcenplaner lieferte das Vorhaben Informationen über das Auftreten von Wasserknappheit bzw. Wasserversorgungsengpässen.
- Für Regionalplaner wurden Aussagen über veränderte Hochwasser- und Dürrehäufigkeiten gemacht.
- Für Energieplaner wurden Informationen über zukünftige Änderungen im Wasserkraftpotential erarbeitet.
- Für die Mitarbeiter der europäischen Umweltbehörden wurden die Auswirkungen eines Klimawandels auf die kontinentalen Wasserressourcen aufgezeigt. Diese Informationen können in Berichten über den zukünftigen Zustand der europäischen Umwelt verwendet werden.

Potentielle Nutzer der Projektergebnisse sind

in Deutschland

- Umweltbehörden und andere Behörden der Länder, die sich mit der Wasserversorgung und der Wasserverfügbarkeit befassen,
- Energieversorgungsunternehmen, Ministerien der Länder und des Bundes, die mit Energiegewinnung aus Wasserkraft befasst sind,
- Innenministerien der Länder und des Bundes, die mit Hoch- und Niedrigwasserfragen befasst sind,

bzw. in Europa und international

- die European Environment Agency in Kopenhagen, die Daten über die europäische Umwelt sammelt und Berichte zur Zukunft der europäischen Umwelt verfasst,
- das United Nations Environment Programme mit seinem Büro in Genf, das sich mit den europäischen Aspekten des *Global Environmental Outlook* befasst,
- IPCC und IGBP, an welche die Projektergebnisse durch Prof. Alcamo übermittelt werden, da er ein Hauptautor beim IPCC und Teilnehmer an einem Kernprojekt des IGBP ist.

Als zentrale Produkte des Vorhabens sind Berichte, Präsentationen und Veröffentlichungen auf nationaler und internationaler Ebene bereits erfolgt oder noch geplant (vgl. Literatur- und Vortragsliste in Abschnitt 2.4). Insbesondere die umfassende Darstellung aller erzielten Ergebnisse in Form eines eigenen Bandes innerhalb der *Kassel World Water Series* (Lehner et al. 2001) wird weit gestreut. Damit ist sichergestellt, dass die Informationen die entsprechenden Entscheidungsträger wie Politiker, Behörden oder Regionalplaner erreichen.

Inhaltlich lieferte das Vorhaben zahlreiche wissenschaftlich verwertbare Ergebnisse. Dabei sind folgende Aspekte besonderes hervorzuheben:

- Das Vorhaben stellt unseres Wissens die erste Analyse des Einflusses des Klimawandels auf die Wasserressourcen in Europa dar, die nicht nur Abflussänderungen berücksichtigt, sondern auch explizit Änderungen in der Wassernutzung. Dies erlaubt ein realistischeres Bild der Auswirkungen auf die Wasserversorgung und auf das Wasserkraftpotential.
- Es handelt sich um das erste Vorhaben, das auf europäischem Maßstab Modelle des Klimas und des Wassers miteinander verknüpft, die dem aktuellsten Stand der Wissenschaft entsprechen. Die erzielten Ergebnisse sind wissenschaftlich von großer Bedeutung, da einheitliche Vergleiche auf Länder- oder Einzugsgebietsebene ermöglicht werden.
- Es handelt sich um das erste Vorhaben, das mit der gleichen Methodik sowohl alle europäischen Wassereinzugsgebiete berücksichtigt als auch detailliertere Analysen großer europäischer Einzugsgebiete ermöglicht. Insbesondere können die Ergebnisse der Studie eine Grundlage für weitere gezielte Analysen kritischer Einzugsgebiete bilden.
- Es handelt sich um die erste deutsche und europäische Studie, die einen Überblick über die Konsequenzen des Klimawandels für drei wichtige wasserbezogene Problemkreise gibt: Wasserverfügbarkeit (Wasserversorgung), Energiegewinnung aus Wasserkraft und Gefahrenrisiko durch Hochwasser und Dürren.
- Es handelt sich um die erste Studie auf europäischem Maßstab, welche die kombinierte Wirkung von langfristigen Klimaänderungen und von zwischen-jährlichen Klimavariabilitäten auf die Quantität der erneuerbaren Süßwasser-Ressourcen analysiert.
- Das Vorhaben umfasst auch Unsicherheitsanalysen, insbesondere eine Analyse zur Auswirkung der Unsicherheiten des von Klimamodellen berechneten Niederschlags.
- Im Rahmen des Projektverbunds beleuchtete das Vorhaben Aspekte der Skalenfrage in der Hydrologie für die mesoskalige bis makroskalige Modellierung.
- Um die genannten Resultate zu erreichen wurden wesentlichen Elemente der Modellierung innerhalb von WaterGAP verbessert, unterstützt durch die Vergleiche mit den Modellen auf kleineren Skalen. Die Qualität zukünftiger Modellierungen mit WaterGAP auf deutscher, europäischer bzw. globaler Ebene wird dadurch deutlich erhöht und die Abfluss-Simulationen werden zuverlässiger.

Die genannten Punkte skizzieren gleichzeitig das Potential für mögliche wissenschaftliche Anschlussarbeiten. Zu den eigenen Planungen hinsichtlich weiterer Forschungsphasen siehe Abschnitte 2.3 und 3.4.

Für alle wissenschaftlichen Neuentwicklungen, die innerhalb des Vorhabens entstanden, wurden keine Schutzrechtsanmeldungen vorgenommen oder spezielle Schutzrechte erteilt. Dies ist über den üblichen Rahmen von wissenschaftlichen Veröffentlichungen hinaus auch nicht angestrebt.

Folgende Datensätze, deren Entwicklung (zumindest für den europäischen Teil) im Zusammenhang mit dem Vorhaben steht, werden kostenfrei an interessierte wissenschaftliche Stellen verbreitet, wobei die inhaltlichen Rechte bei den Autoren verbleiben (vgl. unsere Homepage unter <http://www.usf.uni-kassel.de>, darüber hinaus sind Links auf entsprechenden, zentralen Internetseiten geplant, z.B. IGBP-DIS Projekt am PIK):

- Eine globale Fließrichtungskarte, DDM30, Auflösung 0.5° (Döll und Lehner 2001).
- Eine globale Karte der Feuchtgebiete, Seen und Stauseen der Erde, WELAREM1, Auflösung 1° (Lehner und Döll 2001).
- Eine globale Karte der Bewässerungsflächen, Auflösung 0.5° (Siebert und Döll 2001, Döll und Siebert 2000).

2.3 Fortschritte bei anderen Stellen

Begleitend zur Durchführung der einzelnen Arbeitsaufgaben wurden stets aktuelle Literaturrecherchen durchgeführt. Gerade die interdisziplinäre Ausrichtung am Wissenschaftlichen Zentrum für Umweltsystemforschung förderte dabei die Möglichkeiten, neue Erkenntnisse von anderen Stellen stets kurzfristig zu recherchieren, aufzuarbeiten und zu berücksichtigen. Es sind uns jedoch im Laufe des Vorhabens keine Ergebnisse von dritter Seite bekannt geworden, welche die geplante Durchführung des Vorhabens sowie die genannten Zielsetzungen entscheidend verändert hätten.

Die im Rahmen des Vorhabens zugrundgelegten Annahmen zu Klima- und Wassernutzungsänderungen beruhen durchwegs auf dem IPCC-IS92a Szenario. Inzwischen wurde vom IPCC (2000) ein *Special Report on Emission Scenarios* (SRES) veröffentlicht mit neuen („updated“) Referenz-Emissionsszenarien. Die Ergebnisse von WaterGAP sollten daher, sobald möglich, auf diese neuen IPCC-Szenarien und damit auf den neuesten Stand der Wissenschaft aktualisiert werden. Innerhalb des Bewilligungszeitraums waren die dazu notwendigen Daten jedoch nicht erhältlich und die erforderlichen Arbeiten nicht erfüllbar bzw. nicht vorgesehen. Für die Aktualisierung, die im Rahmen eines neuen Vorhabens durchgeführt werden könnte, wurde bereits im Februar 2001 eine Projektskizze beim BMBF eingereicht, über die jedoch nicht positiv entschieden wurde.

2.4 Eigene Veröffentlichungen und Vorträge

Über den Zwischenbericht (Mai 2000) und den hier vorliegenden Schlussbericht hinaus wurden die Ergebnisse des Vorhabens im Rahmen zahlreicher Veröffentlichungen sowie Vorträge auf nationaler und internationaler Ebene einem breiten Publikum zugänglich gemacht. Die folgende Zusammenstellung ist dabei nicht als abgeschlossen zu betrachten, weitere Veröffentlichungen und Vorträge sind geplant. (Verwendete Fachliteratur anderer Autoren ist in Abschnitt 1.5 aufgeführt.)

➤ *Umfassende Publikation der Ergebnisse des Vorhabens:*

Lehner, B., Henrichs, T., Döll, P., Alcamo, J. (2001): EuroWater – Model-based assessment of European water resources and hydrology in the face of global change. Kassel World Water Series, Report No 5. Center for Environmental Systems Research, University of Kassel, Germany (forthcoming).

➤ *Veröffentlichungen und Vorträge 2001:*

Alcamo, J. (2001): Scenarios as Tools for International Environmental Assessments - An overview prepared for the European Environmental Agency. Center for Environmental Sciences, University of Kassel, Kurt-Wolters-Strasse 3, 34109 Kassel, Germany, Kassel.

Alcamo, J., Döll, P., Henrichs, T., Kaspar, F., Lehner, B., Rösch, T., Siebert, S. (2001a): WaterGAP 2: A model for global assessment of freshwater resources. Water Resources Research (submitted September 2000).

Alcamo, J., Henrichs, T. (2001): Critical regions: Preliminary estimates of water resources sensitive to global changes. Keynote speech at the session: „Vulnerability of water resources to environmental change“ at the conference „Challenges of a changing earth“, Amsterdam, July, 2001.

Alcamo, J., Henrichs, T., Lehner, B. (2001b): An Integrated Approach to Modeling the Impacts of Climate Change on Water Resources in Europe. Abstract of invited paper for the Symposium on “Climate change and variability in Northern Europe”. Turku, 6-8 June, 2001.

Beckmann, T., Lehner, B., Becker, A., Doell, P. (2001): Impacts of climate and land-use and their changes on water availability and flood events (Elbe-Odra basin). Geophysical Research Abstracts, Vol. 3, 2001. Abstracts of the contributions of the 26th General Assembly of the European Geophysical Society, 25-30 March 2001, Nice, France.

Döll, P., Kaspar, F., Lehner, B. (2001): Calibration of a global hydrological model against measured discharge. In: Dolman, H., Pomeroy, J., Oki, T., Hall, A. (eds.): Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer Schemes and Large-Scale Hydrological Models, IAHS Publication 270 (accepted).

Döll, P., Lehner, B. (2001): Validation of a new global 30-minute drainage direction map. Journal of Hydrology (submitted March 2001).

Henrichs, T., Lehner, B., Alcamo, J. (2001a): Water Stress in Europe: Analysis of an Integrated Scenario. Forthcoming

Henrichs, T., Lehner, B., Alcamo, J. (2001b): Water Stress in Europe : An analysis on an integrated scenario. Integrated Assessment (to be submitted).

Kaspar, F., Döll, P., Lehner, B. (2001): Globale Modellierung der Durchflußverminderung durch konsumptive Wassernutzung. In: Suttmöller, J., Raschke, E. (eds.): Modellierung in meso- bis makroskaligen Flusseinzugsgebieten – Tagungsband zum gleichnamigen Workshop am 16./17. November 2000 in Lauenburg, GKSS 2001/15, pp.160-171, GKSS Research Center, Geesthacht.

Lehner, B., Döll, P. (2001): A global wetlands, lakes and reservoirs data set. Unpublished manuscript.

Lehner, B., Döll, P., Kaspar, F. (2001b): Vergleich von hydrologischen Modellen auf unterschiedlichen Skalenebenen am Beispiel Elbe und Oder. In: Suttmöller, J., Raschke, E. (eds.): Modellierung in meso-

bis makroskaligen Flußeinzugsgebieten – Tagungsband zum gleichnamigen Workshop am 16./17. November 2000 in Lauenburg, GKSS 2001/15, pp.160-171, GKSS Research Center, Geesthacht.

Lehner, B., Doell, P., Kaspar, F. (2001c): Assessment of climate and human impacts on droughts – applying the integrated macroscale model WaterGAP. Geophysical Research Abstracts, Vol. 3, 2001. Abstracts of the contributions of the 26th General Assembly of the European Geophysical Society, 25-30 March 2001, Nice, France.

Lehner, B., Doell, P., Kaspar, F. (2001d): A large scale analysis on the impact of climate change on regional flood frequencies in Europe – first results. Geophysical Research Abstracts, Vol. 3, 2001. Abstracts of the contributions of the 26th General Assembly of the European Geophysical Society, 25-30 March 2001, Nice, France.

Siebert, S., Döll, P. (2001): A digital global map of irrigated areas – An update for Latin America and Europe. World Water Series 4, Center for Environmental Systems Research, University of Kassel, Germany, 14 pp + Appendix.

➤ **Veröffentlichungen und Vorträge 2000:**

Alcamo J., Henrichs T., Rösch, T. (2000a): World Water in 2025 - Global modeling and scenario analysis. In: Rijsberman F (ed) World Water Scenarios – Analyses. Earthscan Publications, London.

Alcamo, J., Henrichs, T., Rösch, T. (2000b): World Water in 2025 – Global modeling and scenario analysis for the World Commission on Water for the 21st Century. Report A0002, Center for Environmental Systems Research, University of Kassel, Germany.

Döll, P., Siebert, S. (2000a): Global modeling of irrigation water requirements. (submitted to Water Resources Research).

Döll, P., Siebert, S. (2000b): A digital global map of irrigated areas. ICID Journal, 49(2), 55-66.

Henrichs, T. (2000a): Water Stress in Europe - An assessment based on the WaterGAP model. EFIEA Policy Workshop on Integrated Management of Water Resources, European Forum on Integrated Environmental Assessment. Paris, Frankreich, 25-27 October 2000.

Henrichs, T. (2000b): Wasser im Jahr 2025 - "Global Assessment" für die Weltwasser-Kommission. [Wasser, ein knapper werdendes Gut, Tropenzentrum]. Witzenhäuser, Deutschland, 9. November, 2000.

Henrichs, T., Rösch, T., Alcamo, J. (2000): Globale Wasserkrise? Lage und Entwicklung in Europa und Asien. Wasser - Nachhaltiges Management einer natürlichen Ressource, Hülster, A., Kraemer, K., Lange, M. (eds): ecomed, Landsberg, 15.

Lehner, B., Alcamo, J., Döll, P., Kaspar, F. (2000a): Towards a global perspective on the risk of river floods. In: Toensmann, F., Koch M. (eds.): River Flood Defence. Int. Symposium on River Flood Defence, Kassel Reports of Hydraulic Engineering, No. 9/2000, Vol. 1, pp. D-23 – D-32, Herkules Verlag.

Lehner, B., Doell, P., Kaspar, F. (2000b): Two global data sets: a 0.5 degree drainage direction map and a lakes, reservoirs and wetlands data set. Geophysical Research Abstracts, Vol. 2, 2000. Abstracts of the contributions of the 25th General Assembly of the European Geophysical Society, 25-29 April 2000, Nice, France.

➤ **Veröffentlichungen und Vorträge 1999:**

Alcamo, J., Henrichs, T. (1999): Globale Wasserkrise? Lage und Entwicklung in Europa und Asien. Wasser - Nachhaltiges Management einer natürlichen Ressource, Zentrum für Umweltforschung der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster, Deutschland, 15-16 November 1999. Döll, P., Lehner, B., Kaspar, F. (2000): Global modeling of groundwater recharge and surface runoff. EcoRegio 8, Geographisches Institut der Universität Göttingen, 73-80.

3 ANLAGE I: ERFOLGSKONTROLLBERICHT

3.1 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms

Das Vorhaben lieferte politikrelevante Informationen über die Auswirkungen des Klimawandels bzw. des Globalen Wandels auf die zukünftige Wasserverfügbarkeit, die Wassernutzung, das Wasserkraftpotential sowie das Auftreten von Hoch- und Niedrigwasserereignissen in Deutschland und Europa. Es entspricht damit den Richtlinien der BMBF-Förderung "Beiträge zur Anwendbarkeit bisheriger Ergebnisse der Klimaforschung in Politik und Ökonomie", die im Bereich der angewandten Klima- und Atmosphärenforschung angesiedelt ist.

Das Vorhaben nutzte dabei einerseits bereits existierende Modelle und Datensätze, die an drei deutschen Forschungseinrichtungen (GhK, PIK, GKSS) entwickelt wurden, sowie andererseits Ergebnisse aus Modellanwendungen, die bereits vom BMBF finanziert wurden (z.B. PIK: "Auswirkungen der Landnutzung auf den Wasser- und Stoffhaushalt der Elbe und ihres Einzugsgebietes" im BMBF-Förderschwerpunkt "Elbe-Ökologie", Förderkennzeichen 0339577).

3.2 Wissenschaftlicher Erfolg des Vorhabens

Das Vorhaben konnte zahlreiche in wissenschaftlich-technischem Sinne erfolgreiche Ergebnisse liefern (vgl. Abschnitt 2.2). Folgende Aspekte sind besonderes hervorzuheben:

- Das Vorhaben stellt unseres Wissens die erste Analyse des Einflusses des Klimawandels auf die Wasserressourcen in Europa dar, die nicht nur Abflussänderungen berücksichtigt, sondern auch explizit Änderungen in der Wassernutzung. Dies erlaubt ein realistischeres Bild der Auswirkungen auf die Wasserversorgung und auf das Wasserkraftpotential.
- Es handelt sich um das erste Vorhaben, das auf europäischem Maßstab Modelle des Klimas und des Wassers miteinander verknüpft, die dem aktuellsten Stand der Wissenschaft entsprechen. Die erzielten Ergebnisse sind wissenschaftlich von großer Bedeutung, da einheitliche Vergleiche auf Länder- oder Einzugsgebietsebene ermöglicht werden.
- Es handelt sich um das erste Vorhaben, das mit der gleichen Methodik sowohl alle europäischen Wassereinzugsgebiete berücksichtigt als auch detailliertere Analysen großer europäischer Einzugsgebiete ermöglicht. Insbesondere können die Ergebnisse der Studie eine Grundlage für weitere gezielte Analysen kritischer Einzugsgebiete bilden.
- Es handelt sich um die erste deutsche und europäische Studie, die einen Überblick über die Konsequenzen des Klimawandels für drei wichtige wasserbezogene Problemkreise

gibt: Wasserverfügbarkeit (Wasserversorgung), Energiegewinnung aus Wasserkraft und Gefahrenrisiko durch Hochwasser und Dürren.

- Es handelt sich um die erste Studie auf europäischem Maßstab, welche die kombinierte Wirkung von langfristigen Klimaänderungen und von zwischen-jährlichen Klimavariabilitäten auf die Quantität der erneuerbaren Süßwasser-Ressourcen analysiert.
- Das Vorhaben umfasst auch Unsicherheitsanalysen, insbesondere eine Analyse zur Auswirkung der Unsicherheiten des von Klimamodellen berechneten Niederschlags.
- Im Rahmen des Projektverbunds beleuchtete das Vorhaben Aspekte der Skalenfrage in der Hydrologie für die mesoskalige bis makroskalige Modellierung.
- Um die genannten Resultate zu erreichen wurden wesentlichen Elemente der Modellierung innerhalb von WaterGAP verbessert, unterstützt durch die Vergleiche mit den Modellen auf kleineren Skalen. Die Qualität zukünftiger Modellierungen mit WaterGAP auf deutscher, europäischer bzw. globaler Ebene wird dadurch deutlich erhöht und die Abfluss-Simulationen werden zuverlässiger.

3.3 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Der Nutzen sowie die Verwertbarkeit der Ergebnisse ist umfassend in Abschnitt 2.2 des vorliegenden Schlussberichts dargestellt.

3.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Die im Vorhaben geplanten Arbeiten wurden in allen wesentlichen Punkten erfolgreich umgesetzt. Lediglich einige wenige Teilaspekte konnten im bewilligten Zeitraum nicht im erwarteten Maß zufriedenstellend gelöst werden. Diese Aufgabenfelder stellen gleichzeitig Anschlusspunkte für weitere Forschungsarbeiten dar:

- Die Kenntnis der Landnutzung bzw. ihrer Änderung stellt eine wesentliche Voraussetzung für die Modellierung der Abflussbildung dar. Die Bereitstellung entsprechender Landnutzungsdaten und -szenarien auf unterschiedlichen Skalenebenen stand im Zentrum mehrerer Arbeitsaufgaben des Projektverbunds. Sowohl am PIK als auch an der GKSS werden die CORINE-Landnutzungsdaten als Grundlage verwendet (Auflösung: 250m x 250m), die speziell für den europäischen Kontinent entwickelt wurden. Im Modell WaterGAP dagegen wird die Landnutzung und deren Änderung dem Modell IMAGE entnommen, das in gröberer Auflösung (0.5° x 0.5°) arbeitet. Im Vorhaben wurde daher kurzfristig versucht, eine Methodik zu entwickeln, um auch für das makroskalig arbeitende Modell WaterGAP die CORINE-Landnutzungsdaten bereitzustellen, welche dem aktuellen Stand der Wissenschaft entsprechen. Da diese Arbeitsaufgabe im ursprünglichen Projektantrag jedoch nicht vorgesehen war, konnte sie, primär aus zeitlichen Gründen, nicht abgeschlossen werden.

- Um auszudrücken, ob die Wasserversorgungssituation kritisch ist, wurde ein Kritikalitätsindex eingeführt, der als Quotient aus Wasserentnahme und erneuerbarem Wasserdargebot definiert ist. Diese Definition sollte im Rahmen des Vorhabens neu gefasst werden, um den deutschen und europäischen Verhältnissen besser gerecht zu werden. Dieser Arbeitsschritt führte zwar zu neuen, teils komplexen Ansätzen zur Definition von Wasserstress bzw. Wasserkritikalität, die Aufgabenstellung konnte jedoch nicht endgültig und zufriedenstellend gelöst werden. Deshalb wurde letztendlich in der Ergebnisdarstellung auf bestehende Ansätze zurückgegriffen, um eine leichtere Vergleichbarkeit mit anderen Studien zu ermöglichen.
- Im ursprünglichen Projektantrag war vorgesehen, insgesamt fünf große europäische Einzugsgebiete detaillierter zu untersuchen. Neben Elbe und Oder wurden dazu Rhein, Guadalquivir (semiarid) und Dnjepr oder Donau (kontinental) ausgewählt. Diese Arbeitsaufgabe war jedoch, wie bereits im Antrag und im Zwischenbericht vom Mai 2000 beschrieben, vom zeitlichen Aufwand der Datenbeschaffung abhängig. Im Rahmen des Bewilligungszeitraums konnte diese Aufgabe nicht umfassend erfüllt werden. Neben Elbe und Oder (detaillierte Analyse, Daten wurden von PIK und BALTEX zur Verfügung gestellt) konnten lediglich einzelne Aspekte anderer Einzugsgebiete behandelt werden. In weiteren Forschungsphasen (z.B. GLOWA-Beteiligung) sollen weitere europäische Einzugsgebiete genauer untersucht werden.

3.5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Die Präsentation der Ergebnisse und damit der Zugang für mögliche Nutzer ist über zahlreiche Publikationen und Vorträge gewährleistet (vgl. Literatur- und Vortragsliste in Abschnitt 2.4). Im Zusammenhang mit dem Vorhaben entwickelte Datensätze werden an wissenschaftlichen Stellen kostenfrei abgegeben (vgl. Abschnitt 2.2 sowie unsere Homepage unter <http://usf.uni-kassel.de>).

3.6 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

Der Bewilligungszeitraum für das Vorhaben wurde (mit Änderungsbescheid Nr. 2 des BMBF vom 25.11.99) auf 1.3.1999 bis 28.02.2001 festgelegt. Sowohl der geplante Mittelverbrauch als auch der Arbeitsplan wurden für diesen Zeitraum in allen wesentlichen Punkten eingehalten. Entsprechende Verwendungsnachweise und Abrechnungen wurden an die zuständigen Stellen weitergeleitet. Der Zeitplan, aufgeschlüsselt in geplanten und tatsächlichen Ablauf, ist in Abschnitt 1.3 als Balkenplan dargestellt und erläutert.

4 ANLAGE II: KURZFASSUNG

4.1 Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN ---	2. Berichtsart Schlussbericht
3a. Titel des Berichts Einfluss des Klimawandels auf Wasserverfügbarkeit und Hochwasser in Deutschland und Europa: eine integrierte Analyse	
3b. Titel der Publikation EuroWater – Model-based assessment of European water resources and hydrology in the face of global change	
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Alcamo, J., Döll, P., Lehner, B.	5. Abschlußdatum des Vorhabens 28.02.2001
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n)) Lehner, B., Henrichs, T., Döll, P., Alcamo, J.	6. Veröffentlichungsdatum Geplant August 2001
	7. Form der Publikation Kassel World Water Series, Band 5
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Zentrum für Umweltsystemforschung, Universität Gesamthochschule Kassel Kurt-Wolters-Str. 3, 34109 Kassel	9. Ber.Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen *) 01 LA 9809/1
	11 a. Seitenzahl Bericht 40
	11 b. Seitenzahl Publikation ca. 80
	12. Literaturangaben ca. 100
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) 53170 Bonn	14. Tabellen 2
	15. Abbildungen 7
	16. Zusätzliche Angaben
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Im durchgeführten Vorhaben wurde, auf bestehenden Grundlagen aufbauend, eine Verbesserung, Weiterentwicklung und Validierung des integrierten globalen Wassermodells WaterGAP erreicht. WaterGAP 2 stellt ein einzigartiges Modell zur Berechnung des Wasserdargebots und der Wassernutzung sowohl auf Zell-, Einzugsgebiets- und Länderebene dar, das es erlaubt, die Folgen des Globalen Wandels auf die Ressource Wasser auf kontinentalem und globalem Maßstab abzuschätzen. Im Vorhaben wurden zunächst bestehende Anwendungskonzepte von WaterGAP modifiziert und verfeinert, insbesondere die Berechnung der Wasserkritikalität (Wasserstress) und ihrer Änderung für Europa, berechnet aus dem Verhältnis von Wasserdargebot und Wasserbedarf. Darüber hinaus wurden erstmalig neue Konzepte entwickelt, um die Auswirkungen des Globalen Wandels auf zukünftige Hochwasser- und Dürrehäufigkeiten sowie auf das Wasserkraftpotential mittels eines konsistenten Ansatzes für ganz Europa abzuschätzen. Diese makroskaligen Entwicklungen und Analysen stellten weitgehend wissenschaftliches Neuland dar. Die Ergebnisse sind insbesondere für behördliche und politische Entscheidungsträger von großer Bedeutung, da dadurch eine Einschätzung künftiger Konflikt- und Risikosituationen auf nationaler und internationaler Ebene unterstützt wird. Basierend auf dem IPCC-IS92a/Baseline-A Szenario für Änderungen in der Wassernutzung sowie auf den Berechnungen zweier unterschiedlicher Klimamodelle (HadCM3 und ECHAM4) wurden Berechnungen für zwei Zeitschnitte (2020er und 2070er Jahre) durchgeführt und ausgewertet. Als übereinstimmende Ergebnisse der Anwendung beider Klimamodelle können die folgenden Aussagen zusammengefasst werden, die sich für ein repräsentatives Jahr 2075 entsprechend den getroffenen Szenario-Annahmen und Voraussetzungen ergeben würden: Als Reaktion auf die veränderten Niederschlagsmengen nimmt generell die Wasserverfügbarkeit in Nord-Europa zu und geht in Süd-Europa zurück. Die Kritikalität der Wasserversorgungssituation verschärft sich im Osten Europas, in erster Linie bedingt durch den für dort simulierten starken Anstieg in der Wassernutzung. Aufgrund höherer Niederschläge und veränderter Schneeschmelzen nimmt das Hochwasserrisiko in Nord-Europa zu. Auch einzelne Flussläufe wie die Weichsel in Polen und der mittlere Rhein reagieren sensitiv. Niedrigwassersituationen bzw. hydrologische Dürren treten vermehrt im Süden und Osten Europas auf, wobei neben den verminderten Niederschlägen auch die erhöhte Wassernutzung im Osten Europas einen starken Einflussfaktor darstellt. Das Potential der bestehenden Wasserkraftanlagen zur Stromerzeugung nimmt, in starker Korrelation zur Wasserverfügbarkeit, in Nord-Europa zu und geht im Süden zurück. Die Situation der Wasserressourcen und der Hydrologie Deutschlands erweist sich im Vergleich zu anderen europäischen Ländern als relativ stabil.	
19. Schlagwörter Makroskalige integrierte Modellierung, Wasserressourcen, Wasserverfügbarkeit, Wasserstress, Hochwasserfrequenzen, Niedrigwasserfrequenzen, Wasserkraftpotential, Globaler Wandel, Deutschland, Europa.	
20. Verlag ---	21. Preis ---

4.2 Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN ---	2. Type of Report Final Report
3a. Report Title Einfluss des Klimawandels auf Wasserverfügbarkeit und Hochwasser in Deutschland und Europa: eine integrierte Analyse	
3b. Title of Publication EuroWater – Model-based assessment of European water resources and hydrology in the face of global change	
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Alcamo, J., Döll, P., Lehner, B.	5. End of Project 28.02.2001
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s)) Lehner, B., Henrichs, T., Döll, P., Alcamo, J.	6. Publication Date Planned August 2001
8. Performing Organization(s) (Name, Address) Center for Environmental Systems Research, University of Kassel Kurt-Wolters-Str. 3, D-34109 Kassel	7. Form of Publication Kassel World Water Series, No 5
	9. Originator's Report No.
	10. Reference No. 01 LA 9809/1
	11 a. No. of Pages Report 40
	11 b. No. of Pages Publication ca. 80
13. Sponsoring Agency (Name, Address) Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) 53170 Bonn	12. No. of References ca. 100
	14. No. of Tables 2
	15. No. of Figures 7
16. Supplementary Notes	
17. Presented at (Title, Place, Date)	
18. Abstract The EuroWater project led to further development, improvement, and validation of the integrated global water model WaterGAP. WaterGAP 2 is a model that, being unique in its kind, allows to calculate both water abstractions and water availability in a consistent manner on a grid-, watershed-, and country-scale. Combined with scenario analysis, WaterGAP provides a valuable tool to assess the impacts of Global Change upon water resource systems on the continental and global scale. The project's first phase allowed for important modifications and refining of the WaterGAP model and its applications. In particular, the previous concept of 'water criticality' (i.e. stress on water resources) was re-defined, taking both water availability and water withdrawals into account. Additionally, new concepts were developed on how the effects of Global Change on flood and drought frequencies as well as on hydropower generation can be assessed. In these fields of research, applying consistent model-based approaches for macro-scale analyses was breaking new ground in science. The results may support the evaluation of risk- and conflict-potentials both on a national and an international level, and can thus be especially interesting for political decision-makers. For the IPCC-IS92a/Baseline-A scenario, changes in water withdrawals and water availability were calculated for two future time-slices (the 2020s and the 2070s). In this context, uncertainties regarding climate change projections were considered by utilising outputs from two different climate models (HadCM3 and ECHAM4). Despite considerable variation in the simulations based on different climate models, agreement in the results for long-term projections (2070s) was identified for several important research issues: Following the changes in precipitation, water availability generally increases in Northern Europe, but decreases in the South. Stress on water resource systems continues to grow significantly in Eastern Europe, mainly due to projected large increases in water demand. Increases in precipitation and changing snowmelt patterns lead to a higher flood-risk in Northern Europe. Also some individual rivers in the other parts of Europe react sensitive regarding flood frequencies (e.g. the Wisla basin in Poland or the middle-part of the Rhine river). Low-flow situations and/or hydrological droughts are simulated to occur more often in Southern and Eastern Europe - here the increases in water abstraction and changing precipitation patterns play a comparably important role. In strong correlation to the development in water availability, the potential of existing hydro power plants to produce electricity increases in Northern Europe, but decreases in Southern Europe. On a country scale, it is shown that the hydrology and water resource systems in Germany react rather stable compared to other European countries.	
19. Keywords Macroscale integrated modeling, water resources, water availability, water use, water stress, flood frequencies, drought frequencies, hydropower potential, global change, Germany, Europe.	
20. Publisher ---	21. Price ---