



**GLOWA-Elbe: Auswirkungen des Globalen Wandels auf Umwelt
und Gesellschaft im Elbe-Gebiet**

Schlussbericht zum Vorhaben

**Makroskalige Integration:
Modellierung von Wasserdargebot und Wassernutzung
sowie Bilanzierung des Stickstoffaustrags**

(Förderkennzeichen 07GWK03, Auftragsnummer 203008)

im Rahmen des BMBF-Verbundprojekt

GLOWA-Elbe

Projektleitung: PD Dr. Petra Döll
Projektmitarbeiterin: Dr. Sara Vassolo
Projektlaufzeit: 1. Mai 2000 – 30. April 2003

Wissenschaftliches Zentrum für Umweltsystemforschung
Universität Kassel

Juni 2003



**U N I K A S S E L
V E R S I T Ä T**

1. Aufgabenstellung	3
2. Projektvoraussetzungen	3
3. Planung und Stand der Untersuchungen	5
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn	5
5. Verwendete Fachliteratur	7
6. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	8
6.1 Arbeitsgemeinschaft „Szenarien“	8
6.2 Kooperation mit dem Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB)	9
6.3 Kooperation mit dem Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH (UFZ)	9
6.4 Kooperation mit der Forschungsgesellschaft für Agrarpolitik und Agrarsoziologie e.V. (FAA)	9
7. Ergebnisse	10
7.1 Einführung	10
7.2 Erstellung räumlich aufgelöster und konsistenter Bevölkerungsszenarien für Deutschland und die Tschechische Republik	10
7.3 Berechnungen zum Einfluss des Klimawandels auf das Wasserdargebot im gesamten Elbe-Einzugsgebiet	13
7.4 Erstellung von Szenarien zur Wassernutzung für die Kühlung von Wärmekraftwerken im Elbe-Einzugsgebiet oberhalb Geesthacht	18
7.5 Analyse des Mehrwerts elbespezifischer Informationen bei der Erstellung von Wassernutzungsszenarien	21
7.6 Vergleich von Modellergebnissen zum Wasserdargebot und zur Wassernutzung in allen GLOWA-Einzugsgebieten	21
7.7 Globalskalige Analyse des Einflusses des Klimawandels auf Wasserverfügbarkeit und Bewässerungswasserbedarf	22
7.8 Erstellung eines modellbasierten globalen Datensatzes der Wassernutzung zur Kühlung von Wärmekraftwerken und für das produzierende Gewerbe	23
7.9 Erstellung eines globalen Modells des terrestrischen Stickstofftransports	23
8. Verwertbarkeit der Ergebnisse	23
9. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	24

Anhang: Neun Veröffentlichungen

1. Aufgabenstellung

Dieser Bericht beschreibt die Tätigkeiten und Ergebnisse des Vorhabens „Makroskalige Integration: Modellierung von Wasserdargebot und Wassernutzung sowie Bilanzierung des Stickstoffaustrags“. Dieses Vorhaben war eine Teilaufgabe des Verbundprojektes GLOWA-Elbe, Teilprojekt „Untersuchungen im gesamten Elbegebiet“ (Gesamtelbe) und wurde am Wissenschaftlichen Zentrum für Umweltsystemforschung der Universität Kassel durchgeführt. Ziel der Teilaufgabe war es, die Untersuchungen für das Elbeeinzugsgebiet in flussgebietsübergreifende, d.h. auch globale, Zusammenhänge einzubinden. Diese Integration sollte zum einen mit der Erstellung von elbespezifischen Szenarien, die konsistent mit makroskaligen Szenarien sind, erreicht werden. Zum anderen sollten Szenarioberechnungen mit Hilfe des globalen Modells der Wasserdargebot und Wassernutzung WaterGAP durchgeführt werden, um für das gesamte Elbe-Einzugsgebiet (einschließlich des tschechischen Teils) sowie in den anderen GLOWA-Einzugsgebieten erste grobe Analysen von Wasserdargebot und die Wassernutzung zu bestimmen.

Gemäß dem Projektantrag im Rahmen des Verbundprojekts GLOWA-ELBE sollten folgende wissenschaftliche Ziele erreicht werden:

- Eine Analyse, inwieweit kleinere skalige wasserquantitätsbezogene Konflikte durch ein makroskaliges Modell wiedergegeben werden können (z.B. die Interaktion zwischen dem Ballungsgebiet Berlin und das oberstromig gelegenen Einzugsgebiet der Spree). Für diese Aufgabe wird das Modell WaterGAP benutzt, mit dem sowohl das Wasserdargebot als auch die Wassernutzung auf globalen Maßstab berechnet werden kann.
- Eine Verbesserung des bestehenden globalen Modells WaterGAP, so dass in der Zukunft eine höhere Aussageschärfe für die Modellierung von Einzugsgebiete mit geringer Datendichte erreicht werden kann.
- Die Entwicklung von Szenarien der Wassernutzung und des Wasserdargebots für das Elbeeinzugsgebiet, die konsistent sind mit makroskaligen (z.B. globalen) Szenarien (in Kooperation mit allen anderen Teilaufgaben im Rahmen der teilaufgabeübergreifenden Arbeitsgruppe Szenarien).
- Ein vorläufiger Vergleich von Wasserdargebot und Wassernutzung in allen Einzugsgebieten, die ebenfalls im Rahmen des GLOWA-Programms als Fallstudien untersucht werden.
- Die Entwicklung eines ersten Ansatzes zur makroskaligen Modellierung von Wasserqualitätsaspekten am Beispiel des Eintrags von Stickstoff in die Elbe zur Abschätzung des Austrags in die Nordsee. Hierbei sollen insbesondere die entwickelten Methoden auf datenarme Einzugsgebiete übertragbar sein

2. Projektvoraussetzungen

Die vom Wissenschaftlichen Zentrum für Umweltsystemforschung durchgeführte Teilaufgabe ist im GLOWA-Elbe Verbundprojekt integriert. Das GLOWA-Elbe Verbundprojekt erfasst das Elbeeinzugsgebiet (Abbildung 1) und ist ein Projekt des GLOWA Programms. In diesem vom BMBF finanzierten Programm werden die Auswirkungen des globalen Wandels auf den Wasserkreislauf untersucht. Unter globalem Wandel werden hier nicht nur Klimaänderungen, sondern auch die sozialen, politischen und ökonomische Änderungen berücksichtigt, die im Zuge der Globalisierung stattfinden. Insgesamt sind im GLOWA Programm sechs

verschiedene Flusseinzugsgebiete als Pilotprojekte einbezogen: Elbe, Donau, Drâa in Marokko, Ouémé in Benin, Volta und Jordan.

Die allgemeinen Ziele des GLOWA-Elbe Verbundprojekts sind:

- Die Analyse und Modellierung der komplexen Wechselwirkungen zwischen dem hydrologischen Kreislauf, Klima, Landnutzung und Gesellschaft.
- Die Szenarioerstellung für das 21. Jahrhundert.
- Die Entwicklung von Methoden, Modelle und Werkzeuge für eine integrative Analyse der Auswirkung von klimatischen, sozialen, politischen und ökonomischen Änderungen auf die Region, vor allem auf die Wasserverfügbarkeit und die Wasserqualität.
- Auswahl von Strategien für die nachhaltige Entwicklung des Elbegebiets unter der Anwendung der zuvor genannten Modelle und Werkzeuge mit einem speziellem Schwerpunkt auf den gefährdeten Subregionen.



Abbildung 1. Das gesamte Elbegebiet, wie es im GLOWA-Elbe Projekt berücksichtigt wird.

Das GLOWA-Elbe Verbundprojekt wurde in verschiedene Teilprojekte (TP) untergliedert (www.glowa-elbe.de). Das TP1 umfasst das gesamte Elbegebiet (Abbildung 1), das TP2 untersucht das Spree-Havel-Gebiet und das TP3 erforscht das Unstrut-Gebiet. Die vom Wissenschaftlichen Zentrum für Umweltsystemforschung durchgeführte Teilaufgabe „Makroskaligen Integration“ gehört zum Teilprojekt TP1.

Die Teilaufgabe konnte aufgrund der Erfahrungen der Projektleiterin auf dem Gebiet der makroskaligen Wassermmodellierung und des Integrated Assessment (insbesondere der

Szenarioerstellung) durchgeführt werden und war eingebettet in eine Forschungsgruppe, der Aufgabe die Entwicklung neuer Ansätze zur quantitativen Analyse des globalen Wandels ist. Für die makroskalige Modellierung von Wasserdargebot und Wassernutzung stand das am Wissenschaftlichen Zentrum für Umweltsystemforschung entwickelte globale Modell WaterGAP zur Verfügung.

3. Planung und Stand der Untersuchungen

Folgende Arbeitsschritte waren für das Vorhaben geplant:

- Makroskalige Modellierung von Wasserdargebot und Wassernutzung im gesamten Elbegebiet.
- Festlegung des Entwicklungsrahmens für die Szenarioerstellung in GLOWA-Elbe (für das gesamte Elbeeinzugsgebiet).
- Entwicklung von Szenarien zur Bestimmung von Wasserdargebot und Wassernutzung für das gesamte Elbegebiet.
- Vergleichende Modellierung von Wasserdargebot und Wassernutzung in den anderen GLOWA-Einzugsgebieten.
- Entwicklung eines ersten Ansatzes zur makroskaligen Modellierung des Stickstoffaustrags aus Einzugsgebieten.

Die vorgesehene Zeitplanung für die Durchführung der zuvor beschriebenen Aufgaben kann Abbildung 2 entnommen werden. Die ersten vier Aufgaben sind bereits abgeschlossen, und die Entwicklung eines Ansatzes zur makroskaligen Modellierung des terrestrischen Stickstofftransport ist weit fortgeschritten. Das Modellkonzept liegt vor, die Modellentwicklung und Programmierung laufen jedoch noch. Daher konnten weder ein Ergebnisvergleich mit MONERIS (Arbeitsgruppe Behrendt, IGB) noch die Szenarioberechnungen durchgeführt werden.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn

Zur makroskaligen Modellierung von Wasserdargebot und Wassernutzung stand das Modell WaterGAP zur Verfügung, das beide Größen mit einer räumlichen Auflösung von $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ berechnet (siehe Veröffentlichungen von Döll und anderen im nächsten Abschnitt). Simuliert werden der monatliche Abfluss, differenziert nach Oberflächenabfluss und Grundwasserneubildung, sowie der Durchfluss in Flüssen, und die Wassernutzung durch Haushalte, Industrie und Landwirtschaft. Dazu wird eine Vielzahl von globalen Datensätzen verwendet, z.B. Zeitreihen der Monatswerte von Klimavariablen für den Zeitraum 1901-1995 sowie Daten zu Bodeneigenschaften, Geologie, Hangneigung, Bewässerungsgebieten, etc. Mit WaterGAP waren bereits verschiedene globale Szenarien berechnet worden.

Für die Szenarioerstellung stand die Methodik des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) zur Verfügung. Die im GLOWA-Elbe Verbundprojekt entwickelten Szenarien basieren auf den SRES-Szenarien A1 und B2 des IPCC (Nakicenovic und Swart; 2000). Für ihre Implementierung mit WaterGAP konnte auf die Modellergebnisse des integrierten Modells IMAGE (RIVM 2001) bzw. auf die über das IPCC Data Distribution Centre zugänglichen Klimaszenarien zurückgegriffen werden.

4.1.1.1 Arbeitsbereiche und Aufgaben		2001		2002												2003			
		N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	4.1
1	4.1.1.2 Großskalige Modellierung Wasserdargebot/-nutzung Elbe																		
SWIM und MONERIS	- Vergleich mit Daten und kleinskaligen Modellergebnissen																		
REMO	- Vergleich mit REMO (vertikale Wasserbilanz)																		
Reimer	- Vergleich mit korrigierten Klimadaten																		
	- Modellverbesserung																		
2	Entwicklung des Entwicklungsrahmen für Gesamtelbe (im Rahmen der AG Szenarien)																		
	- Erstellung von Bevölkerungsszenarien																		
Ipsen Gruppe	- Verbesserung der Bevölkerungsszenarien unter Berücksichtigung der Landschaftskonferenzen-Ergebnisse																		
3	Entwicklung von Szenarien Wasserdargebot/-nutzung																		
AG Szenario	- Quantifizierung der treibenden Kräfte und Parameter																		
	- Szenariorechnungen																		
4	4.1.1.3 Vergleichende Modellierung Wasserdargebot/-nutzung in den anderen GLOWA-Einzugsgebieten																		
	- Szenariorechnungen																		
Andere GLOWA Projekte	- Vergleichende Auswertung																		
5	4.1.1.4 Entwicklung eines Ansatzes zur großskaligen Modellierung des Stickstoffaustrags																		
	- Modellerstellung																		
MONERIS	- Vergleich mit MONERIS																		
	- Szenariorechnungen																		

Abbildung 2. Leistungsplan für die Teilaufgabe „Makroskalige Integration“

5. Verwendete Fachliteratur

- Alcamo, J., Leemans, R., Kreileman, E. (Hrsg.) (1998): Global Change Scenarios of the 21st Century. Results of the IMAGE 2.1 Model. Pergamon.
- Arnell, N.W. (1999): A simple water balance model for the simulation of water resources. Report to the Global Atmosphere Division, Department of the Environment, Transport and the Regions, University of Southampton.
- Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (1999): Perspektiven der künftigen Raum- und Siedlungsentwicklung. Heft 11/12.
- CIESIN (2001): Center for International Earth Science Information Network, Columbia University. GPW version 2. . <http://sedac.ciesin.columbia.edu/plue/gpw/index.html>.
- Cole, J.J., Peierls, B.L., Caraco, N.F., Pace, M.L. (1993): Nitrogen loading of rivers as a human-driven process. In: McDonnell, M.J., Prickett, S.T.A.: Humans as Components of Ecosystems: The Ecology of Subtle Human Effects and Populated Areas. Springer, 141-157.
- Döll, P., Kaspar, F., Alcamo, J. (1999a): Computation of global water availability and water use at the scale of large drainage basins, *Mathematische Geologie*, 4, 111-118.
- Döll, P., Kaspar, F., Siebert, S., Alcamo, J. (1999b): Global modelling of runoff and irrigation requirements in typical dry years. In: Gottschalk, L., Olivry, J.-C., Reed, D., Rosbjerg, D. (Hrsg.): Hydrological Extremes: Understanding, Predicting, Mitigating, Proceedings of IUGG 99 Symposium HS1, Birmingham, July 1999. IAHS publication 255, 137-143.
- Döll, P., Alcamo, J., Henrichs, T., Kaspar, F., Lehner, B., Rösch, T., Siebert, S. (2001): The global integrated water model WaterGAP 2.1. In Kassel World Water Series, Report Nr. 5: EuroWasser. Center for Systems Research, University of Kassel (auch in www.usf.uni-kassel.de/usf/archiv/dokumente/kwvs/kwvs.5.en.htm).
- Döll, P., Siebert, S. (2002): Global modeling of irrigation water requirements. *Water Resources Research*. 38, 4, 8.1-8.10, DOI 10.1029/2001WR000355.
- Döll, P., Kaspar, F., Lehner, B. (2003): A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation. *Journal of Hydrology*. 258, 214-231.
- Hagemann, S. (1998): Entwicklung einer Parametrisierung des lateralen Abflusses für Landflächen auf der globalen Skala. Examensarbeit Nr. 52, Max-Planck-Institut für Meteorologie Hamburg.
- Hu, D., Saito, Y., Kempe, S. (1998): Sediment and nutrient transport to the coastal zone. In Galloway, J. and Melillo, J.: Asian Change in the Context of Global Change: Impact of Natural and Anthropogenic Changes in Asia on Global Biogeochemical Cycles. Cambridge University Press, 245-270.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (1995): Climate Change 1995 – The Science of Climate Change. Cambridge University Press.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (1999): Special Report on Emission Scenarios. Draft.
- Landesbetrieb für Datenverarbeitung und Statistik (2001): Bevölkerungsprognose des Landes Brandenburg für den Zeitraum 2000-2015. Potsdam.
- Lohmann, D., Nolte-Holube, R., Raschke, E. (1996): A large-scale horizontal routing model to be coupled to land surface parametrization schemes. *Tellus* 48A, 708-721.
- Meigh, J.R., McKenzie, A.A., Austin, B.N., Bradford, R.B., Reynard, N.S. (1998): Assessment of global water resources – phase II. Estimates of present and future water availability for Eastern and Southern Africa. DFID Report 98/4, Institute of Hydrology, Wallingford, U.K.
- Nakicenovic, N., Swart, R. (Hrsg.) (2000): Emission Scenarios. IPCC Special Report on Emission Scenarios. Cambridge University Press.
- Raskin, P., Gleick, P., Kirshen, P., Pontius, G., Strzepek, K. (1997): Water Futures: Assessment of the Freshwater Resources of the World. Stockholm Environment Institute, Stockholm.
- RIVM (2001): The Image 2.2 implementation of the SRES scenarios.

- Seckler, D., Amarasinghe, U., Molden, D., da Silva, R., Barker, R. (1997): World Water Demand and Supply 1990 to 2025: Scenarios and Issues. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka.
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, 1999. Bevölkerungsprognose für Berlin 1998-2010. (<http://www.stadtentwicklung.berlin.de/planen/bevoelkerungsprognose/>).
- Statistischer Bericht (2000): Entwicklung der Bevölkerung Thüringens von 1998 bis 2020 nach Kreisen – Bevölkerungsvorausberechnung – Thüringer Landesamt für Statistik. A I 8.
- Statistische Berichte (2000): Voraussichtliche Entwicklung der schleswig-holsteinischen Bevölkerung bis zum Jahre 2015. Statistisches Landesamt Schleswig-Holstein. A I 8.
- Statistische Berichte (2001): Bevölkerung und Erwerbstätigkeit. Bevölkerungsvorausberechnung nach Alter und Geschlecht. 2. Regionalisierte Bevölkerungsvorausberechnung 1999 – 2015. Statistisches Landesamt Sachsen Anhalt. A I 8/S.
- Statistisches Bundesamt (1998): Langfristige Entwicklung in der Wasserwirtschaft (1975 - 1995) – Ausgewählte Ergebnisse. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (2000): Bevölkerungsentwicklung Deutschlands bis zum Jahr 2050. Ergebnisse der 9. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung. Wiesbaden.
- Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen (2000): Regionalisierte Bevölkerungsvorausberechnung für den Freistaat Sachsen bis 2015. Teil 2: Ergebnisse nach Kreisen. Gebietsstand 1. Januar 1999. Sonderheft Nr. 2.
- Ströbl, B. (2001): Entwicklungsrahmen Bevölkerung für GLOWA-Elbe: Skalierung insbesondere für Berlin-Brandenburg. Potsdam Institute for Climate Impact Research (unpublished).
- Thoman, R., Mueller, J. (1987): Principles of Surface Water Quality Modeling and Control. Harper Collins.
- Toth, F.L., Hyzsyk, E., Clark, W.C. (Hrsg.) (1998): Scenarios of Socioeconomic Development for Studies of Global Environmental Change: A Critical Review. Report RR-89-4. IIASA, Laxenburg, Österreich.
- Van Drecht, G., Bouwman, A.F., Knoop, J.M., Meinardi, C., Beusen, A. (2001): Global pollution of surface waters from point and nonpoint sources of nitrogen. *TheScientificWorld*, DOI 10.1100/tsw.2001.326.
- Vögele, S., Markewitz, P. (2001): Die Analyse des deutschen Strommarktes mit Fokus auf die neuen Bundesländer sowie die Ableitung von möglichen Strommarktentwicklungsszenarien bis zum Jahr 2050. Forschungszentrum Jülich UN (United Nations) (1998). World Population 1950-2050 (The 1998 Revision) – Population Division. Department of Economic and Social Affairs.
- UNEP (United Nations Environmental Program) (1999): Global Environmental Outlook 2000, Earthscan, London.
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen) (1997): Welt im Wandel: Wege zu einem nachhaltigen Umgang mit Süßwasser. Jahresgutachten 1997. Springer.

6. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Es fand sowohl eine Zusammenarbeit mit Wissenschaftler innerhalb des zu bearbeitenden Teilprojektes von GLOWA-Elbe statt als auch mit Wissenschaftlern anderer Teilprojekte. Die verschiedenen Kooperationen werden im Einzelnen in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben.

6.1. Arbeitsgemeinschaft „Szenarien“

Zur Entwicklung von Szenarien wurde die Arbeitsgemeinschaft (AG) „Szenarien“ mit im November 2000 gegründet. Diese AG befasste sich unter der Federführung von Dr. Frank

Messner (UFZ Leipzig) mit der Aufgabe, konsistente Entwicklungsszenarien für das gesamte Elbegebiet zu definieren. Die Tätigkeiten des Wissenschaftlichen Zentrums für Umweltsystemforschung bestanden insbesondere darin, die Einbindung in flussgebietsübergreifende Zusammenhänge zu leisten. So wurde beispielsweise die Wahl der beiden globalen SRES Storylines¹ A1 und B2 (Nakicenovic und Swart, 2000) als die qualitativen Entwicklungsrahmen des GLOWA-Elbe Verbundprojekts durch die Teilaufgabe angeregt.

6.2. Kooperation mit dem Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB)

Eine der Aufgaben des IGB war die Entwicklung von Szenarien zum Stoffaustrag in die Elbe. Dafür wurden Szenarien des Abflusses für das gesamte Elbegebiet nötig. Es wurden dem IGB vier solche Szenarien zur Verfügung gestellt, die auf den Berechnungen mit WaterGAP basieren. Das Ergebnis dieser Kooperation ist in der Publikation von Venohr et al. (2003) im Anhang dokumentiert.

6.3. Kooperation mit dem Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH (UFZ)

Das UFZ Leipzig-Halle beauftragte das Forschungszentrum Jülich zur Erstellung von zwei Szenarien für die Elektrizitätsproduktion in den neuen Bundesländern bis zum Jahr 2050. Die Studie berücksichtigt die Bundesländer Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen.. In den Szenarien wird bundeslandspezifisch die Entwicklung der Kapazitäten, der Stromerzeugung, des Stromverbrauchs sowie der CO₂-Emissionen aufgezeigt. Darüber hinaus wird die Wasserentnahme sowie die Wassereinleitung ostdeutscher Kraftwerke ausgewiesen. In Anlehnung an diese Szenarien wurden am Wissenschaftlichen Zentrum für Umweltsystemforschung zwei räumlich aufgelöste Szenarien zur Wassernutzung für die Kühlung von thermischen Kraftwerken für das Elbegebiet erstellt, (vgl. Kapitel 6.1.3).

6.4. Kooperation mit der Forschungsgesellschaft für Agrarpolitik und Agrarsoziologie e.V. (FAA)

Die FAA stellte Nutztierzahlen auf der Ebene von kreisfreien Städten und Landkreise für Deutschland zur Verfügung. Es handelt sich um Zeitreihen von 1971 bis 1996 sowie Szenarien, die den Szenarien A1 und B2 entsprechen. Diese Daten wurden zur Berechnung der Wassernutzung für die Tierhaltung im Elbegebiet sowohl für den Ist-Zustand (1995) als auch für die Szenarien eingegeben.

¹ Storylines sind narrative Beschreibungen möglicher zukünftiger Entwicklungen.

7. Ergebnisse

7.1. Einführung

Die in der Teilaufgabe „Makroskalige Modellierung“ erzielten Ergebnisse sind:

1. Erstellung räumlich aufgelöster und konsistenter Bevölkerungsszenarien für Deutschland und die Tschechische Republik als Grundlage für viele in GLOWA-Elbe behandelten Fragestellungen
2. Berechnungen zum Einfluss des Klimawandels auf das Wasserdargebot im gesamten Elbe-Einzugsgebiet
3. Szenarien der Wassernutzung für die Kühlung von Wärmekraftwerken im Elbe-Einzugsgebiet oberhalb Geesthacht
4. Analyse des Mehrwerts elbespezifischer Informationen bei der Erstellung von Wassernutzungsszenarien
5. Vergleich von Modellergebnissen zum Wasserdargebot und zur Wassernutzung in allen GLOWA-Einzugsgebieten
6. Globalskalige Analyse des Einflusses des Klimawandels auf Wasserverfügbarkeit und Bewässerungswasserbedarf
7. Erstellung eines modellbasierten globalen Datensatzes der Wassernutzung zur Kühlung von Wärmekraftwerken und für das produzierende Gewerbe
8. Erstellung eines globalen Modells des terrestrischen Stickstofftransports

Die Ergebnisse werden in den nächsten Kapiteln beschrieben, wobei jeweils auf die dazugehörigen Veröffentlichungen verwiesen wird, die diesem Bericht im Anhang beigelegt sind.

7.2. Erstellung räumlich aufgelöster und konsistenter Bevölkerungsszenarien für Deutschland und die Tschechische Republik

Die Bevölkerungsentwicklung kann als die wichtigste treibende Kraft süßwasserrelevanten Entwicklungen betrachtet werden. Insbesondere werden durch die Bevölkerungsentwicklung der Wasserbedarf, die Belastung der Umwelt durch Nährstoffe und Schadstoffe sowie die Siedlungsentwicklung, die wiederum Auswirkungen auf die Abflussbildung hat, beeinflusst. In diesem Abschnitt wird zusammenfassend die Methodik dargestellt, mit der zwei räumlich aufgelöste Bevölkerungsszenarien für Deutschland und die Tschechische Republik erstellt worden sind. Diese Szenarien umfassen den Zeitraum 2000-2050 (5-Jahresschritte). Eine ausführliche Darstellung ist in Vassolo & Döll (2002c) zu finden.

Die Erstellung der beiden Bevölkerungsszenarien wurde einerseits durch den GLOWA-Elbe-weiten Ansatz, für die Entwicklungsrahmen für das Elbegebiets den globalen Storylines des IPCC A1 und B2 zu folgen, bestimmt, andererseits durch die Verfügbarkeit von Bevölkerungsprognosen für Deutschland und Tschechien. Für Deutschland existierten zwei Bevölkerungsprognosen des Statistischen Bundesamts (2000), die die Entwicklung für jedes

der 16 Bundesländer bis 2050 quantifizieren. Beide Prognosen unterscheiden sich nur durch die angenommene Nettoeinwanderung nach Deutschland, während die Fertilität in beiden Prognosen mit konstant 1.4 (1400 Kinder pro 1000 Frauen) angesetzt wird. Variante 1 geht von einer Netto-Immigration nach Deutschland von 100.000 Personen pro Jahr aus, Variante 2 von 200.000 Personen pro Jahr konstant bis 2050.

Das globale Szenario A1 beschreibt eine stark globalisierte Welt mit einer starken Entwicklung des wirtschaftlichen Wohlstands, während das Szenario B2 eine eher regionalisierte Welt beschreibt, in der mehr Wert auf den Schutz der Umwelt gelegt wird. Daher wurde für die Erstellung der beiden regionalen Bevölkerungsszenarien A1 und B2 für Deutschland und Tschechien die Variante 2 mit A1 gleichgesetzt, und die Variante 1 mit B2. Im Zuge einer starken Globalisierung ist auch mit verstärkter Einwanderung nach Deutschland zu rechnen. Um eine Wanderungsbewegungen nicht nur zwischen den Bundesländern, sondern auch zwischen kleineren administrativen Einheiten widerzuspiegeln, wurden weitere existierende Prognosen für kleinere Einheiten (hier Bevölkerungseinheit genannt) verwendet. Diese sind jedoch nicht immer konsistent mit den Prognosen für die Bundesländer, haben einen kürzeren Zeithorizont und umfassen nicht zwei Varianten umfassen. Die Prognosen für die Bevölkerungseinheiten wurden dazu verwendet, die durch die Prognose des Statistischen Bundesamts (2000) festgelegten Bevölkerungszahlen der Bundesländer innerhalb dieser zu verteilen, d.h. Bevölkerungsverschiebungen innerhalb der Bundesländer, wie z.B. die Entwicklung eines "Speckgürtels" in Brandenburg um Berlin herum zu repräsentieren. Folgende kleinräumige Prognosen fanden Verwendung:

- Für die 97 Raumordnungsregionen (ROR) Deutschlands (Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, 1999), mit Ausnahme von Berlin, Brandenburg, Niedersachsen, Sachsen, Sachsen-Anhalt Schleswig-Holstein und Thüringen. Diese Prognose beschreibt die Bevölkerungsverteilung für 2005 und 2015, ist aber nicht konsistent mit den Szenarien des Statistischen Bundesamts. Die Bevölkerungszahl für 2010 wurde mit einer einfachen linearen Interpolation berechnet. Um Werte nach 2015 berechnen zu können, wurde angenommen, dass das Verhältnis zwischen der Bevölkerung einer ROR und der des Bundeslandes zu dem sie gehört konstant auf dem Wert von 2015 bleibt.
- Die Verfeinerung zur Bevölkerungsentwicklung in Berlin basiert auf Szenarios für die Stadtbezirke. Sie sind als Szenario A1 und B2 für 2000, 2005 und 2010 vom PIK (Ströbl, 2001) entwickelt worden. Um die Werte von 2015 an rechnen zu können, wurde angenommen, dass das Verhältnis zwischen der Bevölkerung eines Bezirkes und der des Landes konstant auf dem Wert von 2010 bleibt.
- Für die das Elbe-Einzugsgebiet überdeckenden Bundesländer Brandenburg, Niedersachsen, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Schleswig-Holstein und Thüringen wurden Prognosen auf Stadt- und Landkreisebene berücksichtigt, die von den jeweiligen Ländern erstellt wurden (aber nicht immer konsistent sind mit den Prognosen des Statistischen Bundesamts). Diese Prognosen reichen bis zum Jahr 2015. Um die Werte von 2020 aufwärts bestimmen zu können, wurde angenommen, dass das Verhältnis zwischen der Bevölkerung eines Landkreises oder einer Stadt und der des Bundeslandes, zu dem die Stadt oder der Kreis gehören, konstant auf dem Wert von 2015 bleibt.

Die berechneten Szenarien auf der Ebene der Bevölkerungseinheit (ROR, Stadtbezirke, Stadt oder Landkreise) wurden basierend auf der einer globalen Bevölkerungskarte für 1995 des CIESIN (CIESIN, 2001) auf einem Gitter mit einer räumlichen Auflösung von 2.5 min x 2.5 min verteilt. Hierfür wird angenommen, dass die Bevölkerung in einer Gitterzelle als

Anteil der Bevölkerung der zugehörigen Bevölkerungseinheit konstant auf dem Wert von 1995 bleibt.

Für die Bevölkerungsszenarien für Tschechien wurden keine tschechischen Prognosen verwendet. Die Bevölkerungsszenarien für die Tschechische Republik basieren auf einer Prognose der UN (UN, 1998) mit mittlerer Geburtsrate, die für jedes Land der Erde die Bevölkerungsentwicklung zwischen 1998 bis 2050 quantifiziert. Die Differenzierung zwischen Szenario A1 und B2 erfolgt über die szenariospezifischen Bevölkerungsänderungen in 17 Weltregionen, die durch das IMAGE-Modell bereitgestellt werden (RIVM, 2001). Es wurde also angenommen, dass die Bevölkerungsänderung in jeder 2.5 min Gitterzelle gleich ist, und Wanderungsbewegungen innerhalb Tschechiens wurden nicht berücksichtigt.

Tabelle 1 fasst die Bevölkerungsszenarien für das deutsche und tschechische Elbegebiet zusammen. In beiden Teilgebieten und Szenarien nimmt die Bevölkerung ab, wobei die Abnahme in Szenario A1 jeweils etwas geringer ist als in B2. Abbildung 3 zeigt die räumlich verteilte prozentuelle Änderung der Bevölkerung zwischen 1995 und 2025 im Elbegebiet. Im Allgemeinen nimmt die Bevölkerung innerhalb des Elbegebiets ab, mit Ausnahme der Speckgürtel um die größere Städte (Berlin, Hamburg, Leipzig, Jena). Die stärksten Abnahme werden in Teilgebieten von Sachsen-Anhalt erwartet.

Veröffentlichung zu diesem Thema: Vassolo & Döll (2002c)

Tabelle 1. Zusammenfassung der Bevölkerungsszenarien für die Elbegebiet

Jahr	Bevölkerung in Szenario A1			Bevölkerung in Szenario B2		
	Deutsche Elbe	Tschechische Elbe	Elbegebiet	Deutsche Elbe	Tschechische Elbe	Elbegebiet
2000	19.425.279	6.059.297	25.484.576	19.425.169	5.994.338	25.419.507
2005	19.205.966	6.077.843	25.283.809	19.189.059	5.953.551	25.142.610
2010	19.099.004	6.073.176	25.172.180	18.951.400	5.900.230	24.851.630
2015	18.957.171	6.037.178	24.994.349	18.652.150	5.837.052	24.489.202
2020	18.751.651	5.968.096	24.719.747	18.279.845	5.770.070	24.049.915
2025	18.420.013	5.879.647	24.299.660	17.774.565	5.669.799	23.444.364
2030	18.028.395	5.768.690	23.797.085	17.205.250	5.552.695	22.757.945
2035	17.616.394	5.629.804	23.246.198	16.611.428	5.410.686	22.022.114
2040	17.189.606	5.460.162	22.649.768	16.001.413	5.265.398	21.266.811
2045	16.728.859	5.271.178	22.000.037	15.355.983	5.128.724	20.484.707
2050	15.809.927	5.069.329	20.879.256	14.664.251	4.990.591	19.654.842

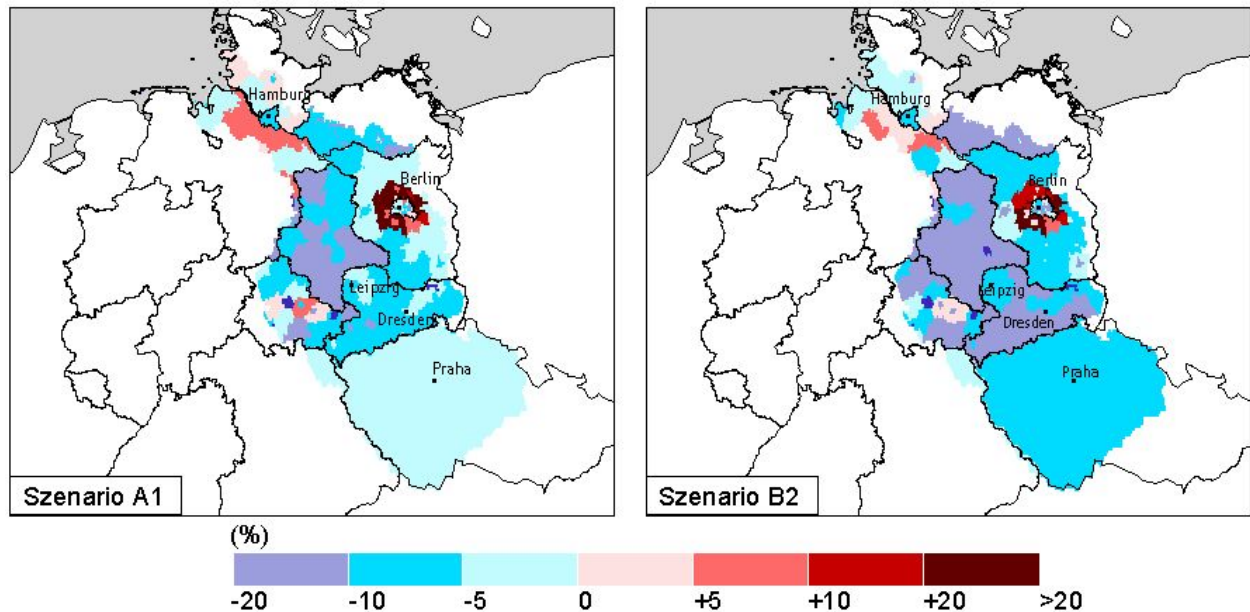


Abbildung 3. Änderung der Bevölkerungsverteilung zwischen 1995 und 2025, in Prozent.

7.3. Berechnungen zum Einfluss des Klimawandels auf das Wasserdargebot im gesamten Elbe-Einzugsgebiet

Zur Einordnung des Elbe-Einzugsgebiet bezüglich seiner Wasserproblematik wurde zunächst das Wasserdargebot im Elbegebiet mit dem in anderen europäischen Einzugsgebieten verglichen. Dieser Vergleich wird mit den Ergebnissen des gegen gemessenen Abfluss kalibrierten und validierten Modells WaterGAP (Döll et al., 2003) durchgeführt. Döll und Vassolo (2002) haben gezeigt, dass das Modell WaterGAP sowohl die langjährigen Mittel des Abflusses als auch die statistischen Hoch- und Niedrigwasserwerte Q_{10} und Q_{90} zufriedenstellend simulieren kann. Abbildung 4 zeigt langjährige Mittel des Wasserdargebots für die Klimanormale 1961-1990 für alle Flussgebiete in Europa (simulierter natürlicher Abfluss ohne Abzug der konsumptiven Wassernutzung). Abbildung 5 macht deutlich, dass das Elbe-Einzugsgebiet mit 200 mm/a ein relativ wasserarmes Einzugsgebiet innerhalb Europas ist.

Abbildung 6 zeigt die mittlere Wasserverfügbarkeit im Elbegebiet auf Zellebene ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$) für die Periode 1961-1990. Im tschechischen Teil des Einzugsgebiets ist die flächenbezogene Abflussbildung in den meisten Gitterzellen höher als im deutschen Teil. Am unterstrom liegenden Pegel Neu-Darchau beträgt der langjährige mittlere Durchfluss $25 \text{ km}^3/\text{a}$.

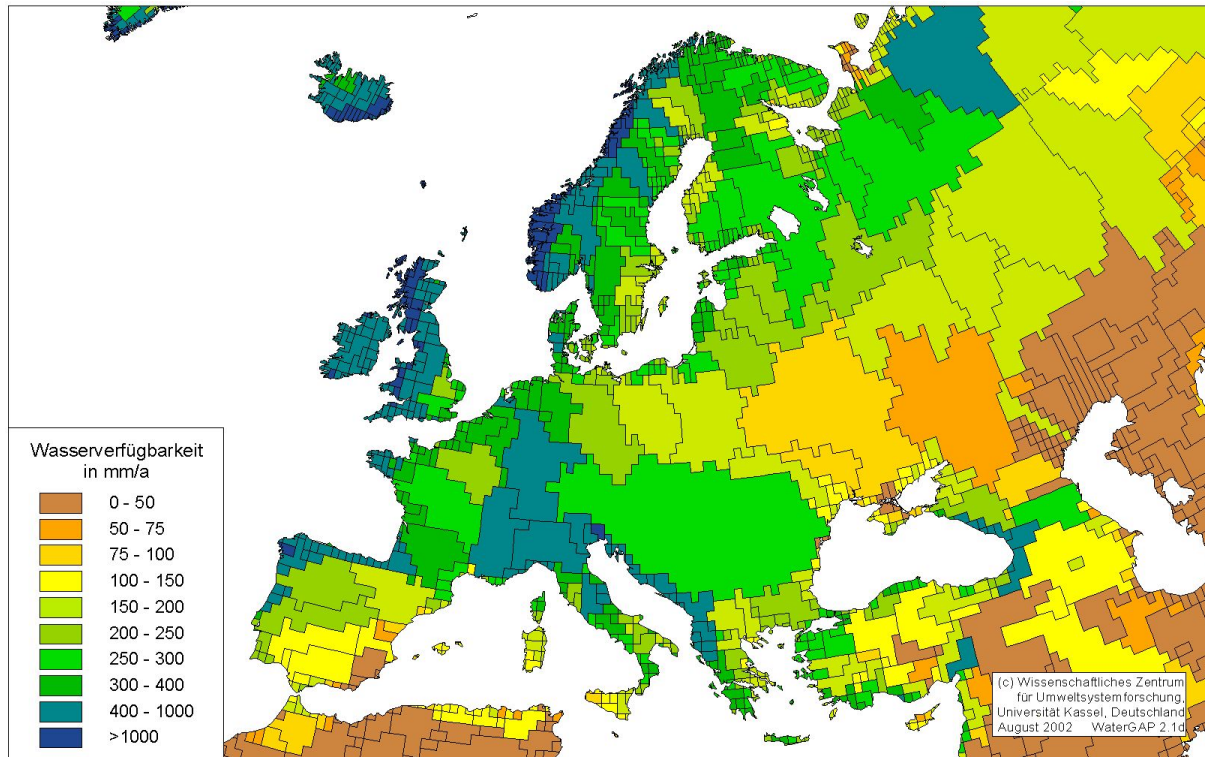


Abbildung 4. Wasserdargebot in europäischen Flusseinzugsgebieten. Langjähriges Jahresmittel für die Klimanormale 1961-1990.

Für das zukünftige Wasserdargebot im Elbe-Einzugsgebiet spielt die zukünftige Entwicklung des Klimas eine überragende Rolle. Leider weisen die Berechnungen von Niederschlagsänderungen, die aufgrund steigender Treibhauskonzentrationen auftreten werden, sehr hohe Unsicherheiten auf. Um die Auswirkungen der Unsicherheit der Klimamodelle auf das von WaterGAP berechnete Wasserdargebot einschätzen zu können, werden für die Szenarien des Wasserdargebots die Klimaszenarien zweier globaler Klimamodelle berücksichtigt. Für die Berechnungen im Elbegebiet werden Ergebnisse der globalen Klimamodelle ECHAM 4 (Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg) und HadCM3 (Hadley Center, Bracknell, Großbritannien) gegenübergestellt. Die von den Klimamodellen berechneten langfristigen Änderungen der monatlichen Temperatur T und des Niederschlags P werden zur Skalierung historischer Werte, die auf Messwerten beruhen, benutzt, um somit die Klimaänderungsszenarien für WaterGAP zu berechnen. Für die Berechnung des Wasserdargebots wird jeweils eine Zeitreihe des Wasserdargebots über 30 Jahren berechnet und dann gemittelt. Für das Referenzklima ist es die Zeitreihe 1961-1990. Für ein Klimaänderungsszenario beispielsweise für die 2020er Jahre werden die Monatsmittel von P und T , wie sie von den globalen Klimamodellen berechnet werden, für den Zeitraum 2021-2030, verglichen mit den Monatsmitteln der Klimamodelle für den Zeitraum 1961-1990, und die auf Messdaten basierenden historische Zeitreihen von T und P werden dann mit der Änderung der Klimamodellwerte skaliert. Eine solche Skalierung ist notwendig, da bislang weder globale noch regionale Klimamodelle in der Lage sind, die historischen Niederschläge zufriedenstellend zu simulieren.

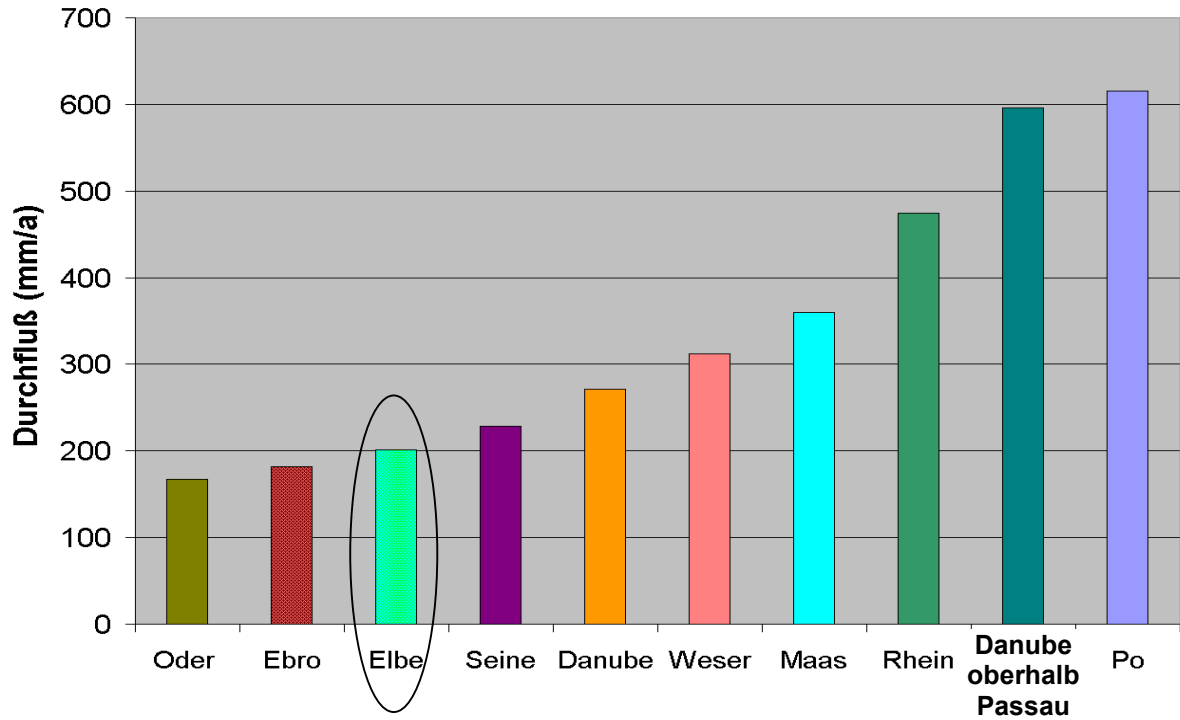


Abbildung 5. Vergleich des flächennormierten Wasserdargebots in ausgewählten europäischen Flussgebieten (1961-1990).

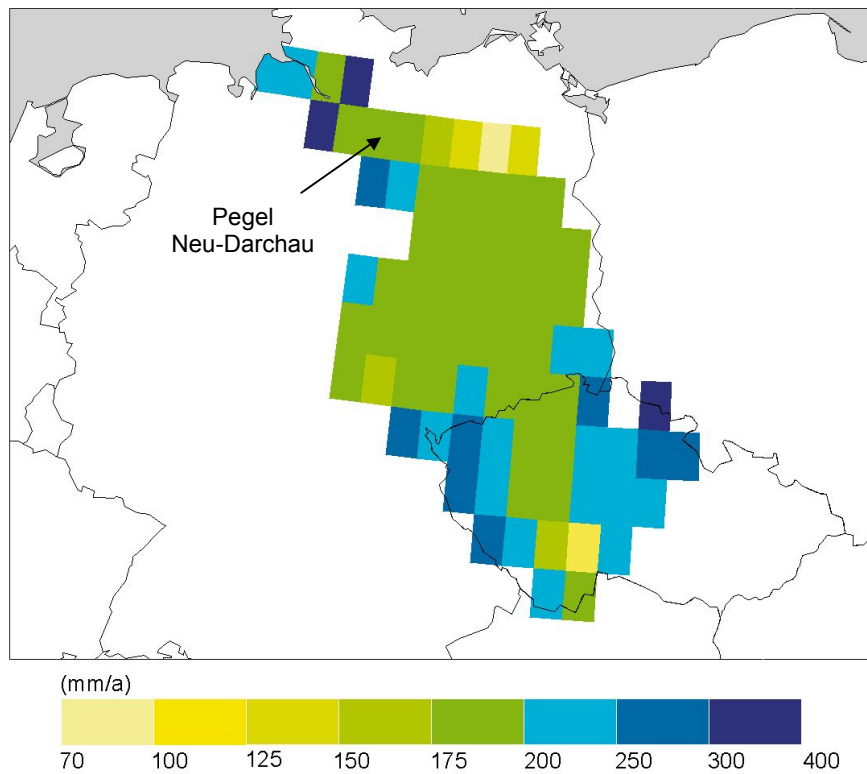


Abbildung 6. Wasserdargebot im Elbegebiet auf 0.5° x 0.5° Zellebene. Der langjährige mittlere Abfluss für die Periode 1961-1990 am Pegel Neu-Darchau beträgt 25 km³/a.

Gleichung [1] beschreibt die Skalierung von Temperatur (T) und Niederschlagswerten (P) beschrieben. Im Gegensatz zu einer additiven Methode bei Skalierung der Temperatur erfolgt die Skalierung der zukünftigen Niederschlagswerte multiplikativ.

$$T_{Skal}(m, j_{Beob}) = T_{Beob}(m, j_{Beob}) + [T_{Klim-Modell,Skal}(m) - T_{Klim-Modell,Obs}(m)] \quad [1]$$

$$P_{Skal}(m, j_{Beob}) = P_{Beob}(m, j_{Beob}) \cdot \frac{P_{Klim-Modell,Skal}(m)}{P_{Klim-Modell,Obs}(m)}$$

$T_{Skal}(m, j_{Beob})$:	skalierte Temperatur für das Klimaänderungsszenario im Monat m des Jahres j_{Beob}
$T_{Beob}(m, j_{Beob})$:	beobachtete Temperatur im Monat m des Jahres j_{Beob}
$T_{Klim-Modell,Skal}(m)$:	simulierte Temperatur des Klimamodells für das Klimaänderungs-Szenario (Dekadenmittel, z.B. 2021-2030) im Monat m
$T_{Klim-Modell,Obs}(m)$:	simulierte Temperatur des Klimamodells für das gegenwärtige Klima (Mittel 1961-90) im Monat m

Die Bezeichnungen für die Skalierung des Niederschlags sind analog.

Wie bereits erwähnt wurde, wurden im Rahmen des Verbundprojekts GLOWA-Elbe Szenarios entwickelt, die auf den IPCC Emissionsszenarien A1 und B2 bis zum Jahr 2050 beruhen. Leider waren bis zum Ende der Projektlaufzeit keine globalen A1-Klimaszenarien verfügbar. Aus diesem Grund wurde dieses Szenario durch das Szenario A2 ersetzt, um globale Wasserverfügbarkeit berechnen zu können. Dass dieses Vorgehen berechtigt ist, zeigt der Kurvenverlauf der Treibhausgasemissionen für die beiden Szenarien: bis zum Jahr 2030 ist kein bedeutender Unterschied in den Emissionen zwischen A1 und B2 zu erkennen. Der Unterschied bis 2050 ist noch als geringfügig zu bewerten (Abbildung 7).

Die prozentualen Änderungen der berechneten Wasserverfügbarkeit im Elbeeinzugsgebiet zwischen der Klimanormale 1961-1990 und den 2020er sind in Abbildung 8 dargestellt, für beide Emissionsszenarien und ihre jeweilige Umsetzung in ein Klimaszenario durch die beiden globalen Klimamodelle ECHAM4 und HadCM3. Die berechneten Änderungen des Wasserdargebots sind ganz offensichtlich stärker vom verwendeten Klimamodell abhängig als vom angenommenen Emissionsszenario. Bei Verwendung der Klimaszenarien von ECHAM4 ergeben sich fast in allen Zellen des Elbe-Einzugsgebiets verringerte Wasserverfügbarkeiten, während mit HadCM3 für das Emissionsszenario A2 nur sehr geringe Änderungen ergeben, während bei B2 das Wasserdargebot signifikant zunimmt. Auch bei Berechnungen für die 2070er Jahre, für die die Emissionsszenarien A2 und B2 stark differieren, sind die Unterschiede zwischen den Klimamodellen noch immer dominant. In Abbildung 7 wird auch deutlich, dass sich geringere Emissionen (B2) nicht in geringeren Änderungen des Wasserdargebots niederschlagen. Das liegt daran, dass das Wasserdargebot stärker vom Niederschlag als von der Temperatur bestimmt wird. Während im globalen Mittel der Niederschlag mit steigenden Treibhausgaskonzentrationen steigt, gilt dies, anders als bei der Temperatur, nicht für die regionale Skala. Die steigenden Treibhausgaskonzentrationen führen in manchen Regionen zu einer Erhöhung des Niederschlags, und in anderen zu einer Verringerung. Durch die stetig steigenden Treibhausgaskonzentrationen wird die globale Zirkulation ständig verändert, und damit auch die Niederschlagsmuster.

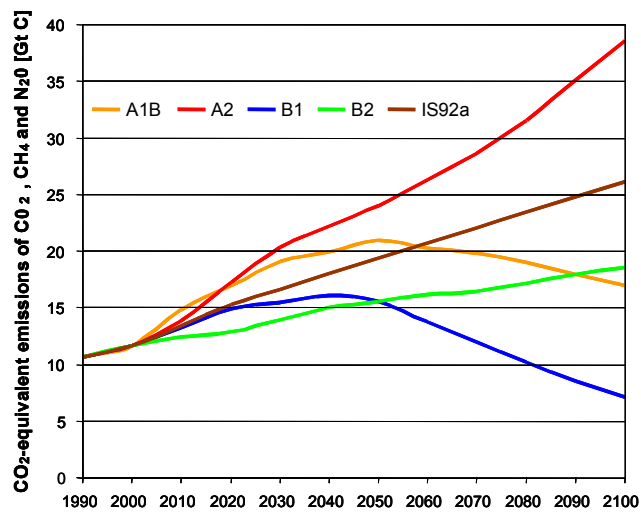


Abbildung 7. Szenarien der Treibhausgasemissionen des IPCC.

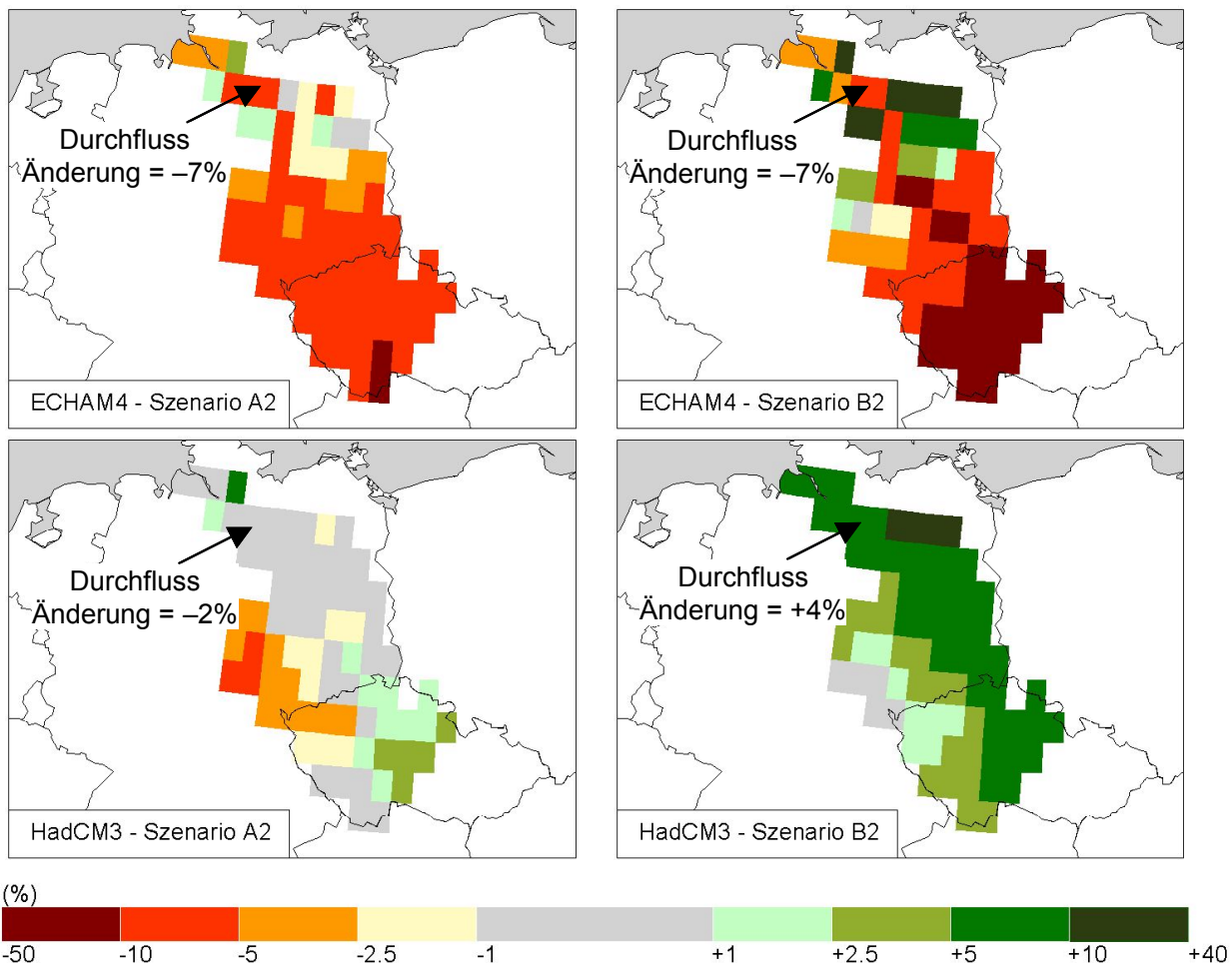


Abbildung 8. Änderung des Wasserdargebots zwischen 1961-90 und den 2020ern, für die beiden Emissionsszenarien in ihrer Umsetzung in Klimaszenarien durch zwei globale Klimamodelle.

Die mit WaterGAP berechneten Änderungen des Wasserdargebots im gesamten Elbe-Gebiet wurden dem Institut für Gewässerkunde und Binnenfischerei GmbH zur Verfügung gestellt. Dadurch konnte mit Hilfe des mesoskaligen Nährstofftransportmodells MONERIS Einfluss des Klimawandels auf den Austrag von Nährstoffen aus dem Elbe-Einzugsgebiet abgeschätzt werden. Die Ergebnisse sind in Venohr et al. (2003) ausführlich dargestellt.

Veröffentlichungen zu diesem Thema: Döll & Vassolo (2002), Venohr et al. (2003)

7.4. Erstellung von Szenarien zur Wassernutzung für die Kühlung von Wärmekraftwerken im Elbe-Einzugsgebiet oberhalb Geesthacht

Die Wasserentnahme für die Kühlung thermischer Kraftwerke stellt einen bedeutenden Anteil der Wassernutzung für die Industrie im Elbegebiet dar. Das entnommene Volumen ist stark von der Art des Kühlsystems abhängig. Zwei grundsätzlich unterschiedliche Kühlsysteme sind hervorzuheben: Durchlaufkühlung und Kühlturm. Das Durchlaufkühlsystem benötigt zum Abkühlen der Kondensatoren ein großes Volumen Wasser pro produzierter Elektrizitätseinheit. Das benötigte Kühlwasser wird unmittelbar nach dem Kühlvorgang in die Quelle zurückgeleitet. Ein kleines Prozent des Wasser geht dabei durch Evaporation verloren. Das Kühlwasser im Kühlturmsystem fließt grundsätzlich im Kreislauf. Beim Abkühlungsvorgang im Kühlturm kommt es zu großen Verlusten durch Evaporation. Diese Verluste sind dem Kühlkreislauf zuzuführen. Das Kühlturmsystem zeichnet sich durch eine relativ kleine Wasserentnahme aus, aber die Evaporation pro produzierte Elektrizitätseinheit ist doppelt so groß wie im Durchlaufkühlsystem.

Szenarien der Wassernutzung für die Kraftwerkskühlung wurden nur für die Elbe oberhalb Geesthacht (bei Hamburg) erstellt, weil unterstrom die Elbe tideoffen ist, und das zur Kühlung von Kraftwerken notwendige Wasser vorwiegend Meerwasser ist. Die erstellten Szenarien für Deutschland basieren auf der Arbeit von Vögele & Markewitz (2001) „Die Analyse des deutschen Strommarktes mit Fokus auf die neuen Bundesländer sowie die Ableitung von möglichen Strommarkt-Entwicklungsszenarien bis zum Jahr 2050“. In dieser für das GLOWA-Elbe-Projekt erstellten Studie sind zwei unterschiedliche Szenarien entwickelt worden, die sich vor allem in der Menge an regenerativer Energie unterscheiden. Das Szenario mit dem niedrigeren Anteil an regenerativer Energie wurde als Szenario A1 angenommen. Berlin und Niedersachsen sind in der Studie nicht berücksichtigt. Für Berlin wurde angenommen, dass die Szenarien für Berlin denen von Brandenburg folgen. Für Niedersachsen wurde, je nach Brennstoff, das Szenario des ostdeutschen Bundeslandes zugrunde gelegt, das gemäß Vögele & Markewitz (2001) die jeweils höchste Zunahme hat.

Da keine spezifische Szenarien bzgl. der Energieerzeugung oder der Wassernutzung für die Tschechische Republik vorhanden waren, wurden hierfür die globalen Szenarien angenommen, wie sie durch WaterGAP berechnet werden (Döll & Vassolo, 2003). Abbildung 9 zeigt die Szenarien zur Stromproduktion innerhalb des gesamten Elbegebiets. Anzumerken ist, dass in den globalen Szenarien der Stromproduktion von IMAGE für Deutschland stärker steigende Stromproduktion angenommen wird als in den Szenarien von Vögele & Markewitz (2001).

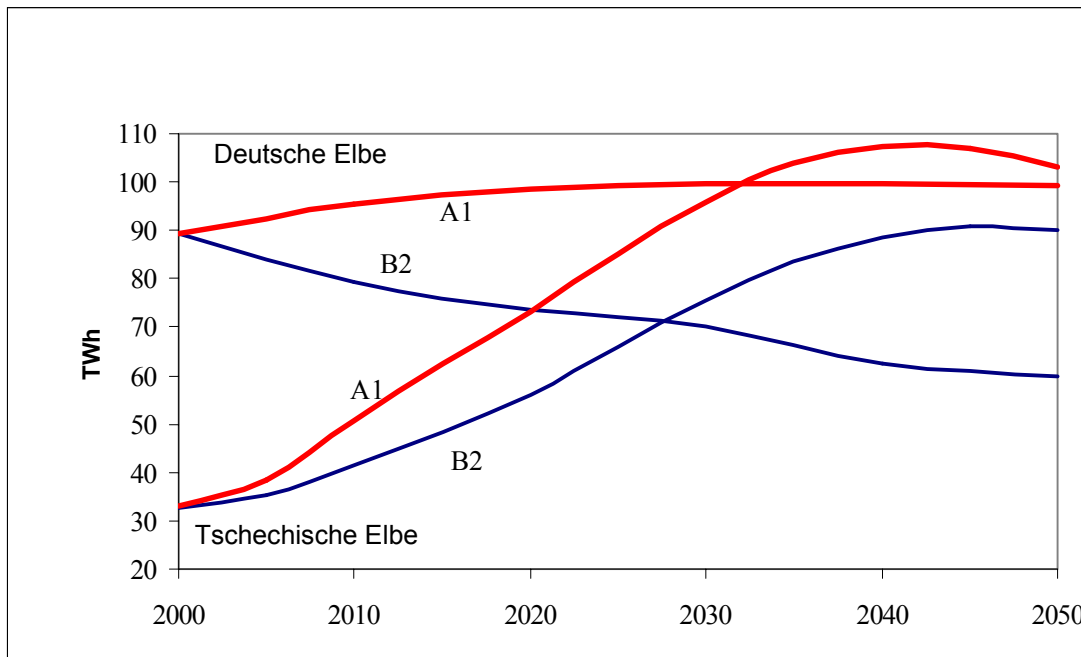


Abbildung 9. Entwicklung der Stromproduktion mit Wärmekraftwerken für das deutsche und das tschechische Elbe-Einzugsgebiet.

Für die Berechnung der Szenarien wurden folgende Annahmen getroffen:

- Spezifische Wasserentnahme und spezifischer Wasserverbrauch (verdunstetes Wasservolumen pro produzierte Stromeinheit) aus Vögele und Markewitz (2001)
- Lebensdauer aller Kraftwerkstypen: 35 Jahre
- Stillgelegte Kraftwerke werden durch neue Kraftwerke ersetzt, die immer mit Kühltürmen versehen sind
- Technologischer Fortschritt bringt eine Verringerung der spezifischen Wasserentnahme von 0,7%/Jahr und eine Verringerung des spezifischen Wasserkonsumption (Verdunstung) von 0,8%/Jahr (gleich für alle Kraftwerkstypen)

Auf der Grundlage dieser Annahmen wurden zwei räumlich aufgelöste Szenarien (A1 und B2) für das Elbegebiet bis Geesthacht erstellt, in der die Lage der Kraftwerke explizit berücksichtigt sind. Diese räumlich verteilten Szenarien bauen auf einem verbesserten, modellbasierten Datensatz der industriellen Wassernutzung auf globaler Skala auf, der im Rahmen des GLOWA-Elbe-Projekts erstellt wurde (vgl. Abschnitt 7. 6) (Vassolo & Döll, 2003). Dieser globale Datensatz unterscheidet, mit einer räumliche Auflösung von $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, erstmals die Wassernutzung zur Kühlung von Kraftwerken von der Nutzung im produzierenden Gewerbe, und enthält sowohl die Wasserentnahmen als auch die konsumptive Wassernutzung.

Die durchgeführten Berechnungen zeigen, dass im Elbegebiet bis Geesthacht im Jahr 2000 $0,75 \text{ km}^3$ Wasser für die Kühlung von Wärmekraftwerken entnommen worden sind. Abbildung 10 zeigt die Verteilung dieser Entnahmen mit einer Auflösung von $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. Die prozentuale Entnahmeänderungen im Jahr 2025 im Vergleich zu 1995 sind in Abbildung 11 dargestellt. Hier sind im für das gesamte Einzugsgebiet Abnahmen von 29% in Szenario A1

und 52% in Szenario B2 festzustellen, in vielen Zellen ist jedoch auch mit einer Zunahme zu rechnen (insbesondere in Tschechien).

Veröffentlichung zu diesem Thema: Vassolo & Döll (2002c)

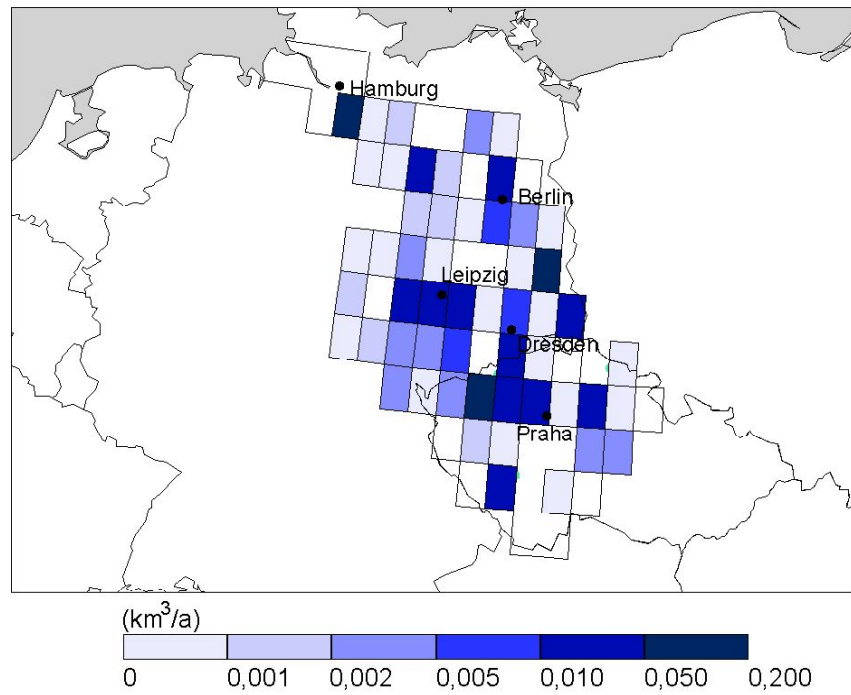


Abbildung 10. Verteilung der Wasserentnahme für die Kühlung von Wärmekraftwerken im Jahr 2000 innerhalb des Elbegebiets bis Geesthacht

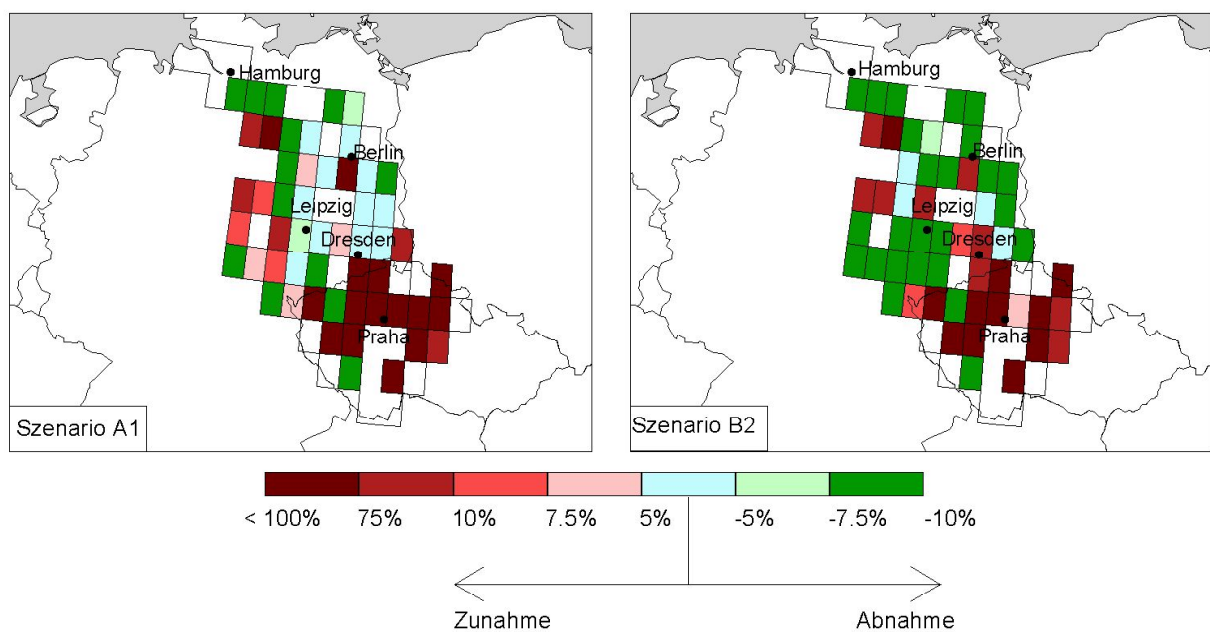


Abbildung 11. Änderung der Wasserentnahme für die Kühlung von Wärmekraftwerke zwischen 2000 und 2025.

7.5. Analyse des Mehrwerts elbespezifischer Informationen bei der Erstellung von Wassernutzungsszenarien

Zusätzlich zu den Szenarien der Wassernutzung zur Kühlung von Wärmekraftwerken wurden auch Szenarien der Wassernutzung durch Haushalte, produzierendes Gewerbe und Viehhaltung erstellt, die elbespezifische Informationen mit dem globalskaligen Ansatz von WaterGAP zur Modellierung der Wassernutzung verknüpfen (Döll & Vassolo, 2003). So wurden Szenarien der Wassernutzung durch Haushalte erstellt, die als treibende Kraft die elbespezifischen Bevölkerungsszenarien (Abschnitt 7.3) verwenden. Döll & Vassolo diskutieren den Mehrwert, der durch die Einbeziehung elbespezifischer Information in den globalskaligen Modellierungsansatz von WaterGAP bezüglich Szenarien der Wassernutzung, gewonnen wird.

Veröffentlichung zu diesem Thema: Döll & Vassolo (2003)

7.6. Vergleich von Modellergebnissen zum Wasserdargebot und zur Wassernutzung in allen GLOWA-Einzugsgebieten

Mit Hilfe des globalen Modells WaterGAP wurden die Wasserressourcen und Wassernutzungen in allen GLOWA-Einzugsgebieten verglichen. Die Ergebnisse sind in Form eines Posters veröffentlicht worden (Vassolo & Döll, 2002). Die mittlere Wasserverfügbarkeit für die Periode 1961-1995 und die Wassernutzung für 1995 für alle GLOWA-Einzugsgebiete sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Es zeigt sich, dass die Donau der Fluss mit der höchsten Wasserverfügbarkeit pro Einwohner ist, gefolgt vom Volta. Die höchste Entnahme pro Einwohner ist für das Drâagebiet berechnet worden. Dieser Wert überschätzt den tatsächlichen jedoch beträchtlich, da die Wasserentnahme für Bewässerung in diesem Gebiet von WaterGAP überschätzt wird.

Tabelle 2. Vergleich der Wassernutzung und Wasserverfügbarkeit in allen GLOWA-Einzugsgebieten (Vassolo & Döll, 2002b)

Flussgebiet	Entnahme in 1995		langjähriges Mittel (1961-1995) der Wasserverfügbarkeit		zuverlässige Wasserverfügbarkeit (*)
	km ³ /a	km ³ /(Kopf·a)	km ³ /a	km ³ /(Kopf·a)	km ³ /(Kopf·a)
Elbe	10,6	428	29,5	1191	584
Donau	58,1	709	215,7	2631	1021
Drâa	5,1	4415	0,5	433	0
Ouémé	0,1	31	6,2	1939	325
Volta	0,6	33	33,1	1797	743

(*) basierend auf dem zu 90% erreichten Monatswert des Durchflusses Q_{90} an der Flussmündung

Veröffentlichung in diesem Thema: Vassolo & Döll (2002b)

7.7. Globalskalige Analyse des Einflusses des Klimawandels auf Wasserverfügbarkeit und Bewässerungswasserbedarf

Der Klimawandel beeinflusst sowohl der Wasserverfügbarkeit als auch den Bewässerungswasserbedarf, jedoch auf unterschiedliche Art und Weise. Wie in Abschnitt 7.3 beschrieben, wurden die auf den IPCC-Emissionsszenarien A2 und B2 beruhenden Klimaszenarien der globalen Klimamodelle ECHAM4 und HadCM3 als Eingabe für WaterGAP verwendet, um den potentiellen Einfluss des Klimawandels zu analysieren. Die mit WaterGAP 2 berechneten Änderungen der Wasserressourcen WR bis zu den 2020er bzw. 2070er Jahren (prozentuale Änderungen der langjährigen Mittel des Abflusses in Einzugsgebieten) unterscheiden sich sehr stark je nach dem verwendeten Klimamodell. Sie sind stärker vom Klimamodell als von den doch deutlich unterschiedlichen Emissionsszenarien abhängig. Für große Gebiete der Erde führt ein Klimamodell (für ein gegebenes Emissionsszenario) zu einer Abnahme von WR, während das andere zu einer Zunahme führt. Vergleicht man jeweils die beiden Emissionsszenarien, so führen die geringeren Emissionen im Szenario B2 nicht zu geringeren Änderungen von WR als bei A2. Dies trifft sowohl für die 2020er als auch die 2070er Jahre zu. So sind nach dem HadCM3-Modell die Abnahmen von WR bis zu den 2070er Jahren in Mittel- und Südamerika bei dem Emissionsszenario B2 stärker als bei A2, bei dem bis dahin wesentlich höhere Emissionen angenommen werden. Türkei, Syrien, Irak und Iran sind bis zu den 2020er Jahren mit B2 von deutlichen Abnahmen betroffen, während mit den höheren Emissionen A2 WR ungefähr stabil bleibr. Die Änderungen von WR bis zu den 2070er Jahren sind meist stärker als bis zu den 2020er Jahren.

Bezüglich des Netto-Bewässerungswasserbedarf ICU ist es im Allgemeinen nicht so, dass in den Einzugsgebieten, in denen die (übers Jahr gemittelten) Wasserressourcen zunehmen, auch ICU abnimmt. Das liegt insbesondere daran, dass bei ICU die Klimaänderung während der Wachstumsperiode (150 Tage bzw. 300 Tage bei Anbau von zwei Feldfrüchten pro Jahr) zum Tragen kommt und nicht die während des ganzen Jahres. Auch daher hat die Unsicherheit der Klimamodelle bezüglich der Niederschlagsänderungen für ICU eine deutlich andere Wirkung als für die Wasserressourcen. So sind die Änderungen im ICU für die iberische Halbinsel sehr ähnlich (und nahe Null), da HadCM3 vor allem im Winter, d.h. außerhalb der Wachstumsperiode, sehr viel höhere Niederschläge in den 2020er Jahren berechnet als ECHAM4, was zu einer starken Diskrepanz bei den Wasserressourcen führt. Im großen und ganzen sind die Bewässerungswasserbedarfe, die sich mit den ECHAM4- und HadCM3-Klimaänderungen berechnen, ähnlicher als die berechneten Wasserressourcen. Zum einen ist ICU sensitiver auf die Temperatur als die Wasserressourcen, und die Unsicherheit in den berechneten Temperaturänderungen ist geringer als die Unsicherheit in den berechneten Niederschlagsänderungen. Zum anderen schätzt GIM nicht den Wasserbedarf für eine konstante Wachstumsperiode, sondern bestimmt eine optimale Wachstumsperiode als Funktion des Niederschlags und der Temperatur. In vielen Zellen führen unterschiedliche Klimaszenarien zu einer unterschiedlichen Verschiebung der Wachstumsperioden, was zu einer Angleichung der berechneten Wasserbedarfe führt.

Veröffentlichung in diesem Thema: Döll et al. (2003)

7.8. Erstellung eines modellbasierten globalen Datensatzes der Wassernutzung zur Kühlung von Wärmekraftwerken und für das produzierende Gewerbe

Zur besseren Analyse der globalen Wassernutzungssituation und zur Erstellung aussagekräftiger Szenarien der Wassernutzung wurde im Rahmen des Vorhabens ein modellbasierter Datensatz der industriellen Wassernutzung auf globaler Skala erstellt. Dieser globale Datensatz, der eine räumliche Auflösung von $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ hat, ist der erste globale Datensatz der industriellen Wassernutzung, in dem die Wassernutzung zur Kühlung von Kraftwerken von der Nutzung im produzierenden Gewerbe unterschieden wird. Dabei wird die explizite Lage von über 60000 Wärmekraftwerken berücksichtigt. Der Datensatz beschreibt die Verhältnisse um 1995 und enthält sowohl die Wasserentnahmen als auch die konsumptive Wassernutzung. Da er modellbasiert ist (z.B. ist die Wassernutzung im produzierenden Gewerbe eine Funktion der Produktionsmengen in verschiedenen Industriezweigen), eignet er sich gut für die Szenarioerstellung. Seine Anwendung für das Elbegebiet ist in Abschnitt 7.4 beschrieben. Eine ausführliche Beschreibung und Validierung des Datensatzes finden Sie in Vassolo & Döll (2003).

Veröffentlichungen in diesem Thema: Vassolo & Döll (2003), Vassolo & Döll (2002a)

7.9. Erstellung eines globalen Modells des terrestrischen Stickstofftransports

Das globale Modell des terrestrischen Stickstofftransports WaterGAP-N berechnet den Eintrag, den Transport und die Transformation von Stickstoffverbindungen sowie den Austrag in die Küstengewässer. Ziel ist insbesondere, über Szenarien die Auswirkung des globalen Wandels und den Einfluss von Stickstoffmanagement auf den Austrag von N in die Küstengewässer abzuschätzen. WaterGAP-N rechnet mit einer räumlichen Auflösung von 0.5° mal 0.5° und einer zeitlichen Auflösung von einem Monat. Es verwendet die vom hydrologischen Modul von WaterGAP berechneten Abflüssen und Durchflüsse, ebenso wie z.B. die für WaterGAP erstellten globalen Datensatz von Seen und Feuchtgebieten; Seen und Feuchtgebiete beeinflussen stark die Denitrifizierung (Retention von Stickstoff). Das Modellkonzept ist in Döll (2003) beschrieben.

Die Modellierung des Stickstoffhaushaltes ist noch nicht abgeschlossen. Die Phase der Modellkonzeption ist beendet, der Modellaufbau und Programmierung laufen aber noch. Die Modellentwicklung erfolgt im Rahmen der internationalen Arbeitsgruppe der Intergovernmental Oceanographic Commission der UNESCO GlobalNEWS.

Veröffentlichung zu diesem Thema: Döll (2003)

8. Verwertbarkeit der Ergebnisse

Innerhalb des GLOWA-Elbe Verbundprojekts wurden einige der im Wissenschaftlichen Zentrum für Umweltsystemforschung erzielte Ergebnisse von anderen Teilprojektpartnern weiter verwendet worden. Die ermittelten Wasserverfügbarkeitsänderungen z.B. wurden dem Institut für Gewässerkunde und Binnenfischerei GmbH zur Verfügung gestellt. Damit konnten die Änderungen von Nährstofftransport und -frachten aufgrund von Klimaänderungen berechnet werden. Die Ergebnisse sind in Venohr et al. (2003) (Anlage 1) ausführlich dargestellt. Die erstellten Bevölkerungsszenarios sind für alle anderen

Teilprojekten zur Verfügung gestellt worden, um eine homogene Betrachtung der Bevölkerungsentwicklung innerhalb des GLOWA-Elbe Verbundprojekts zu gewährleisten.

Die berechneten Szenarien der Wasserverfügbarkeit sind insofern für wasserwirtschaftliche Planungsbehörden von Interesse als sie zeigen, dass es zur Zeit aufgrund der Unsicherheiten in den von Klimamodellen berechneten Niederschlägen noch nicht möglich ist, sichere Aussagen über die zukünftige Wasserverfügbarkeiten zu treffen, selbst unter der Annahme, dass die zukünftigen Treibhausgasemissionen bekannt sind. Der neu entwickelte globale Datensatz der industriellen Wassernutzung unterstützt internationale Organisation wie UNESCO oder Weltbank in ihrem Bemühen um ein besseres Wassermanagement weltweit.

9. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Bezüglich des Einflusses des Klimawandels auf Wasserressourcen und Bewässerungswasserbedarf wurden während der Projektlaufzeit vom IPCC Data Distribution Centre erstmals transiente Klimaszenarien bereitgestellt, die zwei verschiedenen Emissionsszenarien in Klimaänderungen umsetzen. Dadurch konnte mit Hilfe von WaterGAP analysiert werden, welche Aussagen sich bezüglich des Einflusses von Emissionsszenarien auf Wasserverfügbarkeit und Bewässerungswasserbedarf gemacht werden können. Als Fortschritt auf dem Gebiet Bevölkerungsszenarien ist zu erwähnen, dass das Statistische Bundesamt nicht nur Prognosen für Deutschland als ganzes zur Verfügung stellen konnte, sondern auch die abgestimmten Prognosen für die einzelnen Bundesländer. Im Bereich Wassernutzungsszenarien sind die Arbeiten zur Kühlung thermischer Kraftwerke in den Neuen Bundesländern (Vögele & Markewitz, 2001, Forschungszentrum Jülich) zu nennen. In dieser Studie wird die heutige Stromsituation in Ostdeutschland analysiert und Szenarien bzgl. des Strombedarfs und der Wassernutzung zur Stromerzeugung erstellt. Bezüglich der globalen Stickstoffmodellierung entwickelten Van Drecht et al. (2001) ein Modell, das mit derselben räumlichen Auflösung von WaterGAP-N arbeitet, jedoch anders als WaterGAP ein stationäres Modell ist, das zudem die wichtige Retention von Stickstoff in Oberflächengewässern nicht abbildet.

Anhang: Veröffentlichungen im Rahmen des Vorhabens

Veröffentlichungen in Zeitschriften oder Tagungsbänden

1. Döll, P., Vassolo, S. (2003): The value of regional-scale information in global change studies: an example of water use scenarios for the Elbe river basin. *Regional Environmental Change*. (eingereicht)
2. Döll, P., Flörke, M., Märker, M., Vassolo, S. (2003): Einfluss des Klimawandels auf Wasserressourcen und Bewässerungswasserbedarf: Eine globale Analyse unter Berücksichtigung neuer Klimaszenarien. Tagungsband des Tags der Hydrologie 2003 in Freiburg. (im Druck)
3. Döll, P., Vassolo, S. (2002): Klimabedingte Änderungen des hydrologischen Regimes im gesamten Einzugsgebiet der Elbe von 1900 bis 2100. In Geller, W., Puncochar, P., Guhr, H., von Tümpling jun., W., Medek, J., Smrták, J., Feldmann, H., Uhlmann, O. (eds.): *Die Elbe – neue Horizonte des Flussgebietsmanagements*. 10. Magdeburger Gewässerschutzseminar. Teubner, Stuttgart, 323-326.
4. Vassolo, S., Döll, P. (2003): A gridded global data set of thermoelectric power and manufacturing water use. *Water Resources Research*. (eingereicht)
5. Venohr, M., Soukup, M., Vassolo, S., Döll, P., Behrendt, H. (2003): Änderung von Nährstoffeinträgen und –frachten im Einzugsgebiet der Elbe infolge des Globalen Wandels. Tagungsband des Tags der Hydrologie 2003 in Freiburg. (im Druck)

Projektinterne Veröffentlichungen

6. Döll, P. (2003): WaterGAP-N: A global grid-based model to simulate the input and fate of nitrogen in river basins under the impact of global change. Manuskript. Wissenschaftliches Zentrum für Umweltsystemforschung, Universität Kassel.
7. Vassolo, S.; Döll, P. (2002c): Population Scenarios for Germany and the Czech Republic with focus on the Elbe river basin. Manuskript. Wissenschaftliches Zentrum für Umweltsystemforschung, Universität Kassel.

Posterveröffentlichungen

8. Vassolo, S.; Döll, P. (2002a): Industrial Water Use: A New Global Data Set. XXVII General Assembly of the European Geophysical Society. Nizza, 21-26 April 2002.
9. Vassolo, S.; Döll, P. (2002b): Modelling of Water Resources and Demand in the GLOWA Projects. GLOWA Status Seminar. München, 6-8 May 2002.

[1]

The value of regional-scale information in global change studies: an example of water use scenarios for the Elbe river basin

Döll, P., Vassolo, S.

(submitted to Regional Environmental Change)

2003

The value of regional-scale information in global change studies: an example of water use scenarios for the Elbe river basin

PETRA DÖLL (✉) AND SARA VASSOLO

Center for Environmental Systems Research, University of Kassel, 34109 Kassel, Germany

E-mail: doell@usf.uni-kassel.de
+49-561-804-3913
+49-561-804-3176

Abstract For a first rapid evaluation of the impact of global change in a region, it might be useful to consult existing global-scale assessments. In this paper, we explore to what extent the inclusion of a limited amount of regional-scale information in a global-scale approach improves the relevance of the assessment for the region of interest. To develop scenarios of water withdrawals in the German part of the Elbe river basin, we applied the water use modules of the global water model WaterGAP in their standard form (global approach) and in a form, where limited regional information was included (regionalized approach). This information was collected for Germany as a whole, for the individual New Laender (federal states in eastern part of Germany) or for districts, depending on the water use sector. The resulting scenarios of sectoral water withdrawals in 2025 differ strongly between the global and the regionalized approaches, with the global approach leading to much higher water withdrawals. The main value of the regional-scale information lies in the more adequate and plausible scenario assumptions on the main driving forces of water use in the basin, population, thermoelectric power production and industrial gross domestic product. In the global-scale quantitative interpretations of the storylines of the IPCC SRES scenarios A1 and B2, these driving forces show vigorous increases between 2000 and 2025 while from the regional perspective, smaller increases and mostly decreases appear to be plausible. Therefore, for regional assessments of the impact of global change on water use, we recommend not to directly apply global-scale quantitative scenarios of the driving forces. Instead, a limited amount of regional information should be used to develop region-specific driving force scenarios that fit to global-scale storylines.

Keywords Regional scale Global scale Data value Scenarios Water demand Water management Regional planning

Introduction

Global-scale studies of environmental change issues provide a consistent assessment of the situation world-wide. Their relevance at the regional scale (e.g. at the scale of a river basin) is limited due to the coarse information about the region of interest that can be considered.

Nevertheless, existing global-scale studies can serve as a first inexpensive source of information for a region, which can later be built upon. In this paper, we explore the benefit of adding a limited amount of regional-scale information to a global-scale assessment of current and future freshwater use. For a selected river basin, we compare the scenarios that are based on the global model WaterGAP in its standard configuration with those that result when some basin-specific information on water use and its driving forces are included in the calculations with the macro-scale model WaterGAP. Please note that the amount of additional information is still much less than what would be considered in a full-blown and thus much more expensive regional-scale assessment in which a meso-scale water use model is applied.

Freshwater use assessments are the basis for a sustainable river basin management as water is a renewable, but mostly scarce resource. Any significant human water use affects the natural environment, either because water availability for humans is artificially increased by reservoir construction or groundwater development, or because water availability for freshwater ecosystems is reduced by human water withdrawals and water consumption. Generally, the part of the withdrawn water that is returned to the environment has a lower quality, and consumptive use (the part of the withdrawn water that evapotranspires) leads to a reduction of water flows. Thus, it is generally acknowledged that water demand management must play a prominent role in water management (here, water demand and water use are used synonymously). However, much less scientific effort has been spent on the analysis of water use than on the analysis of water availability, the latter being performed in particular by hydrological modeling (e.g. groundwater flow or rainfall-runoff modeling).

The global integrated water model WaterGAP (Alcamo et al. 2003; Döll et al. 2003; Vassolo and Döll 2003; Döll et al. 2002) computes both water use and water availability in river basins, with a spatial resolution 0.5° latitude by 0.5° longitude. WaterGAP has been designed to make the best use of all pertinent information that is globally available. It simulates the impact of demographic, socioeconomic and technological change on water use as well as the impact of climate change and variability on water availability and irrigation water use. In the framework of a regional-scale evaluation of the impact of global change on the water situation in the Elbe river basin, GLOWA-Elbe (<http://www.glowa-elbe.de>), WaterGAP was applied to provide a first rough assessment of water availability and use in the basin. Fig. 1 shows the Elbe river basin as well as the computational grid of WaterGAP. Using the WaterGAP hydrological module, which is currently the only existing hydrological model that covers the whole Elbe river basin (i.e. the German and Czech subbasins), the impact of climate variability and change on the long-term average water resources as well as on typical high and low flows was analyzed (Döll and Vassolo 2002). Equally, as there is not yet a meso-scale water use model for the basin, the global-scale WaterGAP model can give as a first rough idea about the current and future water use situation in the basin..

Figure 1

To improve the relevance of the WaterGAP results for the Elbe river basin, we included a limited amount of regional-scale information that was easily available in the context of the GLOWA-Elbe project. Here, we compare the water withdrawals computed by the standard (global-scale) version of WaterGAP with those obtained by including additional information for the German part of the Elbe river basin. The comparison is restricted to the German Elbe basin upstream of Geesthacht (a few kms upstream of Hamburg, Fig. 1) as this area was the

focus in the first phase of GLOWA-Elbe. Our study region is located mainly within the New Laender of Germany, i.e. former East Germany (Fig. 2 shows the outlines of the Laender).

In the next section, we shortly describe the water use module of WaterGAP and introduce the applied scenario method. Then, the scenarios that results with and without including the additional regional-scale information are presented. We discuss the value of the regional-scale information for the estimation of water withdrawals in the base year 2000 and for deriving scenarios of water withdrawals in 2025. Finally, we draw conclusions for future regional-scale scenario analyses.

Methods

Global water use model

The global water use model of WaterGAP simulates water use in individual grid cells of 0.5 degree by 0.5 degree, which may be aggregated to larger spatial units like river basins or countries. Five water use sectors are distinguished: households, thermoelectric power plants, manufacturing, irrigation and livestock. Both water withdrawal and water consumption are computed (water consumption is the part of the withdrawn water that is lost by evapotranspiration). An earlier version of the water use model is described in Alcamo et al. (2003) and Döll et al. (2001). In the current version, water use for thermoelectric power and manufacturing are computed separately (Vassolo and Döll 2003). A detailed description of the global irrigation water use model is provided in Döll and Siebert (2002). In-situ water use (e.g. for navigation) is not taken into account in WaterGAP. Water use in each sector is computed as a function of a sector-specific water use intensity (e.g. per-capita domestic water use of population with access to safe drinking water) and a driving force of water use (e.g. population). Sectoral water use intensities depend on a number of model parameters which, for example, describe the impact of technological change.

Domestic sector

Domestic water use is computed as a function of domestic water use intensity [$\text{m}^3/(\text{cap yr})$] and population. It is determined based on country-specific estimates of domestic withdrawal and consumptive water use in 1995 (Shiklomanov 2000). The country values are allocated to the WaterGAP grid cells based on population density (CIESIN 2001), urban and rural population in each country (WRI 1998) and the fraction of inhabitants with access to safe drinking water in rural and urban areas (World Bank 1996, WRI 1998).

Two main concepts are used for modeling the future change in water intensity in the domestic sector, structural change and technological change. Structural change in the domestic sector means that households in poorer countries first acquire more and more water-using appliances as their income increases. Eventually, the average household becomes saturated with water-using appliances, and water use stabilizes. The consequence of these structural changes is that average water intensity of households first grows with per capita gross domestic product GDP, and stabilizes as per capita GDP continues to grow. In WaterGAP, this process is represented by a sigmoid curve:

$$DSWI = DSWI_{\min} + DSWI_{\max} \cdot (1 - \exp(-\gamma_d \cdot GDP^2)) \quad (1)$$

where $DSWI$ = domestic structural water intensity [m^3/cap], GDP = per capita annual GDP and γ_d = curve parameter. Values of $DSWI_{min}$, $DSWI_{max}$, and γ_d are calibrated for each of 26 world regions (grouping of countries) based on the trend of historical data by Shiklomanov (2000) or to country data in the case of Germany, Japan, USA and Canada. Technological change is assumed to decrease water intensity by a certain annual rate resulting in a domestic water intensity that is a function of per capita GDP and time

Thermoelectric power sector

Thermoelectric power water use is based on the geographical location of 63,590 thermal power stations worldwide that worked around 1995 (UDI 2000). For 89% of the stations, the cooling system type, which determines both withdrawal and consumption intensity (water withdrawal or consumption per unit electricity production) is not known. In these cases, it was estimated as a function of the construction year of the station or the cell-specific energy production and river discharge. Water withdrawal and consumption of a station are computed as the product of the electricity production and the withdrawal (or consumption) intensity [m^3/MWh produced thermal energy]. Annual electricity production of each power station is estimated from the total electricity production in each country, fuel type-dependent typical working hours and the station-specific installed capacity. Intensities are only a function of the cooling system. The computed data set was compared to data of state-specific thermoelectric power withdrawals and consumption in the USA (Vassolo and Döll 2003); modeling efficiency is high, 0.77 for total withdrawals, in million m^3/yr and 0.76 for area-specific withdrawals, in $\text{m}^3/(\text{km}^3 \text{ yr})$. Thermoelectric power water intensity is assumed to decrease in the future due to technological change that only affects newly constructed stations. Station-specific water intensity remains constant during the whole life span of a station.

Manufacturing sector

Manufacturing water use is modeled by first estimating country-specific water withdrawal values, which are then distributed to the grid cells as a function of city nighttime lights (Vassolo and Döll 2003). Country-specific water withdrawals are estimated based on the production volumes of eight manufacturing sectors and the respective specific withdrawal intensity, taking into account estimates of country-specific values of total industrial water withdrawals. A comparison to published industrial water use in the 50 states of the USA and 89 administrative regions in Russia shows that grid cell values cannot be estimated well without subnational statistical information on manufacturing water withdrawals. However, the spatial distribution proportional to the city nighttime effectively prevents WaterGAP from erroneously distributing total country withdrawals to (almost) uninhabited areas (e.g. like Northern Canada).

To develop scenarios of future manufacturing water use, an overall manufacturing water withdrawal intensity is defined as total water withdrawal per Industrial Gross Domestic Product (IGDP) at constant (i.e. inflation corrected) prices. Manufacturing water intensity is assumed to decrease in the future at a certain annual rate due to technological change.

Irrigation sector

The Global Irrigation Model GIM of WaterGAP (Döll and Siebert 2002) computes net and gross irrigation requirements, which reflect an optimal supply of water to irrigated plants; actual per hectare water uses may be lower due to restricted water availability. Net irrigation

requirement (water consumption) refers to the part of the irrigation water that is evapotranspired by the plants (at the potential rate), while gross irrigation requirement (water withdrawals) refers to the total volume of water that is withdrawn from its source. The irrigation model uses a digital global map of irrigated areas (Siebert and Döll 2001) and simulates the cropping patterns, the growing seasons and the net and gross irrigation requirements, distinguishing two crop types, rice and other crops. Rice is distinguished because crop-specific data on irrigated areas are available only available for rice but not for other crops. The irrigation requirements are modeled similar to the FAO CROPWAT approach, based on time series of monthly climatic data. The gross irrigation requirement is computed by taking into account regionally varying irrigation efficiencies ranging from 0.35 in South and East Asia to 0.7 in Canada, North Africa and Oceania, which are rough estimates of project irrigation efficiencies. Model performance was tested against irrigation water use data for the federal states of the USA, and a modeling efficiency of 0.98 was reached.

Livestock sector

In most parts of the world, livestock water use is very small compared to the other water uses. Water withdrawals for livestock are computed by multiplying the number of livestock per grid cell by the livestock-specific water withdrawals per head and year. Ten livestock types are distinguished. Water use intensity of dairy cattle is a function of milk production, and that of non-dairy cattle a function of meat production.

Scenario development

Based on the water use module of WaterGAP, four scenarios of water withdrawals in the German Elbe river basin upstream of Geesthacht between 2000 and 2025 were developed. These scenarios reflect two different storylines, each of which is translated into quantitative scenarios by either

- 1) using purely global-scale information as available for deriving scenarios for the whole globe (here "global approach"), or
- 2) supplementing a limited amount of easily available basin-specific information not only to derive more appropriate and meaningful scenarios, but also to improve the simulation of the current water use situation (here "regionalized approach").

The type of modification applied to the global approach in order to obtain the regionalized approach is mainly related to the availability of additional information and differs for each of the five water use sectors. Table 1 list the different information used in the global and the regionalized approach. For the thermoelectric power and livestock water use sectors, both the modeling of current and future water use has been modified. For the domestic and manufacturing water use sectors, mainly the scenario production is different, and the regionalized estimates of sectoral water withdrawals in 2000 have been derived by updating the global approach value of 1995 to 2000 using some regional information. No adaptation of the irrigation water use modeling was attempted, as the agro-economic model applied in the GLOWA-Elbe project (RAUMIS model, FAA 2002) does not distinguish rainfed and irrigated agriculture, and the importance of irrigated agriculture in the Elbe basin is considered to remain low even under a possibly dryer future climate. Any driving forces and parameters not mentioned in Table 1 are the same in the global and the regionalized approach.

Table 1

With respect to the scenario storylines, all scenarios developed in the framework of the GLOWA-Elbe project were supposed to follow either the global-scale IPCC SRES storyline A1 or B2 (Nakicenovic and Swart 2000). In their section 4.2.1, Nakicenovic and Swart summarize the two storylines as follows:

- "The A1 storyline and scenario family describes a future world of very rapid economic growth, low population growth, and the rapid introduction of new and more efficient technologies. Major underlying themes are convergence among regions, capacity building, and increased cultural and social interactions, with a substantial reduction in regional differences in per capita income. (...)
- The B2 storyline and scenario family describes a world in which the emphasis is on local solutions to economic, social, and environmental sustainability. It is a world with moderate population growth, intermediate levels of economic development, and less rapid and more diverse technological change than in the B1 and A1 storylines. While the scenario is also oriented toward environmental protection and social equity, it focuses on local and regional levels."

In scenarios of future water use, both the changes of water use intensities and driving forces reflect the two storylines. The main driving forces of water use are population (domestic sector), electricity production (thermoelectric power sector), industrial gross domestic product IGDP (manufacturing sector), area of irrigated land and climate (irrigation sector) and number of livestock (livestock sector). In the global approach, the changes of the driving forces (except for irrigation) are provided by the global integrated model IMAGE model (IMAGE team 2001), which served to quantify the SRES storylines and to downscale them to 17 world regions. In the global approach, cell-specific changes were obtained by assuming that the changes in driving forces (and parameters) are the same in each cell within the IMAGE world region, or, in the case of population, in each cell within a country. For population, the country-specific population changes as projected by the medium-fertility projection of UN (1998) are scaled with world-region specific scenarios of IMAGE, such that different scenarios like A1 and B2 can be simulated while taking into account the different population developments in the individual countries within a world region. The population of a country in scenario X is computed as

$$P_{country,x}(2025) = P_{UN,country,x}(2025) \frac{P_{IMAGE,world\ region,2025}}{P_{UN,world\ region,2025}} \quad (2)$$

In the regionalized approach, the driving forces are prescribed with a much finer resolution, i.e. for districts, federal states or the whole of Germany, depending on the water use sector (Table 1). Regional-scale scenarios of technological change were derived for the thermoelectric power and manufacturing sectors, and for the thermoelectric power sector, specific information on cooling system type, water intensity, life span and replacement of thermal power stations was used.

Results

Table 2 lists the basin-wide averages of sectoral water withdrawals in the German Elbe river basin upstream of Geesthacht, for the years 1995 (base year of global approach), 2000 (base year of regionalized approach) and 2025. As the base year in the global approach is 1995, the global approach water withdrawal values in 2000 already depend on the scenario. In both the regionalized and the global approach, manufacturing is the most important water use sector in 2000 and 2025, followed by the domestic sector, or, in 2025 with the global approach, by the thermoelectric power sector. For both approaches, water withdrawals in scenario A1 are larger than in scenario B2, which is consistent with the storylines. The regionalized approach leads to significantly smaller water withdrawals than the global approach. In scenario A1, total water withdrawals increase by 5% between 2000 and 2025 in the global approach, but decrease by 24% in the regionalized approach. In scenario B2, they decrease in both approaches, by 32% and 51%, respectively. Combined with the higher estimate of withdrawals in 2000, much higher values of water withdrawals in 2025 are computed with the global approach than with the regionalized one (Table 2). In the latter, water withdrawals in the main water use sectors households, thermoelectric power and manufacturing decrease between 2000 and 2025 both in scenario A1 and B2. In the global approach, the reductions in the household and manufacturing sectors are relatively small and thermoelectric power water use even increases in A1 and B2. The discrepancies between the two approaches are mainly due to the assumed future developments of the main driving forces population, thermoelectric power production and IGDP, which increase strongly in the global approach, while in the regionalized approach they either decrease or increase only weakly (Table 3).

Table 2 Table 3

In the following sections, the differences between the withdrawals computed with the global and the regionalized approach are explained by presenting, for each sector, which additional information was included in the regionalized approach and how it was used to calculate water withdrawals.

Domestic sector

For the domestic sector, the differences between the water withdrawals as computed by the global and the regionalized approach mainly result from the different scenarios of the driving force population. In the global approach, population in all grid cells of the study region is assumed to increase with the same rate as OECD Europe according to IMAGE (Table 1). The regionalized approach combines German population projections for the 16 Laender (federal states) and for smaller administrative units of Germany (Vassolo and Döll, unpublished report "Population Scenarios for Germany and the Czech Republic with focus on the Elbe river basin" Center for Environmental Systems Research, University of Kassel, Germany, 10 p., December 2002). Two alternative population projections for the time period 2000-2050 for the Laender (Statistisches Bundesamt 2000) were assumed to be consistent with scenarios A1 and B2, respectively, and short-term, but inconsistent projections for smaller spatial units (without alternative scenarios) were used to represent migration within the individual

Laender. Thus, the spatial distribution of population within the Laender does not differ between the two scenarios. The population distribution in 1995 on the 0.5 degree grid is obtained by aggregating the 2.5' x 2.5' global population data set for 1995 of CIESIN (2001), which, for Germany, is based on the population in the 447 districts of the country (global approach). For the regionalized approach, population distribution in 2000 is obtained from the CIESIN data set for 1995, total population in Germany in 2000, and projections of migration within Germany.

Fig. 2 shows the derived changes in population in the German Elbe basin between 2000 and 2025 for scenarios A1 and B2. In the regionalized approach, the total population within the German Elbe basin decreases by 5% in scenario A1 and by 8% in scenario B2 (Table 3). The strong decreases occur in spite of significant net immigration because birth rates are assumed to remain at only 1400 children per 1000 women. In some regions, however, population increases are expected due to the continuing process of suburbanization. In the global approach, population increases by 6% in A1 and by 2% in B2 (Table 3), and population change is constant in all cells (Fig. 2). Why do the global scenarios result in a population increase, while the regional scenarios show a population decrease? The main reason is that according to the IMAGE implementation of the SRES scenarios, population increases in the world region OECD Europe, to which Germany belongs, by 7% in A1 and by 3% in B2. In combination with a decrease in population in Germany of 2.4% according to UN (1998) and a projected decrease in OECD population of 1.9% according to the same source, these IMAGE scenarios lead to the very high assumed population increases in the study region.

Figure 2

Figs. 3 and 4 show the differences in the domestic water withdrawals that are computed with the global and the regionalized approach for the 46 cells that make up the German Elbe river basin upstream of Geesthacht. The maps of domestic water withdrawals in 2000 (Fig. 3) are rather similar. In the regionalized approach, water withdrawal intensity in 2000 is set to 59 m³/yr, a value that is equal to the average German value in 2001 (Statistisches Bundesamt 2003a). The differences between the global A1 and B2 estimates are due to the higher total population and water intensity in A1, and the regionalized approach map reflects the migration between 1995 and 2000, which is not taken into account in the global approach. While in the global approach, the percentage change in domestic water withdrawal between 2000 and 2025 is the same everywhere, the regionalized approach distinguishes areas with large decreases from areas with small decreases due to the spatially distributed changes of the driving force population (Fig. 4). The development of domestic water intensity is the same in both the global and the regionalized approach.

Figure 3 Figure 4

The different decreases of domestic water intensity, 0.6%/yr in A1 and 4.0%/yr in B2, are the main reason for the different water uses in the two scenarios (Table 2). According to

Statistisches Bundesamt (2003a), water use of end users in Germany decreased by 7.4% between 1995 and 2001, which is equivalent to annual decrease of 1.3%/yr). The different base years in the two approaches have the effect that the global approach estimate for water withdrawals in 2025 for B2 is lower than that in the regionalized approach, as the very strong water intensity decrease already starts in 1995 in the global approach, but only in 2000 in the regional approach.

Thermoelectric power sector

Of all water use sectors, the most detailed additional information is included in the regionalized assessment of thermal power water use (Table 1). The information is provided by a study of Vögele and Markewitz (2001) on the electricity production market and its future in the five New Laender of Germany. This study also considered thermoelectric power water use. However, no specific regional information was available for the power stations within the basin that are located in Berlin, Schleswig-Holstein and Niedersachsen. Following Vögele and Markewitz, all power stations in the German Elbe basin upstream of Geesthacht had cooling towers in 2000, and water withdrawal intensity was 3.23 m³/MWh as compared to 4.5 m³/MWh in the global approach. Using information on thermoelectric power production in each of the New Laender, power production is estimated to be 89 MWh in 2000, while only 34 MWh are estimated in the global approach. The underestimation is due to method to compute station-specific power production. In the global approach, it is computed by assuming typical fuel type-dependent working hours, which are then adjusted equally within each country (here Germany) to obtain the literature value of thermoelectric power production in Germany in 1995. Typically, working hours of nuclear power plants are higher than those of coal-fuelled stations, but as there are no nuclear power plants in the New Laender, coal-fuelled power stations should take the role of nuclear power stations and operate longer hours. However, this effect is not taken into account in the global approach. In total, the water withdrawals for thermoelectric power production are strongly overestimated in the global approach even though power production is strongly underestimated (Table 2). This is mainly due to only a few power plants which, in the global approach, are assumed to still have one-through flow cooling systems. As the water withdrawal intensity of one-through-flow cooling systems is approximately 40 times that of cooling tower systems, a small number of cooling system conversions makes a big difference in water withdrawals (but not consumptive water use). In Fig. 5, which shows the maps of thermoelectric power water withdrawals in 2000, the locations of the one-through-flow stations that are assumed to still exist in the global approach but are known to have been retired in the regionalized approach are quite obvious.

Figure 5

Vögele and Markewitz (2001) presented two alternative scenarios of fuel-type specific electricity production in each of the New Laender. For their scenarios, they considered the large thermal power stations individually and defined life span and replacement of certain power plants depending on the scenario. In one of the scenarios, which is assumed to represent scenario A1, climate protection policies are rather weak, while in the other scenario (B2), a strong orientation towards climate protection leads to a lower energy demand, a more significant use of renewable energy and combined heat and power production, and the replacement of lignite by natural gas (resulting in smaller power stations). In the regionalized

approach, electricity production by thermal power plants increases by 11% between 2000 and 2025 in A1, and decreases by 20% in B2 (Table 3). In the global approach, production increases by 78% and 47% respectively, representing average conditions in OECD Europe (Table 2). Mainly due to the very strong increase of electricity production in the global approach, thermoelectric power water withdrawal increases, while it decreases according to the regionalized approach (Table 2). The increase is only somewhat lowered by a technological change rate of 1 %/yr in both scenario A1 and B2, which is somewhat higher than the rate in the regionalized scenario, 0.8%/yr (Table 4). This regional rate was derived from information on water withdrawal intensity of a large lignite power station and that of its replacement in 2000, as provided in Vögele and Markewitz (2001).

Table 4

The computed changes of thermoelectric power use between 2000 and 2025 are rather homogeneous in the global approach, and the few cells with decreasing withdrawals are due to the replacement of one-through-flow cooling systems by cooling towers (left-hand side of Fig. 6). The spatial distribution of change in water withdrawal in the regionalized approach is very heterogeneous (right-hand side of Fig. 6). A strong decrease between 2000 and 2025 reflects the retirement of power stations (more in scenario B2 than in A1). A strong increase (from a small value in 2000) indicates the switch from oil-fuelled to gas-fuelled power plants which typically have longer working hours (although both are peak load stations). Neither a retirement of plants nor a switch of fuels can be simulated in the global approach.

Figure 6

Manufacturing sector

No specific studies on the manufacturing sector in the Elbe basin were performed in the GLOWA-Elbe project. An analysis of the historical development of water withdrawals for manufacturing (Statistisches Bundesamt 1998a) and IGDP (Statistisches Bundesamt 2003b) in the Old Laender of Germany was the basis for deriving regionalized estimates of IGDP and water withdrawal intensity in the manufacturing sector (Table 1). The analysis was not done for the New Laender, which essentially make up the German Elbe river basin, because the abrupt changes due to re-unification do not allow for an extrapolation of the past and because the economic and technological development in the New Laender is expected to continue to become more similar to development in the Old Laender. Fig. 7 shows the development of IGDP between 1960 and 1998, at constant prices of 1991, i.e. subtracting the effect of inflation. Total GDP is shown for comparison. IGDP as a fraction of GDP decreased steadily with time, from 45% in 1960 to 38% in 1990 and 33% in 1998 (while the service sector concurrently expanded). In the 1990s, IGDP in the Old Laender did not increase anymore, a tendency that is confirmed by the almost constant IGDP values for Germany as a whole from 2000 to 2002 (while GDP increased). Thus, in the regionalized approach, we foresee only weak changes of IGDP. In the economically oriented scenario A1, we assume that IGDP in Germany and thus also in the German Elbe river basin increases by 10% between 2000 and

2025, and that it decreases by 10% in the environmentally oriented scenario B2 (Table 3 and Fig. 7). This bifurcation with respect to approximately 0%-change since 1990 reflects the idea that German policies were oriented in the past towards economic growth but also discouraged industrial polluters to continue operating in Germany. Very different from the regionalized scenarios, the global scale scenarios of IGDP in OECD Europe and thus the German Elbe river basin imply a very strong increase of IGDP, by 57% in the case of A1 and by 32% in the case of B2 (Table 3 and Fig. 7). They seem to follow the long-term trend for the West Germany until 1990, and do not take into account the more recent development.

Figure 7

According to the regional information, water withdrawal intensity for manufacturing in the Old Laender of Germany decreased at a rate of 2.7%/yr between 1975 and 1995 (Fig. 8) and continued decreasing approximately at that rate in more recent years. This strong decrease is due to an increased recycling of water inside the production process, but also due to the shift away from water-intensive industries like steel. Similar rates are deemed feasible for the time period up to 2025, in particular because internal recycling can still be improved. According to Lallana et al. (2001), work in closed circuits can reduce water withdrawals by about 90%. In the regionalized approach, we assume a constant rate of only 2.2%/yr for scenario A1, while with an increased emphasis on environmental protection in B2, a value of 3.2%/yr appears feasible (Table 4 and Fig. 8). Similar technological change rates are assumed in the global approach, 2.0%/yr for A1 and 3.0%/yr for B2 (Table 4).

Figure 8

The slightly lower regional approach estimate of manufacturing withdrawal in 2000 as compared to the global approach value (Table 2) is mainly due to setting IGDP in 2000 equal to its value in 1995, while it increases significantly in the global approach. For both the regional and the global approaches, water withdrawals in 2025 are computed to be lower than 2000, but the decreases in the global approach are much weaker due to the very strong increases of IGDP in both scenarios.

Livestock sector

In the regionalized approach, the computation of livestock water use could be based on district-specific information of the number of livestock, milk production per dairy cattle unit and meat production per non-dairy cattle production (Table 1). This information was provided by the agroeconomic model RAUMIS (personal communication, Peter Kreins, FAA, 2003) for 1999 and, for scenarios A1 and B2, for 2020. In the A1 scenario of RAUMIS, a strong liberalization of the agriculture was implemented (no trade barriers, less subsidies for regional products), while in scenario B2, a protection of regional and environmentally oriented agriculture is foreseen, with a tax on the use of mineral fertilizer. With respect to livestock

production, both scenarios lead to an increase of total livestock numbers, but this is mainly due to chicken and turkeys, which have a low per capita water use. The number of the major water user, cattle, decreases by 41% in scenario A1 between 2000 and 2025, and by 35% in scenario B2 (Table 3). The decrease is mainly related to the constant milk quota, which together with an increased milk production per cow, leads to a lower number of both dairy and non-dairy cattle. In B2, livestock as fertilizer producer is more attractive than in A1, as a tax for mineral fertilizer is charged, and because subsidies for suckler cows are eliminated in A1. In the global approach, livestock number increase by 5% in A1 and decrease by 3% in B2, as a less vigorous economic development is assumed in B2 (Table 3).

Livestock water withdrawals in 2000 do not differ significantly between the global and the regionalized approach (Table 2). Withdrawals in 2025 reflect the assumed development of the livestock numbers.

Discussion

We discuss the value of including a limited amount of regional information into the global-scale assessment of water use in the German Elbe river basin by answering three questions.

Does the inclusion of regional information lead to significantly different scenarios?

Scenarios are not predictions of the future but should help to understand the range of alternative futures that we might possibly have to face. In the case of the developed water use scenarios for the German Elbe river basin, the two scenarios derived with the global approach show a quite different range of alternative futures than those scenarios that resulted when a limited amount of regional information was included. The global approach leads to total water withdrawals in 2025 of 4.39 and 2.85 km³/yr in scenarios A1 and B2, respectively, and the regionalized approach to only 2.62 and 1.71 km³/yr. Thus, the additional regional information results in a range of alternative water withdrawals that is completely outside the range of the values derived with the global approach. This shows that the value of the regional information is high, assuming that due to the additional information the scenarios of the regionalized approach are more relevant than those of the global approach (see discussion below). In addition, the regional information leads to more detailed spatial patterns of current and future water withdrawals, which is valuable, too. This is particularly true for the domestic and the thermoelectric power sectors. Only the value of the regional information included to improve the computation of livestock water use appears to be low, as livestock water withdrawals are very small compared to total water withdrawals.

To what extent does the regionalized approach lead to better estimates of water withdrawals in 2000?

Statistical data of sectoral water withdrawals in the Laender of Germany in 2000 are used to derive best estimates of total sectoral water withdrawals in the German Elbe river basin in 2000. We evaluate the withdrawals that are computed with the global and the regionalized approach (listed in Table 2) against these best estimates. Please note that statistical data of water withdrawals in spatial subunits of the Elbe basin were not included in the regionalized approach as this would be appropriate for a meso-scale modeling approach only.

Domestic water withdrawal intensity is much lower in the New Laender than in the Old Laender, and the average domestic water withdrawal intensity there can be estimated to be only about 75% of the German average (Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2001). The lower water intensity can be related to the massive introduction of new (and therefore water-saving) appliances in the New Laender after re-unification as well as to higher prices for water and waste water and to lower incomes as compared to the Old Laender. Thus, our regionalized approach seems to overestimate domestic water withdrawals by approximately one fourth (Table 2). Statistical data of manufacturing water withdrawals in five Laender in the Elbe basin (Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2001) indicates that manufacturing water withdrawals are likely to be overestimated by approximately 50% by the regionalized approach (Table 2). This can be explained mainly by the lower industrial activities as compared to other human activities (in WaterGAP, the total manufacturing water use of a country is spatially distributed based on city nighttime lights, which are only a weak predictor of industrial water use). The computed water withdrawals for irrigation refer to the irrigation water requirement under long-term average climatic conditions on the area equipped for irrigation. In the wet year 1998, only about half of the total area equipped for irrigation in Germany (which is represented in the WaterGAP calculations) was actually irrigated (Statistisches Bundesamt 1998b; Roth et al. 1995). A comparison of WaterGAP results for a wet year comparable to 1998 with the irrigation water withdrawals in 1998 according to Statistisches Bundesamt (1998b) indicates WaterGAP might overestimate the water requirements per unit of irrigated area. Combining all this information, we conclude that we might overestimate irrigation requirements (for long-term average climate on the area equipped for irrigation) by 50%.

Thus, our best estimates for domestic, manufacturing and irrigation water withdrawals in the German Elbe basin upstream of Geesthacht are $0.71 \text{ km}^3/\text{yr}$, $1.14 \text{ km}^3/\text{yr}$ and $0.29 \text{ km}^3/\text{yr}$, respectively. Our best estimates for thermoelectric power and livestock water withdrawals are the values that we obtained with the regionalized approach (Table 2). Then, the best estimate of total water withdrawal in 2000 is $2.5 \text{ km}^3/\text{yr}$, compared to $3.5 \text{ km}^3/\text{yr}$ in the regionalized approach and $4.2 \text{ km}^3/\text{yr}$ in the global approach. Even though the regionalized approach leads to a better estimate of water withdrawals in the German Elbe basin in the year 2000 than the global approach, the estimate is still much too high. The main reason for overestimating water withdrawals even with the regionalized approach is that the study area covers mainly the New Laender of Germany, which have a social and industrial structure that is still rather different from the (dominant) rest of Germany. However, regional information on the specific water use situation there (and not only for Germany as a whole) has only been included for the thermoelectric power sector.

To what extent does the regionalized approach lead to more plausible and relevant scenarios of water withdrawals?

We cannot assess the value of regional information for estimating changes in the water withdrawals within the German Elbe basin between 2000 and 2025 against any best estimate because there are no Elbe-specific water withdrawal scenarios that have been quantified with a meso-scale model. We can, however, show how a meso-scale scenario analysis would differ from the regionalized approach, e.g. with respect to the considered data and processes. We will discuss if and why the regionalized approach leads to more plausible and relevant scenarios than the global approach, based 1) on the type of regional information that was included in the regionalized approach, and 2) on a general discussion of the global SRES scenarios as implemented by the IMAGE Team (2001).

The developments of the driving forces and the other inputs of the water use model that determine the future changes of water withdrawals are, for each approach, a quantitative interpretation of the same storylines of future societal development. Certainly, this interpretation depends on both the spatial and temporal scale but also on the subjective thinking of those who performed the quantification. In the global approach, the quantification of the driving forces was done for 17 world regions originally (IMAGE Team 2001), and was downscaled within WaterGAP in very simple ways to the country and the grid cell level. The other model inputs, i.e. technological change rates, were set at a similar or even lower spatial resolution. In the regionalized approach, the driving forces are quantified for much smaller spatial units: population in administrative units that are similar to districts, thermoelectric power production in Laender, IGDP in the whole of Germany and livestock numbers in districts. Technological change rates in the thermoelectric power and manufacturing sectors were set for the whole of Germany, too. The different spatial scales alone, however, cannot explain why the world region scenarios of IMAGE always show much stronger positive changes in the driving than the regionalized approach. The strong tendencies in the global IMAGE scenarios may be due to the following:

- The SRES scenarios do not take into account the historical development in the 1990s, when a general slow down occurred as compared to the decades before (The Economist 2003). However, the SRES scenarios have a time horizon up to the year 2100 (while their application here only considers the time period up to 2025) such that one might argue that decadal-scale developments should not be taken into account in the SRES scenarios. This argument, however, is only correct if the decadal-scale developments are only fluctuations from a mean trend, but not if they are a sign of a structural, long-term change in trend.
- The world region OECD Europe, which includes Germany, is certainly a heterogeneous region that encompasses a lot of different countries. The trends in the individual countries or in subunits of countries like the German Elbe basin might often be different from the overall trend in the world region. Without a detailed study for e.g. all the countries of OECD Europe, we cannot judge if the world region scenarios would be a good aggregation of plausible country scenarios.
- With respect to population development in B2, the quantification of the SRES scenarios for the world regions in IMAGE does not follow the original SRES B2 quantification, as it is stated in Nakicenovic and Swart (2000, p. 194), that the population in B2 follows the medium-fertility projection of UN (1998). This means that the B2 population of Germany in 2025 (global approach) should be equal to the UN (1998) value for 2025 (Eq. 1), which is 2.4% below the UN value for 2000. However, the population of OECD Europe decreases by 2% between 2000 and 2025 according the UN (1998) but increases by 3% according to the IMAGE quantification of B2. Thus, there are some discrepancies between the quantification of population scenarios in 17 world regions by IMAGE and the original quantification for four world regions in the original SRES scenarios.

The main value of the regionalized approach for deriving water withdrawal changes lies in its consideration of information on the driving forces of water withdrawal changes. In the regionalized approach, the developments of the driving forces are more adequate and plausible for the German Elbe river basin than in the purely global approach. To derive scenarios of the driving forces, the specific developments in Germany, the individual (New) Laender, and smaller subregions of the German Elbe basin are considered up to the year 2000 approximately, in the regionalized approach, while in the global approach, mainly the

developments in OECD Europe as a whole up to around 1990 are taken into account. Therefore, the water withdrawal scenarios of the regionalized approach are certainly more relevant and meaningful than those of the global approach. And as they differ strongly between each other, the inclusion of regional information was worth the effort.

Still, the water withdrawals scenarios would certainly look different if they were based on a meso-scale water use model. A meso-scale scenario analysis of water use in the Elbe basin would probably include, among others,

- statistical data on district or community-level domestic and manufacturing water withdrawals
- water price as a driving force of water use
- household size as a driving force of domestic water intensity
- population scenarios in which the spatial distribution of population within the Laender depends on the scenario
- scenarios of branch-specific manufacturing activities
- future changes of irrigation water use as a function of produced crops, climate and technology

Some of these topics were included in a regional-scale scenario analysis of water use in Northeastern Brazil (Döll and Hauschild 2002).

Conclusions

The relevance of water withdrawal scenarios for the German part of the Elbe river basin improves when limited regional-scale information is included in a global-scale water use assessment. Here, regional-scale either refers to the German Elbe basin or Germany as a whole. Due to the regional-scale information, water withdrawals in the base year 2000 are modeled more accurately (in particular in the thermoelectric power sector for which the additional information was most detailed) but actual water withdrawals are still significantly overestimated. The principal value of the regional-scale information lies in the more adequate and plausible scenario assumptions on the main driving forces of water use in the basin, population, thermoelectric power production and IGDP. Other information, e.g. on technological change, is important but, in the case of the Elbe basin, does not cause major differences between the withdrawal scenarios resulting from the purely global and the regionalized approach.

The regionalized assumptions on the development of the driving forces lead to much lower estimated water withdrawals in 2025 in (almost) all sectors and scenarios as compared to the purely global approach. In the purely global approach, the driving forces of water use, which are based on a quantification of the IPCC SRES scenarios by the IMAGE Team, are assumed to increase much more strongly than appears to be plausible from the regional perspective. This is only partly due to the fact that the spatial units, for which changes are specified in the global approach, are large world regions (here OECD Europe). It also seems that the economic developments in the 1990s were not taken into account in the SRES scenarios and

that at least in the case of scenario B2, the IMAGE population scenario for OECD Europe does not follow original SRES ideas as published in Nakicenovic and Swart (2000).

For regional assessments of water use, we recommend to embed the scenario analysis in global storylines like those of the IPCC SRES scenarios. However, we caution against directly applying the quantitative changes of the driving forces, as for example provided by the IMAGE model, to the region of interest. It is preferable to collect some limited additional regional information and then derive region-specific quantifications of the driving forces (and other input of the applied water use model) that fit to the global storylines. If no meso-scale water use model is available, these quantifications can then serve as input to the macro-scale water use model of WaterGAP.

Acknowledgments The research was funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF 07GWK03 - 203008).

References

- ALCAMO J, DÖLL P, HENRICH T, KASPAR F, LEHNER B, RÖSCH T, SIEBERT S (2003) Development and testing of the WaterGAP 2 global model of water use and availability. *Hydrological Sciences Journal*, 48(3), 317-338.
- ALCAMO, J, HENRICH T, RÖSCH T (2000) World Water in 2025 – Global modeling and scenario analysis for the World Water Commission on Water for the 21st Century. Kassel World Water Series 2, Center for Environmental Systems Research, University of Kassel, Germany. <http://www.usf.uni-kassel.de/usf/archiv/dokumente.de.htm>
- CIESIN (2001) Center for International Earth Science Information Network, Columbia University. GPW version 2. <http://sedac.ciesin.columbia.edu/plue/gpw/index.html>
- DÖLL P, KASPAR F, LEHNER B (2003) A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation. *Journal of Hydrology* 270(1-2):105-134.
- DÖLL P, LEHNER B (2002) Validation of a new global 30-min drainage direction map. *Journal of Hydrology* 258(1-4): 214-231.
- DÖLL P, SIEBERT S (2002) Global modeling of irrigation water requirements. *Water Resources Research* 38(4):8.1-8.10. DOI 10.1029/2001WR000355.
- DÖLL P, HAUSCHILD M (2002) Model-based scenarios of water use in two semi-arid Brazilian states. *Regional Environmental Change* 2(4):150-162. DOI 10.1007/s10113-002-0046-z.
- DÖLL P, VASSOLO S (2002) Klimabedingte Änderungen des hydrologischen Regimes im gesamten Einzugsgebiet der Elbe von 1900 bis 2100. In: Geller et al. (eds): Die Elbe – neue Horizonte des Flussgebietsmanagements. 10. Magdeburger Gewässerschutzseminar. Teubner, Stuttgart, Germany, pp. 323-326.
- FAA (FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR AGRARPOLITIK UND AGRARSOZIOLOGIE E.V. (2002): RAUMIS. Forschungsgesellschaft für Agrarpolitik und Agrarsoziologie, Bonn, Germany. <http://fwww.faa-bonn.de>
- IMAGE TEAM (2001) The IMAGE 2.2. implementation of the SRES scenarios: A comprehensive analysis of emissions, climate change and impacts in the 21st century. RIVM CD-ROM publication 481508018, National Institute for Public Health and the Environment, Bilthoven, The Netherlands.
- LALLANA C, KRINNER W, ESTRELA T, NIXON S, LEONARD J, BERLAND M (2001) Sustainable water use in Europe. Part 2: Demand management. Environmental issue report 19. European Environment Agency; Copenhagen
- NAKICENOVIC N, SWART R (EDS.) 2000 Emission Scenarios. IPCC Special Report on Emission Scenarios. Cambridge University Press.
- ROTH D, EGGERS T, SEEBELBERG F, ALBRECHT M (1995) Status of sprinkler irrigation in Germany – an analysis of the Federal Sprinkler Irrigation Association. *Zeitschrift für Bewässerungswirtschaft* 2/95, 113-120.

SHIKLOMANOV I (2000) 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.

SIEBERT S, DÖLL P. (2001): A digital global map of irrigated areas – An update for Latin America and Europe. Kassel World Water Series 4, Center for Environmental Systems Research, University of Kassel, Germany, 14 pp + Appendix. (<http://www.usf.uni-kassel.de/usf/archiv/dokumente.de.htm>)

STATISTISCHE ÄMTER DES BUNDES UND DER LÄNDER (2001) STATISTIK REGIONAL – AUSGABE 2001. (<HTTP://WWW.BRANDENBURG.DE/STATREG/>)

STATISTISCHES BUNDESAMT (2003A) ÖFFENTLICHE WASSERVERSORGUNG UND ABWASSERBESEITIGUNG: WASSERABGABE AN PRIVATE HAUSHALT / WASSERGEWINNUNG. WIESBADEN, GERMANY. (<HTTP://WWW-ZR.DESTATIS.DE/BASIS/D/UMW/UMWTAB5.HTM>).

STATISTISCHES BUNDESAMT (2003b) Entstehung des Inlandsprodukts – Bruttowertschöpfung Produzierendes Gewerbe. Segment 1496, Zeitreihenservice, Wiesbaden, Germany. (<http://www-zr.destatis.de>).

STATISTISCHES BUNDESAMT (2000) Bevölkerungsentwicklung Deutschlands bis zum Jahr 2050. Ergebnisse der 9. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung. Wiesbaden, Germany.

STATISTISCHES BUNDESAMT (1998a) Langfristige Entwicklung in der Wasserwirtschaft 1975-1995. Wiesbaden, Germany.

STATISTISCHES BUNDESAMT (1998b) Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung in der Industrie und in der Landwirtschaft. Fachserie 19, Reihe 2.2. Wiesbaden, Germany.

THE ECONOMIST 2003 Hot potato: The Intergovernmental Panel on Climate Change had better check its calculations. The Economist 15 February 2003, 366(8311):72. (<http://search.epnet.com/direct.asp?an=9126033&db=bsh>)

UDI (UTILITY DATA INSTITUTE) 2000 World Electric Power Plants Database. Platts Energy InfoStore, <http://www.platts.com>.

UN (1998) World Population 1950-2050 (The 1998 Revision). UN Population Division, Department of Economic and Social Affairs, New York, USA.

VÖGELE S, MARKEWITZ P (2001) Die Analyse des deutschen Strommarktes mit Focus auf die neuen Bundesländer sowie die Ableitung von möglichen Strommarkt-Entwicklungsszenarien bis zum Jahr 2050. Endbericht Programmgruppe STE, Forschungszentrum Jülich, Jülich, Germany.

VASSOLO S, DÖLL P (2003) A gridded global data set of thermoelectric power and manufacturing water use. Water Resources Research. (submitted)

WORLD BANK (1996) World Development Report 1996. Oxford University Press.

WRI (WORLD RESOURCES INSTITUTE) (1998) World Resources 1998-99, Oxford University Press, New York, USA.

Table 1 Differences between the purely global-scale water use modeling and scenario approach and the regionalized global-scale approach for the German Elbe river basin. The base year for the scenarios is 1995 in the global approach and 2000 in the regionalized one.

Water use sector	Global approach		Regionalized approach	
	Present-day (1995)	Scenario (2000, 2025)	Present-day (2000)	Scenario (2025)
Domestic	D: Total population in Germany in 1995 P: Domestic water intensity in Germany in 1995	D: Population changes based on country (UN 1998) and (scenario-specific) world region projections (IMAGE)	D: Total population in Germany in 2000 P: Domestic water intensity in Germany in 2000	D: Population changes based on projections for Laender and smaller administrative units of Germany*
Thermoelectric power	D: Electricity production in Germany (VD) P: Cooling type and water intensity (global analysis, VD)	D: Change in electricity production in world regions (IMAGE) P: Technological change and life span (global analysis)*	D: Electricity production in Laender (FZJ) P: Cooling type of large power stations in Laender water intensity (FZJ)	D: Change in fuel-type specific electricity production in Laender (FZJ) P: Technological change, life span (FZJ)
Manufacturing	D, P: global analysis (VD)	D: Change in industrial GDP in world regions (IMAGE) P: Technological change (global analysis)*	D: global analysis plus change in industrial GDP in Germany* P: global analysis plus techn. change in Germany*	D: Change in industrial GDP in Germany* P: Technological change in Germany*
Livestock	D: Livestock numbers for German federal states*	D: Change in livestock numbers in world regions (IMAGE)	D: Livestock numbers for German districts (RAUMIS)	D: Livestock numbers in districts (RAUMIS)

D: Driving force

P: Model parameter

*: this paper

IMAGE: IMAGE Team (2001)

VD: Vassolo and Döll (2003)

FZJ: Vögele and Markewitz (2001)

RAUMIS: FAA (2001)

Table 2 Current and future water withdrawals in the German Elbe river basin upstream of Geesthacht as computed with the global and the regionalized approach.

Water use sector	Water withdrawals (km ³ /yr)						
	1995	2000		2025 Scenario A1		2025 Scenario B2	
	Global	Global (A1/B2)	Regiona- lized	Global	Regiona- lized	Global	Regiona- lized
Domestic	1.00	0.98/0.93	0.94	0.93	0.76	0.31	0.32
Thermoelectric power	0.89	0.82/0.81	0.31	1.11	0.30	0.91	0.22
Manufacturing	1.96	1.95/1.85	1.71	1.85	1.08	1.14	0.68
Livestock	0.06	0.06/0.06	0.06	0.06	0.04	0.05	0.05
Irrigation*	0.44	0.44/0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44
<i>Total</i>	<i>4.35</i>	<i>4.25/4.09</i>	<i>3.46</i>	<i>4.39</i>	<i>2.62</i>	<i>2.85</i>	<i>1.71</i>

*for the climate normal 1961-1990 on the area equipped for irrigation around 1995

Table 3 Change of driving forces of water use in the global-scale and the regionalized approach.

Driving force	Change of driving force between 2000 and 2025, in percent, within the German part of the Elbe river basin upstream of Geesthacht			
	Scenario A1		Scenario B2	
	Global	Regionalized	Global	Regionalized
Population (domestic)	+6 ^a	-5 ^b	+2 ^a	-8 ^b
Electricity production by thermal power stations (thermoelectric power)	+78 ^c	+11 ^d	+48 ^c	-20 ^d
Industrial Gross Domestic Product (manufacturing)	+57 ^c	+10 ^e	+32 ^c	-10 ^e
Livestock numbers (livestock)	+5 ^c	+35 ^f	-3 ^c	+38 ^f

^a UN(1998), IMAGE Team (2001)

^b Statistisches Bundesamt (2000), as downscaled by the authors of this paper

^c IMAGE Team (2001)

^d Vögele and Markewitz (2001)

^e this paper

^f FAA (2002); increase in numbers of livestock mainly due to chicken and turkey; cattle decreases by 41% in A1 and 30% in B2

Table 4 Annual decrease of water withdrawal intensity of thermoelectric and manufacturing water use in the global and the regionalized approach.

Annual decrease of water withdrawal intensity of thermoelectric and manufacturing water use until 2025, in percent per year				
Water use sector	Scenario A1		Scenario B2	
	Global	Regionalized	Global	Regionalized
Thermoelectric power	1.0	0.8	1.0	0.8
Manufacturing	2.0	2.2	3.0	3.2

Figure captions

Fig. 1 Elbe river basin with its German and Czech parts, overlain by the WaterGAP 0.5 degree by 0.5 degree computational grid.

Fig. 2 Change in population in the German Elbe basin upstream of Geesthacht between 2000 and 2025: Scenarios A1 and B2 in the global and the regionalized approach. The resolution of the population scenario is 0.5 degree by 0.5 degree in the global approach and 2.5 minute by 2.5 minute in the regionalized approach. The outlines of the German Laender are indicated.

Fig. 3 Domestic water withdrawals in the German Elbe basin upstream of Geesthacht in the year 2000 in the global and the regionalized approach.

Fig. 4 Change in domestic water withdrawals between 2000 and 2025: Scenarios A1 and B2 in the global and the regionalized approach.

Fig. 5 Thermoelectric power water withdrawals 2000 in the German Elbe basin upstream of Geesthacht in the global and the regionalized approach.

Fig. 6 Change in thermoelectric power water withdrawals in between 2000 and 2025: Scenarios A1 and B2 in the global and the regionalized approach.

Fig. 7 Historic development of industrial IGDP in the Old Laender of Germany (former West Germany) and assumed changes until 2025: Scenarios A1 and B2 in the global and the regionalized approach

Fig. 8 Historic development of manufacturing water withdrawal intensity in the Old Laender of Germany (former West Germany) and assumed changes until 2025; scenarios A1 and B2 in the global and the regionalized approach.

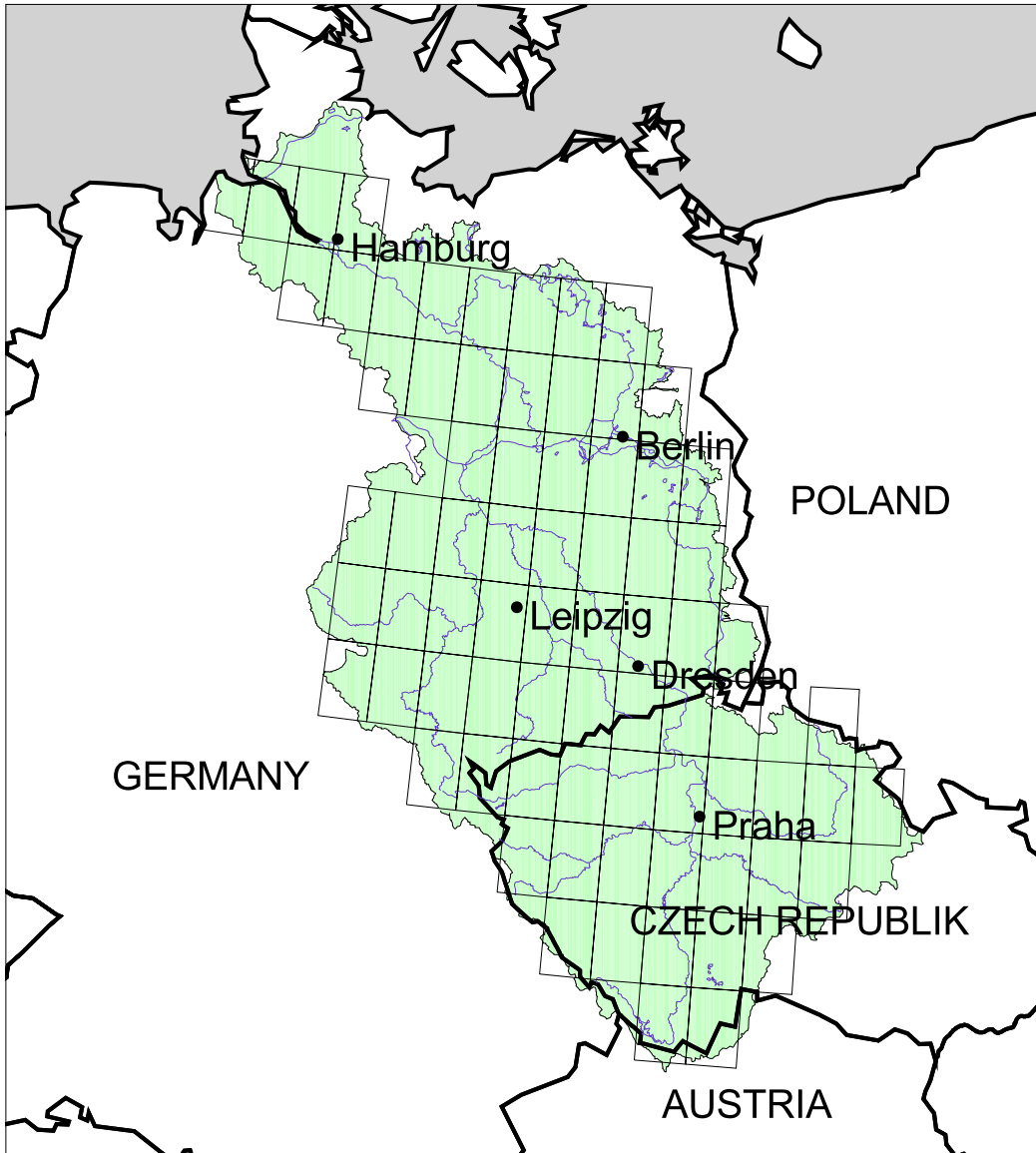


Fig. 1

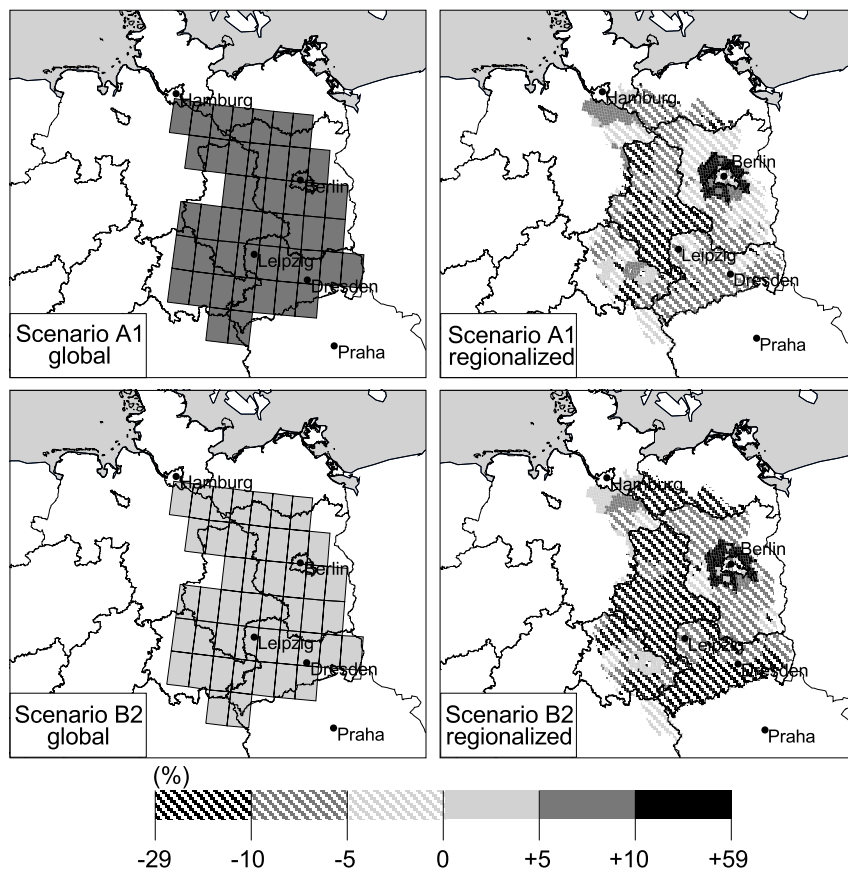


Fig. 2

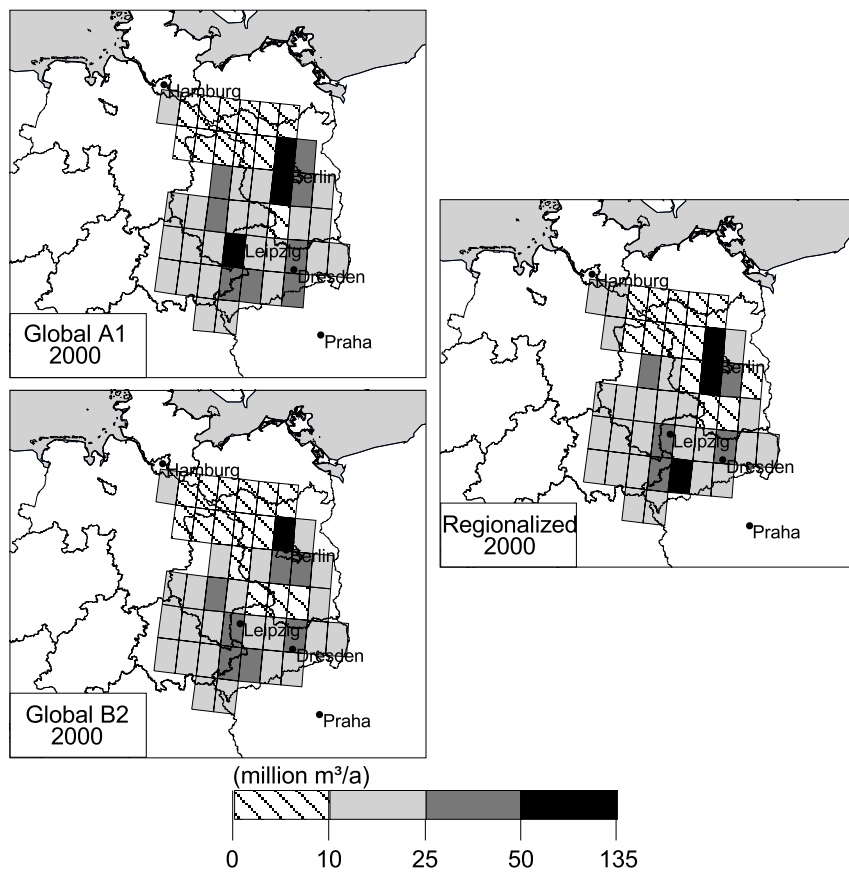


Fig. 3

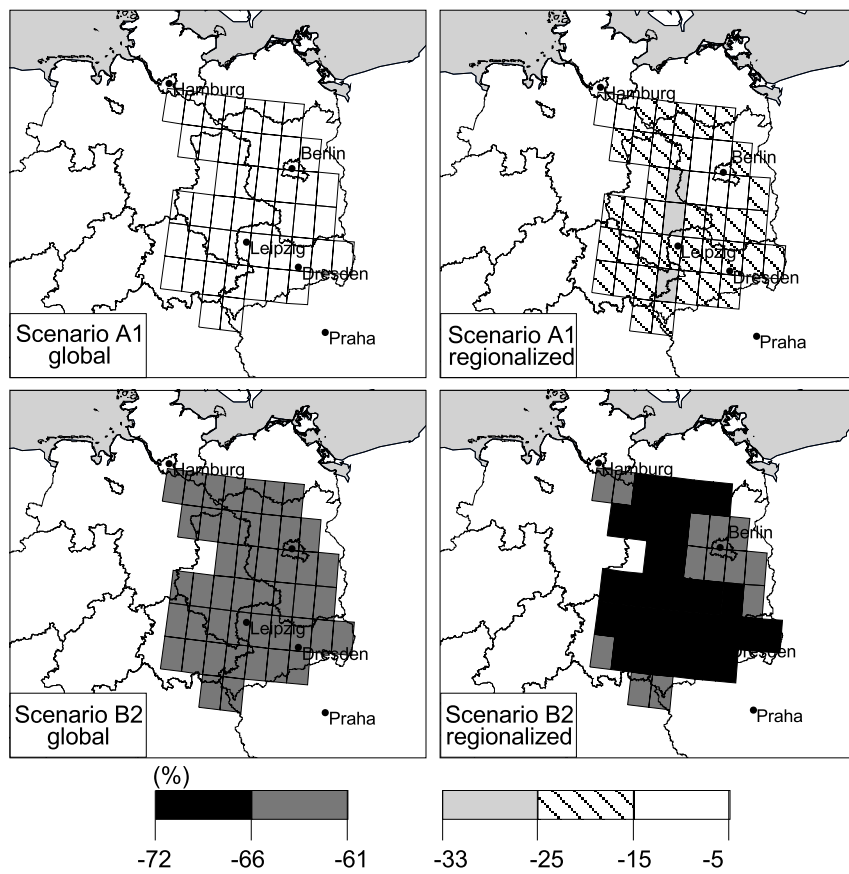


Fig. 4

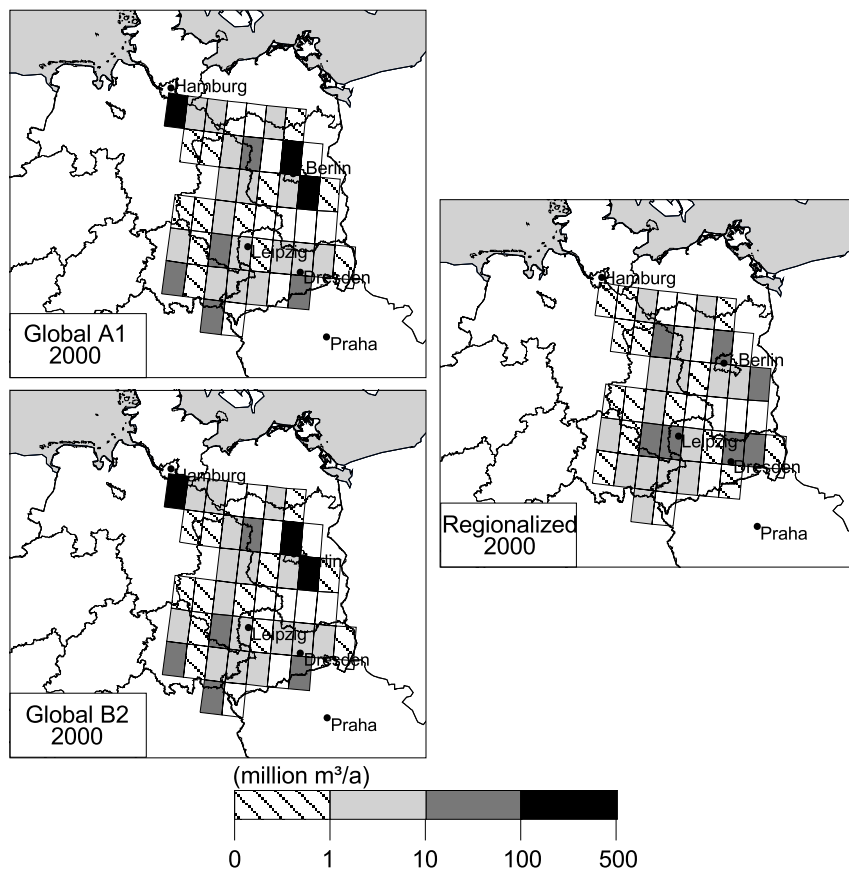


Fig. 5

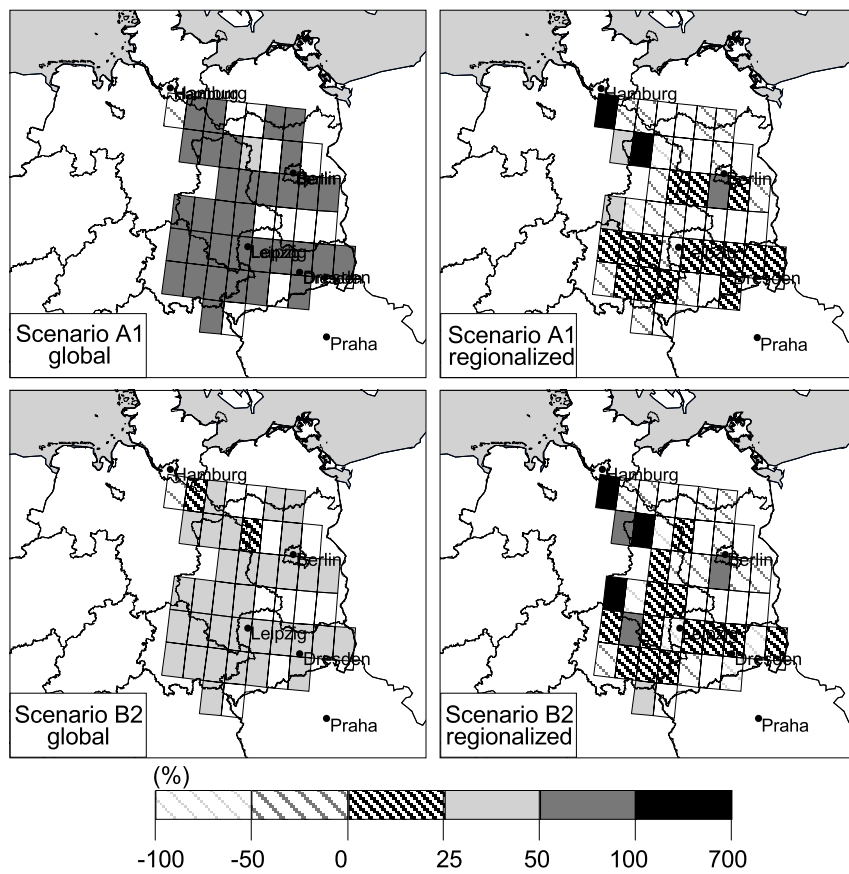


Fig. 6

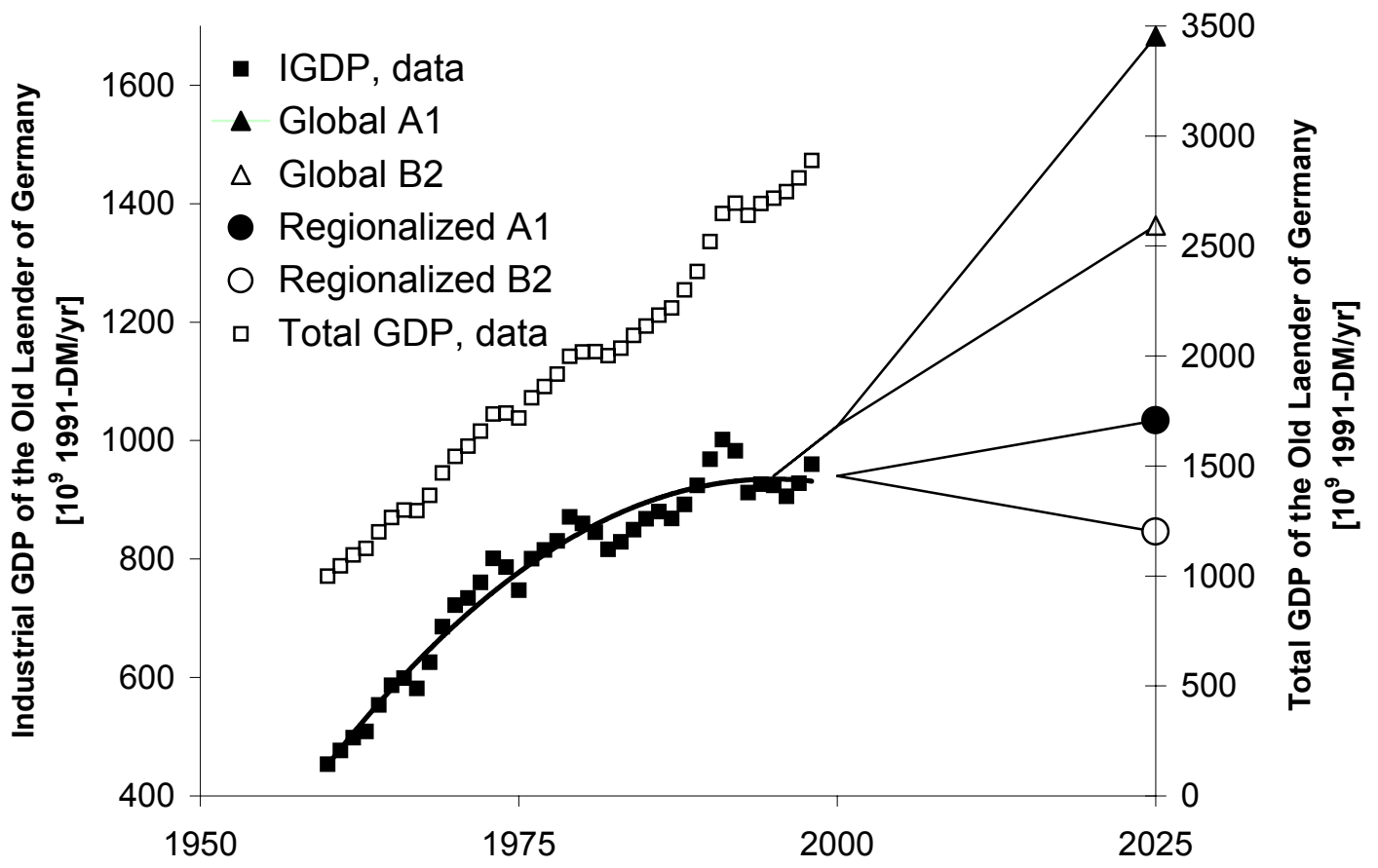


Fig. 7

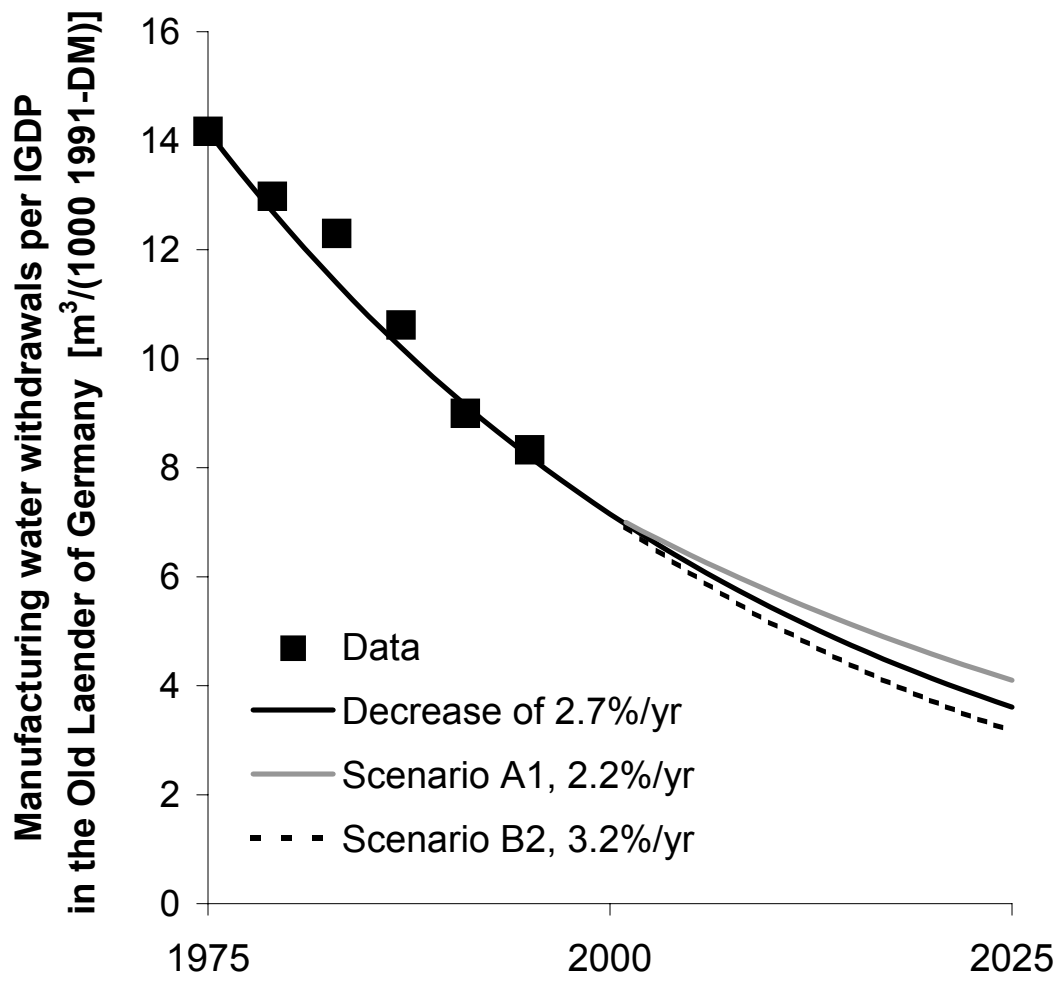


Fig. 8

[2]

Einfluss des Klimawandels auf Wasserressourcen und Bewässerungswasserbedarf: Eine globale Analyse unter Berücksichtigung neuer Klimaszenarien

Döll, P., Flörke, M., Märker, M., Vassolo, S.

Tagungsband des Tags der Hydrologie 2003 in Freiburg (im Druck)

2003

Einfluss des Klimawandels auf Wasserressourcen und Bewässerungswasserbedarf: Eine globale Analyse unter Berücksichtigung neuer Klimaszenarien

Petra Döll, Martina Flörke, Michael Märker und Sara Vassolo

Einleitung

Die durch globale Klimamodelle berechneten Niederschläge sind mit einer weit höheren Unsicherheit behaftet als z.B. die Temperaturen (IPCC 2001). Daher unterscheiden sich die für ein Emissionsszenario durch unterschiedliche globale Klimamodelle berechneten Niederschlagsänderungen auf regionalem Maßstab stark (vgl. z.B. DÖLL 2002) und weitaus stärker als die berechneten Temperaturänderungen. Es ist deshalb notwendig, für die Untersuchung des Einflusses des Klimawandels auf Wasserressourcen und Bewässerungswasserbedarf wenigstens die Szenarien zweier Klimamodelle zu berücksichtigen, um die Unsicherheiten zumindest grob abschätzen zu können. Die hier vorgestellte globaleskalige Analyse umfasst erstmals zwei verschiedene Szenarien der Treibhausgasemissionen (in ihrer jeweiligen Umsetzung in Klimaszenarien durch zwei globale Klimamodelle). Ziel der Analyse ist es, zu untersuchen, welche Bedeutung veränderte Emissionspfade, wie sie z.B. durch Klimaschutzmaßnahmen erreicht werden können, für die zukünftige Entwicklung von Wasserressourcen und Bewässerungswasserbedarf haben. Bei den Emissionsszenarien handelt es sich um die SRES Szenarien A2 und B2 des IPCC (NAKICENOVIC & SWART 2000). Bei A2 werden die Treibhausgasemissionen 2030 als ca. doppelt so hoch wie 1990 angenommen, während bei B2, welches eine umweltschonende Entwicklung der Gesellschaft voraussetzt, die Emissionen nur um etwa ein Drittel erhöht sind (Abb. 1).

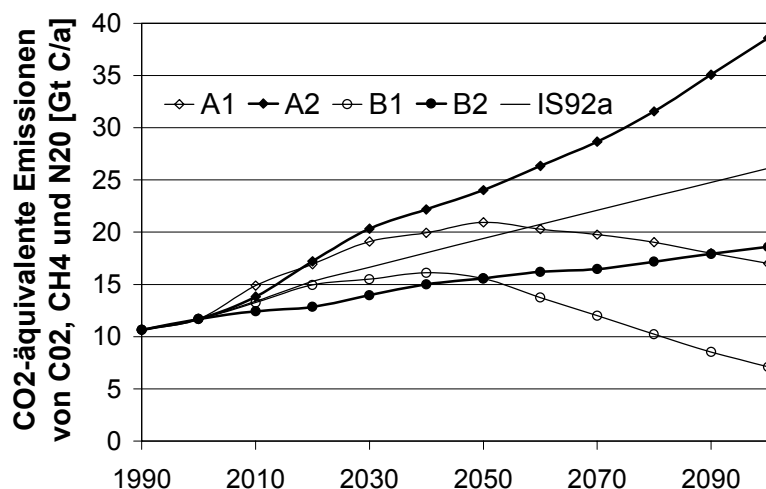


Abb. 1: Die SRES Treibhausgas-Emissionsszenarien des IPCC A1, A2, B1 und B2, ebenso wie das ältere IPCC IS92a Szenario, das die Grundlage fast aller publizierten Klimaszenarien bis 2001 war.

Globale Modellierung von Wasserressourcen und Bewässerungswasserbedarf

Das globale Wassermengenmodell WaterGAP 2 berechnet Abflussbildung, Grundwasserneubildung und Durchfluss sowie die Wassernutzung in den Sektoren Landwirtschaft, Haushalte und Industrie in allen Einzugsgebieten der Erde (räumliche Auflösung 0.5°). Damit ermöglicht WaterGAP eine global konsistente Analyse des Einflusses des Klimawandels auf Wasserressourcen und Bewässerungswasserbedarf in Flusseinzugsgebieten, und damit auf den Wasserstress, der sich aus dem Verhältnis von Angebot und Nachfrage ergibt.

Das hydrologische Modell WGHM (**WaterGAP Global Hydrological Model**) ist für 724 Messstellen weltweit derart kalibriert, dass der simulierte langjährige mittlere Abfluss mit dem gemessenen übereinstimmt, wobei die Durchflussreduzierung durch Wassernutzung berücksichtigt wird. Eine Modellüberprüfung hat ergeben, dass das Modell den typischen Niedrigwasserabfluss (auf Monatsbasis) sowie die interannuelle Variabilität zufriedenstellend simuliert (DÖLL et al. 2003). Das Modul zur Berechnung des Bewässerungswasserbedarfs GIM (**Global Irrigation Model**) (DÖLL 2002; DÖLL & SIEBERT 2002) basiert auf einer globalen Karte der bewässerten Flächen 1995 (DÖLL & SIEBERT 2000) und verwendet ebenso wie WGHM Zeitreihen von monatlichen Klimadaten (1901-95) von NEW et al. (2000). GIM ist u.a. gegen unabhängig geschätzte Netto-Bewässerungswasserbedarfe in den USA validiert. WaterGAP wird insbesondere dazu verwendet, konsistente Szenarien des globalen Wandels im Bereich der Wassermengenproblematik zu entwickeln (z.B. LEHNER et al. 2001).

Der Einfluss des Klimawandels auf Wasserressourcen und Bewässerungswasserbedarf wird durch Skalierung der gemessenen monatlichen Niederschlags- und Temperaturwerte während der Klimanormale 1961-90 (jeweils 360 Werte pro Zelle) mit den durch die Klimamodelle berechneten langfristigen monatlichen Niederschlags- und Temperaturänderungen zwischen der Klimanormale und der jeweiligen zukünftigen Dekade (hier die 2020er und die 2070er Jahre) berechnet. Dabei geschieht die Skalierung im Falle des Niederschlags multiplikativ, im Falle der Temperatur additiv. Wasserressourcen und Bewässerungswasserbedarf werden dabei sowohl für die Klimanormale als auch für die zukünftigen Zeiträume durch Berechnung einer dreißigjährigen Zeitreihe bestimmt. Bei den verwendeten Klimamodellen handelt es sich um das Modell ECHAM4/OPYC des Max-Planck-Instituts für Meteorologie, Hamburg, und das Modell HadCM3 des Hadley Centers, Bracknell, Großbritannien. Die Klimaszenarien wurden über das IPCC Data Distribution Centre zur Verfügung gestellt (<http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk>).

Ergebnisse

Die mit WaterGAP 2 berechneten Änderungen der Wasserressourcen WR bis zu den 2020er bzw. 2070er Jahren (prozentuale Änderungen der langjährigen Mittel des Abflusses in Einzugsgebieten) unterscheiden sich sehr stark je nach dem verwendeten Klimamodell. Sie sind stärker vom Klimamodell als von den doch deutlich unterschiedlichen Emissionsszenarien abhängig. Für große Gebiete der Erde führt ein Klimamodell (für ein gegebenes Emissionsszenario) zu einer Abnahme von WR, während das andere zu einer Zunahme führt. Basierend auf dem HadCM3-Klimamodell nimmt WR in Mittelamerika und in Südamerika bis hinunter zum Amazonas und im östlichen Australien für beide Emissionsszenarien und Zeiträume stark ab, während es nach dem ECHAM4-Modell zunimmt. Für die iberische Halbinsel, Südchina, das westliche Australien und große Teile Nordamerikas verhält es sich

genau umgekehrt. Beide Modelle führen zu beträchtlichen Abnahmen von WR im Nordosten Brasiliens und im südwestlichen Afrika, und zu beträchtlichen Zunahmen in den borealen Zonen.

Vergleicht man jeweils die beiden Emissionsszenarien, so führen die geringeren Emissionen im Szenario B2 nicht zu geringeren Änderungen von WR als bei A2. Dies trifft sowohl für die 2020er als auch die 2070er Jahre zu. So sind nach dem HadCM3-Modell die Abnahmen von WR bis zu den 2070er Jahren in Mittel- und Südamerika bei dem Emissionsszenario B2 stärker als bei A2, bei dem bis dahin wesentlich höhere Emissionen angenommen werden. Türkei, Syrien, Irak und Iran sind bis zu den 2020er Jahren mit B2 von deutlichen Abnahmen betroffen, während mit den höheren Emissionen A2 WR ungefähr stabil bleibt. Die Änderungen von WR bis zu den 2070er Jahren sind meist stärker als bis zu den 2020er Jahren.

Bezüglich des Netto-Bewässerungswasserbedarf ICU ist es im Allgemeinen nicht so, dass in den Einzugsgebieten, in denen die (übers Jahr gemittelten) Wasserressourcen zunehmen, auch ICU abnimmt. Das liegt insbesondere daran, dass bei ICU die Klimaänderung während der Wachstumsperiode (150 Tage bzw. 300 Tage bei Anbau von zwei Feldfrüchten pro Jahr) zum Tragen kommt und nicht die während des ganzen Jahres. Auch daher hat die Unsicherheit der Klimamodelle bezüglich der Niederschlagsänderungen für ICU eine deutlich andere Wirkung als für die Wasserressourcen. So sind die Änderungen im ICU für die iberische Halbinsel sehr ähnlich (und nahe Null), da HadCM3 vor allem im Winter, d.h. außerhalb der Wachstumsperiode, sehr viel höhere Niederschläge in den 2020er Jahren berechnet als ECHAM4, was zu einer starken Diskrepanz bei den Wasserressourcen führt. Im großen und ganzen sind die Bewässerungswasserbedarfe, die sich mit den ECHAM4- und HadCM3-Klimaänderungen berechnen, ähnlicher als die berechneten Wasserressourcen. Zum einen ist ICU sensitiver auf die Temperatur als die Wasserressourcen, und die Unsicherheit in den berechneten Temperaturänderungen ist geringer als die Unsicherheit in den berechneten Niederschlagsänderungen. Zum anderen schätzt GIM nicht den Wasserbedarf für eine konstante Wachstumsperiode, sondern bestimmt eine optimale Wachstumsperiode als Funktion des Niederschlags und der Temperatur. In vielen Zellen führen unterschiedliche Klimaszenarien zu einer unterschiedlichen Verschiebung der Wachstumsperioden, was zu einer Angleichung der berechneten Wasserbedarfe führt. Im globalen Mittel erhöht sich ICU bei konstanter Bewässerungsfläche bis in die 2020er Jahre von 1131 km³/a um 1-3% je nach Szenario und Klimamodell und um 2-7% bis in die 2070er (wobei HadCM3 B2 zu den größten Zunahmen führt). China und Indien, die Länder mit dem höchsten ICU weltweit, haben bis zu den 2020er Jahren im Landesmittel mit Anstiegen von 2-15% und (-6)-5% (je nach Szenario und Klimamodell) zu rechnen.

Schlussfolgerungen

Es zur Zeit noch nicht möglich, die Auswirkungen unterschiedlicher zukünftiger Treibhausgasemissionen auf Wasserressourcen und Bewässerungswasserbedarf in Einzugsgebieten abzuschätzen. Dies liegt daran, dass die durch Klimamodelle berechneten Niederschläge mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Ein Vergleich der mit den beiden Emissionsszenarien A2 und B2 berechneten Änderungen von Wasserressourcen und

Bewässerungswasserbedarf zeigt jedoch, dass verminderte Emissionen im Allgemeinen nicht zu geringeren Änderungen führen werden.

Damit unterscheidet sich die Problematik der klimabedingten Änderungen von Wasserressourcen und Bewässerungswasserbedarf z.B. deutlich vom Problem des Meeresspiegelanstiegs, der mit den Treibhausgasemissionen bzw. -konzentrationen positiv korreliert. Bei letzterem ist die Temperatur die dominante treibende Kraft, bei ersterem der Niederschlag. Zwar korrelieren im globalen Mittel sowohl Temperatur als auch Niederschlag positiv mit den Treibhausgaskonzentrationen. Auf regionaler Skala trifft dies jedoch für den Niederschlag nicht mehr zu; aufgrund der durch die Treibhausgase veränderten globalen atmosphärischen Zirkulation ergeben sich räumlich differenziert sowohl (starke) Zunahmen des Niederschlags als auch (starke) Abnahmen, und die Lage der Regionen mit Zu- und Abnahmen ändert sich mit der sich ändernden atmosphärischen Zirkulation.

Literatur

- DÖLL, P., F. KASPAR & B. LEHNER (2003): A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation. *Journal of Hydrology*, 270 (1-2), 105-134.
- DÖLL, P. (2002): Impact of climate change and variability on irrigation requirements: a global perspective. *Climatic Change*, 54(3), 269-293.
- DÖLL, P. & S. SIEBERT (2002): Global modeling of irrigation water requirements. *Water Resources Research*, 38(4), 8.1-8.10, DOI 10.1029/2001WR000355.
- DÖLL, P. & S. SIEBERT (2000): A digital global map of irrigated areas. *ICID Journal*, 49(2), 55-66.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001): *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Edited by J. T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden and D. Xiaosu. Cambridge University Press. (<http://www.ipcc.ch>)
- LEHNER, B., T. HENRICHS, P. DÖLL & J. ALCAMO (2001): *EuroWasser — Model-based assessment of European water resources and hydrology in the face of global change*. Kassel World Water Series 5, Center for Environmental Systems Research, University of Kassel, Germany. (<http://www.usf.uni-kassel.de/usf/archiv/dokumente.de.htm>)
- NAKICENOVIC, N. & R. SWART (HRSG.) (2000): *Emission Scenarios*. IPCC Special Report on Emission Scenarios. Cambridge University Press. (<http://www.ipcc.ch>)
- NEW, M., M. HULME & P.D. JONES (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.

Petra Döll, Martina Flörke, Michael Märker und Sara Vassolo
Wissenschaftliches Zentrum für Umweltsystemforschung, Universität Kassel, Kurt-Wolters-
Str. 3, 34109 Kassel, e-mail: doell@usf.uni-kassel.de

[3]

Klimabedingte Änderungen des hydrologischen Regimes im gesamten Einzugsgebiet der Elbe von 1900 bis 2100

Döll, P., Vassolo, S.

In Geller, W., Puncochar, P., Guhr, H., von Tümpling jun., W., Medek, J., Smrták, J., Feldmann, H., Uhlmann, O. (eds.): Die Elbe – neue Horizonte des Flussgebietsmanagements. 10. Magdeburger Gewässerschutzseminar. Teubner, Stuttgart, 323-326

2002

Klimabedingte Änderungen des hydrologischen Regimes im gesamten Einzugsgebiet der Elbe von 1900 bis 2100

Petra Döll, Sara Vassolo (doell@usf.uni-kassel.de)

Wissenschaftliches Zentrum für Umweltsystemforschung, Universität Kassel

1 Einleitung

Das globale Wassermengenmodell WaterGAP 2 berechnet mit einer Auflösung von 0.5° Wasserverfügbarkeit (als schneller Abfluss, Grundwasserneubildung und Durchfluss) und Wassernutzung (durch Haushalte, Industrie, Bewässerung und Vieh) sowohl für historische Perioden als auch für Zukunftsszenarien. Das hydrologische Modell von WaterGAP basiert auf einem globalen Rasterdatensatz mit Zeitreihen monatlicher beobachteter Klimavariablen zwischen 1901 und 1995 (New et al., 2000) und einer globalen Abflussrichtungskarte (Döll und Lehner, 2002). Mit einem Zeitschritt von einem Tag berechnet es die vertikale Wasserbilanz von Kronenraum, Boden und offenen Wasserflächen sowie den lateralen Wassertransport durch Grundwasser, Seen und Feuchtgebiete zur unterhalb gelegenen Zelle. Es simuliert auch die Durchflussreduzierung durch Wassernutzung. Durch Anpassung von nur einem Parameter wurde das Modell gegen Durchflussmesswerte an 724 Stationen weltweit kalibriert (GRDC, Koblenz), so dass der simulierte langjährige Durchfluss innerhalb 1% des Messwerts fällt. Döll et al. (2001) beschreiben und überprüfen das hydrologische Modell, während Lehner et al. (2001) das gesamte Modell WaterGAP kurz beschreiben und seine Anwendung zur Erstellung von Szenarien der Wasserverfügbarkeit- und -nutzung, des Wasserkraftpotenzials sowie von Dürren und Hochwässern für Europa zeigen. Zudem werden die Ergebnisse für Elbe und Oder mit denen von mesoskaligen Modellen verglichen.

Hier benutzen wir die von WaterGAP berechneten Durchflüsse im Elbe-Einzugsgebiet (EZG), das durch 76 0.5° Zellen repräsentiert wird, um die klimabedingte Durchflussvariabilität innerhalb des EZG zu analysieren. Insbesondere betrachten wir die Unterschiede der langjährigen Mittelwerte und der 10% und 90% Perzentile der monatlichen Durchflüsse zwischen der Klimanormalen 1901-1930, 1931-1960 und 1961-1990, und die potentiellen Auswirkungen des Klimawandels in den 2020er und 2070er Jahren werden mit der historischen Variabilität verglichen.

2 Modellverhalten im Elbe-Einzugsgebiet

Im Elbe-EZG dienen die Durchflussmesswerte in Decin und Neu-Darchau zur Modellkalibration. Darüber hinaus wurden die Messwerte der Saale in Calbe für eine Modellüberprüfung verwendet. Tabelle 1 zeigt quantitative Indikatoren der Modellgüte. Im Fall der Saale, wo der simulierte langjährige Durchfluss nicht auf den Meßwert gezwungen wurde, stimmt der berechnete Wert sehr gut mit dem gemessenen überein. An allen Stationen wird die interannuelle Variabilität gut getroffen, was der hohe Wert des Nash-Sutcliffe-Koeffizienten für Jahreswerte AME ausdrückt. Die tatsächlichen Monatswerte werden nur unzureichend modelliert (kleine MME-Werte), was zurückzuführen ist auf 1) die global konstante laterale Transportgeschwindigkeit, 2) die Wirkung von Stauseebewirtschaftung

und 3) den sehr einfachen Schneecalgorithmus in WaterGAP; Durchflüsse im Januar und Februar werden im allgemeinen durch zu geringes Schmelzen unterschätzt, während die Durchflüsse im März dann überschätzt werden. Die 10% und 90% Perzentile der monatlichen Durchflusswerte Q_{10} and Q_{90} werden jedoch gut simuliert (Q_{90} ist der Durchfluss, der in 90% aller Monate überschritten wird). Das deutet darauf hin, das WaterGAP zwar nicht den Durchfluss in einem bestimmten Monat verlässlich simulieren kann, jedoch in der Lage ist, das statistische Systemverhalten im Hinblick auf Bemessungsdurchflüsse (Niedrig- und Hochwasser) abzuschätzen.

Tab. 1. Vergleich von gemessenen und simulierten Durchflüssen im Elbe-EZG: langjährige Mittel, 90% (Q_{90}) und 10% (Q_{10}) Perzentile der monatlichen Durchflüsse, MME: Modelleffizienz (Nash-Sutcliffe-Koeffizient) für Monatwerte, AME: Modelleffizienz für Jahreswerte.

	A ^a [1000 km ²]	Zeit	Langjähriges		Mon. Q_{90}		Mon. Q_{10}		MME	AME
			Mittel		[km ³ /Monat]		[km ³ /Monat]			
			[km ³ /Monat]		Gem.	Sim.	Gem.	Sim.		
*										
Elbe at Decin ^b	52	61-84	0.83	0.83	0.36	0.24	1.54	1.70	-0.28	0.81
Elbe at Neu-Darchau ^b	133	65-88	2.04	2.04	0.93	0.99	3.60	3.49	0.13	0.78
Saale at Calbe ^c	23	81-95	0.32	0.34	0.16	0.17	0.53	0.55	0.31	0.65

* Datenquellen: Elbe: GRDC, Saale: Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

^a Einzugsgebietsgröße nach der globalen Durchflussrichtungskarte DDM30, in WaterGAP verwendet.

^b Kalibrierungsstation, für die langjähriges Mittel an Messwert angepasst wurde

^c Validierungsstation ohne Modellanpassung

3 Methodik und Ergebnisse

Das hydrologische Modell von WaterGAP wurde mit der historischen Zeitreihe der klimatischen Monatswerte von Januar 1901 bis Dezember 1995 angetrieben. Zusätzlich wurde der Einfluss des Klimawandels auf den Durchfluss unter Verwendung von Klimaszenarien der 2020er und 2070er Jahre simuliert. Dazu wurden die gemessenen Monatswerte von Niederschlag und Temperatur für jedes Jahr der Klimanormalen 1961-90 mit den Änderungen skaliert, wie sie durch zwei globale Klimamodelle (GCM), das ECHAM4 und das HadCM3 Modell, für das IPCC IS92a Emissionsszenario berechnet wurden. Dann wurde WaterGAP mit diesen 30 Klimajahren angetrieben und die Ergebnisse gemittelt. Es ist notwendig, zumindest die Klimaszenarien zweier GCM zu analysieren, da sie im allgemeinen für dasselbe Emissionsszenario stark unterschiedliche Niederschlagsänderungen berechnen. Im Falle der Temperatur wird der Messwert skaliert, indem die Differenz der GCM-Werte für zukünftige (Dekadenmittelwerte 2020-29 oder 2070-79) und heutige (Mittelwert 1961-90) Bedingungen zu zum Messwert addiert wird. Die skalierten 30-Jahre-Zeitreihen des Niederschlags werden durch Multiplikation der Messwerts mit dem Verhältnis von zukünftigem zu heutigem GCM-Niederschlag berechnet. Die so erzeugten Klimaszenarien berücksichtigen nicht den wahrscheinlichen Anstieg der Klimavariabilität aufgrund des Klimawandels, da GCM diesen Anstieg nicht verlässlich berechnen können.

Abb. 1 zeigt, wie sich die Durchflusskennwerte langjähriger Mittelwert, monatlicher Q_{90} und monatlicher Q_{10} an den drei Stationen der Tabelle 1 zwischen den drei Klimanormalen des 20. Jahrhunderts geändert haben, und wie diese Werte sich aufgrund des Klimawandels bis zu den 2020er

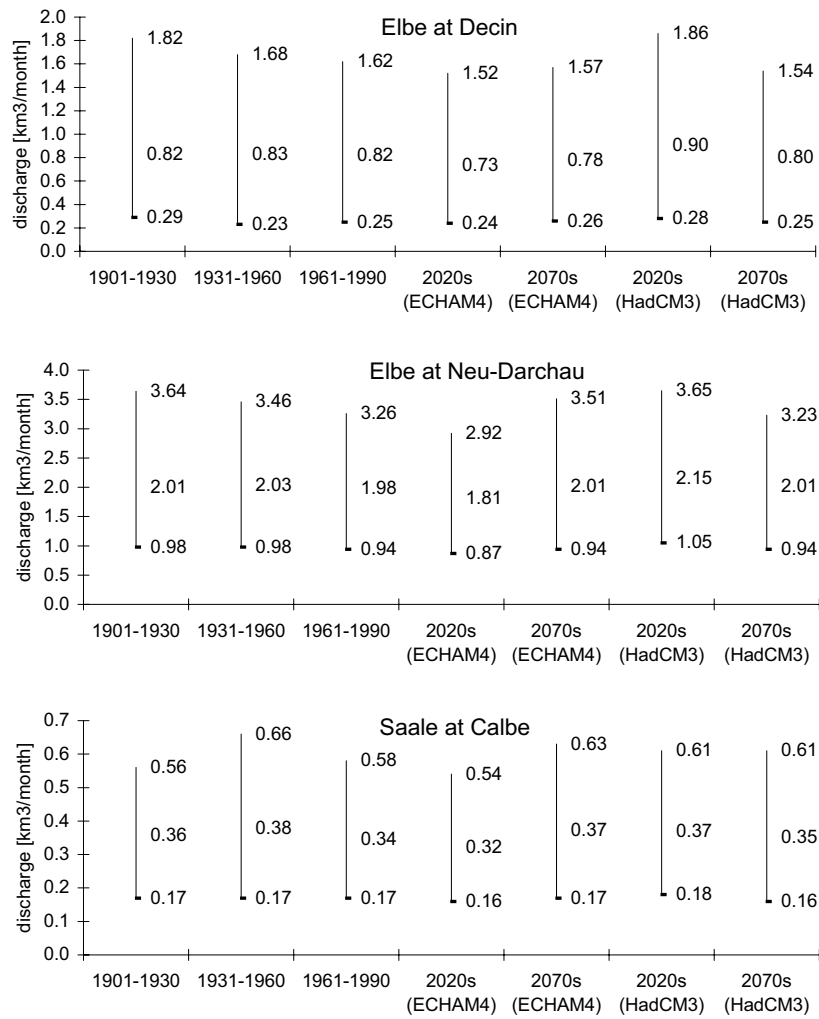


Abb. 1. Einfluss der langfristigen historischen Klimavariabilität und des zukünftigen Klimawandels auf das hydrologische Regime an drei Punkten im Elbe-EZG. In jedem Graphen sind oben die monatlichen Q_{10} -Werte, in der Mitte die langjährigen Mittelwerte des Durchflusses und unten die monatlichen Q_{90} -Werte angegeben.

und 2070er Jahren ändern könnten. Die historischen langjährige Mittelwerte ebenso wie Q_{90} (mit Ausnahme von Decin) variieren um weniger als 5%. Die Variabilität von Q_{10} ist etwas größer, und eine negativer Trend ist im Hauptfluss erkennbar. Mit dem ECHAM4 Klimaszenario sind alle Durchflusskennwerte an allen drei Stationen in den 2020ern kleiner als die kleinsten Werte im 20. Jahrhundert (mit Ausnahme von Q_{90} in Decin). Das HadCM3 Klimaszenario führt zum gegenteiligen Ergebnis, mit höheren Durchflusskennwerten an allen Stationen. Für die 2070er ergeben die beiden Klimaszenarien ähnliche Werte, die denen der 1961-90 Klimanormalen ähnlich sind. Betrachtet man die über 30 Jahre gemittelten Monatsabflüsse, so zeigt sich, dass bei allen Szenarien außer dem HadCM3 2020er Szenario die Durchflüsse in den Monaten Juli bis November zurückgehen.

4 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die berechneten Auswirkungen des Klimawandels auf die Durchflusskennwerte sind für die 2020er stärker als die der langfristige Klimavariabilität während des 20. Jahrhunderts. Dies gilt nicht für die 2070er. Aufgrund der gegensätzlichen Trends für die 2020er, die aus der Nutzung zweier Klimamodelle resultieren, können jedoch keine Schlussfolgerungen für das Wassermanagement gezogen werden. Es ist zu erwarten, dass aufgrund der wahrscheinlich steigenden Klimavariabilität sich die Spannen zwischen Q_{10} and Q_{90} erhöhen (was zur Zeit noch nicht quantitativ abgeschätzt werden kann).

Ein globales hydrologisches Modell wurde angewendet, um den Einfluss von Klimavariabilität und Klimawandel auf das hydrologische Regime im Elbe-EZG zu analysieren. Dabei wurden nur globalskalige Informationen verwendet. Soweit den Autorinnen bekannt, ist dies die erste modellbasierte Abschätzung des Einflusses von Klimavariabilität und -wandel im Elbe-EZG. Der Einfluss des Klimawandels kann nur mit einem Modell für das gesamte EZG berechnet werden, und momentan gibt es nur mesoskalige hydrologische Modelle für Teile des Elbe-EZG. Sinn und Zweck eines globalen Modells wie WaterGAP, das mit groben und global verfügbaren Daten auskommt, ist es jedoch nicht, optimale Ergebnisse für einzelne EZG zu berechnen, sondern eine konsistente vergleichende Analyse von verschiedenen EZG zu ermöglichen. Daher werden wir ähnliche Analysen für andere Flussgebiete weltweit durchführen, um eine verbesserte globale Perspektive der Auswirkungen von Klimavariabilität und Klimawandel auf den Durchfluss (insbesondere Niedrig- und Hochwasser) zu erhalten.

Literatur

- Döll, P., Lehner, B. (2002) Validation of a new global 30-min drainage direction map. *Journal of Hydrology*, 258(1-4), 214-231
- Döll, P., Kaspar, F., Lehner, B. (2001) A calibrated global hydrological model for deriving water availability indicators (eingereicht bei *Journal of Hydrology*)
- Lehner, B., Henrichs, T., Döll, P., Alcamo, J. (2001) EuroWasser — Model-based assessment of European water resources and hydrology in the face of global change. *Kassel World Water Series 5*, Center for Environmental Systems Research, University of Kassel, Germany. (<http://www.usf.uni-kassel.de/usf/archiv/dokumente.en.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

[4]

A gridded global data set of thermoelectric power and manufacturing water use

Vassolo, S., Döll, P.

(eingereicht bei Water Resources Research, April 2003)

2003

A gridded global data set of thermoelectric power and manufacturing water use

Sara Vassolo and Petra Döll

Center for Environmental Systems Research

University of Kassel

Abstract

A new gridded global data set of industrial water use around 1995 is presented which for the first time distinguishes between water use for cooling of thermal power stations and for manufacturing. Model-based estimates of annual values of both water withdrawal and consumption are provided with a spatial resolution of 0.5° by 0.5° . Thermoelectric power water use is based on the geographical location of 63,590 thermal power stations. Manufacturing water use is computed by first estimating country-specific water withdrawal values, which are then distributed as a function of city nighttime lights. A comparison to industrial water use in the 50 states of the USA and 89 regions in Russia shows that the developed data set represents thermoelectric power water use satisfactorily, while manufacturing water use remains uncertain.

1. Introduction

Freshwater is a scarce resource, and its efficient use is a prerequisite for sustainable development. However, information on water use is generally scant too and improved data is needed, especially to support a successful water demand management. Water users are generally subdivided into three sectors households, industry, and agriculture. In most developing countries, but also in industrialized countries like the USA, the agricultural sector, i.e. especially irrigation, is the major water user. *Döll and Siebert* [2002] developed a global model of irrigation water requirement which estimates water withdrawals and water consumption (the fraction of the withdrawn water that evapotranspires) in $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ grid cells.

The industrial sector is the main water user in most of the industrialized countries (especially in northern and central Europe and in the eastern part of the USA). Unfortunately, global-scale information on industrial water use only exists as “total industrial water withdrawals per country” [*WRI*, 2000; *Shiklomanov*, 2000]. *Shiklomanov* [2000] also gives estimates of the industrial water consumption (the fraction of withdrawn water that evaporates to the atmosphere) as a ratio of the industrial water withdrawals for each of 26 world regions. These data sets do not provide any information on the spatial distribution of industrial water use within countries and they do not distinguish between the fraction that is used to cool thermal power stations and the one that is employed in manufacturing processes. This differentiation is important because the water used for the cooling of thermal power stations, also called thermoelectric power water use, does not lead to water contamination by chemical substances, its driving forces differ those of the manufacturing sector, and, in case of “one-through flow” cooling, water consumption is only a very small fraction of water withdrawal. Information on the volumes of water withdrawn and consumed for cooling of thermal power stations and for manufacturing is only available for the USA, where data are published for each county [*USGS*, 1996].

The global model of water availability and water use WaterGAP computes total industrial water use in 0.5° latitude by 0.5° longitude grid cells by disaggregating country estimates of total industrial water withdrawals per country given in *Shiklomanov* [2000]. This disaggregation was necessary to be able to assess the global water availability and use

situation in river basins. The industrial water withdrawal in each country was distributed to the grid cells proportional to the estimated urban population in the cells [Alcamo *et al.*, 2003; Döll *et al.*, 2001], while industrial water consumption was assumed to be a fraction of industrial water withdrawal that only depends on the world region to which the country belongs [Shiklomanov, 2000].

Here we present a 0.5° gridded, model-based data set of industrial water withdrawal and consumptive water use in 1995 that distinguishes between thermoelectric power water use and water use for other manufacturing processes (water use for mining is not considered). This model-based data set was designed for developing scenarios of future industrial water use, as the model algorithm includes the relevant driving forces. It will be included in the next version of WaterGAP and will contribute to a better assessment of water use and water stress in all large river basins of the globe. Section 2 introduces the methods of computing thermoelectric power water use and water use for manufacturing purposes, while Section 3 describes the resulting data set. In section 4, the reliability of the data set is discussed, and in section 4 the conclusions of the study are presented.

2. Data Set Generation

The global data set of industrial water use includes annual values of 1) thermoelectric power water withdrawals, 2) thermoelectric power water consumption, 3) manufacturing water withdrawals, and 4) manufacturing water consumption in 66,896 0.5° by 0.5° grid cells. All the values represent the situation around 1995.

2.1 Thermoelectric Power Water Use

Figure 1 provides an overview of the steps taken to compute thermoelectric power water use. The total amount of water withdrawn by each of the 63,590 power stations (Figure 2) is computed by multiplying the annual electricity production (MWh/yr) with the water intensity of each power station (water withdrawal per unit electricity production, in m³/MWh). The total annual thermoelectric water withdrawal (TWW) in each cell is then calculated as the sum of the withdrawals of all the power stations within the cell as

$$TWW = \sum_{i=1}^n EP_i \cdot WI_i(Cs_i) \quad (1)$$

where

EP_i Annual electricity produced by thermal power station *i* within the cell (MWh/yr)

WI_i Station-specific water withdrawal intensity (m³/MWh). This figure depends on the cooling system of the station Cs_i

n Number of stations in the cell

The total thermoelectric consumption is computed using power station-specific water consumption intensities instead of water withdrawal intensities in Equation (1). The next sections describe the steps of the computation of thermoelectric power water use, which are showed in Figure 1.

2.1.1 Localization of Thermal Power Stations

The World Electric Power Plants Data Set of the Utility Data Institute [UDI, 2000] provides comprehensive global data on all types of electric power stations. Among others, the data set contains information on the name of the station, installed capacity, year of connection to the net, fuel type, and cooling type, but no information on the exact geographic location. A total of 63,590 thermal power stations are included in the data set. To determine the geographic coordinates of the stations, the database of foreign geographic features names of the *National Imagery and Mapping Agency* [2000] was used. This database is a repository of

place-names comprising some 3.7 million of geographic features with their geographic coordinates (decimal latitude and longitude). As the names of the power stations in the UDI data set, in their majority, reflect the name of the places or cities where the stations are located, most of them were allocated via an automated spread sheet join. The missing stations were manually allocated to a grid cell. Of the total number of thermal power stations, 98% are fossil fuelled, 1% nuclear fuelled, and another 1% is geothermal (Figure 2).

2.1.2. Calculation of Annual Electricity Production of each Power Station

The UDI data set contains values for installed capacity. These values were summed up for each country and compared with published data on total installed capacity for electricity production per country [IED - *International Energy Database*, 1999] to evaluate the completeness of the database. It was found that the installed capacity according to the UDI data set was in the range of $\pm 10\%$ of the IED country data in 37 out of a total of 92 countries, while for the other countries, the discrepancies were larger. These 37 countries, however, account for 72% of the total installed capacity as provided by IED.

The electricity produced in 1995 for each individual station is calculated as the product of the installed capacity and the working hours of the station. The initial estimation of the power station working hours is based on 1997 data published for Germany [RWE, 1997], depending on the fuel type (oil, natural gas, coal, lignite, and uranium). The computed electricity productions are summed up for each country and compared with country values of electricity production as provided by the *International Energy Database* [1999], the *International Atomic Energy Agency* [2000], and the *CIA World Factbook* [2001]. For each country, the station-type specific working hours were modified such that the electricity produced by the UDI power stations is equal to the country values from the literature.

2.1.3. Definition of Cooling System

To compute the amount of water withdrawn or consumed by a power station, it is necessary to know the type of cooling system installed. Mainly two types can be distinguished, the “one-through flow” system and the “cooling tower” system. In the “one-through flow” cooling system, the cooling water is returned to the source immediately after it has cooled down the condenser. This system requires very high water withdrawals per unit of produced electricity, but the consumption is only a very small fraction of the withdrawal. Only the power stations indicated as cooled with fresh water are included in this study, as those cooled with salt or brine water do not influence the terrestrial fresh water cycle. In the “cooling tower” system, the cooling water flows in a closed circuit. The heat is removed from the cooling water by contact with the air in the cooling tower. The withdrawal in this system is low, as water leaves the station mainly by evaporation in the tower (consumption) and not by return-flow to the source. Although the system is characterized by very low water withdrawals as compared to the “one-through flow” system, the water consumption per unit of produced electricity is approximately twice as high as for the “one-through flow” cooling system.

Unfortunately, information on the type of cooling system is available for only 11% of the thermal power stations in the UDI data base. To estimate the cooling type system of the rest of the stations, two methods were developed. The first is based on information from the USA and is applied to USA and Canada, while the second is based on information from European countries and is applied for all countries except USA and Canada.

2.1.3.1 United States and Canada

The UDI database provides the cooling system for 16% of the 16,590 active thermal power stations in the USA in 1995. These stations represent 80% of the total installed capacity of thermal power stations. The fraction of “one-through flow” cooled power stations

has declined constantly since 1970. The majority of all new built thermal power stations since then were equipped with “cooling towers”. To decide on the cooling system for the 14,212 power stations without information, the annual fractions of each cooling type were obtained based on a statistical analysis of the year in which the stations with information were connected to the net and the cooling system. Once the number for each cooling system type and year were estimated, the cooling system type was spatially distributed in a random way to all the stations constructed in the respective year. For Canada, where 1,455 of a total of 1,527 thermal power stations lack information on the cooling system (representing 52% of the installed capacity of thermal power stations), the same methodology was applied.

2.1.3.2 All Other Countries

Different from the USA, the historical development of cooling systems in Europe does not show a trend, and a different methodology had to be developed for this continent. The cooling system data for the Czech Republic, France, Germany, Greece, Ireland, Italy, Portugal, Russia, Spain, and the United Kingdom were analyzed. The hypothesis was that due to the fact that “one-through flow” cooling heats up the river, “cooling tower” systems would prevail in cells with low river discharge and high electricity production to prevent excessive warming. The total produced electricity in each 0.5° cell was plotted against the river discharge as computed by WaterGAP hydrology for the climate normal 1961-1990 [Döll *et al.*, 2003]. This plot shows that the “one-through flow” cooling system is mainly installed in cells where electricity production is below 100 GWh/cell/yr and discharge is larger than $0.3 \text{ km}^3/\text{year}$.

Information on cooling system type for Asia, Africa, Latin America, and Oceania is very poor, therefore it was impossible to develop an independent methodology for these continents. The method developed for Europe was tested using data from the Republic of South Africa. It defines all the thermal power stations in the country as equipped with cooling tower, which is true. Therefore, the European method was applied globally, except for USA and Canada.

2.1.4. Definition of Water Intensities as a Function of the Cooling System

To define the water withdrawal intensities for each cooling system (in m^3/MWh), data from various power station operators or related authorities were statistically analyzed. The values obtained are:

- $180 \text{ m}^3/\text{MWh}$ for thermal power stations with “one-through flow” cooling and
- $4.5 \text{ m}^3/\text{MWh}$ for thermal power stations with “cooling tower”.

The water consumption intensity for each of the two cooling systems was derived from data of Unipede [1999] as (Figure 1):

- $0.65 \text{ m}^3/\text{MWh}$ for thermal power stations with “one-through flow” cooling and
- $1.33 \text{ m}^3/\text{MWh}$ for thermal power stations with “cooling tower”.

2.2. Computation of Manufacturing Water Use

Figure 3 shows how manufacturing water use was computed. First, country values were estimated, which were then disaggregated to obtain grid cell values. Country-scale data on water withdrawal for manufacturing were only available for USA, Canada and some European countries. However, as already mentioned, there is information on total industrial water use for almost all countries [WRI, 2000; Shiklomanov, 2000]. It would thus be possible to estimate country values of manufacturing water use simply as the difference between the published total industrial water use and the thermoelectric water use calculated here. However, country values of total industrial water use may differ appreciably depending on the source of information. Therefore, a method was developed to check the plausibility of the literature data and to obtain a best estimate of manufacturing water use per country. In

addition, this method, which considers the water use of various manufacturing sectors, allows for the development of water use scenarios that take into account the future developments of the individual sectors.

The manufacturing sectors included in the computations are chemicals, paper and paper board, pig iron, fabrics, crude steel, sugar, beer and cement. The first six sectors are those with the highest water intensities among all (in m³ water per ton of product). Sugar and beer are included to be able to obtain water use for manufacturing in very poor countries, where the other manufacturing sectors are not important. Cement, which is produced in most of the countries, is included for tuning the water withdrawal calculation to the most plausible literature data on total industrial water withdrawals (by adjusting the sector-specific water intensity). This is appropriate because water withdrawals for its production are very variable. In addition, a second tuning factor is required for a number of countries such that the computed values equal the most plausible literature data.

Country-specific total manufacturing water withdrawal (MWW) is calculated as:

$$MWW = f \cdot \sum_{i=1}^8 VP_i \cdot WI_i \quad (2)$$

where:

f Tuning factor

VP_i Annual production volume of each of the eight manufacturing sectors (ton/yr)

WI_i Sector-specific water intensity (m³/ton)

The country values of MWW are then disaggregated to the 0.5° grid cells based on city nighttime lights. The next sections describe the steps of the computation of manufacturing water use (as summarized in Figure 3).

2.2.1. Estimation of Production Volumes and Definition of Sector-Specific Water Intensities

The 1995 production volumes for each of the eight manufacturing sectors in a country were obtained from the *UN Statistical Yearbook* [1997] and *CIA World Factbook* [2001]. Data for typical sector-specific water withdrawal intensities are only available for some industrialized countries. Table 1 shows that these figures vary considerably among countries, and it is expected that intensities in developing countries might even be outside the given ranges. Due to lack of data, the mean of the published figures is used for those countries and sectors for which no data are available (Table 1).

When using these rough estimates of water withdrawal intensities, which are assumed to be the same for most countries no matter what the climatic or economic conditions of the country are, one cannot expect to obtain good estimates of actual water withdrawal or consumption. However, as discussed before, published industrial water withdrawals differ appreciable among sources, and it is necessary to select the most plausible value for each country. An assessment of the published data shows that for 124 out of 160 countries, the *Shiklomanov* [2000] total industrial water withdrawals differ by more than 10% from the values of *WRI* [2000]. One might conclude that the *Shiklomanov* [2000] figures are better because they were produced under the umbrella of the International Hydrological Programme from the UN, using a consistent methodology, while the *WRI* [2000] data are a compilation of different sources. However, Table 2 shows that *Shiklomanov* [2000] values of industrial water use also differ from figures published by individual countries. Therefore, we decided to tune the manufacturing water withdrawal calculations to values from individual country sources where available (Table 2) and, for the rest of the countries, to *Shiklomanov* [2000] values unless the *WRI* [2000] values appeared more plausible (see next paragraph).

According to *Carmichael & Strzepak* [1987], water intensity for cement varies from 50 m³/t to 900 m³/t, depending on the technology used. For this reason, this water intensity is an appropriate tuning parameter. From the 160 countries considered, 18 did not have literature

values and further 7 countries had thermoelectric power water use larger than the total industrial water use from *Shiklomanov* [2000] or *WRI* [2000]. The manufacturing water use for these countries was calculated in a straight-forward manner by multiplying the produced volumes by the average sector-specific water withdrawal intensities provided in Table 1 and a water intensity of 50 m³/t for cement. Fifty-four countries were tuned using *Shiklomanov* [2000] industrial water use, 11 using *WRI* [2000], and 9 using the country-specific values from Table 2, taking into account a water intensity for cement in the range of 50 m³/ton to 900 m³/ton. In the case of the 11 countries, for which *WRI* [2000] values were used, it was not possible to obtain the *Shiklomanov* [2000] values by varying the water intensity of cement within the prescribed range. The remaining 61 countries had industrial water withdrawals either larger or lower than the published values. A new tuning was done, in which the total manufacturing water withdrawal was increased or decreased (as necessary) by not more than 20%. In this case, further 31 countries could be tuned to *Shiklomanov* [2000] values, but for the other 30 countries, the adjustment had to be even stronger. In 17 of these 30 countries, most of them arid and semi-arid countries, the calculated figures were larger than the published values, and the manufacturing water withdrawal was reduced (by decreasing the tuning factor *f* in Equation 2) to obtain the most plausible values (*Shiklomanov* [2000] in all cases, except in the case of Zambia, which was tuned to the *WRI* [2000] value as the necessary correction factor was smaller than it would have been with *Shiklomanov* [2000] data). Similarly, the manufacturing water withdrawal was increased in the 13 remaining countries to be able to obtain the most plausible industrial water uses (in 8 cases to *WRI* [2000] and in 5 cases to *Shiklomanov* [2000] values). The case of Israel (for which individual country information was available) is a typical example for the semi-arid countries, which required a very strong reduction of the average sector-specific water intensities. There, the calculated industrial water withdrawals, even with a water intensity of cement of only 50 m³/ton, resulted in 0.461 km³/yr, but the records from the country indicate a total of only 0.11 km³/yr (1998, personal communication from Mr. Dreizin, Water Commissioner of Israel). Obviously, advanced water saving technologies lead to much lower water intensities in Israel than in the generally humid countries for which sector-specific water intensities are available (Table 1).

To estimate the consumptive use for manufacturing, withdrawal use is multiplied by the manufacturing water use efficiency (consumption-to-withdrawal ratio). Due to the lack of further information, a manufacturing water use efficiency of 0.135, which is the average value for the USA [*USGS*, 1996], is assumed for all countries,

2.2.2. Spatial Disaggregation of Country Manufacturing Water Use to 0.5° Grid Cells

The calculated manufacturing water withdrawals and consumption per country are distributed onto the 0.5° grid proportional to the light intensity of the city lights at nighttime (*NOAA* [1998]). Each pixel in this city nighttime lights map represents the frequency of occurrence of light in a cloud-free imagery. It compiles cloud-free nights images taken from October 1994 to March 1995 and has been manually cleaned up of lights from fires, boats in the heavily fished coastal areas, and gas flares. The distribution of manufacturing water use according to city nighttime lights is based on the assumption that industrial activity and thus industrial water use should be somewhat correlated with illumination. For comparison, water use for manufacturing was also distributed proportional to the urban population, the brightest city nighttime lights, and the cell area. The latter represents a spatially homogeneous distribution of the country water withdrawal values.

3. Results

Figure 4a shows the thermoelectric water withdrawals in 1995. The largest withdrawals occur in highly industrialized regions like the eastern USA and West Europe, but also in the western part of East Europe and in China. In Japan, most thermal power plants are cooled by salt water, and are thus not included in this data set. In all other regions, thermoelectric water withdrawals are only important in certain industrialized centers (e.g. around Calgary in Canada and along the Ganges river in India). Figure 4b shows the water withdrawals for manufacturing, which are based on distributing country values proportional to city nighttime lights. In the case of manufacturing, the highest withdrawals take place in Europe and eastern Asia.

Figure 5 shows the consumption-to-withdrawal ratio of total industrial water use, i.e. total industrial water consumption as a ratio of the total industrial water withdrawal. For most cells, this ratio lies between 0.1 and 0.25. It is lower in the few cells, where water use for one-through flow power stations dominates, and higher, where water use for cooling tower power stations are important.

Table 3 summarizes industrial water withdrawal and consumption for each continent. North America is the continent with the highest industrial water withdrawal, but most of the used water is returned to the terrestrial water cycle (only 1 million m³ of water is consumed for every 25 million m³ of water withdrawn). This is the effect of the numerous thermal power stations with “one-through flow” cooling system in Canada and the USA. In Europe, 12.5 million m³ of water are withdrawn for each million m³ of consumed water. All other continents have lower withdrawal-to-consumption ratios, as thermoelectric power water use by one-through flow stations is not important. The highest thermoelectric water withdrawals occur in North America, followed by Europe. In the case of manufacturing water withdrawals, it is Asia who has the highest figures, followed by Europe. Around 1995, 400 km³/yr are estimated to be globally withdrawn for cooling of thermal power plants and 325 km³/yr for manufacturing. Water consumption amounts to only 11 km³/yr (3%) and 44 km³/yr (13.5%), respectively. This is in stark contrast to irrigation water use, where water consumption is almost 50% of the approximately 2,500 km³/yr withdrawn.

4. Discussion

The new gridded model-based global data set of industrial water use with a 0.5° resolution is mainly based on information that is easily available at the global scale. For consistency, county-specific information on industrial water use in the USA and Russia was not included in the data set but was used for the validation of the developed data set. In this section, the reliability of the data set will be assessed by comparing the developed data set to these and other published data.

4.1. Water use for cooling of thermal power stations

To validate the methodology for estimating thermoelectric water withdrawals, the computed values are compared with data from the literature for selected countries (Table 4). All literature values are for 1995, except for Canada (1991). The values calculated for USA, Canada, Germany, and Ireland are consistent with the published values. The values for France, Portugal, Spain, and UK differ appreciably, but it is not clear from the source of the literature data [EEA, 1999] whether salt water withdrawals are included in the data or not. Additionally, we do not know whether the figures provided by EEA [1999] include thermoelectric water use or not.

A comparison with independent data below the country level is only possible for the USA, where values of thermoelectric water withdrawals in 1995 are provided for each county [USGS, 1996]. The data for USA federal states are used to validate the spatial disaggregation

of the withdrawals. Figure 6 shows scatter-plots for the withdrawals per federal state (in million m³/yr) and the specific withdrawals per state area (in m³/(km²·yr)). Model efficiency ME indicates the goodness-to-fit with respect to the 1:1 line (ME = 1 indicates a perfect fit) and is calculated as:

$$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (TWW_{calculated,i} - TWW_{published,i})^2}{\sum_{i=1}^n (TWW_{published,i} - \overline{TWW}_{published,i})^2} \quad (3)$$

where

TWW Thermoelectric water withdrawal in federal state (million m³/yr)

n Number of states

ME of thermoelectric power withdrawal per state, in million m³/yr, is 0.77, while ME of the withdrawals per state area, in m³/(km²·yr), is 0.76. For us, both figures are high enough to conclude that the applied methodology for computing spatially distributed thermoelectric power water withdrawals is adequate and leads to a rather low uncertainty. However, ME of thermoelectric power water consumption per state is only 0.58, and 0.43 for consumption per state area, probably due to the fact that the adopted consumption intensities are lower than the actual values for the USA.

4.2. Manufacturing water use

The validation of the spatial disaggregation of country values is performed by comparison to published manufacturing withdrawals in the federal states of the USA and those in the 89 administrative regions in Russia. The values for Russia were obtained by subtracting the calculated thermal water withdrawal to the published values of total industrial water withdrawal. Table 5 summarizes the modeling efficiency ME calculated using Equation (3) for the withdrawals per area in m³/(km² yr). The first column indicates the values obtained using the distribution to grid cells proportional to the city nighttime lights (based on the NOAA [1998] mapping of city nighttime lights). Also presented in the table are the values obtained using three other spatial distribution methods: 1) Proportional to the urban population in the grid cell (calculated based on the gridded population of the world from CIESIN [2001] and the country-specific fraction of rural population as described in Döll *et al.*, 2001), 2) proportional to the brightest city nighttime lights or, in other words, to the biggest and most luminous spots, and 3) proportional to the cell area. The last alternative means that industrial water use per cell area is constant within each country. The best modeling efficiency for each region is indicated in bold. The model efficiencies for all four disaggregation methods are very low, but the distribution proportional to the city nighttime lights shows the best results, except for the Western USA without considering California and Louisiana. Computed consumptive use could be compared only to the USA data set. There, the results obtained using the distribution proportional to the city nighttime lights are also the best, although the model efficiencies are even lower than for withdrawals. It appears that the spatial distribution of manufacturing water use cannot be derived well from indicators like city nighttime lights or the urban population. This might seem obvious considering that major water users like paper plants are likely to have rather insignificant nighttime lights, and they are often located somewhat away from the urban centers. Even though the model efficiencies are low, the distribution of manufacturing water use proportional to the city nighttime lights provides good results regarding the non-developed regions of the world with a low population density, where manufacturing water use is negligible (e.g. Northern Canada, Amazon basin, Siberia, and Western China).

5. Conclusions

The new global data set of industrial water use is a first attempt to provide spatially disaggregated information on both water use for cooling of thermal power plants and water use for manufacturing around 1995. The gridded data set (cell size 0.5° by 0.5°), which covers the total land area of the Earth except Antarctica, includes both consumptive and withdrawal water uses. It helps to better assess the current water use situation in river basins, as it allows the distinction of two very dissimilar industrial water uses, which differ with respect to their consumption-to-withdrawal ratio and their pollution potential. The model-based data set will be a good basis for scenario development because it considers the various driving forces of thermoelectric power water use (thermoelectric electricity production) and manufacturing water use (sectoral production volume or industrial GDP). Additionally, the data on thermoelectric power water use can advance a macro-scale assessment of heat pollution of rivers.

Due to the inclusion of the specific location of 63,590 thermal power stations, the data set appears to represent the actual water use for cooling of thermal power plants quite well. The estimates of grid-level manufacturing water use are rather poor for the following reasons:

- Published data on country-specific total industrial water use, from which the manufacturing water use is derived by means of tuning the model calculations, are rather uncertain.
- The sector-specific water use intensities are expected to vary considerably among countries but, due to the lack of data, are generally assumed to be constant in this study (except for the few countries for which country-specific information on sectoral water use intensities were available).
- It does not seem to exist a good predictor for the spatial distribution of manufacturing water use within countries. The consideration of city nighttime lights at least prevents the allocation of manufacturing water use in grid cells without much human activity.

To arrive at a better global picture of industrial water use, water use surveys like those conducted every five years in all counties of the USA [USGS, 1996] are recommended. Besides, like in the USA, the results of these surveys must be made freely available. Irrespective of the global data set, such surveys would be a very important basis for river basin management plans and water demand management at the river basin or country level.

Acknowledgments The research was funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF 07GWK03 - 203008).

6. References

- Alcamo, J., P. Döll, T. Henrichs, F. Kaspar, B. Lehner, T. Rösch, S. Siebert. WaterGAP 2: A model for global assessment of freshwater resources. *Hydrological Sciences Journal*, 2003 (in print).
- Canada Statistics. Major Withdrawal Uses of Water. Available in the Internet under <http://www.statcan.ca/english/Pgdb/Land/Environment/envir05.htm>, 2001.
- Carmichael, J.B. and K.M. Strzepek. *Industrial Water Use and Treatment Practices*. Published for the United Nations Industrial Development Organisation (UNIDO) by Cassell Tycooly, 123 pages, 1987.
- CIA World Factbook. Under <http://www.cia.gov/cia/publications/factbook/>, 2001.
- CIESIN (Center for International Earth Science Information Network). Gridded Population of the World, version 2. <http://sedac.columbia.edu/plue/gpw/index.html>, 2001.
- Döll, P., J. Alcamo, T. Henrichs, F. Kaspar, B. Lehner, T. Rösch, S. Siebert. The global integrated water model WaterGAP 2.1. In *Kassel World Water Series, Report Nr. 5*: EuroWasser. Center

- for Systems Research, University of Kassel, 2001 (also in www.usf.uni-kassel.de/usf/archiv/dokumente/kwws/kwws.5.en.htm).
- Döll, P. and S. Siebert. Global modeling of irrigation water requirements. *Water Resources Research*. 38, 4, 8.1-8.10, DOI 10.1029/2001WR000355, 2002.
- Döll, P., F. Kaspar, B. Lehner. A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation. *Journal of Hydrology*. 258, 214-231, 2003.
- EPA (Environmental Protection Agency). Web page available at <http://www.epa.gov>, 2002.
- EEA (European Environmental Agency). Sustainable Water Use in Europe. Part 1: Sectoral use of water. Environmental Assessment Report No. 1. Report available at <http://reports.eea.eu.int/binary/enviasses01pdf/en/enviasses01.pdf>, 1999.
- FAO AQUASTAT. At www.fao.org/waicent/faoinfo/agricult/agl/aquastat/dbase/index.stm, 2003.
- Goscomstat (Russian Federation State Statistics Committee). Environmental protection in Russia. *Factbook*. Moscow, 1998.
- International Energy Database. World Total Electricity Installed Capacity, January 1980 – January 1998. *Energy Information Administration*, 1999.
- IAEA (International Atomic Energy Agency). Database on nuclear power stations. Available at <http://www.iaea.org/cgi-bin/db.page.pl>, 2000.
- ITT Industries Engineered for Life. Guidebook to Global Water Issues. Available at http://www.itt.com/waterbook/ind_USA.asp, 2002.
- Lumby, A.B.. The scope for clean production: Some comments on the textile industry in the greater Durban metropolitan area. Department of Economics, University of Natal, RSA. Available at <http://www.feem.it/gnee/pap-abs/lumby.pdf>, 1998.
- NIMA (National Imagery and Mapping Agency). Database of foreign geographic feature names. The GEOnet Names Server (GNS). At <http://164.214.2.59/gns/html/index.html>, 2000.
- NOAA (National Geophysical Data Center). Image and data processing by NOAA's National Geophysical Data Center. DMSP data collected by US Air Force Weather Agency. http://www.ngdc.noaa.gov/news/night_light.html, 1998.
- Rogers, P.. Role of Government in regulating industrial water activities. Harvard University. *United Nations Commission on Sustainable Development*, 1998.
- RWE Campus. Stromerzeugung - Ausnutzungsdauer der Kraftwerke in Deutschland. At http://www.rwe.com/1.7_RWE_Campus/1.7.1_Wissen/1.7.1.6_Stromerzeugung/bild4.html, 1997.
- Shiklomanov, I.. 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: Analysis Global Water Resources and Use*, Earthscan Publications, London, 2000.
- Siebert, S. and P. Döll. 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, 2001.
- Statistisches Bundesamt. Langfristige Entwicklung in der Wasserwirtschaft (1975 – 1995) – Ausgewählte Ergebnisse. *Statistisches Bundesamt*, Wiesbaden, 1998.
- UDI (Utility Data Institute). World Electric Power Plants Database. Platts Energy InfoStore, <http://www.platts.com>, 2000.
- UN Statistical Year Book, 1997.
- Unipede. BAT for Cooling Systems. Working Group “Environmental Protection”. Available at <http://www.unipede.org>, 1999.
- USGS (US Geological Survey). Estimated Water Use in the United States in 1995. Available at <http://water.usgs.gov/watuse/spread95/usst95.txt>, 1996.
- WRI (World Resources Institute). *World Resources 2000 – 2001: People and Ecosystems: The Fraying Web of Life*. Elsevier Science, UK, 389 pages, 2000.

Table 1. Specific water intensity for various manufacturing sectors

Country	Chemicals (m ³ /t)	Pulp & Paper (m ³ /t)	Pig Iron (m ³ /t)	Sugar (m ³ /t)	Beer (l/l)	Cloth (m ³ /t)	Crude Steel (m ³ /t)
Canada	345 ^f	157 ^f	190 ^f		9.3 ^b		
USA	600 ^e	180 ^e	86 ^b	9 ^b	9 ^b	200 ^e	6 ^b
China							56 ^b
Japan							56 ^b
Austria		150 ^a		15 ^a	10 ^a		15 ^a
Belgium					9.3 ^b		
Denmark				10 ^b	3.4 ^a		
Finland		100 ^b		10 ^b	9 ^b	110 ^b	
France		150 ^b		21 ^a	25 ^a	110 ^b	63 ^b
Germany	1200 ^d	50 ^d	96 ^d	10 ^b			
Ireland					8 ^a		
Israel				2 ^h	13.5 ^b		
Norway		20 ^a			10 ^a		30 ^a
Russia		223 ^b					63 ^b
South Africa						350 ^g	
Spain		250 ^a		3.5 ^a	6 ^a	8 ^a	30 ^a
Sweden		20 ^a		0.5 ^a	4 ^a	45 ^a	5.3 ^a
UK		20 ^a		1.5 ^a	6.5 ^a	110 ^a	100 ^a
Average	715	120	124	8.3	9.5	133	39

^a *European Environmental Agency* [1999]

^b *Carmichael & Strzepek* [1987]

^c *EPA* [2002]

^d *Statistisches Bundesamt* [1998]

^e *ITT Industries* [2002]

^f *Canada Statistics* [2001]*USGS* [1996]

^g *Lumby* [1998]

^h *Rogers* [1998]

Table 2. Country-specific versus *Shiklomanov* [2000] values of total industrial water use (in million m³/yr) for 1995

	Country-specific	<i>Shiklomanov</i> [2000]
Canada ^a	35,571	39,542
Germany ^b	35,138	32,200
Ireland ^c	250	599
Israel ^d	110	100
Italy ^c	7,980	11,676
Norway ^c	1,378	1,440
Russia ^e	39,500	50,220
Sweden ^c	1,479	1,758
United Kingdom ^f	7,190	21,996
USA ^g	218,608	216,630

^a *Canada Statistics* [2001]

^b *Statistisches Bundesamt* [1998]

^c *European Environmental Agency* [1999]

^d Personal communication from Mr. Dreizin, Water Commissioner of Israel [1998]

^e *Goscomstat* [1998]

^f *FAO AQUASTAT* [2003]

^g *USGS* [1996]

Table 3. Summary of industrial water use for each continent (in million m³/yr) for 1995

	For cooling of thermal power stations		For manufacturing		Total consumption/ total withdrawal
	Withdrawals	Consumption	Withdrawals	Consumption	
North America	224,395	3,760	42,526	5,741	0.04
South America and Caribbean	7,308	334	21,394	2,888	0.11
Africa	3,637	344	6,219	840	0.12
Europe	121,789	3,838	96,586	13,039	0.08
West Asia	1,462	159	2,723	159	0.13
Asia	41,033	2,804	149,415	20,171	0.13
Oceania	1,144	168	5,932	801	0.14
World	400,769	11,407	324,793	43,847	0.08

Table 4. Comparison between computed and published water withdrawals for cooling of thermal power stations in 1995 for selected countries (in million m³/yr)

	Calculated	Published	Calculated/Published (%)
USA ^a	187,882	183,396	102
Canada ^b	28,426	28,289	100
Germany ^c	26,345	27,439	96
France ^d	17,944	25,835	69
Ireland ^d	292	277	105
Portugal ^d	449	2,682	17
Spain ^d	3,136	4,909	64
United Kingdom ^d	1,574	1,721	91

^a USGS [1996]

^b Values for 1991 from *Canada Statistics* [2001]

^c *Statistisches Bundesamt* [1998]

^d *European Environmental Agency* [1999]

Table 5. Calculated model efficiencies for manufacturing withdrawals per area in the federal states of USA and the administrative regions of Russia (in $\text{m}^3/(\text{km}^2\cdot\text{yr})$). The bold values indicate the highest efficiencies for each region

	City nighttime lights	Urban population	Brightest city nighttime lights	Cell area
Western USA	0.24	0.09	0.24	-0.03
Western USA without California and Louisiana	-0.15	0.61	0.44	-2.31
Eastern USA	-0.31	-4.65	-0.56	-0.54
Eastern USA without Indiana, West Virginia, New Jersey and Massachusetts	-0.46	-4.78	-1.72	-0.55
USA	0.08	-2.41	-0.56	-0.12
USA without California, Louisiana, Indiana, West Virginia, New Jersey and Massachusetts	0.13	-2.23	-0.54	0.03
Russia	0.64	-0.38	0.30	-0.03
Russia without Saint Petersburg, Moscow, Ingushetia Republic, Stavropolksy Kray, and Leningradskaya Oblast	0.21	-1.42	-0.19	-0.10

- The western USA includes Alaska, Arizona, Arkansas, California, Colorado, Idaho, Iowa, Kansas, Louisiana, Minnesota, Missouri, Montana, Nebraska, Nevada, New Mexico, North Dakota, Oklahoma, Oregon, South Dakota, Texas, Utah, Washington, and Wyoming.

- The eastern USA comprises Alabama, Connecticut, Delaware, Florida, Georgia, Hawaii, Illinois, Indiana, Kentucky, Maine, Maryland, Massachusetts, Michigan, Mississippi, New Hampshire, New Jersey, New York, North Carolina, Ohio, Pennsylvania, Rhode Island, South Carolina, Tennessee, Vermont, Virginia, West Virginia, and Wisconsin.

- Russia includes 89 administrative regions.

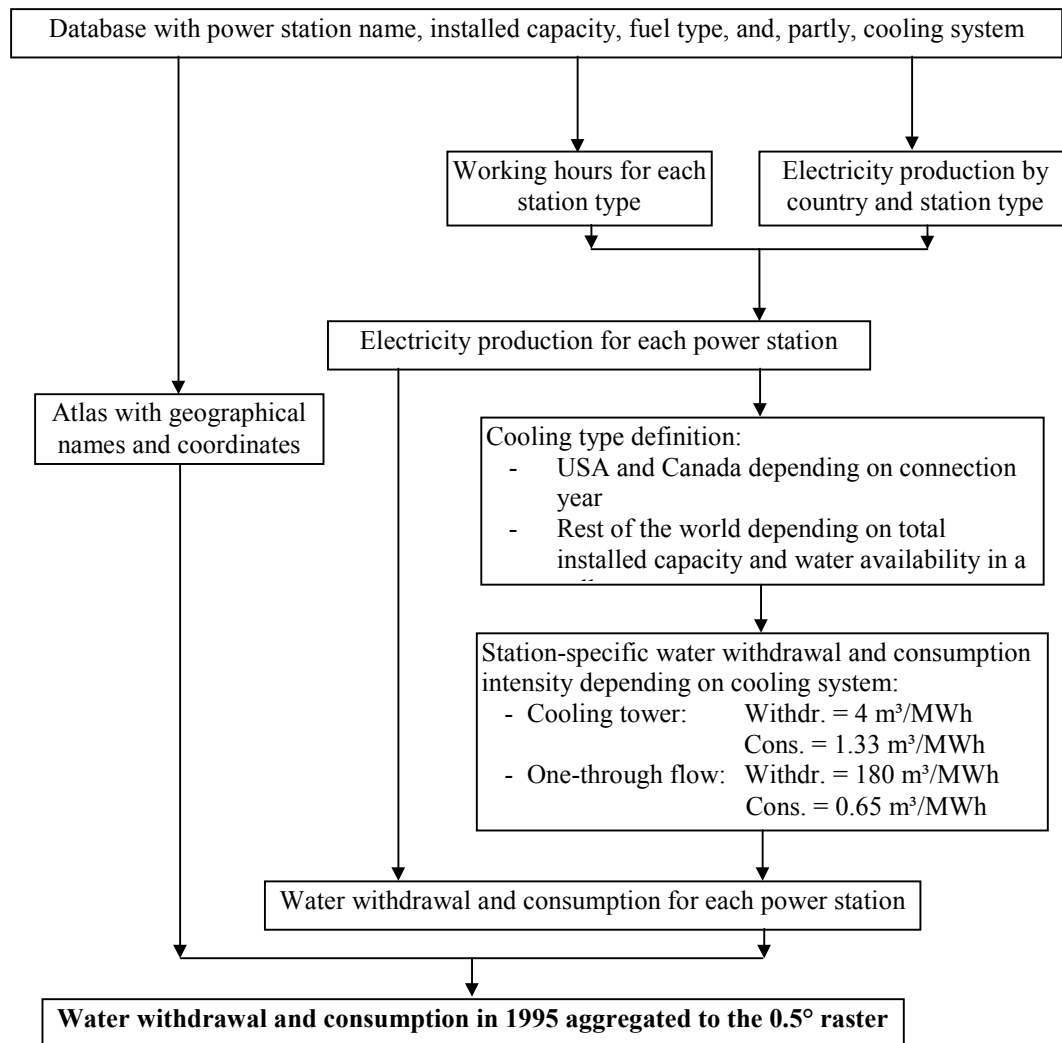


Figure 1. Description of the methodology applied for the calculation of water use for cooling of thermal power stations.

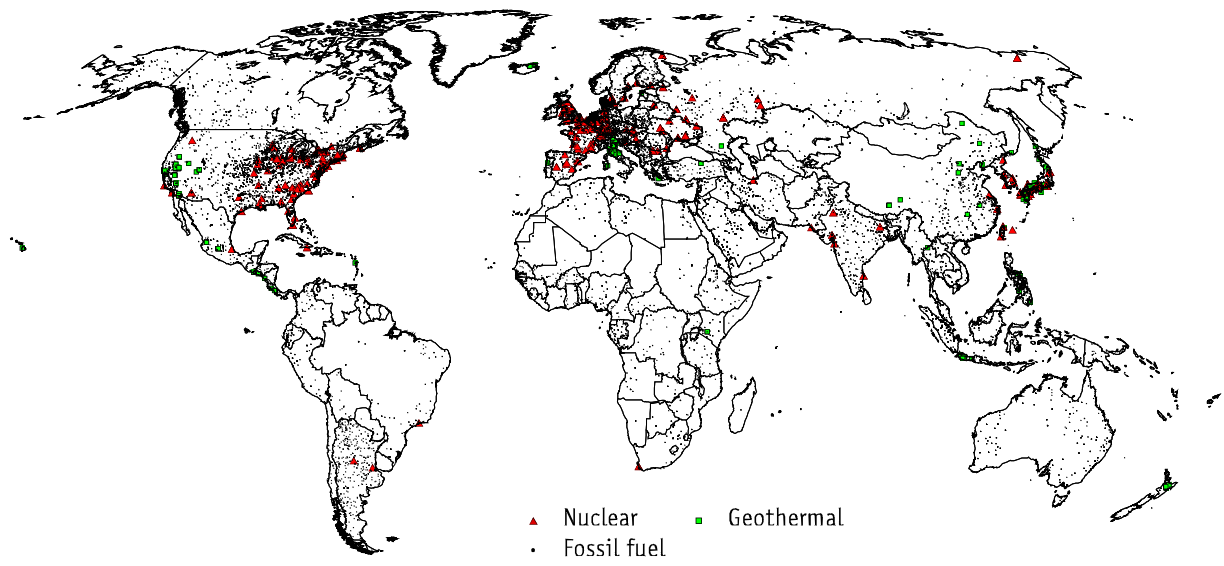


Figure 2. Location of the 63,590 thermal power stations included in the calculation of the new data set.

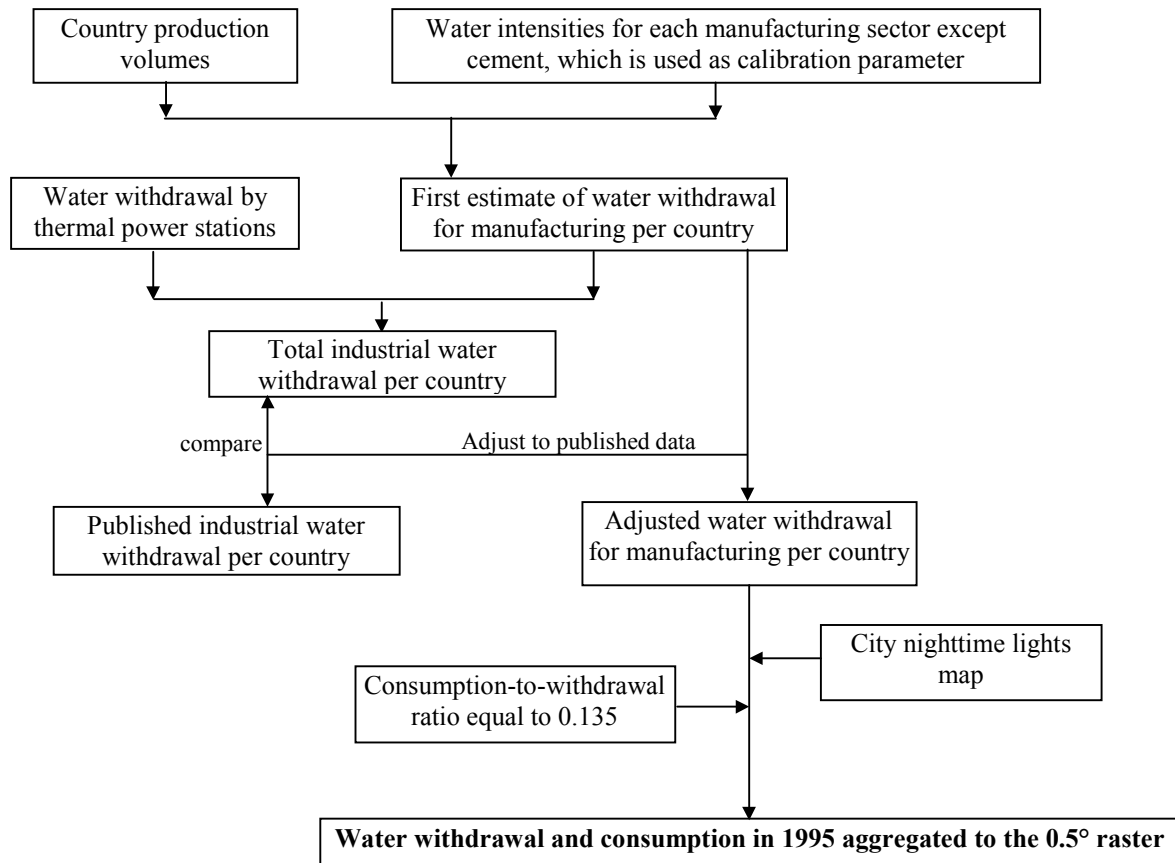


Figure 3. Description of the methodology applied for the calculation of water use for manufacturing. The manufacturing sectors included in the computation are chemicals, pulp and paper, pig iron, sugar, beer, cloth, crude steel, and cement.

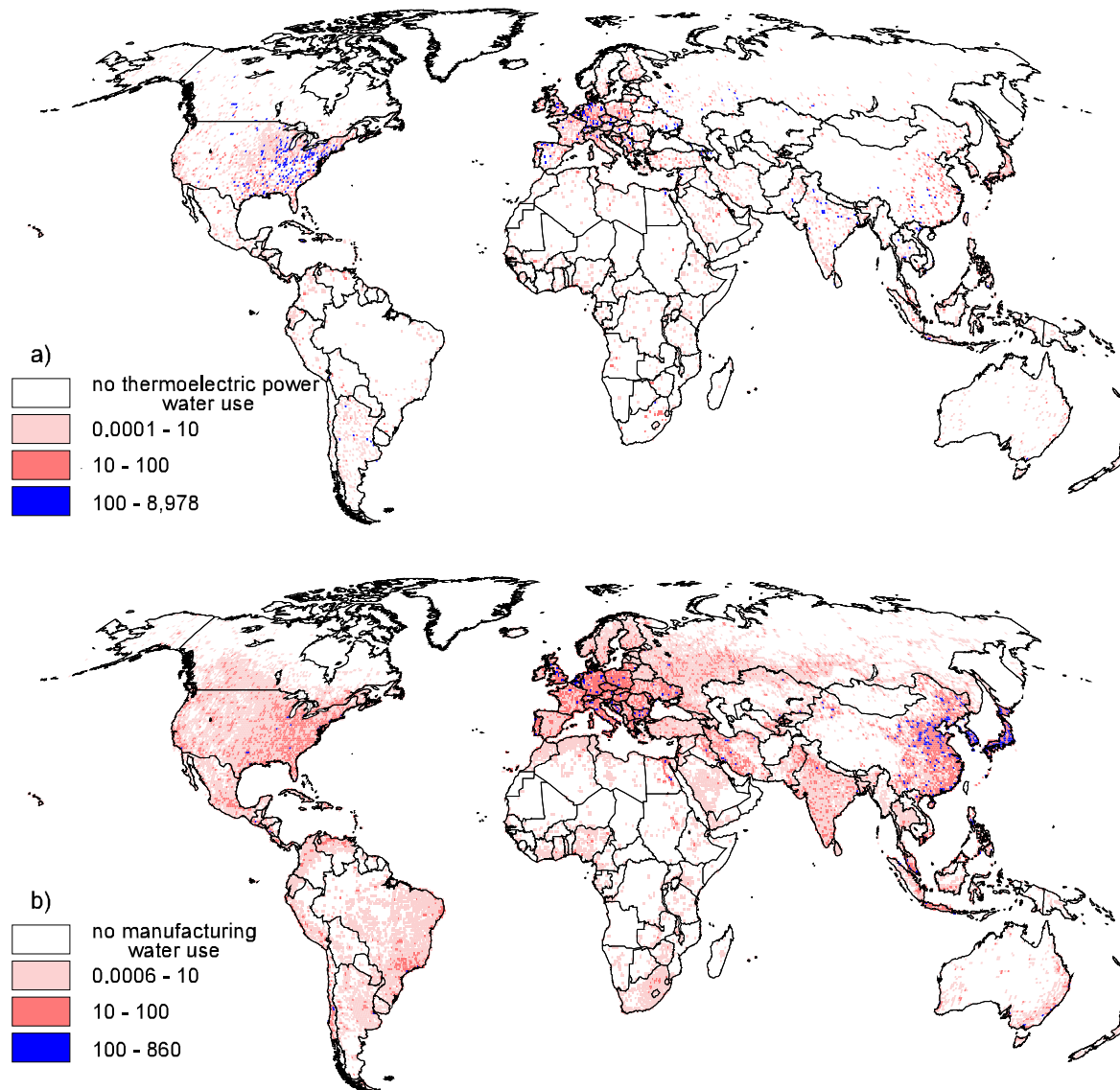


Figure 4. a) Water withdrawals for cooling of thermal power stations in 1995 per 0.5° grid cell, in million m³/yr; b) Water withdrawals for manufacturing in 1995 per 0.5° grid cell, in million m³/yr.

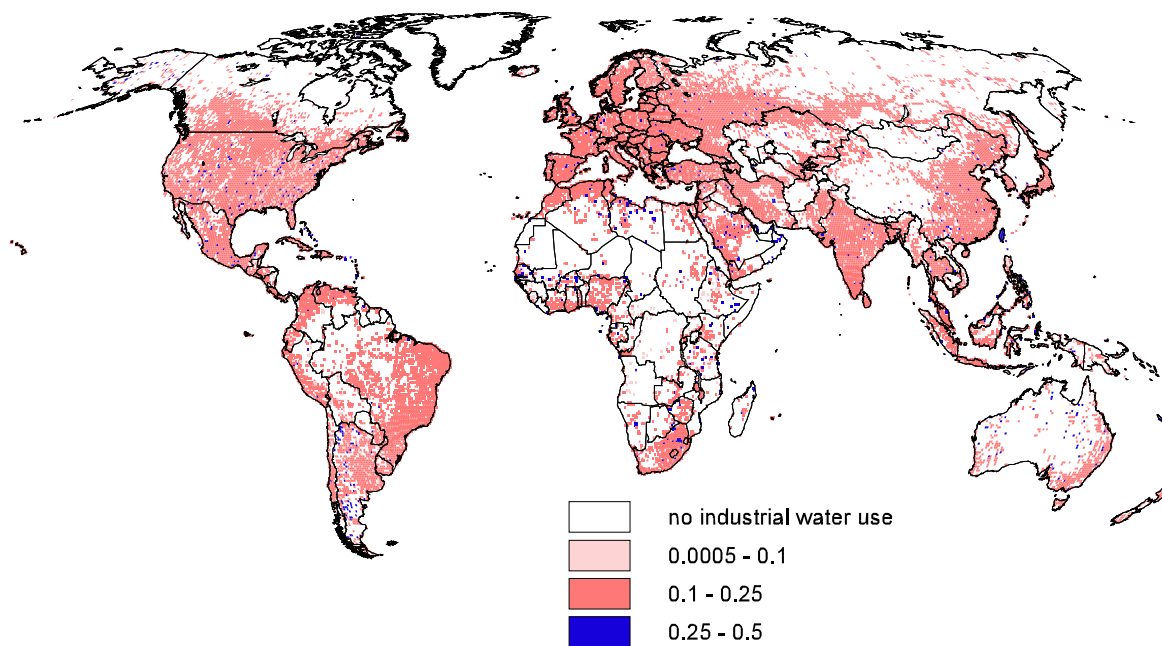


Figure 5. Consumption-to-withdrawal ratio of total industrial water use. The lower ratios correspond to cells in which power stations with “one-through flow” cooling system are predominant. Those cells in which manufacturing is more important are characterized by intermediate values of consumption-to-withdrawal ratios. The highest ratios indicate cells where water use by power stations with “cooling towers” dominates.

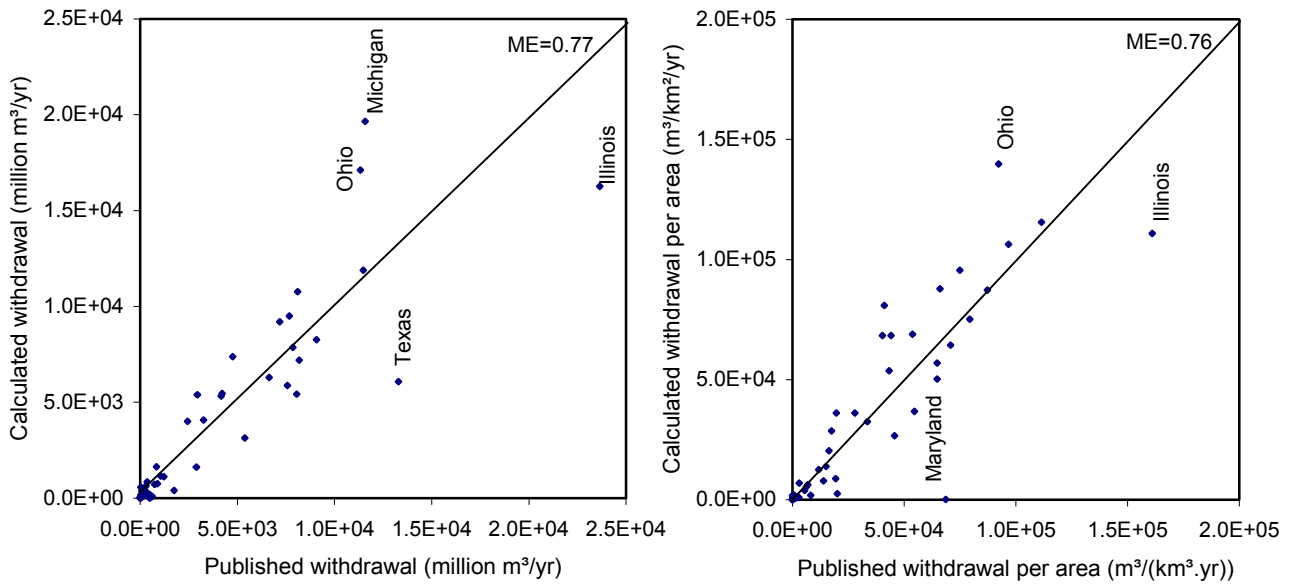


Figure 6. Comparison of calculated and published [USGS, 1996] withdrawals for cooling of thermal power stations in the federal states of the USA.

[5]

**Änderung von Nährstoffeinträgen und –frachten im Einzugsgebiet der Elbe infolge des
Globalen Wandels**

Venohr, M., Soukup, M., Vassolo, S., Döll, P., Behrendt, H.

Tagungsband des Tags der Hydrologie 2003 in Freiburg. (im Druck)

2003

Änderung von Nährstoffeinträgen und -frachten im Einzugsgebiet der Elbe infolge des Globalen Wandels

Markus Venohr, Mojmir Soukup, Sara Vassolo, Petra Döll & Horst Behrendt

Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes GLOWA-Elbe wird der Einfluss sich aufgrund von globalem Wandel verändernder Niederschläge und Abflüsse auf die Nährstoffeinträge innerhalb des gesamten Elbegebietes untersucht. Die Berechnungen der vorliegenden Untersuchungen wurden für die Zeiträume 2011-2040 und 2061-2090 vorgenommen (im folgenden mit 2025 und 2075 abgekürzt). Als Eingangsdaten dienten die Niederschläge und Temperaturen zweier Klimamodelle (ECHAM4, HadCM3) die mit dem Wasserhaushaltsmodell WaterGAP in regionalisierte Abflüsse überführt wurden. Die an das IPCC Klimaszenario B2 orientierten Berechnungen zeigten keinen eindeutigen Trend für die Niederschläge und Abflüsse. Somit ergaben sich für die mit dem Modell MONERIS ermittelten Einträge im Elbegebiet je nach Änderung der Niederschläge und Abflüsse im Mittel ebenfalls nur sehr geringe Änderungen. Trotz der teilweise erhöhten Abflüsse wurde im wesentlichen eine Erhöhung der Retentionsleistung ermittelt, die unter anderem auf eine Temperaturerhöhung und ausgeglichenerer monatlich Abflüsse zurückgeführt werden kann. Aus dieser Kombination sich nur wenig ändernder Einträge und einer eher zunehmenden Retentionsleistung kann eine Tendenz zur Abnahme der resultierenden Fracht abgeleitet werden. Zusammenfassend lässt sich jedoch folgern, dass die möglichen klimabedingten Änderungen der Einträge und der resultierenden Fracht insgesamt weit unter den sozioökonomisch bedingten Änderungen in der Vergangenheit wie z.B. nach der Wiedervereinigung liegen. Für die vorliegende Arbeit wurden nur der mögliche Einfluss sich verändernder Niederschläge, Abflüsse und Temperaturen berücksichtigt. Zukünftige Eintragsberechnungen könnten durch eine umfassendere Einbindung von z.B. veränderten Kläranlageneinleitungen oder Landnutzungsdaten usw. erweitert und verbessert werden.

1 Einleitung

Aufgrund anthropogener Einflüsse wird vom International Panel on Climate Change (IPCC) weltweit eine Erwärmung um 1,4 K bis 5,8 K für die nächsten 100 Jahre prognostiziert. Ausgehend von dieser Erwärmung kann auch mit einer Intensivierung des Wasserkreislaufs gerechnet werden. Durch die Anwendung von Wasserhaushaltsmodellen wird seit einigen Jahren versucht Aussagen über den Einfluss dieser Klimaveränderungen auf die Wasserverfügbarkeit und -nutzung abzuleiten. Seit dem Jahr 2000 werden diese Zusammenhänge im Rahmen des BMBF-Projekts GLOWA-Elbe (Integrierte Analyse der Auswirkungen des Globalen Wandels auf die Umwelt und die Gesellschaft im Elbe-Gebiet) mittels integrierter Analysen am Beispiels des Einzugsgebiets der Elbe untersucht. Die Erforschung der Einflüsse des Klimawandels auf den regionalen Wasser- und insbesondere Stoffhaushalt stecken noch in den Anfängen und sind mit großen Unsicherheiten behaftet. In

der vorliegenden Arbeit wird erstmalig versucht, über die quantitative Veränderung der Abflüsse hinaus auch Aussagen über die möglichen Einflüsse auf die landseitigen Einträge und die daraus resultierenden Frachten zu schließen.

Die Untersuchungen bauen auf den Ergebnissen der globalen Klimamodelle ECHAM4 (ROECKNER et al. 1996) und HadCM3 (GORDON et al. 2000) und den daraus mit dem globalen Modell WaterGAP (Water – Global Assessment and Prognosis; DÖLL et al. 2003) berechneten Szenarien zur Wasserverfügbarkeit und –verbrauch für die Jahre 2025 und 2075 auf. Die Berechnungen folgen den Annahmen des IPCC Szenarios B2. Die so ermittelten monatlichen Temperatur-, Niederschlags- und Abflusszeitreihen wurden als Eingangsdaten für das Nährstoffeintragsmodell MONERIS (Modelling Of Nutrient Emissions in River Systems; BEHRENDT et al. 2002) verwendet. Als Referenz dienen die langjährigen mittleren Abflüsse, Temperaturen und Niederschläge der Periode 1961-1990.

Verschiedene Studien haben nahegelegt, dass mögliche Klimaänderungen durchaus relevante Veränderungen bezüglich der Häufigkeit und Ausprägung von extremen Niederschlägen aber auch Hochwasserereignissen und Niedrigabflüssen bedingen können. Eine direkte Auswirkung auf die Eintragungssituation könnten z.B. erhöhte Einträge durch Erosion aufgrund einer steigenden Anzahl von Starkniederschlägen sein. Andererseits könnten in seinen Ausprägungen verlängerte Perioden mit Niedrigwasser für ein längeres Trockenfallen von Drainagen sorgen und somit die Einträge über diesen Pfad im Jahresmittel deutlich reduzieren. Die teilweise indizierten geringeren Niederschläge im Einzugsgebiet der Elbe würden auch für geringere Einträge über die Überläufe von Misch- und Trennkanalisation beitragen. Ein weiterer wesentlicher Einfluss, sowohl auf die Einträge als auch auf die gewässerinterne Retention, kann durch ein Ansteigen der Temperatur verursacht werden. Diese kann zu einer Verschiebung der Schneegrenze führen, wodurch zunächst nivale Gebiete in pluviale übergehen können. Zum einen würden somit durch die Schneeschmelze verursachte Abflussspitzen abgemildert, zum anderen würden schwächere Hochwässer nach Schneeschmelze die flussinterne Retention begünstigen.

Da die Ergebnisse von detaillierten Untersuchungen zur Veränderung von Extremereignissen z.Zt. noch nicht vorliegen, beschränken sich die folgenden Aussagen zunächst noch auf eine Analyse des möglichen Einflusses der mittleren Niederschlags- Abfluss- und Temperaturbedingungen auf die künftige Stoffeintragungssituation im Elbegebiet. Das Modell MONERIS wurde schon häufig für Bestimmung von Nährstoffeinträgen in verschiedensten Einzugsgebieten Mittel- und Osteuropas angewendet. Da das Modell bislang Einträge als mittlere jährliche Werte berechnet, können bisher keine detaillierten Aussagen zur innerjährlichen Verteilung der Einträge gemacht werden.

Um Aussagen über die aus den Szenarien resultierenden möglichen Frachtänderungen machen

zu können, wurde anschließend die gewässerinterne Retention mit einem im Rahmen der EU-Projekte BUFFER und EUROHARP entwickelten Ansatz (Venohr & Behrendt, 2002) berechnet. Geringere Abflüsse würden tendenziell zu einer geringen Fließgeschwindigkeit und somit zu einer längeren Verweilzeit in einem Gewässerabschnitt sorgen. Gleichzeitig wäre mit höheren Sedimentationsraten und gegebenenfalls mit einem erhöhten Macrophyten aufkommen zu und somit mit einer erhöhten Retentionsleistung zu rechnen. Erhöhte Abflüsse würden demnach eher zu einem umgekehrten Effekt führen. Wobei häufigere

Hochwässer, bei denen mitgeführtes Sediment auf den Überflutungsflächen abgesetzt wird, für die Abschätzung der Netto-Retention zusätzlich berücksichtigt werden müssten.

Die Veränderung der Wassertemperatur beeinflusst unter anderem die Aktivität von im Sediment bzw. im Biofilm submerser Pflanzen befindlichen Bakterien, so dass ein Zusammenhang zwischen erhöhten Temperaturen, erhöhter bakterieller Aktivität und erhöhten Denitrifikationsraten zu erwarten ist. Für innerjährliche Schwankungen der Temperatur konnte dieser Zusammenhang durch den Retentionsansatz bereits beschrieben werden. Für die Berechnungen wird davon ausgegangen, dass sich die Zusammensetzung der Artengemeinschaft im Gewässer nicht ändert.

Basierend auf diesen Annahmen wird die Änderung der jährlichen Retentionsrate und schließlich die Änderung der Frachten diskutiert. Hierbei wird auch der Jahresgang der Retentionsleistung dargestellt und mit den heutigen Bedingungen verglichen.

2 Methodik

Für die Modellierung des Ist-Zustandes, als Referenzwert für mögliche Klimaänderungen, wurden aus den langjährigen (1961-1990), gemessenen (NEW et al. 2000) Klimadaten (z.B. Niederschläge und Temperaturen), mit dem Modell WaterGAP regionalisierte (räumlichen Auflösung von 0,5°) Abflüsse berechnet. Für beide Zeiträume wurden zusätzlich Szenarien zur Bevölkerungsentwicklung und der Wasserentnahme zur Kühlung von Kraftwerken berücksichtigt. Aufgrund der Unsicherheiten bei der Modellierung von Niederschlagsänderungen ist es empfehlenswert, Ergebnisse verschiedener globaler Klimamodellen bei der Berechnung von Klimaszenarien zu berücksichtigen. Hierzu wurde auf die Ergebnisse der Szenarioberechnungen der Klimamodelle HadCM3 und ECHAM4 zurückgegriffen, und ebenfalls mit WaterGAP in regional differenzierte Abflüsse für das gesamte Elbeinzugsgebiet für die Zeiträume um 2025 und um 2075 übertragen.

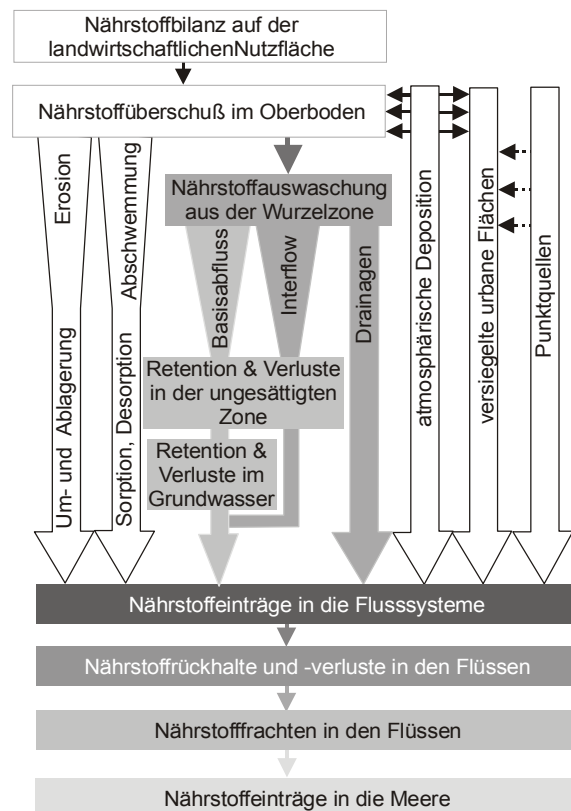


Abb. 1: Berücksichtigte Eintragspfade des Modells MONERIS (BERHENDT et al. 2002).

$$C_{\text{DIN-gem}} = C_{\text{DIN-0}} \cdot e^{-bT} \quad (\text{Gl. 1})$$

$C_{\text{DIN-gem}}$ = gemessene DIN-Konzentration

$C_{\text{DIN-0}}$ = DIN-Konzentration bei 0 °C
(ohne Retention)

T = gemessene Wassertemperatur

Ausgangsbasis für die vorliegende Untersuchung war zunächst die Erweiterung der Anwendung des Modells MONERIS (BEHRENDT et al. 2002) auf den tschechischen Teil der Elbe durch Aufbau einer harmonisierten flussgebietsdifferenzierten Datenbasis für das gesamte Einzugsgebiet. Wie in

Abbildung 1 gezeigt wird, beschreibt MONERIS Nährstoffeinträge von sechs diffusen Eintragspfaden und von Punktquellen.

Den Modellberechnungen lagen die Angaben zu den landwirtschaftlichen Belastungen (z. B. Nährstoffüberschüsse) und Abwasserstatistik für die Zeiträume 1983-87, 1993-1997 sowie 1998-2000 zugrunde. Mit WaterGAP wurden die Ergebnisse der Szenarioberechnungen für die Modelle HadCM3 und ECHAM4 in regional differenzierte Abflüsse auf das gesamte Elbegebiet für die Zeiträume um 2025 und um 2075 übertragen. Für die Szenarien der Nährstoffeinträge infolge der möglichen veränderten Abflüsse und Niederschläge gingen, außer diesen, keine veränderten Eingangsdaten gegenüber dem Zeitraum 1961-1990 in die Berechnungen ein. Nährstoffeinträge aus Punktquellen wurden vom Zeitraum 1998-2000

übernommen.

$$\frac{dC}{dt} = \frac{Q}{V} (C_{\text{IN}} - C) - \frac{1}{z} a \cdot e^{bT} = 0 \quad (\text{Gl. 2})$$

$$L = E_M \cdot \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(1 + 0,703 \cdot e^{0,067 \cdot T_i} \cdot \left(\frac{A_W}{Q_{mi}} \right)^{0,358} \right) \right)^{-1} \quad (\text{Gl. 3})$$

mit:

V = Volumen des untersuchten
Gewässerabschnittes [m³]

C_{IN} = mittlere Konzentration der Einträge [mg/l]

C = mittlere Konzentration im Fließgewässer [mg/l]

z = mittlere Tiefe [m]

T = Wassertemperatur [°C]

L = Stickstofffracht [t/a]

Q_{mi} = Abfluss [m³/a]

C_{Ni} = Stickstoff Konzentration [mg/l]

EM = gesamte Stickstoffeinträge nach MONERIS [t/a]

A_W = Fläche der Oberflächengewässer [m²]

n = Anzahl der Messungen [-]

a, b = Modell-Koeffizienten [-]

In vielen mitteleuropäischen Oberflächengewässern ist die Denitrifikation der dominierende Prozess für die Stickstoffretention.

Denitrifikation findet im wesentlichen unter anaeroben Verhältnissen in den obersten Millimetern des Sediments oder im Biofilm submerser Pflanzen statt. Sie wird von einer sehr heterogenen Gruppe, meist heterotropher Denitrifikanten bewerkstelligt. Die Denitrifikationsrate nimmt wie auch die Aktivität der Denitrifikanten mit der Temperatur zu. MOHAUPT (1985) konnte in der Spree abnehmende DIN (anorganisch gelöster

Stickstoff) Konzentrationen bei steigenden Temperaturen nachweisen. In Anlehnung an die Gesetzmäßigkeit der Thermodynamik irreversibler Prozesse verwendete er

eine exponentielle Gleichung für die Beschreibung der Konzentrationsabhängigkeit von der Temperatur (Gl. 1) und ermittelte so einen Faktor b von -0.069 ($r^2=-0,95$). HILL (1988) untersuchte in einer unabhängigen Studie die Veränderung der NO_3 – Aufnahme von Sedimentkernen mit der Temperatur. Bei einer Erwärmung der Kerne von 0 auf 20°C kam es zu einer Vervielfachung der Aufnahme. Unterverwendung von Gl. 1 lässt sich für b ebenfalls ein Wert von $-0,069$ ermitteln. Für eine weitere Überprüfung dieser Abhängigkeit wurden die Zeitreihen 50 verschiedener Flussgebiete untersucht. Um die Probleme einer Autokorrelation zwischen Abfluss und Temperatur zu minimieren wurden im gleichen Datensatz Flachlandflüsse als auch Flüsse des mittelgebirgs- und alpinen Raumes verglichen, welche unterschiedliche saisonale Abflussganglinien aufweisen. Wie sich aus der theoretischen Ableitung von Gleichung 2 zeigen lässt, weist die Stickstoffretention somit eine Abhängigkeit von der Temperatur und der Hydraulischenbelastung (A_w/Q) auf (Gl.3). Für die letztendliche Berechnung der Retention bzw. der resultierenden Fracht wurde der in Gleichung 3 beschriebene kombinierte Ansatz verwendet.

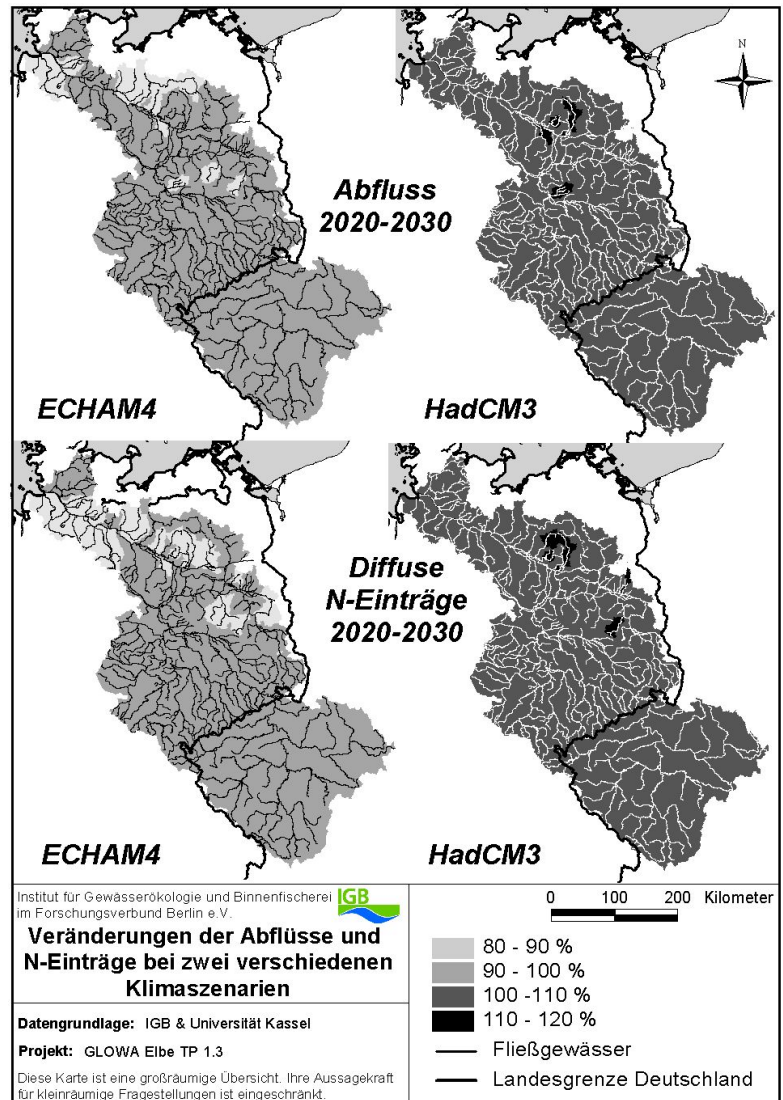


Abb. 2: Veränderung der Abflüsse und N-Einträge zwei verschiedener Klimaszenarien.

3 Ergebnisse

Szenarioberechnungen zur Abschätzung des Klimawandels auf die Wasserverfügbarkeit im Elbeinzugsgebiet mit dem globalen Modell WaterGAP haben gezeigt, dass die Wasserverfügbarkeit im Gebiet entweder abnehmen oder zunehmen kann (Abb. 2). Während für 2075 beide Klimamodelle einen leichten Anstieg des Abflusses an der Elbmündung vorhersagen, können für den Zeitraum 2025 keine eindeutigen Aussagen zur Abflussänderung abgeleitet werden. Dies ist vor allem auf die Unsicherheiten bei der Niederschlagsberechnung durch die zur Verfügung stehenden Klimamodellen zurückzuführen.

Die Berechnungen der diffusen Einträge und Einträgen aus Punktquellen in Oberflächengewässer nach MONERIS sind maßgeblich von den Abflüssen und den Niederschlägen abhängig. Die Ergebnisse der Modellberechnungen zeigten jedoch, dass die Auswirkungen der möglichen Änderungen der mittleren Niederschläge und Abflüsse auf die diffusen Nährstoffeinträge geringer sind als die infolge eines umfassenden sozioökonomischen Wandels und andere Maßnahmen zur Reduzierung der Eintragsituation (Abb. 3). Der Einfluss von Klimaänderungen auf die Nährstoffeinträge wird sich wahrscheinlich nur für starke Veränderungen von Extremsituationen (Trockenperioden, Hochwasser) oder durch indirekte Wirkungen über Ertragsveränderungen und damit veränderte Überschüsse usw. nachweisen lassen. Im Mittel ergab sich eine Änderung der Stickstoffeinträge um $\pm 2\%$. Wobei in Teilgebieten die Veränderungen der Stickstoffeinträge

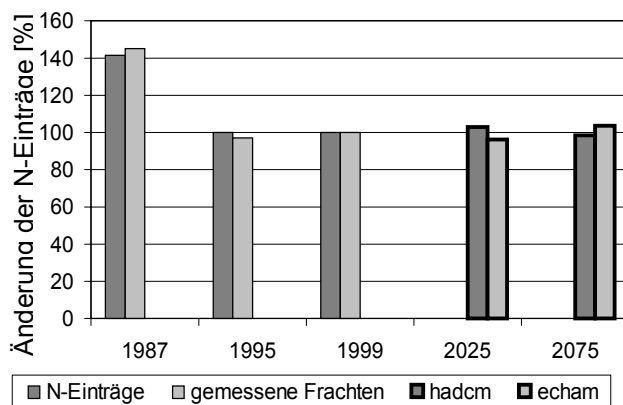


Abb. 3: Änderung der diffusen Nährstoffeinträge nach Berechnungen mit MONERIS für die Zeiträume 1983-89, 1993-97, 1998-2000, 2025 und 2075.

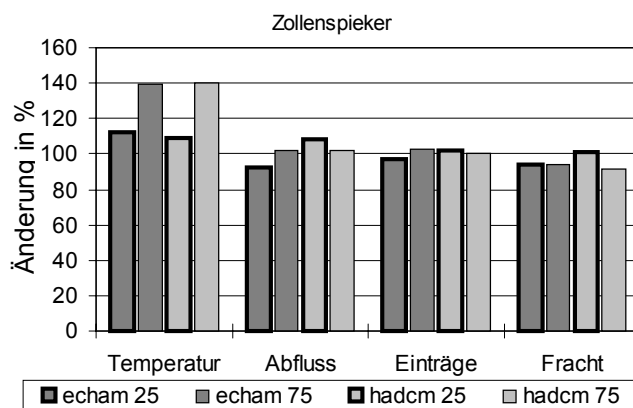


Abb. 4: Änderungen von Temperatur, Abfluss, Einträgen und Fracht für die Station Zollenspieker, bezogen auf die mittleren Verhältnisse im Zeitraum 61-90.

im Extremfall auch nur um -22 bis $+12\%$ zunehmen oder abnehmen würden.

Es zeigte sich, dass die Veränderung der Abflussbedingungen und der Temperatur für den Zeitraum 2025 eine leichte Erhöhung der Retention im Gewässer mit sich bringen könnte. Da das Modell ECHAM4 im Gegensatz zu HadCM3 für diesen Zeitraum einen Rückgang des Abflusses berechnet fällt die Steigerung der Retention nach diesem Modell etwas höher aus. Für 2075 kommt es aufgrund der verstärkten Temperaturerhöhung auch zu einer Erhöhung der Retentionsleistung.

Der retentionsverringende Einfluss der ebenfalls ansteigenden Abflüsse würde in diesem Fall durch die erhöhte mikrobiologische Aktivität ausgeglichen und insgesamt eine Erhöhung der Retentionsleistung begründen.

Hinsichtlich der innerjährlichen Veränderung der Retentionsleistung lässt sich ein ähnlicher Trend feststellen. Die in Abb. 5 (oben) dargestellte mittleren monatlichen Retention spiegelt eindeutig den Temperaturgang und den reziproken

Verlauf der Abflussganglinie wieder. Bis auf wenige Ausnahmen wurde für die Szenarien eine Erhöhung der

Retention berechnet. Die größte Erhöhung lässt sich zunächst für die Sommermonate ableiten (Abb. 5 oben). Bei genauerer Betrachtung der Änderungen Abb. 5 unten zeigen sich jedoch zwei Maxima (März-April und August-September (2025) bzw. August-November (2075)) in der Retentionserhöhung. Eine Untersuchung der monatlichen Temperatur- und Abflussverteilung zeigen das für die Sommermonate beide Werte in Kombination für die Erhöhung verantwortlich sind. Die erhöhte Stickstoffretention im Frühjahr ist dagegen vorwiegend auf die infolge des Klimawandels zu erwartenden geringeren Frühjahrsabflüsse zu erklären. Dieser Abflussverlauf würde demnach auch die Änderung der Retention von Dezember bis Februar erklären.

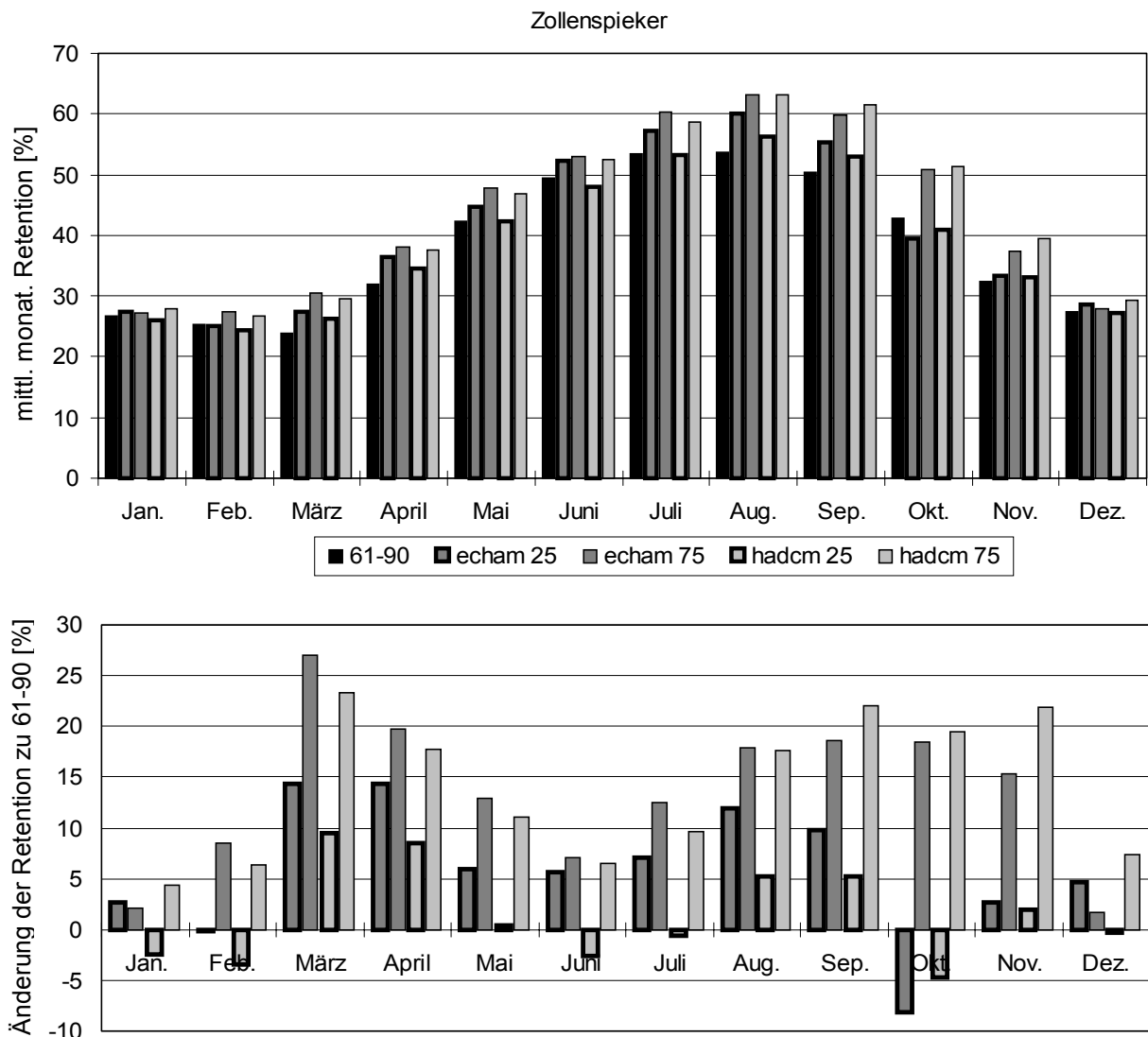


Abb. 5: Veränderung der mittleren monatlichen Retention im Jahresgang (oben) und Differenz der Retentionsleistung nach den Klimamodellen für die Zeiträume 2025 und 2075 (unten).

Aus dieser Kombination sich nur wenig ändernder Einträge und einer insgesamt eher zunehmenden Retentionsleistung kann eine Tendenz zur Abnahme der resultierenden Fracht abgeleitet werden. Dieser Trend ist unter anderem auch an der letzten, noch nicht Tide beeinflusste, Messstation vor der Elbmündung Zollenspieker zu finden. Insgesamt lässt sich jedoch schlussfolgern, dass die berechneten Änderungen der Fracht, ähnlich wie bei den beschriebenen Änderungen der Einträge, weit unter dem Potential der sozioökonomisch bedingten Änderungen wie z.B. nach der Wiedervereinigung liegen (Abb. 3 & 4).

4 Literatur

- BEHRENDT, H., M. KORNMILCH, D. OPITZ, O. SCHMOLL & G. SCHOLZ (2002): Estimation of the nutrient inputs into river systems - experiences from German rivers, *Regional Environmental Changes* 3, 107-117
- DÖLL, P., F. KASPAR & B. LEHNER (2003): A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation. *Journal of Hydrology*. 270, 105-134
- GORDON, C., C. COOPER, C. A. SENIOR, H. BANKS, J. M. GREGORY, T. C. JOHNS, J. F. B. MITCHELL, R. A. WOOD: 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 (2000) 2/3, 147-168
- HILL, A.R. (1988). Factors influencing nitrate depletion in a rural stream. *Hydrobiologia* 160, 111-122
- MOHAUPT, V. (1985). Analyse von Nährstofftransporten in einem Flachlandeinzugsgebiet mit zwischen gelagerten Seen. PhD Thesis, Akademie der Wissenschaften der DDR, 122 pp
- NEW, M., M. HULME & P.D. JONES (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
- ROECKNER, E., K. ARPE, L. BENGTSSON, M. CHRISTOPH, M. CLAUSSEN, L. DÜMENIL, M. ESCH, M. GIORGETTA, U. SCHLESE & U. SCHULZWEIDA (1996): The atmospheric general circulation model ECHAM4: Model description and simulation of present-day climate. Max Planck Institut für Meteorologie, Report No. 218, Hamburg, Germany, 90 pp
- VENOHR, M. & BEHRENDT, H. (2002): Modelling the dependency of riverine nitrogen retention on hydrological conditions and temperature. *Proceedings 6th Internat. Conf. On Diffuse Pollution*, Amsterdam, 30.09.-04.10.2002, 573-574

M. Venohr*, M. Soukup***, S. Vassolo**, P. Döll** & H. Behrendt*

* Leibniz-Institute für Gewässerökologie und Binnenfischerei, Berlin

** Wissenschaftliches Zentrum für Umweltsystemforschung, Universität Kassel

*** Research Institute for Soil and Water Conservation Praha, Czech Republic

[6]

WaterGAP-N: A global grid-based model to simulate the input and fate of nitrogen in river basins under the impact of global change

Döll, P.

Manuskript. Wissenschaftliches Zentrum für Umweltsystemforschung, Universität Kassel

2003

WaterGAP-N: A global grid-based model to simulate the input and fate of nitrogen in river basins under the impact of global change

Petra Döll, Center for Environmental Systems Research, University of Kassel

Introduction

UNEP's Global Environmental Outlook 2000 (<http://www.unep.org/geo2000/>) recognized that nitrogen pollution has become a global problem that does no longer affect only developed countries. Major problems related to excessive amount of nitrogen in the environment already occur e.g. in China and India. Due to the future increase of population and wealth, and the related extension and intensification of agriculture, many areas of the globe will potentially be subject to high nitrate levels in the groundwater and the eutrophication of surface waters (mainly coastal ecosystems).

The purpose of the model WaterGAP-N is to get an overview of the present-day global situation of nitrogen input and fate, and to derive scenarios of the future that simulate the impact of global change (climate, population, agriculture, waste water treatment, etc.). Model design is geared towards making the best use of globally available data.

Model description

WaterGAP-N simulates the input and fate of terrestrial nitrogen, including the input from diffuse (industrial fertilizer and manure, biological fixation, and atmospheric deposition) and point sources and the transport of dissolved N and its outgassing by denitrification in the soil and the groundwater as well as in surface waters (rivers, lakes, wetlands). With a spatial resolution of 0.5°, it computes the N loads in each cell as well as the input to the oceans. Figure 1 gives an overview of the processes that are modeled in each 0.5 degree grid cell. WaterGAP-N is based on information from the global model of water availability and water use WaterGAP 2.1d (Döll et al., 2001, 2003). It uses the same spatial representation of the land surface of the Earth as WaterGAP, 0.5° grid cells that are organized into drainage basins by the global drainage direction map DDM30 (Döll and Lehner, 2002). Other information derived from WaterGAP 2.1d includes:

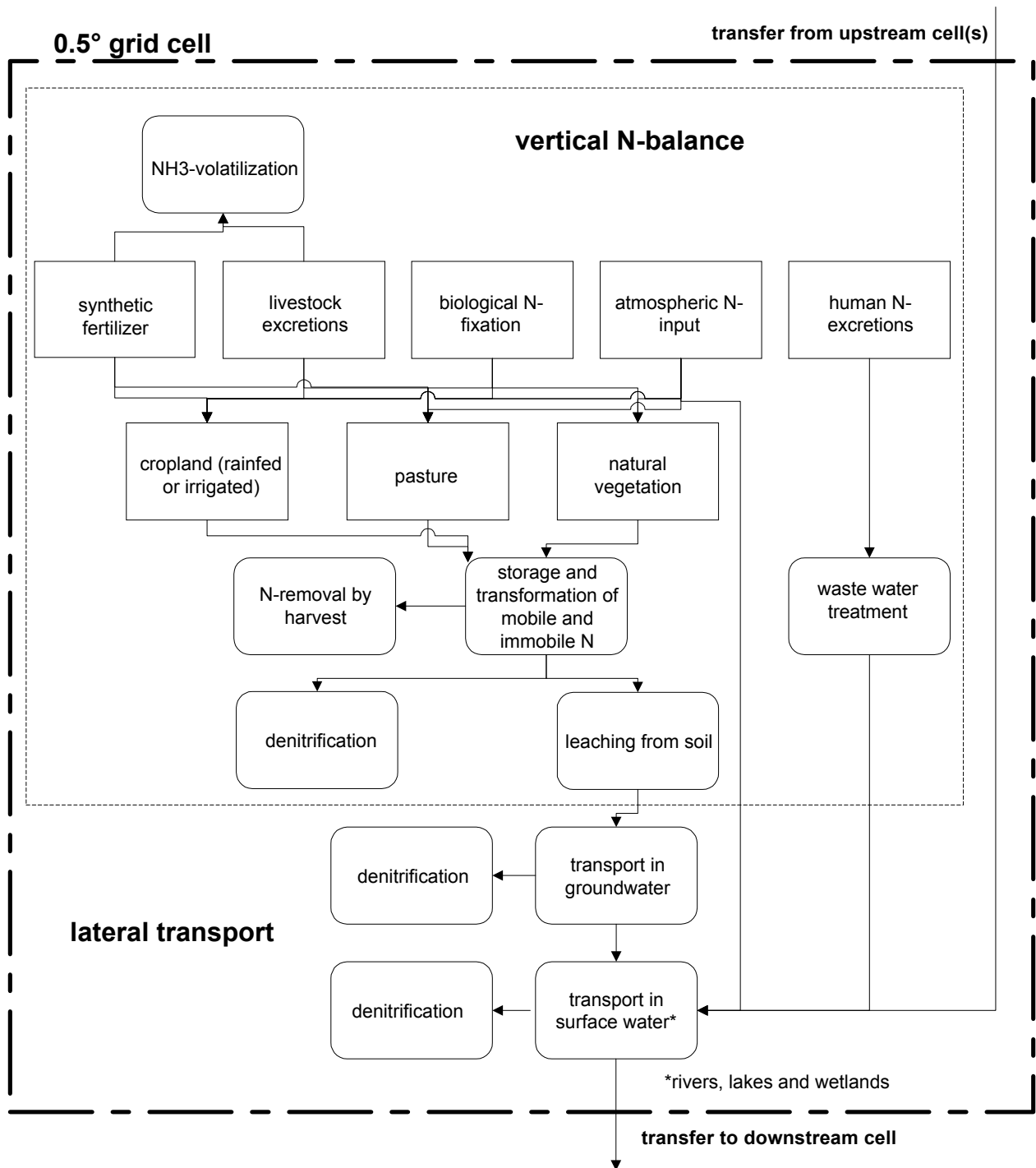


Figure 1. Overview of processes modeled in the global model of terrestrial transport and fate of nitrogen WaterGAP-N.

- the global 1' map of lakes, reservoirs and wetlands WELAREM
- population density map (urban, rural)
- gross domestic product per country
- irrigated areas and irrigation requirements
- aquifer type
- total available water capacity in the root zone
- temperature (time series)
- actual soil water content (time series)
- fast surface/subsurface runoff and groundwater recharge(time series)
- river discharge (time series)

A variety of other global data sets are used to simulate the relevant processes. Land use including production of a variety of crops (22) per agricultural grid cell is mainly based on the integrated global model IMAGE (IMAGE Team, 2001), as IMAGE provides consistent scenarios of future land use under changing demographic, socio-economic, technological and climatic conditions, which can be used as the basis for the computation of N-scenario with WaterGAP-N. A certain problem with using IMAGE land use is that a 0.5° grid cell is either 100% agricultural or does not contain any agriculture. Thus, information on the existence of permanent croplands on a spatial resolution of 5' (Ramankutty and Foley, 1998) was also taken into account, which in particular allows a more realistic distribution of livestock excretions. Further information is taken from IMAGE, e.g. about wood removal in natural ecosystems, or about scenarios of future fertilizer use or livestock numbers.

The modeling of N-input plays a major role in WaterGAP-N. With respect to quantifying livestock excretions, we have combined spatially detailed information on the numbers of 12 different livestock types to derive a global data set of livestock density on a grid resolution of 0.5° for 1995. Typical per-capita excretion values are assumed; in the case of dairy cattle, the values are computed as a function of the milk yield, and in the case of non-dairy cattle, the excretion differs with the world region. Figure 2 shows the resulting N-input by livestock in 1995. The time series of livestock excretions since 1960 is determined based on time series of country values of livestock from FAO. To estimate the input of synthetic fertilizer, information on typical crop-specific fertilizer application from FAO, country values of fertilizer consumption since 1960 from FAO and crop production values from IMAGE were combined. In 1995, total global N-input from livestock is estimated to be 111 Tg N per year, as compared to 78 Tg N from synthetic fertilizer. In 1961, the respective values were 71 and 12 Tg per year. According to the A1B of the Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, as implemented by the IMAGE model (IMAGE team, 2001), the N-input from livestock will increase to 161 Tg N in 2050, while the input from synthetic fertilizer will

reach 138 Tg N. A fraction of the N-input from fertilizer and livestock excretions is volatilized as NH_3 , depending on the type of fertilizer and the climate. Atmospheric N-deposition since 1960 is based on a global atmospheric geochemistry model (personal communication, Frank Dentener, Joint Research Center, Ispra, Italy). With respect to biological N-fixation of agricultural vegetation nonsymbiotic and legume-dependent symbiotic fixation are distinguished. The total biological N-fixation of natural vegetation is modeled as a function of actual evapotranspiration as derived by Cleveland et al. (1999). In addition to these diffuse sources of N, point sources (Figure 1) are estimated mainly as a function of human population and GDP, taking into account the scarce knowledge about N-removal by waste water treatment.

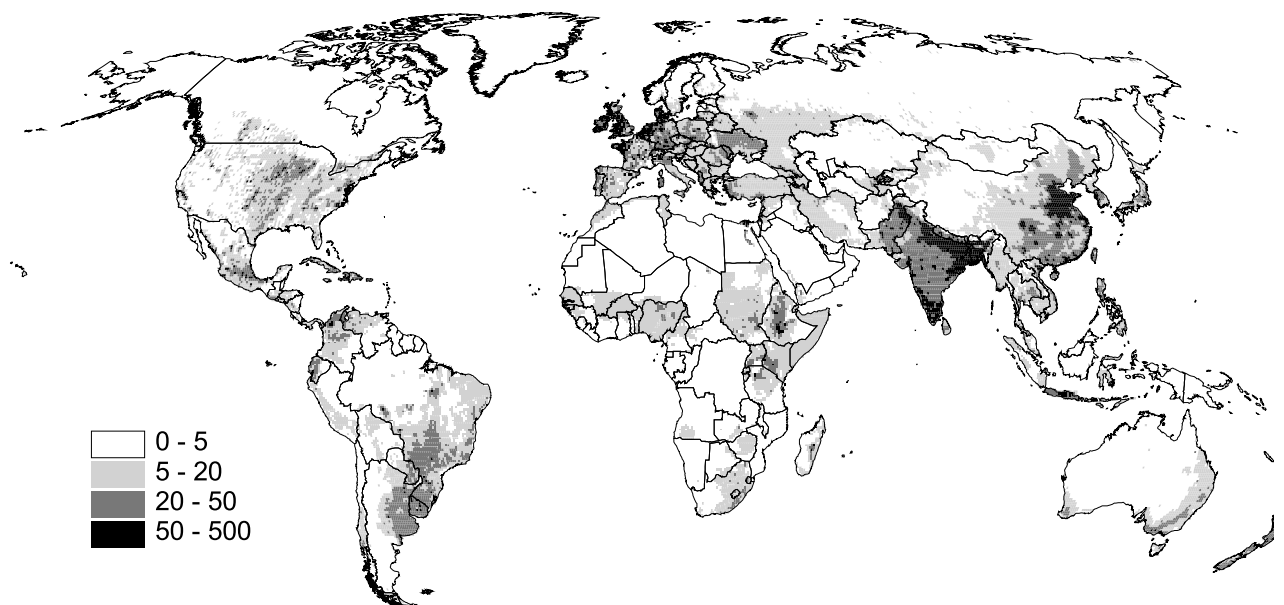


Figure 2. N-input of livestock in 1995, in kg N per hectare and year.

The diffuse input is subject to transformation and transport processes in the soil compartment. In the soil, which consists of one layer only (like in WaterGAP), there coexist a storage of immobile N (organic N) and a storage of mobile N. The different inputs are either entered into the mobile or into the immobile storage. Part of the immobile N is transferred at a certain rate to the mobile storage (mineralization), depending on temperature and soil water saturation. Different from many modeling approaches, the removal of N by plant uptake and harvest is not subtracted from the total N-input first to compute the net input of N at the soil surface, as this might lead to an underestimation of leaching and denitrification. Leaching of N and denitrification is computed first. Leaching of N is a function of runoff and soil water content, denitrification a function of temperature, soil water saturation, as well as soil texture, soil drainage conditions and soil organic carbon content. A fraction of the total runoff is

transported via the groundwater, where N transport is delayed and denitrification takes place. Both the fast and the groundwater runoff reach eventually the surface water (rivers, lakes and wetlands), and there, denitrification occurs as a function of the hydraulic load (discharge as a ratio of surface area of the water bodies). Such an approach has also been taken by de Wit (1999) and Behrendt et al. (1999) for large European river basins.

The computational time step of the model is 1 month, covering the time period between 1961 and 2100. No calibration of the model is planned in the first phase of model development. Given the high uncertainty with respect to the modeled inputs, the input errors are likely to be just compensated by calibration of the biogeochemical processes, such that very little improvement of the reliability of the model for deriving scenarios is likely to be achieved by calibration.

Discussion

Van Drecht et al. (2001) presented global 0.5° resolution estimates on the fate of nitrogen for 1995. WaterGAP-N is designed to be an improvement over the model of van Drecht et al. as it considers important issues that are not taken into account by their approach, like mineralization in soil, transient transport dynamics and the impact of lakes and wetlands on nitrogen retention. Based on the data set of lakes, reservoirs and wetlands that has been developed for WaterGAP, the important role of lakes and wetlands can be simulated. WaterGAP-N is a much more detailed model than the simple lumped model of Caraco and Cole (2001), which treat each river basin in a lumped manner and only uses the runoff as a parameter which influences the fate of nitrogen. Based on information from WaterGAP, the impact of climate variability on the fate of N in the basin can be modeled. According to Andersson and Arheimer (2001), who performed N-fate modeling using the nitrogen model HBV-N (Arheimer and Brandt, 1998), decadal climate variability in Southern Sweden leads to a minimum of 22% of retention (wet) and a maximum of 36% (dry) between 1885 and 1994. When the model is driven by the climatological data from the driest 10-year-period, the estimated average annual load was only half of that obtained with climatological data from the wettest 10-year period.

It is planned to validate the model against measured N-loads (as compiled in the framework of the UNESCO-IOC working group GlobalNEWS) and results of meso-scale N-models (e.g. MONERIS for Elbe river, Behrendt et al., 1999).

References

- Andersson, L., Arheimer, B. (2001): Consequences of changed wetness on riverine nitrogen - human impact on retention vs. natural climatic variability. *Regional Environmental Change* 2, 93-105.
- Arheimer, B., Brandt, M. (1998): Modelling nitrogen transport and retention in the catchments of Southern Sweden. *Ambio* 27, 471-480.
- Behrendt, H., Huber, B., Kornmilch, M., Opitz, D., Schmoll, O., Scholz, G., Uebe, R., Pagenkopf, W.-G., Bach, M. (1999): Nährstoffbilanzierung der Flussgebiete Deutschlands. CD-ROM, Umweltbundesamt, Bismarckplatz 1, 14139 Berlin.
- Caraco, N.F., Cole, J.J. (1999): Human impact on nitrate export: An analysis using major world rivers. *Ambio* 28, 167-170.
- Cleveland, C.C., Townsend, A.R., Schimel, D.S., Fisher, H., Howarth, R.W., Hedin, L.O., Perakis, S.S., Latty, E.F., von Fischer, J.C., Elseroad, A., Wasson, M.F. (1999): Global patterns of terrestrial biological nitrogen (N₂) fixation in natural ecosystems. *Global Biogeochemical Cycles*, 13(2), 623-645.
- De Wit, M. (1999): Nutrient fluxes in the Rhine and Elbe Basins. Ph.D. dissertation, Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen, University of Utrecht.
- Döll, P., Kaspar, F., Lehner, B. (2003): A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation. *Journal of Hydrology*, 270 (1-2), 105-134.
- Döll, P., Lehner, B. (2002): Validation of a new global 30-min drainage direction map. *Journal of Hydrology*, 258(1-4), 214-231.
- Döll, P., Alcamo, J., Henrichs, T., Kaspar, F., Lehner, B., Rösch, T., Siebert, S. (2001): The global integrated water model WaterGAP 2.1. In Lehner, B., Henrichs, T., Döll, P., Alcamo, J. (eds.): EuroWasser – Model-based assessment of European water resources and hydrology in the face of global change. Kassel World Water Series 5, Center for Environmental Systems Research, University of Kassel, Germany, 2.1-2.18. (can be downloaded from <http://www.usf.uni-kassel.de/usf/archiv/dokumente.en.htm>)
- IMAGE Team (2001): The IMAGE 2.2. implementation of the SRES scenarios: A comprehensive analysis of emissions, climate change and impacts in the 21st century. RIVM CD-ROM publication 481508018, National Institute for Public Health and the Environment, Bilthoven, The Netherlands.
- Ramankutty, N., Foley, J.A. (1998): Characterizing patterns of global land use: An analysis of global croplands data. *Global Biogeochemical Cycles*, 12(4), 667-685.
- Van Drecht, G., Bouwman, A.F., Knoop, J.M., Meinardi, C., Beusen, A. (2001): Global pollution of surface waters from point and nonpoint sources of nitrogen. *TheScientificWorld*, DOI 10.1100/tsw.2001.326.

[7]

Population Scenarios for Germany and the Czech Republic with focus on the Elbe river basin

Vassolo, S.; Döll, P.

Manuskript. Wissenschaftliches Zentrum für Umweltsystemforschung, Universität Kassel

2002c

Internal Report GLOWA-Elbe

December 2002

Population Scenarios for Germany and the Czech Republic with focus on the Elbe river basin

Sara Vassolo and Petra Döll, Center for Environmental Systems Research,
University of Kassel

1 Introduction

Many aspects of the future water situation in the Elbe river basin are related to the population distribution within the basin. Examples are the water demand and water quality. Therefore, an analysis of the future water situation requires scenarios of the population distribution. As the Elbe basin belongs to both the Czech Republic and Germany, population scenarios for these two countries are developed for the period 2000-2050, with a special focus on the Elbe basin.

Following the general approach of the GLOWA-Elbe project to derive scenarios according to the global IPCC SRES scenarios A1 and B2 (Nakicenovic and Swart, 2000), two different population scenarios are computed. These scenarios are consistent with the global-scale population scenarios (in the case of the Czech Republic) or with the story lines (in the case of Germany, where national forecasts for the individual Länder are used) of the global scenarios A1 and B2. The global A1 scenario describes a strongly globalized future world of very rapid economic growth and fast introduction of more efficient technologies, where the countries of the world converge and there are strong social, cultural and economic interactions. Due to a certain convergence of the fertility rates in developing countries to the fertility rates in developed countries, the population increase weakens and there will be a decline in global population after the year 2050 (world population in 2050: 8,704 million). The global B2 scenario describes a less globalized world (but still more globalized than today) with slower economic growth in which the trend towards reduced materials intensity and environmental protection in general is strong, and where the emphasis is on local solutions to achieve economic, social and environmental sustainability. In B2, the fertility rates of developing countries do not decline as rapidly as in scenario A1, such that the global population will reach 9,367 million in 2050 and will continue to increase until 2100. The population of the developed world increased more rapidly in scenario A1 than in scenario B2.

For both the German and the Czech part of the Elbe river basins, these global scenarios translate to a population development in which the general decrease in population (due to the low fertility rates) is less strong in the case of A1, this being due to a higher immigration as compared to B2.

2 Description of Computed Scenario Data Set

The computed data set provides the population in each of the 2.5 min grid cell of Germany and the Czech Republic, for 2000 to 2050, and with a time step of 5 years. The data are supplied as four ArcView shape files. There are two shape files for Germany, one for scenario A1 and one for scenario B2, and the corresponding shape files for the Czech Republic. Please note that for the 2.5 min grid cells that belong to both countries, the German data set contains only the number of the inhabitants

living in Germany, and the Czech data set only the number of inhabitants living in the Czech Republic.

2.1 Data Sets Used to Derive Population Scenario Data Set

Different data sets are used for the scenario computation. These are:

- Population distribution within Germany and the Czech Republic in 1995, with a spatial resolution of 2.5 min, from the Gridded Population of the World v2 data set of the Center for International Earth Science Information Network (CIESIN, 2001). These data sets are based on population estimates in the 446 Landkreise of Germany and the 77 okres in the Czech Republic. The gridded population has been adjusted to UN country data.
- Population scenarios for Germany from Statistisches Bundesamt (2000). These scenarios are available up to 2050 for each of the 16 Länder and in two different variants depending on the assumed immigration to Germany.
- A population scenario for Germany from Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (1999). These scenarios are available for 2005 and 2015 for the 97 Raumordnungs-Regionen (ROR) of Germany (Fig. 1).
- A population scenario for Berlin and Brandenburg (Ströbl, 2001). The scenario is available for 2000, 2005, and 2010 for each of the districts (Bezirke) of Berlin and for the districts (Landkreise) and larger towns of Brandenburg (here also for 2015) (Fig. 2). It is based on population prognoses by the city of Berlin (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, 1999) and the Land Brandenburg (Landesbetrieb für Datenverarbeitung und Statistik, 2001). These two prognoses are consistent with each other with respect to migration.
- A population scenario for each the following Bundesländer: Niedersachsen (2001), Sachsen (2000), Sachsen-Anhalt (2001), Schleswig-Holstein (2000), and Thüringen (2000). These prognoses are developed by the respective Statistisches Landesamt and are available at the level of city (freie Stadt) or administrative district (Landkreis) (Fig. 3).
- Population scenarios for 17 world regions applied in the IMAGE 2.2 model based on the A1 and B2 population scenarios of IPCC SRES for four world regions. Only the region that includes the Czech Republic was considered (RIVM, 2001).
- UN population scenarios with medium birth rate for the Czech Republic (UN, 1998).



Figure 1. The 97 Raumordnungsregionen (ROR) of Germany. A scenario for these units was used to downscale population prognoses for 9 Länder of Germany (all except Berlin, Brandenburg, Niedersachsen, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Schleswig-Holstein, Thüringen)

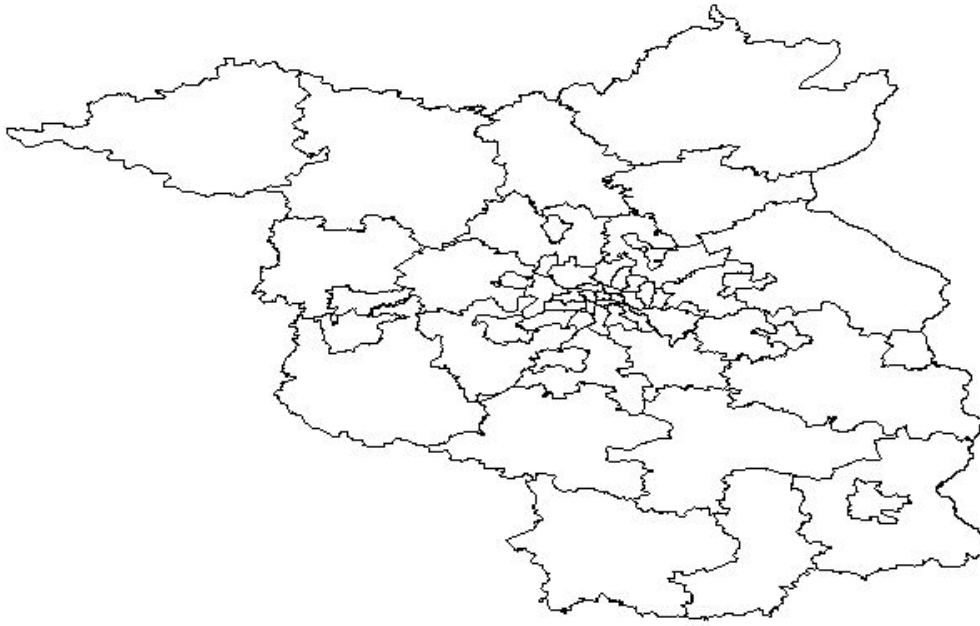


Figure 2. The districts of Berlin and Brandenburg and the larger towns in Brandenburg. A scenario for these units was used to downscale population prognoses Berlin and Brandenburg

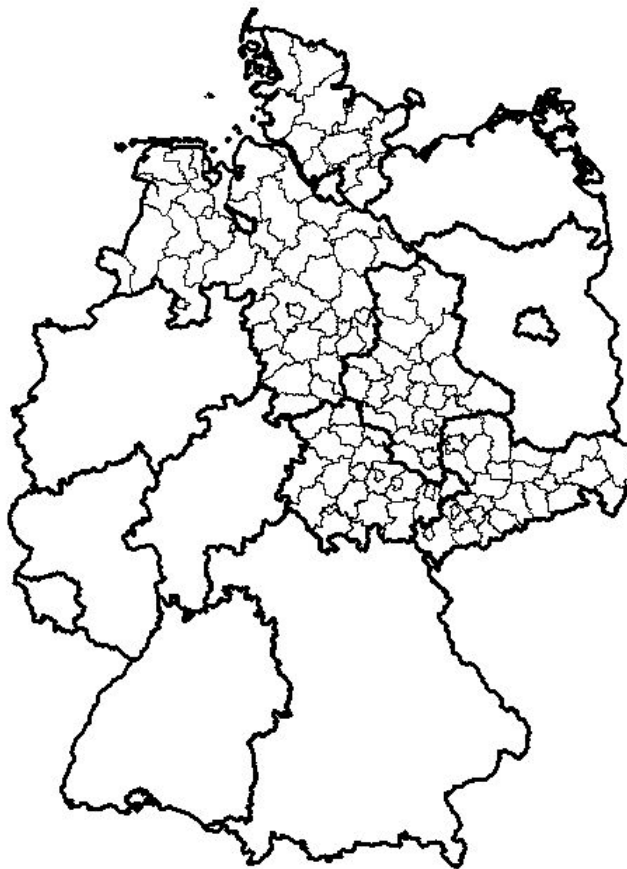


Figure 3. A scenario for the administrative districts (Landkreis) in Niedersachsen, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Schleswig-Holstein, and Thüringen was used to downscale population prognoses of these 5 Länder of Germany

2.2 Methodology and Results

2.2.1 Population Scenarios for Germany

The population scenarios for Germany are calculated to reproduce the prognoses of the Statistisches Bundesamt (2000) provided for each of the 16 Länder within Germany up to the year 2050. Two different variants are available:

- **Variante 1** assumes a net immigration of 100,000 persons per year and a constant fertility of 1.4 (1,400 children for every 1,000 women). This case is understood to represent the IPCC Scenario B2. Since 1980, the fertility in the Länder of the old Federal Republic of Germany was rather constant at 1.4.
- **Variante 2** assumes a net immigration of 200,000 persons per year and a constant fertility of 1.4 (1,400 children for every 1,000 women). This case is understood to represent the IPCC Scenario A1. The globalization will lead to an increased population migration as compared to scenario B2, and a high immigration into Germany is to be expected.

The population scenario for the 97 ROR of Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (1999) are applied for downscaling the Länder-specific prognoses (for all Länder except Berlin, Brandenburg, Niedersachsen, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Schleswig-Holstein, and Thüringen). This scenario describes the changes in population distribution within Länder, but is not consistent with the prognoses of the Statistisches Bundesamt and only available for 2005 and 2015. A linear interpolation was done to obtain the population in 2010, and the population in a ROR as a ratio of the Länder population is assumed to remain at the 2015 value from 2020 onward.

For the Länder Berlin and Brandenburg, downscaling is performed for 2000, 2005, and 2010 (Berlin and Brandenburg) and for 2015 (Brandenburg only) based on the district-specific scenarios (Ströbl, 2001) (compare Fig. 2). Population in a district as a ratio of the Länder population is assumed to remain at the 2010 (Berlin) or 2015 (Brandenburg) value afterwards.

In the case of Niedersachsen, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Schleswig-Holstein, and Thüringen, the downscaling is performed from 2000 to 2015 based on the prognoses of the respective Statistisches Landesamt. Population in a district as a ratio of the population of the Länder is assumed to remain at the value of 2015 afterwards.

The computed scenarios for the ROR or districts are interpolated onto the 2.5 x 2.5 min grid based on the assumption that the grid cell population as a fraction of the total population in the ROR or district remains at the 1995 value. As an example, Fig. 4 shows the resulting population distribution in Germany in 2000.

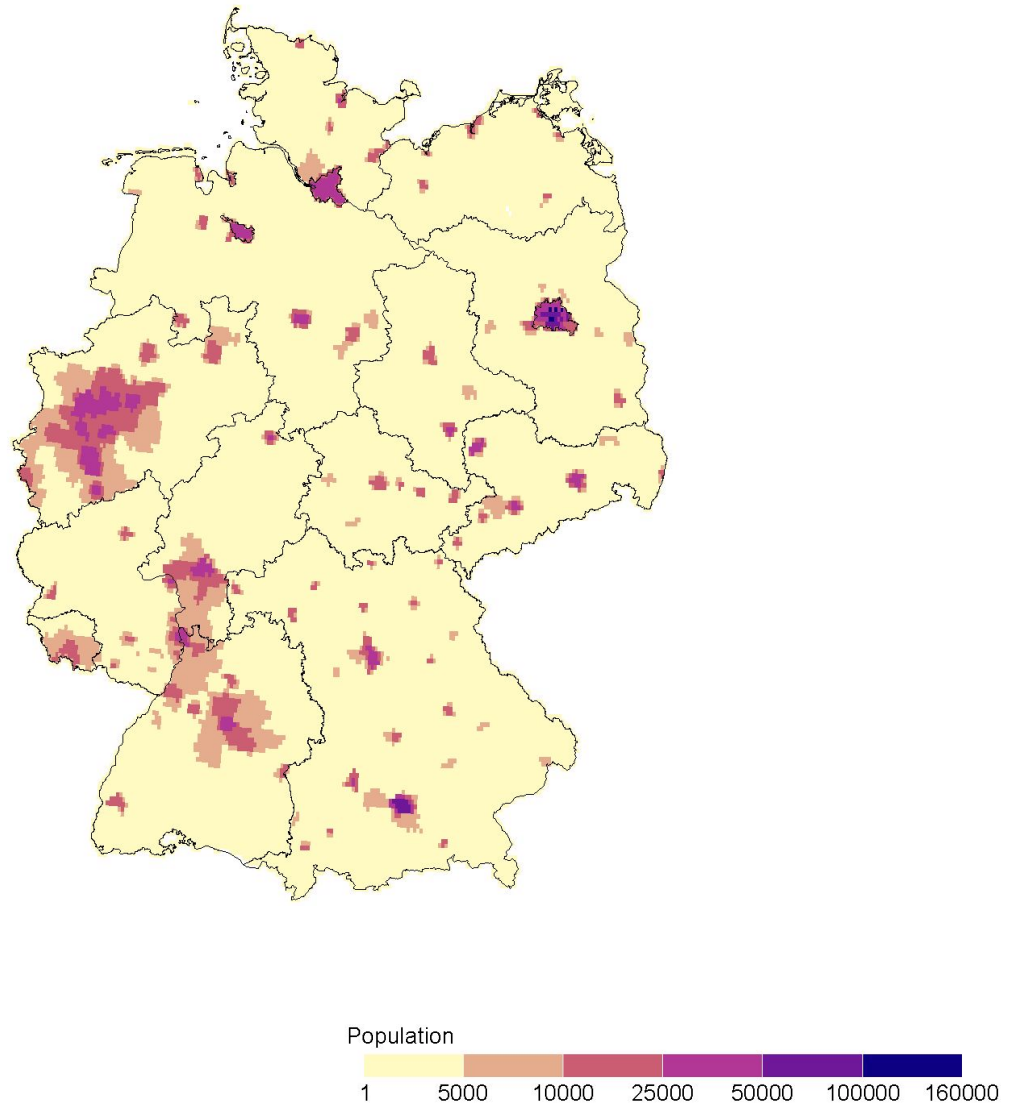


Figure 4. Population distribution in Germany in 2000

2.2.2 Population Scenarios for the Czech Republic

The population scenarios for the Czech Republic take into account the UN98 prognosis with medium birth rate (1998-2050) scaled with the population development in the IMAGE world region to which the Czech Republic belongs.

The computed country values are interpolated onto the 2.5 x 2.5 min based on the assumption that the grid cell population as a fraction of the total population of the country remains at the 1995 value. As an example, Fig. 5 shows the resulting population distribution in the Czech Republic in 2000.

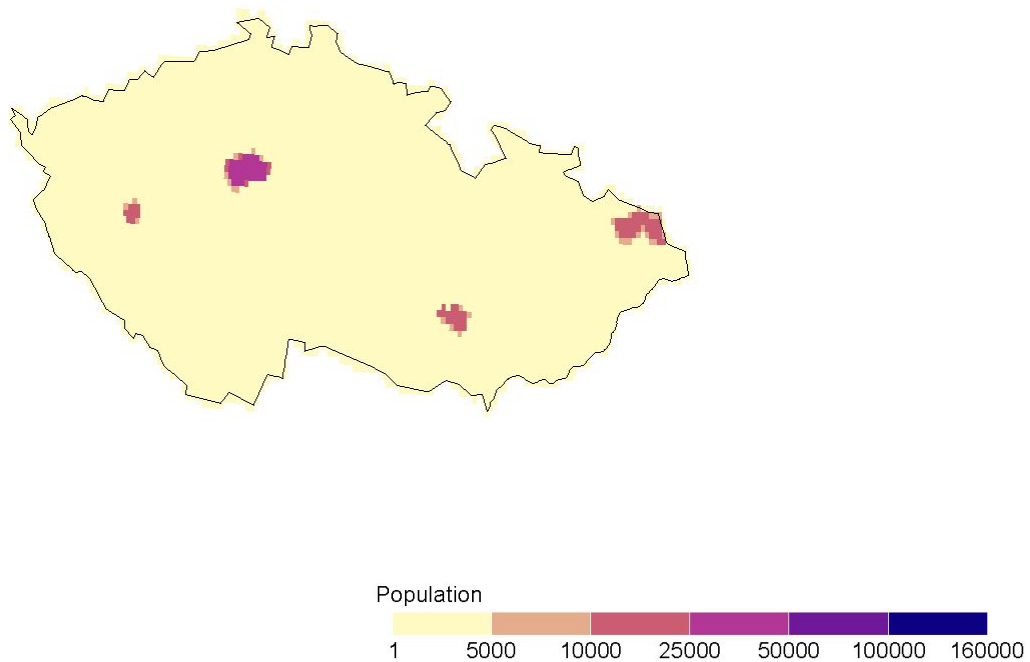


Figure 5. Population distribution in the Czech Republic in 2000

2.2.3 Population Scenarios for the Elbe River Basin

The population development within the Elbe basin, according to scenarios A1 and B2, is summarized in Table 1 and Fig. 6. The total population will decrease by almost 5% from 2000 to 2025 and by 19% till 2050 according to scenario A1, and by almost 8% till 2025 and by 23% till 2050 according to scenario B2.

The current population distribution (2000) of the basin is presented in Fig. 7. Fig. 8 shows the population changes between 2000 and 2025 for the scenarios A1 and B2. A general decreasing population trend appears overall the basin, but strong increases are expected in the belt areas of big cities (Berlin, Hamburg, Jena). These latter increases are based on the small scale specific scenarios of migration from the urban center to the surroundings. Obviously, such a trend could also be foreseen for Praha, but specific scenarios at the appropriate small scale were not available for the Czech Republic to be applied in the derivation of the presented scenarios.

Table 2. Summary of population scenarios for the Elbe river basin

Year	Population in scenario A1			Population in scenario B2		
	German Elbe	Czech Elbe	Total Elbe	German Elbe	Czech Elbe	Total Elbe
2000	19,425,279	6,059,297	25,484,576	19,425,169	5,994,338	25,419,507
2005	19,205,966	6,077,843	25,283,809	19,189,059	5,953,551	25,142,610
2010	19,099,004	6,073,176	25,172,180	18,951,400	5,900,230	24,851,630
2015	18,957,171	6,037,178	24,994,349	18,652,150	5,837,052	24,489,202
2020	18,751,651	5,968,096	24,719,747	18,279,845	5,770,070	24,049,915
2025	18,420,013	5,879,647	24,299,660	17,774,565	5,669,799	23,444,364
2030	18,028,395	5,768,690	23,797,085	17,205,250	5,552,695	22,757,945
2035	17,616,394	5,629,804	23,246,198	16,611,428	5,410,686	22,022,114
2040	17,189,606	5,460,162	22,649,768	16,001,413	5,265,398	21,266,811
2045	16,728,859	5,271,178	22,000,037	15,355,983	5,128,724	20,484,707
2050	15,809,927	5,069,329	20,879,256	14,664,251	4,990,591	19,654,842

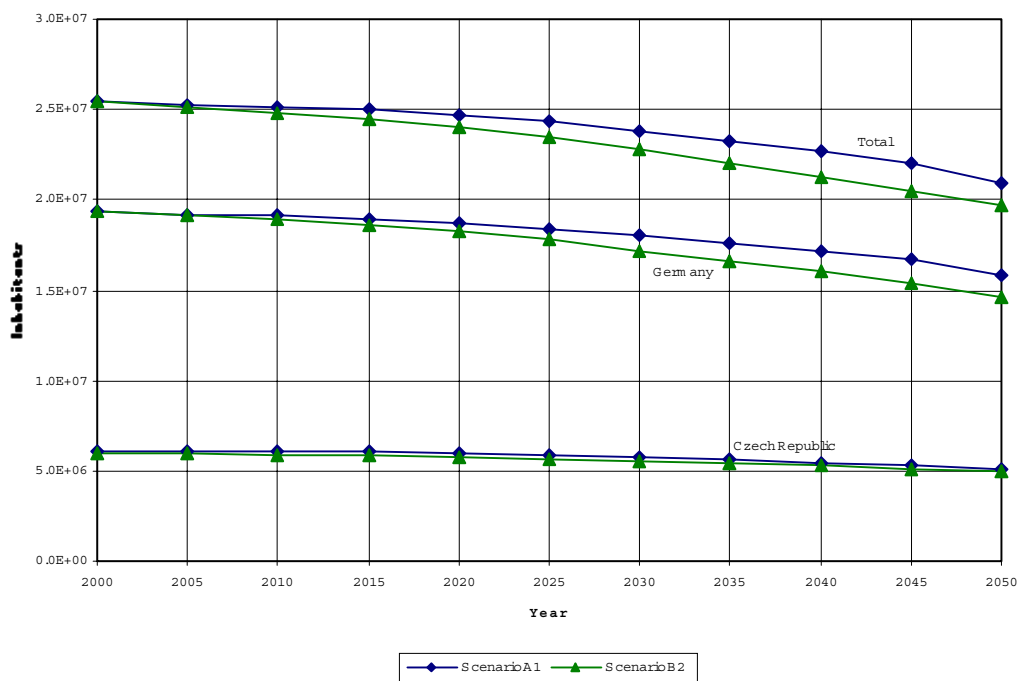


Figure 6. Population development in the Elbe river basin

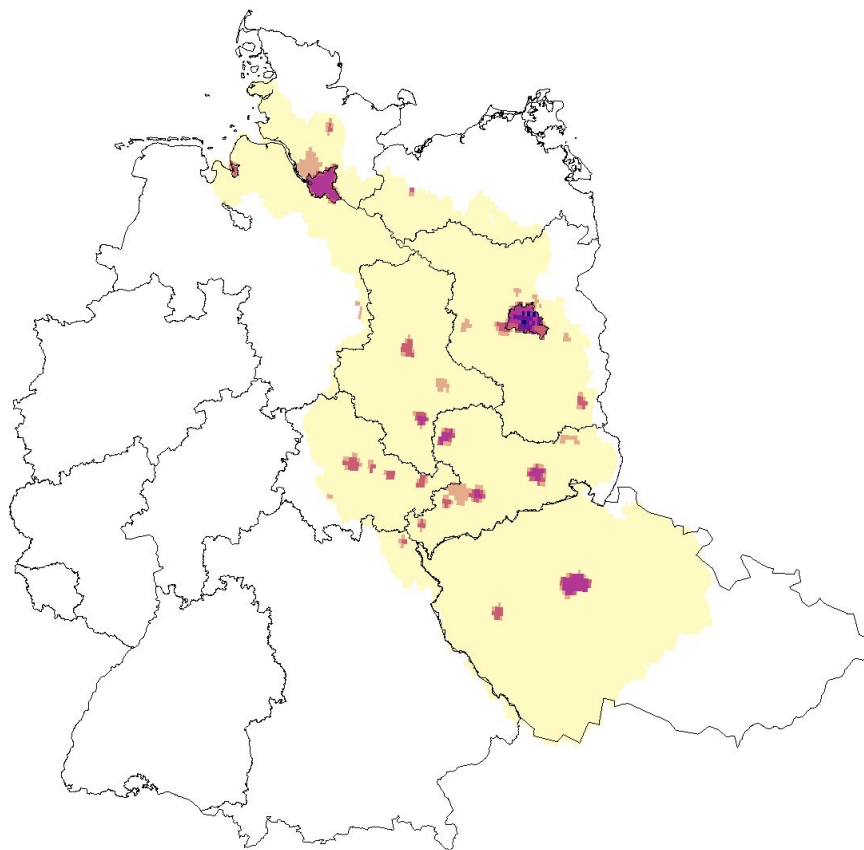


Figure 7. Population distribution within the Elbe river basin in the year 2000

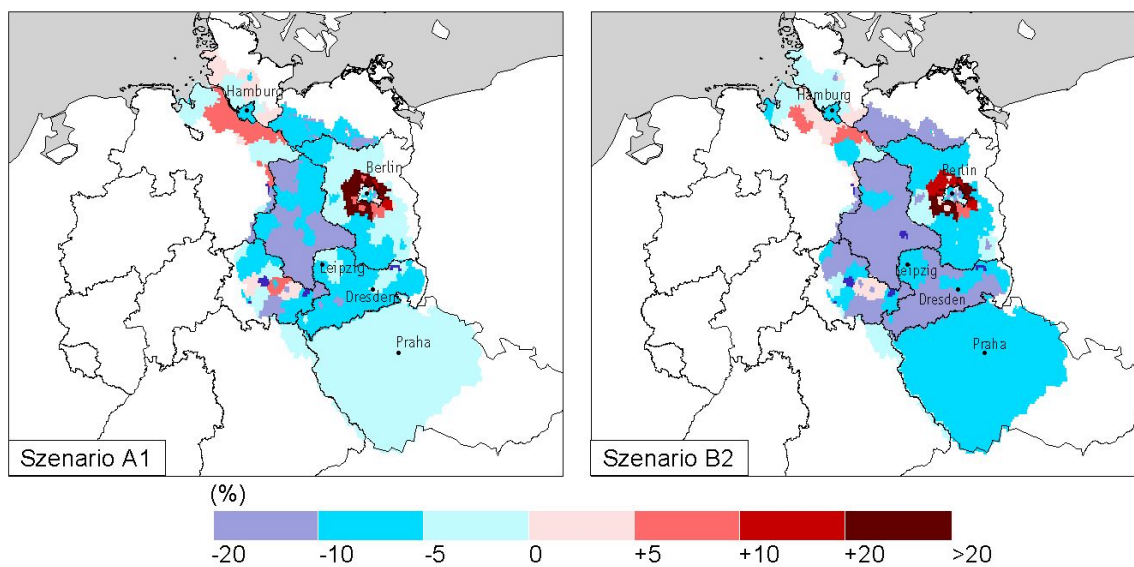


Figure 8. Population changes between 2000 and 2025 within the Elbe river basin for scenarios A1 and B2

3 Conclusions

The developed population scenarios are consistent with the global-scale scenarios A1 and B2 as recommended by the IPCC and take into consideration population scenarios for 17 world regions, the Czech Republic, the 16 Länder of Germany, and the districts of Berlin, Brandenburg, Niedersachsen, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Schleswig-Holstein, and Thüringen. An improvement of the presented data set would include small-scale information on population development within the Czech Republic and some urban centers within the German Elbe river basin.

4 Literature

Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, 1999. Perspektiven der künftigen Raum- und Siedlungsentwicklung. Heft 11/12.1999

CIESIN, 2001. Center for International Earth Science Information Network, Columbia University. GPW version 2. <http://sedac.ciesin.columbia.edu/plue/gpw/index.html>

Landesbetrieb für Datenverarbeitung und Statistik, 2001. Bevölkerungsprognose des Landes Brandenburg für den Zeitraum 2000-2015. Potsdam.

Nakicenovic, N. and Swart, R. (eds.), 2000. Emission Scenarios. IPCC Special Report on Emission Scenarios. Cambridge University Press

Niedersächsisches Landesamt für Statistik, 2001. In www.nls.niedersachsen.de

RIVM, 2001. The Image 2.2 implementation of the SRES scenarios.

Statistischer Bericht (2000): Entwicklung der Bevölkerung Thüringens von 1998 bis 2020 nach Kreisen – Bevölkerungsvorausberechnung – Thüringer Landesamt für Statistik. A I 8.

Statistische Berichte (2000): Voraussichtliche Entwicklung der schleswig-holsteinischen Bevölkerung bis zum Jahre 2015. Statistisches Landesamt Schleswig-Holstein. A I 8.

Statistische Berichte (2001): Bevölkerung und Erwerbstätigkeit. Bevölkerungsvorausberechnung nach Alter und Geschlecht. 2. Regionalisierte Bevölkerungsvorausberechnung 1999 – 2015. Statistisches Landesamt Sachsen Anhalt. A I 8/S.

Statistisches Bundesamt, 2000. Bevölkerungsentwicklung Deutschlands bis zum Jahr 2050. Ergebnisse der 9. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung

Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen (2000): Regionalisierte Bevölkerungsvorausberechnung für den Freistaat Sachsen bis 2015. Teil 2: Ergebnisse nach Kreisen. Gebietsstand 1. Januar 1999. Sonderheft Nr. 2.

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, 1999. Bevölkerungsvorausberechnung für Berlin 1998-2010. (<http://www.stadtentwicklung.berlin.de/planen/bevoelkerungsprognose/>).

Ströbl, B., 2001. Entwicklungsrahmen Bevölkerung für GLOWA-Elbe: Skalierung insbesondere für Berlin-Brandenburg. Potsdam Inst. for Climate Impact Research (unpubl.)

UN, 1998. World Population 1950-2050 (The 1998 Revision) – Population Division. Department of Economic and Social Affairs

[8]

Industrial Water Use: A New Global Data Set

Vassolo, S.; Döll, P.

XXVII General Assembly of the European Geophysical Society. Nizza, 21-26 April 2002

2002a°

Industrial Water Use: A New Global Data Set

Sara Vassolo and Petra Döll

Contact: vassolo@usf.uni-kassel.de

Introduction

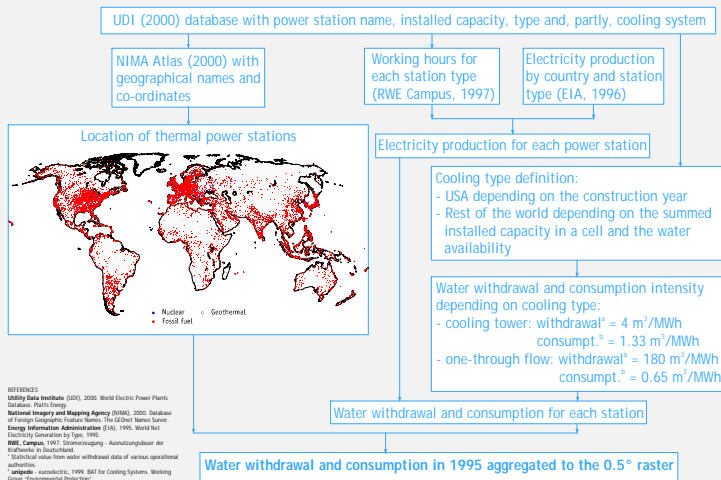
Global-scale information on industrial water use is only available as "total industrial water withdrawals per country" (WRI, 2000; Shiklomanov, 2000). However, for the analysis of water availability and quality in river basins, the following information is needed:

- the spatial distribution within the countries;
- the fraction of total industrial water withdrawal that is needed for cooling thermal power stations because this water generally is not polluted by its use.

Here, we present a 0.5° raster data set of industrial water withdrawals and consumptive water use in 1995 that distinguishes between water use for cooling thermal power stations and water use for manufacturing.

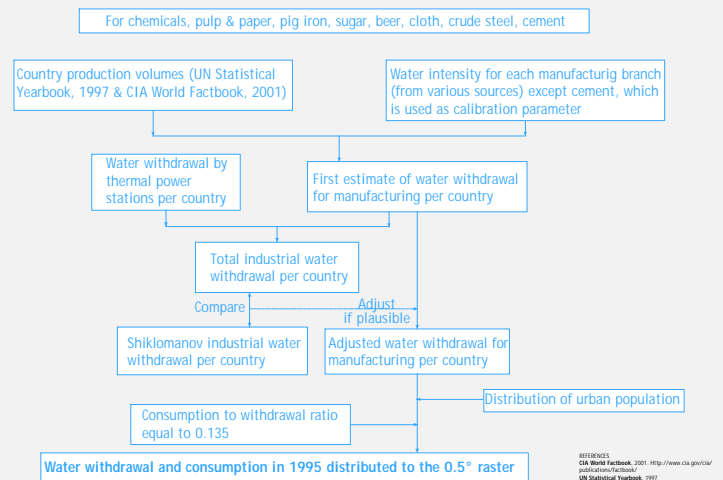
REFERENCES
Shiklomanov, I., 2000. World freshwater resources, available from International Hydrogeological Programme, UNESCO, Paris. CD-ROM.
WRI (World Water Resources Institute), 2000. World Resources 2000 - 2001: People and Ecosystems: The Fraying Way of Life. Elsevier Sciences, UK. 389 pages.

Methodology applied for the computation of water withdrawal by thermal power stations

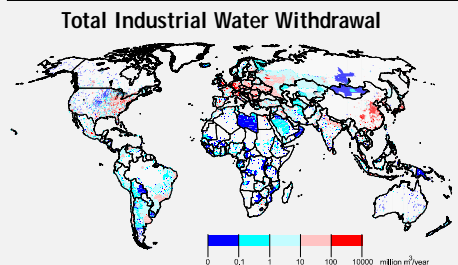
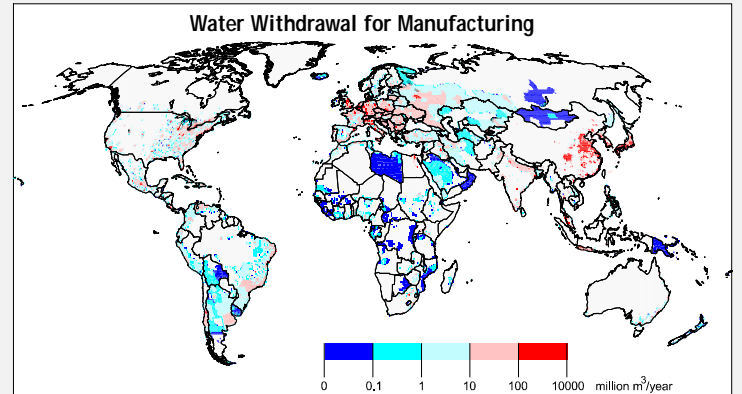
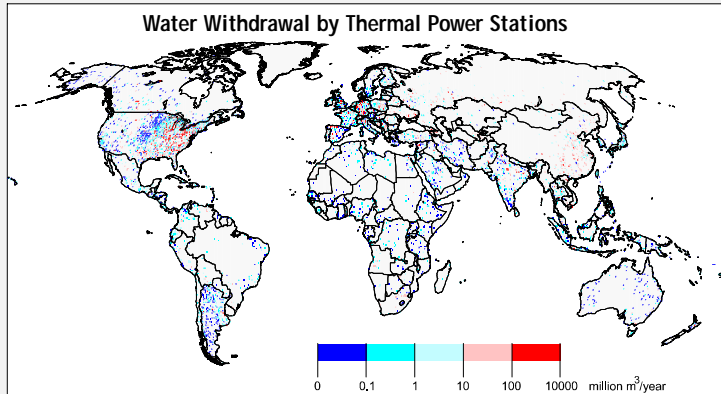


REFERENCES
Utility Data Institute (UDI), 2000. World Electric Power Plants Database. Paris: Energy
National Imagery and Mapping Agency (NIMA), 2000. Database of Geographical Names and Coordinates
Energy Information Administration (EIA), 1995. World Factbook
Electricity Generation by Type, 1995
RWE, Campus, 1997. Stromerzeugung - Antriebsparameter der Kraftwerke in Deutschland
¹Withdrawal value from water withdrawal data of various operational stations
²Consumption value from water withdrawal data of various operational stations
EIA, 1995. World Factbook for Cooling Systems, Working Group: Environmental Protection

Methodology applied for the computation of water withdrawal for manufacturing



REFERENCES
CIA World Factbook, 2001. <http://www.cia.gov/library/publications/cia/r4/cia/wrwb/cia/wrwb.html>
UN Statistical Yearbook, 1997



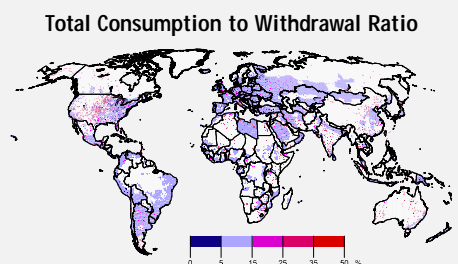
Industrial Water Use: Comparison with Published Data

Continent	Publ. Data (million m ³ /year)		This Data Set (million m ³ /year)		
	Shiklomanov ¹	WRI ²	Ind. Withd.	% Therm	% Manuf
Europe (*)	213,300	193,247	223,486	52	48
N. America	251,200	327,092	261,659	86	14
C. America	27,800	5,021	8,502	19	81
S. America	25,840	18,367	25,672	22	78
Asia (**)	198,100	160,029	202,415	22	78
Middle East	13,200	8,129	12,115	22	78
Africa	9,600	9,150	11,024	33	67
Oceania	7,130	1,186	7,121	14	86

(*) Includes former USSR
(**) Without former USSR
¹ Shiklomanov, I., 2000. World Freshwater Resources. CD-ROM.
² WRI, 2000. World Resources 2000-2001: People and Ecosystems: The Fraying Way of Life.

Country	Thermoelectric (Mm ³ /year)		Manufacturing (Mm ³ /year)	
	Calculated	Published	Calculated	Published
USA	187,882	183,396 ³	35,155	35,223 ³
Canada	28,426	28,289 ³	7,311	7,282 ³
Germany	26,345	27,777 ⁴	9,031	9,014 ⁴
France	17,944	25,835 ⁵	4,480	3,942 ⁵
Ireland	292	277 ⁶	275	250 ⁶
Portugal	449	2,682 ⁷	231	241 ⁷
Spain	3,136	4,909 ⁸	1,707	1,625 ⁸
UK	1,574	1,721 ⁹	3,507	2,338 ⁹

³ USGS, 1996. Estimated Water Use in the United States in 1995
⁴ Canada Statistics, 2001. Major Withdrawal Uses of Water (values for 1991)
⁵ Statistisches Bundesamt, 1998. Langfristige Entwicklung in der Wasserwirtschaft (1975-1995)
⁶ EEA, 1999. Sustainable Water Use in Europe. Part I: Sectoral Water Use



Summary & Conclusions

The new data set provides:

- **Water used by thermal power stations.** This subset is based on the UDI database. It includes water withdrawal and consumption of a total of 62,781 thermal power stations worldwide, taking into account the cooling systems.
- **Manufacturing water use.** This subset considers the production volumes of eight different branches, which are multiplied by the respective water intensity to obtain the water withdrawals. The water intensity for cement is used as a calibration factor to approximate the Shiklomanov values for

total industrial water use. However, even without calibration the Shiklomanov values would have been obtained within +/- 10% in 49% of the 139 countries that produce cement. The manufacturing water use is distributed proportional to the urban population of the countries. In the future, this distribution can possibly be based on a global city lights map.

The new data set allows the development of interesting scenarios which, for example, explore the important relation between energy production and water use.

[9]

Modelling of Water Resources and Demand in the GLOWA Projects

Vassolo, S.; Döll, P.

GLOWA Status Seminar. München, 6-8 May 2002

2002b

Modelling of Water Resources and Demand in the GLOWA Projects

Sara Vassolo and Petra Döll



This research work is carried out within the BMBF funded programme GLOWA, project GLOWA-Elbe



Center for Environmental Systems Research

UNIKASSEL
VERSITÄT

Contact: vassolo@usf.uni-kassel.de

Introduction

WaterGAP, a global model of water availability and water use, has been developed to perform consistent comparative analyses of the water resources situation in river basins. With a spatial resolution of 0.5°, the raster-based model is designed to simulate the characteristic macro-scale behavior of terrestrial water cycle, including the human impacts, and to take advantage of all pertinent information that is globally available.

The **Global Hydrology Model** computes total runoff (sum of surface runoff and groundwater recharge) and river discharge as follows:

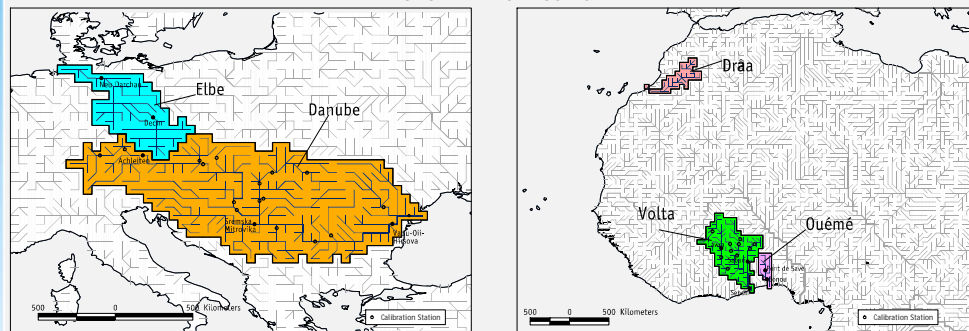
- the daily water balance (canopy, soil, open water) is computed for each cell.
- the total runoff from land is subdivided into surface runoff and groundwater recharge and is transported to the downstream cell (via lakes and wetlands).

The model is tuned against measured discharge at 724 stations (50% of the land area) by adjusting only one model parameter, taking into account discharge reduction by human water consumption.

The **Global Water Use Model** computes withdrawal and consumptive water use in four sectors: domestic, industrial, irrigation, and livestock. Sectoral water use is computed as a function of driving forces and model parameters.

In this poster, the results of the WaterGAP model in the GLOWA basins Elbe, Danube, Dräa, Ouémé, and Volta are summarized.

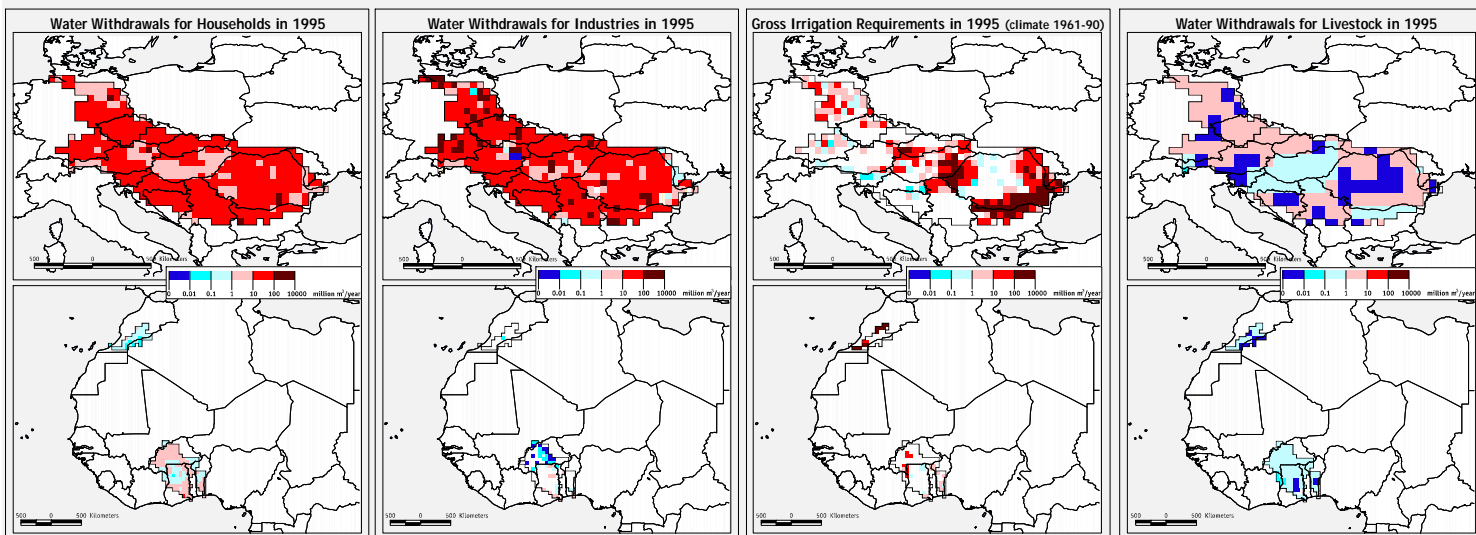
GLOWA River Basins



Performance of hydrological model at selected calibration stations

River Name	Station (*)	Upstream Area(km ²)	Calib. Period	Q _{spec} (mm/yr)	Discharge ^a (km ³ /month)	Q ₉₀ ^b (km ³ /month)		ANSC	MNSC
						Obs.	Calc.		
Elbe	Decin	51,980	1955-84	0.19	0.84	0.36	0.24	0.81	< 0
Elbe	Neu Darchau	132,510	1964-88	0.19	2.06	0.92	0.98	0.78	0.13
Danube	Achleiten	76,464	1962-91	0.59	3.74	2.09	1.03	0.80	< 0
Sava	Sremska Mitrovika	90,083	1955-84	0.57	4.28	1.58	1.90	0.74	0.13
Danube	Vadu-Oii-Hirsova (**)	703,753	1941-70	0.28	16.17	7.62	6.90	0.78	0.22
Ouémé	Pont de Save	21,276	1954-83	0.16	0.29	0.00	0.05 ^c	0.80	0.68
Ouémé	Bonou (**)	48,688	1955-80	0.10	0.43	0.003	0.07 ^c	0.80	0.66
Volta	Lawra (**)	96,316	1952-73	0.04	0.29	0.026	0.029 ^c	0.52	0.47
Volta	Sabari	57,466	1960-73	0.19	0.93	0.008	0.20 ^c	0.58	0.68
Volta	Senchi	399,457	1937-79	0.09	2.97	0.07	1.29 ^c	0.43	0.33

We do not have information on river Dräa discharge measurements
 (*) Calibration stations for which long-term average discharge was adjusted to +/- 1% of measured value
 (**) runoff correction necessary
^a Long-term average of calibration period
^b Monthly Q₉₀ is river discharge that is exceeded in 90% of the months within the calibration period
^c Overestimation of Q₉₀ partly due to neglected river channel seepage and small ephemeral ponds
 ANSC: Annual Nash-Sutcliffe coefficient for calibration period
 MNSC: Monthly Nash-Sutcliffe coefficient for calibration period



Summary of Water Situation in GLOWA Basins

	Water Withdrawal ^a		Long-term Average Water Availability ^b		Reliable Water Availability ^c
	km ³ /yr	m ³ /cap/yr	km ³ /yr	m ³ /cap/yr	m ³ /cap/yr
Elbe	10.6	428	29.5	1,191	584
Danube	58.1	709	215.7	2,631	1,021
Dräa	5.1	4,415	0.5	433	0
Ouémé	0.1	31	6.2	1,939	325
Volta	0.6	33	33.1	1,797	743

^a Values for 1995
^b Long-term average 1961-1990
^c Q₉₀ at river mouth

Summary & Conclusions

The results of the hydrological modelling can be summarized as follows:

- The interannual variability expressed as ANSC (annual Nash-Sutcliffe coefficient) is generally acceptable for all GLOWA basins.
- However, the model does not provide good results on monthly basis, especially for the Elbe and Danube basins (compare the monthly Nash-Sutcliffe coefficient). This is partly due to the simple snow module used in the model.
- The design low flow monthly Q₉₀ is simulated well, except in

arid to semi-arid basins. This is due mainly to the neglected river channel seepage and small ephemeral ponds.

Irrigation water use within the Dräa basin is overestimated, due to an overestimation of the irrigated area for the basin in the applied global irrigation map.

References:
 Döll, P., Alcamo, J., Henrichs, T., Kaspar, F., Lehner, B., Rosch, T., Siebert, S., (2000). The global integrated water model WaterGAP 2.1. In Lehner, B., Henrichs, T., Döll, P., Alcamo, J. (eds.): Eurowasser - Model-based assessment of European water resources and hydrology in the face of global change. Kassel World Water Series 5, Center of Environmental Systems Research, University of Kassel, Germany. <http://www.usf.uni-kassel.de/usf/archiv/dokumente.en.htm>.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN ---	2. Berichtsart Abschlussbericht
3a. Titel des Berichts Makroskalige Integration: Modellierung von Wasserdargebot und Wassernutzung sowie Bilanzierung des Stickstoffaustrags (GLOWA-Elbe)	
3b. Titel der Publikation 1) A gridded global data set of thermoelectric power and manufacturing water use. Water Resources Research. (eingereicht); 2) The value of regional-scale information in global change studies: an example of water use scenarios for the Elbe river basin. Regional Environmental Change. (eingereicht)	
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Vassolo, Sara; Döll, Petra	5. Abschlußdatum des Vorhabens 30.04.03
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n)) 1) Vassolo, Sara; Döll, Petra 2) Döll, Petra; Vassolo, Sara	6. Veröffentlichungsdatum unterschiedlich
	7. Form der Publikation Zeitschriftenartikel
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Wissenschaftliches Zentrum für Umweltsystemforschung Universität Kassel D-34109 Kassel	9. Ber.Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen *) 07GWK03 - 203008
	11a. Seitenzahl Bericht 25 plus Anhang
	11b. Seitenzahl Publikation
	12. Literaturangaben 45
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	14. Tabellen 2
	15. Abbildungen 11
	16. Zusätzliche Angaben
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Ziel des BMBF-Forschungsschwerpunktes GLOWA ist die Entwicklung integrierter Strategien für eine vorausschauende und nachhaltige Bewirtschaftung von Wasser in Einzugsgebieten(EZG) unter Berücksichtigung globaler ökosystemarer Zusammenhänge und sozio-ökonomischer Rahmenbedingungen. Dazu und speziell zu den Zielstellungen des Verbundprojekts GLOWA-Elbe hat das Vorhaben insbesondere durch Berücksichtigung überregionaler Aspekte und die Verwendung und Entwicklung makroskaliger Modellansätze beigetragen. Ergebnisse des Vorhaben sind: <ol style="list-style-type: none"> 1. Räumlich aufgelöste Bevölkerungsszenarien für Deutschland und die Tschechische Republik 2. Berechnungen zum Einfluss des Klimawandels auf das Wasserdargebot im gesamten Elbe-EZG 3. Szenarien der Wassernutzung für die Kühlung von Wärmekraftwerken im Elbe-EZG 4. Analyse des Mehrwerts elbespezifischer Informationen bei der Erstellung von Wassernutzungsszenarien 5. Vergleich von Modellergebnissen zu Wasserdargebot und Wassernutzung in allen GLOWA-EZG 6. Globalskalige Analyse des Einflusses des Klimawandels auf Wasserverfügbarkeit und Bewässerungswasserbedarf 7. Modellbasierter globaler Datensatz der Wassernutzung zur Kühlung von Wärmekraftwerken und für das produzierende Gewerbe 8. Konzept für ein globales Modell des terrestrischen Stickstofftransports 	
19. Schlagwörter Makroskalige Modellierung, Wassernutzung, Wasserressourcen, Wärmekraftwerke, Bevölkerung, Szenario, Klimawandel, Globaler Wandel, Skala, Elbe, global. Flusseinzugsgebietsmanagement	
20. Verlag	21. Preis ---

*) Auf das Förderkennzeichen des BMBF soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN -----	2. Type of Report Final Report
3a. Report Title Macroscale Integration: Modeling of Water Resources, Water Use and Nitrogen Export (GLOWA-Elbe) (in German)	
3b. Title of Publication 1) A gridded global data set of thermoelectric power and manufacturing water use. Water Resources Research (submitted); 2) The value of regional-scale information in global change studies: an example of water use scenarios for the Elbe river basin. Regional Environmental Change (submitted)	
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Vassolo, Sara; Döll, Petra	5. End of Project 30 April 2003
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s)) 1. Vassolo, Sara; Döll, Petra 2. Döll, Petra; Vassolo, Sara	6. Publication Date variable
8. Performing Organization(s) (Name, Address) Center for Environmental Systems Research University of Kassel D-34109 Kassel	7. Form of Publication journal papers
13. Sponsoring Agency (Name, Address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	9. Originator's Report No. 10. Reference No. 07GWK03 - 203008 11a. No. of Pages Report 25 + appendix 11b. No. of Pages Publication 12. No. of References 45 14. No. of Tables 2 15. No. of Figures 11
16. Supplementary Notes	
17. Presented at (Title, Place, Date)	
18. Abstract The goal of the BMBF program GLOWA is the development of integrated strategies for a sustainable water management at the regional scale, while taking into account global environmental changes and the socioeconomic framework conditions. The project has contributed to this goal and in particular to the goals of GLOWA-Elbe by focusing on macroscale aspects and the application and development of macroscale models. The results of the project are: <ol style="list-style-type: none"> 1. Spatially distributed and consistent population scenarios for Germany and the Czech Republic as the basis for the analysis of a variety of water-related issues in the Elbe basin 2. Simulation of the impact of climate change on water resources in the German and Czech Elbe basin 3. Scenarios of water use for cooling thermal power stations in the Elbe basin upstream Geesthacht 4. Assessment of the value of Elbe basin specific information for water use scenarios 5. Comparison of water resources and water use in all river basins of the GLOWA program 6. Global-scale assessment of the impact of climate change on water resources and irrigation water requirements 7. Model-based global data set of water use for cooling of thermal power stations and for manufacturing 8. Concept for a global model of terrestrial nitrogen transport 	
19. Keywords macroscale modeling, water use, water resources, thermal power stations, population, scenario, climate change, global change, scale, Elbe, global, river basin management	
20. Publisher	21. Price ----