



## EU-Projekte zu Auswirkungen von Klimaveränderungen auf den Wasserhaushalt

Peter Krahe  
Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

### 1. Einleitung

Im Zeitraum 1994 bis 1998 wurden im Rahmen des 4. Rahmenprogramms der Europäischen Union (EU) unter dem Programmpunkt „Umwelt und Klima“ zahlreiche Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (F&E-Vorhaben) sowie konzertierte Aktionen zu Fragen der anthropogen verursachten Klimaänderung und deren möglichen Auswirkungen auf die Umwelt durchgeführt. Von den vier Forschungsgebieten (Tab.1), die im Rahmen des Programms formuliert waren, wurden insbesondere auf dem Forschungsgebiet „Forschung der natürlichen Umwelt, Umweltqualität und Globale Änderung“ Vorhaben zu den Themen „Klimaänderung und Auswirkung von Klimaänderungen auf die natürlichen Ressourcen“ sowie „Physik und Chemie der Atmosphäre, Wechselbeziehung zwischen Biosphäre und Mechanismen der Auswirkungen auf Änderungen der Umwelt bearbeitet.

Die unter diesen Themen geförderten Vorhaben hatten zum Ziel, das Prozessverständnis der in der Klima- und Klimafolgenforschung zu berücksichtigenden Systeme zu verbessern, die Ergebnisse der Klimaforschung in Form von Klimaszenarien der europäischen Klimafolgenforschung zur Verfügung zu stellen und schließlich Klimafolgenforschung selbst unter anderem auch auf den Gebieten Hydrologie und Wasserwirtschaft zu betreiben.

Tab.1: Das vierte Forschungsrahmenprogramm der EU (1994-1998). Teilprogramm Umwelt und Klima (Quelle: [www.cordis.lu/en/src](http://www.cordis.lu/en/src))

Nr.	Forschungsgebiete	Budget
1.	Forschung der natürlichen Umwelt, Umweltqualität Und Globale Änderung	247.75 Mecu
2.	Umwelttechnologie	131.25 Mecu
3.	Raumfahrttechnik angewendet für Umweltmonitoring Und –forschung	107.60 Mecu
4.	Menschliche Dimensionen der Umweltänderungen Art der Unterstützung Projekte mit Kostenbeteiligung (F&E-Vorhaben, SME Förderung) Konzertierte Aktionen Begleitende Maßnahmen (Studien, Seminare, Konferenzen, Training etc.)	39.40 Mecu

Als ein Beispiel für die Aktivitäten, die von der EU ergriffen wurden um die Ergebnisse der Klimaforschung für die Klimafolgenforschung aufzubereiten, sei hier die konzertierte Aktion ECLAT „Concerted Action Towards the Improved Understanding and Application of Results from Climate Model Experiments in European Climate Change Impacts Research“ angeführt. Im Rahmen dieses Projektes wurde ein Netzwerk der im 4. Rahmenprogramm mit der Klimamodellierung und Szenarienerstellung betrauten Forschungsgruppen erstellt, mit dem Ziel einer Harmonisierung der Verfahren zur Erstellung von Klimaszenarien auf europäischer Ebene herbeizuführen.

Die Bundesanstalt für Gewässerkunde war, beginnend mit dem Jahr 1995, an drei Vorhaben des 4. Rahmenprogrammes der EU beteiligt. Zwei von diesen befassten sich mit Fragen der Auswirkungen von Klimaänderungen auf Hydrologie und Wasserwirtschaft. Beide Forschungsvorhaben können als repräsentativ für die im Programm geförderten Projekte der Klimafolgenforschung angesehen werden.

Von diesen Projekten werden im folgenden beispielhaft die Ergebnisse dargestellt, die für das gesamte Rheingebiet und für das Flusseinzugsgebiet der Saar erzielt wurden.

## **2. Einfluss von Klimaänderungen auf das Abflussregime des Rheins**

### **Zielsetzung**

Als Mitglied einer Arbeitsgruppe der Internationalen Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR) hat die BfG an einer Untersuchung der Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf den Abfluss im Rheingebiet im Rahmen des von der Europäischen Union geförderten Projektes „Impact of climate change on hydrological regimes and water resources in the European Community“ mitgearbeitet. Die KHR-Gruppe setzte sich aus Mitgliedern der Landeshydrologie und –geologie in Bern, der ETH Zürich, dem Institute Royal Meteorologique de Belgique in Brüssel, dem Rijkswaterstaat RIZA in Arnheim/Lelystad, der Rijksuniversität Utrecht und der BfG in Koblenz zusammen.

Die Ergebnisse des von 1995 bis 1997 laufenden Forschungsvorhabens wurden in einem ausführlichen Bericht der KHR veröffentlicht (Grabs, 1997). Im folgenden werden beispielhaft einige Ergebnisse und die wesentlichen Schlußfolgerungen aus dem Projekt vorgestellt.

### **Methodik**

Auf Grund der Größe des Rheingebietes und der hohen zeitlichen Dynamik der abzubildenden hydrologischen Prozesse wurde das Projekt auf verschiedenen Raum-Zeit-Ebenen durchgeführt. Das Wasserbilanzmodell RHINEFLOW (Kwadijk, 1993) wurde auf der sog. Regionalen Ebene für das Rheingebiet von der Quelle bis zum Pegel Rees (ca. 160 000 km<sup>2</sup>) angewandt. Es arbeitet mit einem monatlichen Zeitschritt und einer räumlichen Auflösung von 3km x 3km. Auf der sog. Einzugsgebietsebene wurden in ausgewählten repräsentativen Einzugsgebieten detaillierte Wasserhaushaltsmodelle mit einer zeitlichen Auflösung von 1 bis 24 Stunden und einer räumlichen Auflösung von 25m x 25 m bis 1km x 1km angewandt (Abb.1).

Basierend auf den Ergebnissen verschiedener Klimamodelle stellte die Climate Research Unit (CRU) der Universität von East Anglia Klimaszenarien in Form vieljährig gemittelter monatlicher Klimagrößen zur Verfügung, die nach entsprechender Transformation zu Monats- und Tageswerten als Inputdaten der hydrologischen Modelle dienten.

Durch einen Vergleich der Modellergebnisse auf den verschiedenen Raum-Zeit-Ebenen wurden die Aussagen zum Einfluss von Klimaänderungen auf das Abflussregime des Rheins abgesichert. Weiterhin erfolgte eine erste qualitative Betrachtung und Bewertung der Auswirkungen der festgestellten möglichen Änderungen auf wasserwirtschaftliche Aspekte im Rheingebiet.

Es ist hervorzuheben, dass die Klimaszenarien verbindlich für alle im Rahmen des EU-Projektes durchgeführten Fallstudien, d.h. europaweit, eingesetzt wurden und damit eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse der hydrologischen Wirkungsforschung auf europäischer Ebene gegeben war.

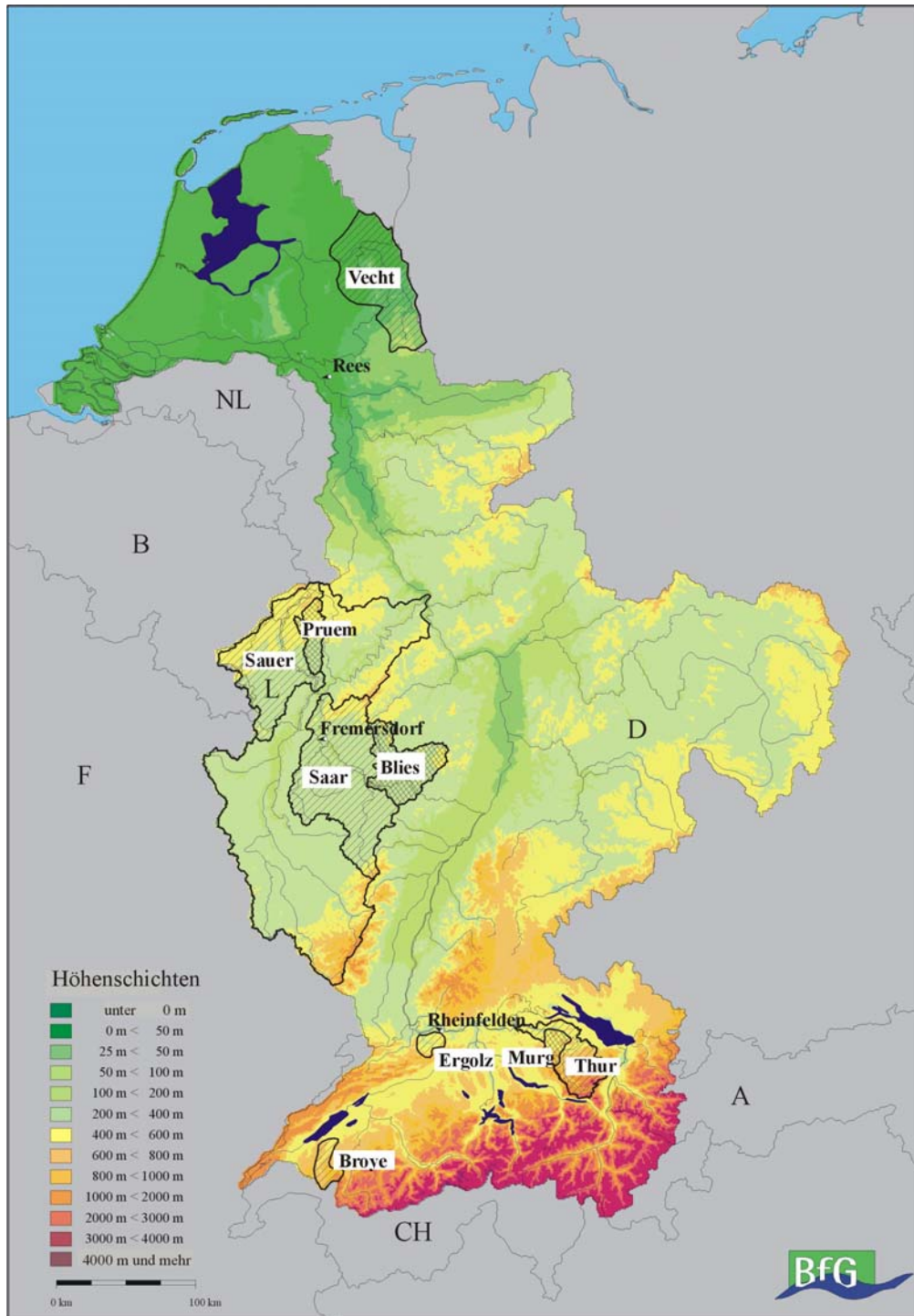


Abb.1: Überblick über das Rheingebiet und die im KHR/EU Projekt bearbeiteten Flussgebiete. Das Einzugsgebiet der Saar war Gegenstand des EUROTAS Projektes

### Klimaszenarien für das Rheingebiet

Globale atmosphärische Zirkulationsmodelle (GCM's) stellen in Verbindung mit Ozeanmodellen die Basis zur Modellierung des künftigen Klimas dar. Sie verfügen über eine hohe zeitliche jedoch geringe räumliche Auflösung (s. Tab.2). Damit ist eine Wiedergabe des regionalen Klimas insbesondere der Niederschlagsklimatologie nicht möglich. Bei den mit Klimamodellen durchgeführten Experimenten wird zwischen Equilibrium und transienten Experimenten unterschieden. Bei den Equilibrium Experimenten erfolgt die gesamte Zugabe der

sog. Treibhausgase, z.B. Verdoppelung des heutigen Gehaltes der CO<sub>2</sub>-äquivalenten Gase in der Atmosphäre, zu einem Zeitpunkt. Die Klimamodelle werden anschließend solange betrieben, bis sich ein quasi-Gleichgewichtszustand der Modellatmosphäre eingestellt hat. Bei transienten Klimaexperimenten findet dagegen eine kontinuierliche Erhöhung äquivalenter Treibhausgase statt. Dabei wird in der Regel zwischen den Emissionsszenarien, die die globale wirtschaftliche Entwicklung sowie die Ergreifung von Maßnahmen zur Reduzierung der Treibhausgase verwenden, unterschieden.

Vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) wurden hierfür verschiedene Szenarien vorgegeben, von denen das Emissionsszenarium business-as-usual (IS92a) dem in der Studie verwendeten UKTR6675 Klimamodelllauf (Tab.2) zu Grunde liegt. Dies entspricht dem Szenarium, dass sich die Wirtschaft mit einer bestimmten Wachstumsrate weiterentwickelt und keine Maßnahmen zur Reduktion CO<sub>2</sub>-äquivalenter Gase unternommen werden.

Es muß bei der Interpretation der Ergebnisse beachtet werden, dass bei den für die Erstellung der Szenarien eingesetzten Klimamodellen noch nicht der Sulfat-Aerosol-Effekt, der die Verunreinigung der Luft mit strahlungswirksamen Luftverunreinigungen beinhaltet, berücksichtigt wird. Dieser bewirkt eine zeitliche Verzögerung des globalen Temperaturanstiegs.

Bevor Ergebnisse von Klimamodellen in hydrologischen Modellen verwendet werden können, müssen sie auf Grund der o.g. Anmerkungen harmonisiert und regionalisiert werden. Im Rahmen des KHR/EU-Projektes konnte auf die von der CRU bereitgestellten Ergebnisse einer derartigen Arbeit zurückgegriffen werden. Ausgehend von den Ergebnissen unterschiedlicher GCM's (Tab.2) wurden von der CRU verschiedene Klimaszenarien mit einer horizontalen Auflösung von 0.5° x 0.5° geographischer Länge/Breite erstellt (Hulme et al., 1994). Die Szenarien liefern mittlere monatliche Änderungen der Lufttemperatur, der Niederschlagshöhe, der Windgeschwindigkeit, der Strahlung sowie des Dampfdrucks. Auf der Grundlage der Ergebnisse von den Klimamodellen für die Equilibrium Experimente durchgeführt wurden, wurden von der CRU Klimaszenarien für die Zeithorizonte 2020, 2050 und 2100 erstellt. Für diese Bezugsjahre wurde das Erreichen der Konzentration der Treibhausgase entsprechend dem Emissionsszenarium „business as usual“ angenommen und die Ergebnisse der Klimamodelle entsprechend hochgerechnet. In der KHR/EU Studie wurden diejenigen Szenarien eingehender analysiert, die sich auf das Jahr 2050 beziehen. Dabei wurden von den verfügbaren transienten Klimaszenarien die Ergebnisse der Zeitreihe 2066/2075 als repräsentativ für das Bezugsjahr 2050 angesehen.. Als Referenzklima, das zur Bewertung der von den Modellen prognostizierten Klimaänderung erforderlich ist, stand ein Datensatz zur Verfügung, der das heutige Klima (1961/80) repräsentiert.

Tab.2: Übersicht der verwendeten GCM-Experimente im KHR/EU-Projekt

<b>Experiment</b>	<b>UKHI2050</b>	<b>XCCC2050</b>	<b>UKTR6675</b>
Quelle	Hadley Centre	Canadian Climate Centre	Hadley Centre
Typ des Experiments	Equilibrium	Equilibrium	Transient
Klimamodell	Atmosphäre	Atmosphäre	Ozean-Atmosphäre gekoppelt
Bodenauflösung (Geogr. Breite/Länge)	2.5° x 3.75°	3.7° x 3.75°	2.5° x 3.75°
Klimaprojektion für das Jahr	2050	2050	~2060

Die aus den Klimaszenarien resultierenden mittleren monatlichen Änderungen der o.g. Größen mussten in Monats- und Tageswerte umprojiziert werden. Hierzu wurden in einem ersten einfachen Ansatz den Werten der historisch gemessenen meteorologischen Zeitreihen die sich im Vergleich zu der Referenzperiode ergebenden Änderungen des entsprechenden Klimaszenariums hinzuaddiert.



Von den verschiedenen Klimaszenarien, die von der CRU erstellt wurden, lässt sich generell feststellen, dass sie in ihren Grundaussagen übereinstimmen, auch wenn sie sich im Detail deutlich unterscheiden. Danach ergibt sich z.B. für den Niederschlag im Rheingebiet eine Erhöhung im Winter von Südwest nach Nordost hin zunehmend und eine Verringerung im Sommer mit überwiegendem Nord-Süd-Gefälle.

### **Ergebnisse für das Rheingebiet**

Die im Projekt verwendeten Klimaszenarien enthalten signifikante Veränderungen der Temperatur und der Niederschlagsverteilung. Die Szenarienrechnungen führen deshalb bezüglich der Wasserführung im Rhein zu folgenden Abschätzungen:

- Im Einzugsgebiet des Alpen- und Hochrheins neigen die sommerlichen Hochwasser zu kleineren Scheitelwerten des Abflusses. Hingegen führen höhere Winterniederschläge in Verbindung mit einer höher liegenden Schneefallgrenze zu markant höheren Scheitelwerten der Winterhochwasser. Dies hat zur Folge, dass sich für kurze Wiederkehrperioden die Scheitelwerte kaum verändern, hingegen für z.B. 50jährliche Hochwasser die Spitzen jedoch um 10% höher liegen können. Das Abflussregime verändert sich von glazio-nival zu nivo-pluvial. Weniger Niederschlag wird im Form von Schnee und Eis gespeichert, und dementsprechend geringer und kürzer ist die Zeit der Schneeschmelze (Abb.2).
- Modellrechnungen in ausgewählten Einzugsgebieten des Mittelrheins auf regionaler und Einzugsgebietsebene zeigen, dass sich hier die Situation im Bezug auf Hochwasserhöhe und -häufigkeit unter veränderten Klima wenig ändert. Die Abflussverhältnisse am Mittelrhein selbst ändern sich jedoch stark, da sich hier die Regimeänderungen des Hochrheins auswirken können und damit gegenüber den heutigen Verhältnissen zu höheren Winter- und niedrigeren Sommerabflüssen führen (Abb.2). Dies bedeutet generell eine Erhöhung des Hochwasserrisikos im Winter und eine Verschärfung der Niedrigwassersituation im Sommer.

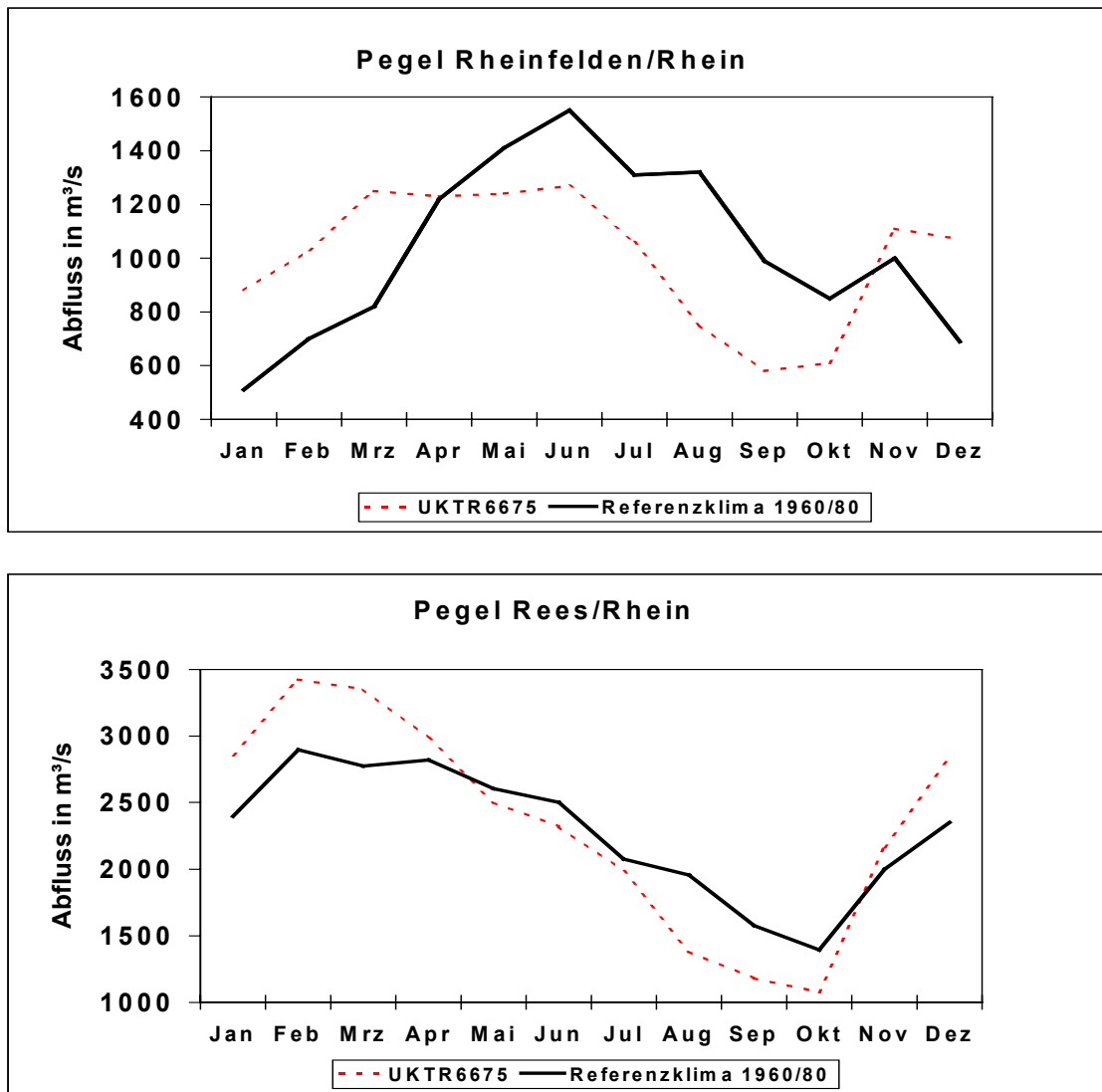


Abb.2: Abflussszenarium 2050 für ausgewählte Rheinpegel. Berechnet mit dem Wasserbilanzmodell RHINEFLOW unter Verwendung des Referenzklimas (1961/80) und des transienten Klimaszenariums UKTR6675

Die auf der Grundlage der Klimaszenarien und mit den regional angepassten hydrologischen Modelle erzielten Ergebnisse weisen eine generelle Übereinstimmung in ihren Aussagen sowohl in den untersuchten Teileinzugsgebieten als auch im gesamten Rheingebiet auf.

Ausgehend von den Resultaten des Projektes hat die Arbeitsgruppe der KHR Empfehlungen bezüglich der wasserwirtschaftlichen und politischen Konsequenzen möglicher Klimaänderungen formuliert. Diese wurden auf einem internationalen Workshop in Nijmegen am 4./5. Dezember 1997 endgültig formuliert und als Nijmwegener Erklärung publiziert (Grabs, 1998). In den Schlussfolgerungen wird hierauf noch einmal Bezug genommen.



### **3. Ein Entscheidungshilfesystem zur Einschätzung von Hochwassereintretenswahrscheinlichkeiten und des Hochwasserrisikos europäischer Flüsse**

#### **Zielsetzung**

In einer dreijährigen Projektlaufzeit (1998–2000) wurde das von der EU geförderte Projekt European River Flood Occurrence and Total Risk Assessment System (EUROTAS) bearbeitet. An diesem Projekt waren neben der BfG 12 weitere Institutionen verteilt über ganz Europa beteiligt. Die Ergebnisse dieses Vorhabens wurden anlässlich des internationalen Symposiums „European Conference on Advances in Flood Research“ in Potsdam vom 1.-3. Nov. 2000 (Bronstert et al., 2000) vorgestellt. Ziel des F&E-Vorhabens war die Entwicklung von integrierten Modellierungs- und Managementprozeduren zur Einschätzung des Hochwasserrisikos und deren zukünftigen Entwicklung unter Berücksichtigung von Klima- und Landnutzungsänderungen. Ebenso waren Strategien zur Reduzierung des Hochwasserrisikos durch Flussbaumaßnahmen Bestandteil der Untersuchungen. Wichtige Eckpfeiler des Projektes waren die Entwicklung eines Software-Prototyps eines integrierten Systems zur Flussgebietsmodellierung basierend auf einer offenen Systemarchitektur (Integrated Catchment Modeling System, ICM), die Erstellung eines softwarebasierten Decision Support Systems (DSS) sowie die Demonstration der Machbarkeit und des Nutzens des Systems am Beispiel von 5 über Europa verteilten Einzugsgebiete. Anhand der Fallbeispiele wurden weiterhin wissenschaftliche und praktische Fragestellungen der hydrologischen Modellierung diskutiert. Neben dem deutschen Einzugsgebietsanteil der Elbe, der vom Potsdam Institut für Klimafolgenforschung bearbeitet wurde, bildete auch das internationale Einzugsgebiet der Saar ein derartiges Fallbeispiel. Im Folgenden werden die Ergebnisse, die für das Saargebiet gewonnen wurden, soweit sie sich mit der Frage der Einbeziehung von Klimaszenarien zur Prognose des künftigen Hochwasserrisikos betreffen, vorgestellt. In diese Arbeiten waren neben der Bundesanstalt für Gewässerkunde die niederländischen Institutionen Delft Hydraulics und der Rijkswaterstaat RIZA eingebunden.

#### **Methodik**

Für das Einzugsgebiet der Saar (Abb.1) wurden zwei Flussgebietsmodelle (Krahe et al., 2000) erstellt, ein Tages- und ein Stundenwertmodell. Die Niederschlag-Abfluss-Modellierung beruht in beiden Fällen auf dem semi-distributiven konzeptionellen Modellansatz des vom Schwedischen Meteorologischen und Hydrologischen Institutes (SMHI) entwickelten Modells HBV (Bergström, 1976). Das Einzugsgebiet der Saar wurde hierzu in Teileinzugsgebiete untergliedert (Tab.3). Zur Berücksichtigung des Wellenablaufs in der Saar steht im Tageswertmodell eine Variante der bekannten Muskingum Gleichung zur Verfügung, während für das Stundenwertmodell auf der 93 km langen Flussstrecke der deutschen Saar das hydrologische Wellenablaufmodell SYNHP einsatzbereit vorliegt. Das Modell SYNHP wurde im Zuge von Untersuchungen zu den Auswirkungen des Saarausbaus auf den Hochwasserwellenablauf der Saar angeeicht (Busch et al., 1996).

Für den Flussabschnitt der Saar unterhalb des Pegels Fremersdorf (Fluss-km 48.5) bis zur Mündung in die Mosel wurde innerhalb des Projektes das 1-D hydrodynamische Modell SOBEK angeeicht (Werner et al., 2000). Dieses Modell wurde zur Bestimmung von Überschwemmungsgrenzen, die die Basis der im DSS vorgegebenen Prozeduren zur Bestimmung des Hochwasserrisikos liefern, verwendet. Das Modell wurde so aufgestellt, dass Flussbaumaßnahmen berücksichtigt werden können.

Das Stundenwertmodell HBV/SYNHP wurde zur Berechnung der Auswirkungen von Landnutzungsszenarien auf den Hochwasserabfluss erstellt, während für die Klimaänderungsstudien das HBV/MUSKINGUM Tageswertmodell verwendet wurde.

Tab.3: Kennwerte der für die hydrologische Modellierung im Saargebiet bis zum Pegel Fremersdorf ausgewiesenen Einzugsgebiete

<b>Einzugsgebiet</b>	<b>Obere Saar</b>	<b>Blies</b>	<b>Restgebiet*</b>	<b>Prims</b>	<b>Nied</b>
Pegel	Wittring	Reinheim	-	Nalbach	Niedaltdorf
Einzugsgebietsfläche (km <sup>2</sup> )	1786	1894	1181	737	1375
Mittlere Gebietshöhe (ü.N.N)	291	334		389	266
<b>Land Nutzung in %</b>					
Siedlung	1.3	4.4	11.2	4.5	1.7
Wiesen und Weide	43.2	27.0	24.7	27.6	40.3
Ackerbau	15.5	18.5	23.4	20.5	33.9
Wald	40.0	50.2	40.6	47.4	24.1
<b>Wasserbilanz in mm/a</b>					
Niederschlagshöhe	943	937	865	1017	809
Abflusshöhe	339	374	347	455	317
Verdunstungshöhe	604	563	517	562	492
<b>HW-Statistik Fremersdorf</b>	<b>MQ53/96</b>	<b>MHQ53/96</b>	<b>HQ10</b>	<b>HQ100</b>	<b>HQ200</b>
	74.3	678	1106	1410	1540

\*Einzugsgebiet unterhalb der Bliesmündung bis zum Pegel Fremersdorf ohne Prims und Nied

## Klimaszenarien für das Saargebiet

Grundlage der Untersuchungen zu den Auswirkungen von Klimaänderungen auf das Hochwasserrisiko bilden die auf der Grundlage von Klimamodellen regionalisierten Zeitreihen meteorologischer Elemente einschließlich des Niederschlages. Im Rahmen des EUROTAS Projektes kam ein vom Potsdam Institut für Klimafolgenforschung vorgeschlagenes statistisches Verfahren, das sog. „Expanded Downscaling (EDS)“ zum Einsatz (Bürger, 2000). Das Verfahren ist den Regressionsverfahren zuzuordnen. Es werden deshalb gemessene Daten für eine Eichperiode benötigt. Im Anwendungsfall gehen die von Klimamodellen berechneten Datensätze ein. Eingangsdaten dieser Methode bilden Felder der geopotentiellen Höhe der 500hPa-Druckfläche sowie der Lufttemperatur der 850 hPa-Druckfläche. Für den Aneich- und Validierungszeitraum (1961/90) standen ein Datensatz von Reanalysedaten atmosphärischer Größen für den Nord Atlantischen/Europäischen Sektor (55°W,25°N und 45°O,75°N) sowie Daten von 65 Niederschlags- und 6 Klimastationen zur Verfügung.

Zur Erstellung eines regionalisierten Klimaszenariums für das Einzugsgebiet der Saar lagen die vom Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg mit dem gekoppelten globalen Zirkulations- und Ozeanmodell ECHAM4/OPYC3 für den Zeitraum 1860-2100 berechneten Modellergebnisse vor. Grundlage dieser Berechnung bilden für den Zeitraum 1860 bis 1990 gemessene Konzentrationen der CO<sub>2</sub>-äquivalenten Gase, während für den Zeitraum 1991 bis 2100 das IPCC Emissions-Szenarium IS92a „business-as-usual“ verwendet wurde.

Nach Anwendung des Downscaling-Verfahrens stehen Zeitreihen für den Zeitraum 1860 bis 2100 der täglichen Niederschlagshöhen von 65 Stationen sowie der meteorologischen Elemente Lufttemperatur, relative Sonnenscheindauer, relative Feuchte und Windgeschwindigkeit von 6 Klimastationen zur Verfügung. In Abb.3 sind beispielhaft die für die Klimastation Saarbrücken mit dem EDS Verfahren regionalisierten Jahressummen der Niederschlagshöhe der Zeitreihe 1951/2100 dargestellt.

In den Jahressummen der Niederschlagshöhen sind zunächst keine signifikanten Trends zu erkennen. Berücksichtigt man jedoch den Jahresgang (s. Abb.4), so zeichnen sich jahreszeitliche Trends ab. Erste Ergebnisse zur extremwertstatistischen Analyse der Niederschlagsreihen sind in Bürger (2000) enthalten. Diese zeigen, dass bei Betrachtung der Zeitreihe 1961/2100 kein signifikantes Klimasignal enthalten ist. Innerhalb dieses Zeitraumes





jedoch durchaus längere Perioden auftreten, in denen verglichen mit der Periode 1961/90 die Scheitelwerte mit einer Jährlichkeit von z.B. 10 Jahren eine deutliche Zunahme aufweisen.

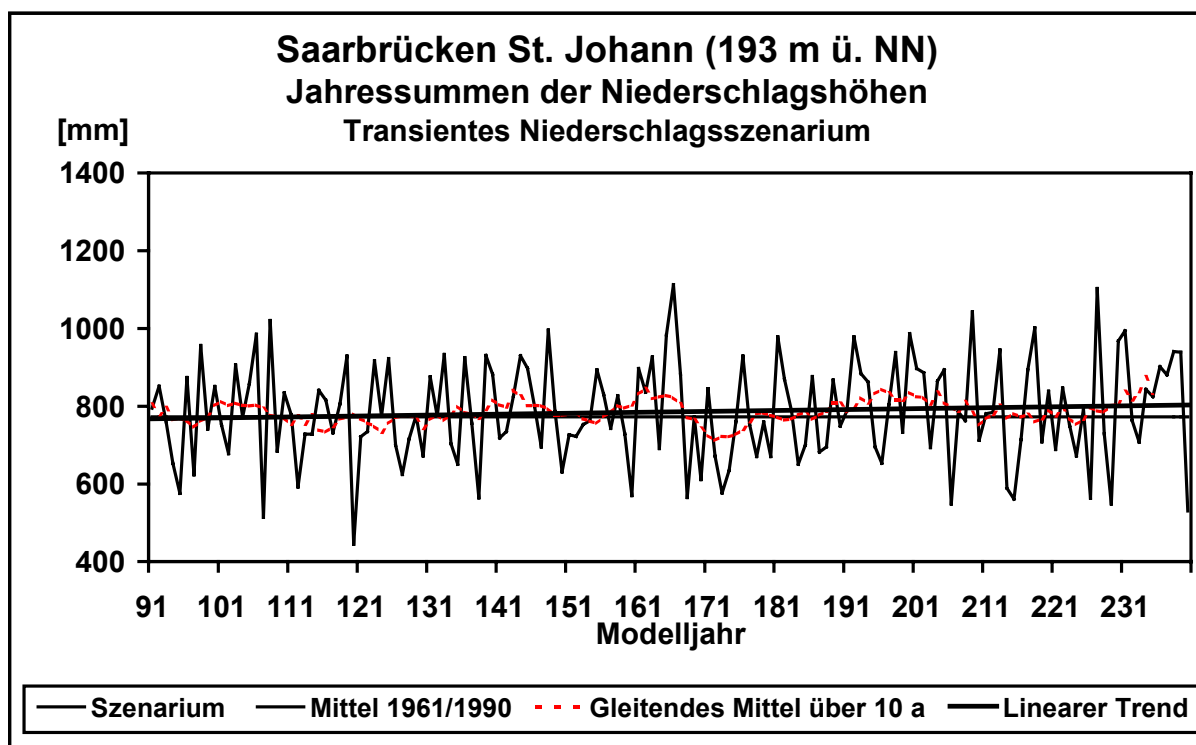


Abb.3: Mit dem EDS Verfahren auf der Basis der Ergebnisse des ECHAM4/OPYC3 Klimamodells für die Zeitreihe 1860/2100 regionalisierte Niederschlagshöhen an der Klimastation Saarbrücken St. Johann

### Ergebnisse für das Einzugsgebiet der Saar

Für die Analyse der hydrologischen Auswirkungen von Klimaänderungen im Saargebiet wurden aus den für die Stationen vorliegenden Niederschlagszeitreihen Gebietsniederschlagshöhen gemäß der räumlichen Unterteilung des HBV/MUSKINGUM Modells berechnet. Ferner diente die Reihe der Lufttemperatur und die aus Lufttemperatur und Sonnenscheindauer berechnete Referenzverdunstung nach Penman-Wendling (Wendling, 1995) an der Station Saarbrücken als Modelleingang für das hydrologische Modell. In Tab.4 sind die Zeiträume, für die das hydrologische Modell berechnet wurde und deren Ergebnisse im weiteren analysiert werden, aufgeführt.

Tab.4: Regionalisierte Klimaänderungsszenarien für das Einzugsgebiet der Saar

Kürzel	Bezeichnung	Beschreibung
C1	Referenzklima	Niederschlag und meteorologische Größen nach Anwendung des EDS Verfahrens für die Zeitreihe 1961/90
C2	Klimaszenarium	Niederschlag und meteorologische Größen nach Anwendung des EDS Verfahrens für die Zeitreihe 2061/90

In Abb.4 sind die Eingangsdaten und berechneten Abflüsse aggregiert als Monatsmittel bzw. -summen dargestellt. Der Vergleich der mit den Klimaszenarien C1 und C2 berechneten Abflusshöhen bestätigt im wesentlichen die bereits im KHR/EU Projekt gefundenen Ergebnisse. Danach ist eine Zunahmen des Abflusses in den Monaten Januar bis März und eine

Verringerung des Abflusses in den abflussarmen Monaten August bis Oktober zu verzeichnen.

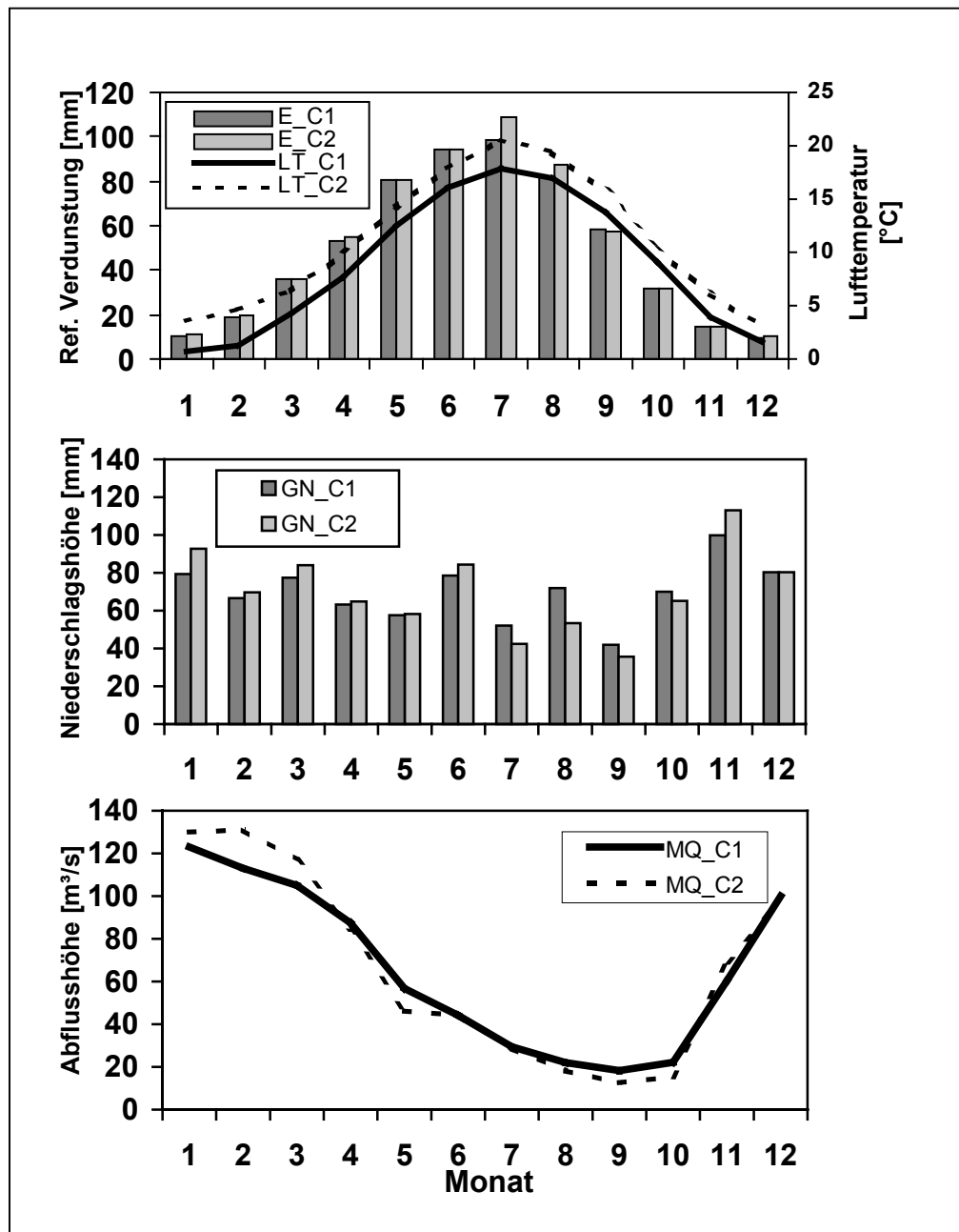


Abb.4: Monatssummen bzw. -mittel der regionalen Klimaszenarien C1 und C2. Dargestellt sind die Gebietsniederschlagshöhen des Saargebietes sowie die Referenzverdunstungshöhe und Lufttemperatur der Station Saarbrücken St. Johann. Die Abflusshöhen am Pegel Fremersdorf/Saar wurden unter Verwendung der Klimaszenarien mit dem HBV/MUSKINGUM Modell auf Tageswertbasis berechnet

Zur Analyse des Einflusses der Klimaänderungen auf den Hochwasserabfluss wurde die im Rahmen des EUROTAS Projektes als Bestandteil des ICM vorgeschlagene extremwertstatistische Methode QDF auf die Modellergebnisse angewendet. Die Abflussdauer-Häufigkeits-Methode QDF (Galea und Prudhomme, 1994) erlaubt eine extremwertstatistische Analyse der Scheitelwerte sowie der Abflüsse eines Hochwasserereignisses, die einen Zeitraum mit einer vorgegebenen Dauer überschreiten. Diese Werte werden aus einer vorliegenden Abflusszeitreihe ermittelt und es werden dann für diese Abflüsse theoretische Extremwertver



teilungen, hier die Exponentialverteilung, angepasst. Die für verschiedene Jährlichkeiten und Überschreitungsdauern berechneten Abflüsse können weiterhin nach einer bestimmten Rechenvorschrift zu einer synthetischen Ganglinie zusammengesetzt werden. Das Ergebnis der Analyse liefert damit Hochwasserganglinien verschiedener Jährlichkeiten. Neben einer anschaulichen Darstellung der Ergebnisse der extremwertstatistischen Eigenschaften der mit verschiedenen hydrometeorologischen Eingangsdaten berechneten Abflussreihen können die synthetischen Ganglinien als Eingangsdatensatz für weitere Modelle, die z.B. die Berechnung von Überschwemmungsgrenzen erlauben, verwendet werden.

In Abb.5 sind die aus den mit den Szenarien C1 und C2 berechneten Abflussreihen abgeleiteten synthetischen Ganglinien für ein 10- und ein 100 jährliches Ereignis dargestellt. Der Vergleich der Kurven erlaubt die Aussage, dass keine markanten Änderungen bei den Scheitelwerten eingetreten sind. Es deutet sich jedoch die Tendenz an, dass die Fülle bzw. Dauer von Hochwasserereignissen unter geänderten Klimabedingungen im Mittel zunehmen wird. Unter Berücksichtigung des statistischen Charakters extremer Wetter- bzw. Niederschlagsereignisse ist damit durchaus eine Veränderung der Hochwasserwahrscheinlichkeit der Scheitelwerte in Erwägung zu ziehen, auch wenn sich dies zunächst nicht unmittelbar aus den Modellergebnissen ergibt.

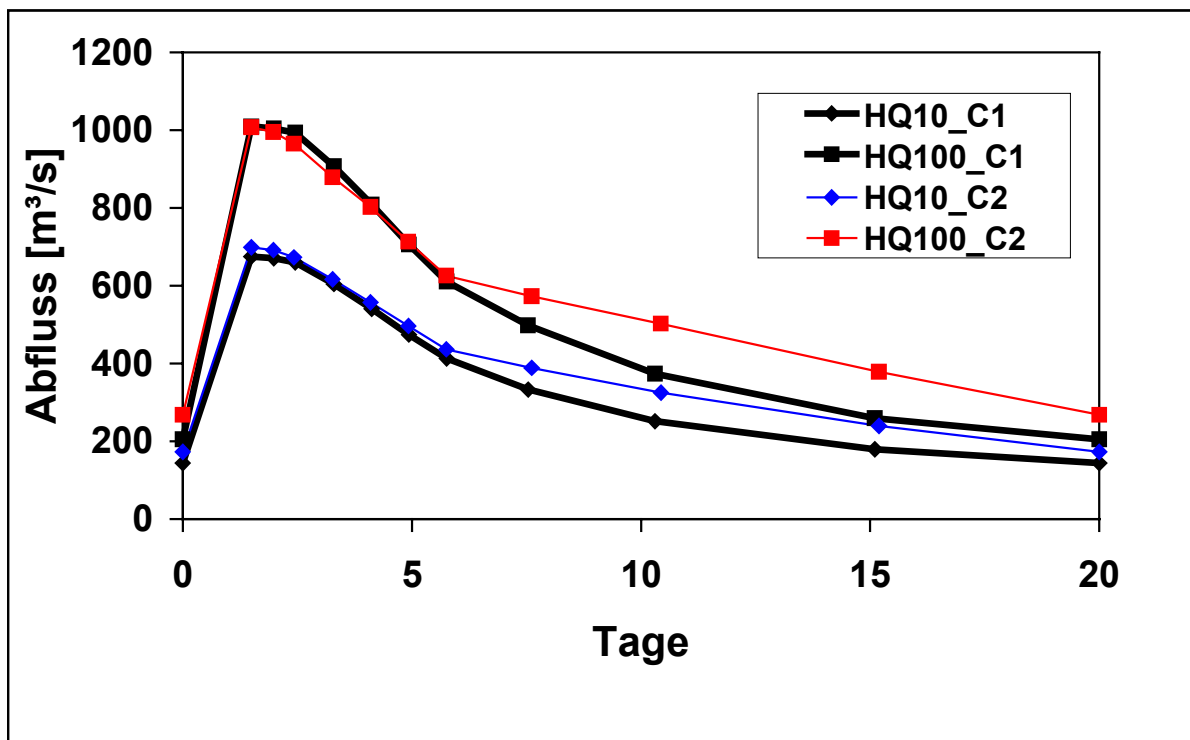


Abb.5: Mit der QDF Methode berechnete synthetische Hochwasserganglinien mit einer Jährlichkeit von 10 und 100 Jahren am Pegel Fremersdorf/Saar. Eingangsdaten bilden die für die Klimaszenarien C1 und C2 mit dem HBV/MUSKINGUM Modell berechneten Abflüsse

Bei der vorliegenden Studie stand die methodische Vorgehensweise im Vordergrund. Die hier vorgestellten Ergebnisse dürfen deshalb nicht überinterpretiert werden. Zum einen gibt das verwendete Klimaszenarium nicht mehr den aktuellen Stand der Klimaforschung wider, zum anderen müssen für eine Prognose der hydrologischen Entwicklung unter geänderten Klimabedingungen die mit den Klimamodellen, den Regionalisierungsverfahren und letztlich die mit der hydrologischen Modellierung verbundenen Fehler noch in die Bewertung mit einfließen. So wurde im Rahmen des EUROTAS Projektes beispielhaft für ein italienisches Ein

zugsgebiet die Vorgehensweise zur Berücksichtigung der Unsicherheiten, die durch die Parametrisierung hydrologischer Modelle in den Hochwasserganglinien auftreten, demonstriert.

#### **4. Schlussfolgerungen und Ausblick**

Die bisher durchgeführten Untersuchungen zum Thema Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Abfluss haben gezeigt, dass die mit einer Prognose verbundenen Unsicherheiten im wesentlichen durch die Unsicherheiten der von der Klimaforschung bereitgestellten Ergebnisse verbunden sind. Probleme von Anwenderseite ergeben sich insbesondere durch die Vielzahl der verfügbaren Ergebnisse der verschiedenen Klimamodelle sowie ihre sachgerechte Interpretation und Anwendung in Klimafolgenprojekten. Die auf europäischer Ebene laufenden Bestrebungen, die Ergebnisse der Klimaforschung zur Erstellung europaweiter Klimaszenarien zu harmonisieren und der Klimafolgenforschung zur Verfügung zu stellen, ist ein Schritt in die richtige Richtung. Projekte, wie z.B. die konzertierte Aktion ECLAT, die von der EU im 4. Rahmenprogramm gefördert wurde, müssen weitergeführt werden. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass die Ergebnisse einer breiten Fachwelt auch außerhalb der im Rahmen von europäischen Forschungsprojekten eingebundenen Forschungsgruppen zur Verfügung gestellt werden.

Trotz der genannten Unsicherheiten lassen sich nach dem derzeitigen Stand folgende Schlussfolgerungen, wie sie bereits in der Nijmegener Deklaration formuliert wurden, für die Wasserwirtschaft ziehen:

- Die zu erwartenden hydrologischen Veränderungen sind so einschneidend, dass sie insbesondere langfristig bei der Bewirtschaftung des Flusseinzugsgebietes berücksichtigt werden sollten. Dies schließt auch die Politikbereiche Raumordnung, Umwelt und Landwirtschaft mit ein.
- Als passende Management-Antwort sollte das Prinzip des „no regret and flexibility“ übernommen werden. Langfristige Pläne sollten flexibel und anpassungsfähig sein. Vorbeugende Maßnahmen, die unterschiedlichen Zielen dienen, sollten zusammen mit bereits laufenden Maßnahmen ergriffen werden.
- Einige der abgeleiteten Auswirkungen lassen sich zur Zeit nicht in ausreichendem Maß quantifizieren. Deshalb sollte sich die künftige Forschung auf einen integrierten Ansatz konzentrieren.
- Das Flusseinzugsgebiet ist die Einheit, nach welcher sich die Einflüsse und Entscheidungsoptionen hinsichtlich der Bewirtschaftung der Wasservorräte richten müssen.

Auch auf europäischer Ebene wird der Berücksichtigung der Klimaänderung in der wasserwirtschaftlichen Planung ein ähnlicher Stellenwert eingeräumt. Dies schlägt sich auch im Fünften Forschungsrahmenprogramm der EU (1999-2002) nieder. So sind unter dem Teilprogramm Umwelt und nachhaltige Entwicklung die folgenden Leitaktionen formuliert:

- Nachhaltige Bewirtschaftung der Wasservorräte und Wasserqualität
- Globale Veränderungen, Klima und Artenvielfalt
- Nachhaltige Ökosysteme des Meeres
- Die Stadt von morgen und das kulturelle Erbe

Projekte mit einem Klimaaspekt finden sich hierbei in den ersten beiden Leitaktionen wieder. Dabei soll der Aspekt der Klimaänderungen in den den Leitaktionen zugeordneten Maßnahmen der „Methoden und Instrumente der strategischen Planung und der integrierten Managementmethoden und Werkzeuge auf der Einzugsgebietsebene“, „Sozioökonomische Aspekte der nachhaltigen Wassernutzung“ und „Erarbeitung operationeller Management Schemata und Entscheidungshilfesysteme“ Eingang finden. Gegenstand der Forschung ist hierbei, wie die durch die Klimaänderung vermuteten Unsicherheiten in die Planung einer nachhaltigen Wasserwirtschaft mit einbezogen werden können.



Unter der Leitaktion „Globale Veränderungen, Klima und biologische Vielfalt“ sind unter den Maßnahmen „Vorhersage und Szenarios von Klimaänderungen“ sowie „Klimaschwankungen und abrupte Klimaänderungen“ Forschungsvorhaben einzureichen, die das Wissen auf dem Gebiet der Klimaforschung gezielt für die Klimafolgenforschung aufbereitet.

Mit den Ergebnissen der entsprechenden Maßnahmen beider Leitaktionen wird somit der Aspekt der Klimaänderungen verstärkt in anwendungsfähige Systeme zur Unterstützung der umweltpolitischen Ziele der Europäischen Union insbesondere im Bereich der Wasserwirtschaft eingebracht.

## **5. Danksagung**

Diese Forschung wurde im Rahmen der EU-Projekte „Impact of Climate Change on Hydrological Regimes and Water Resources Management in Europe“ sowie „European River Flood Occurrence and Total Risk Assessment System“ von der Europäischen Kommission, Direktorat General XII, Wissenschaft, Forschung und Entwicklung, 4. Rahmenprogramm der EU „Umwelt und Klima“, RTD Forschung 2.3.1 (Vertrags Nr. EV5V-CT93-0293 bzw. ENV4-CT97-0535) gefördert. Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit gab zusätzliche finanzielle Unterstützung. Ein spezieller Dank gilt dem Landesamt für Umwelt in Saarbrücken, dem Deutschen Wetterdienst in Offenbach und Meteo France in Paris für die Bereitstellung umfangreicher Daten.

---

## 6. Literatur

- Bergström, S. (1976): Development and Application of a Conceptual Runoff Model for Scandinavian Catchments. SMHI Report RHO 7, Norrköpping, Sweden.
- Bronstert, A., C. Bismuth and L. Menzel (ed.) (2000): European Conference on advances in flood research. Proceedings Vol. 1 and 2, PIK Report No. 65, Potsdam
- Bürger, G. (2000): Expanded Downscaling for Generating Precipitation Scenarios. In: Bronstert, A., C. Bismuth and L. Menzel (ed.) (2000): European Conference on advances in flood research. Proceedings Vol. 1 and 2, PIK Report No. 65, Potsdam
- Busch, N., H. Engel, K. Daamen (1996): Auswirkungen des Saarausbaus zur Großschiffahrtsstraße auf den Hochwasserablauf in Saar und Mosel. - Wasser & Boden, Vol. 48 (2), 12-18.
- Galea, G. and C. Prudhomme (1994): The Monofrequency Synthetic Hydrograph (MFSH) Concept: Definition, Interest and Construction from Regional QdF Models Built with Threshold Discharges, for Little Mountainous Basins with Rapid Runoff. International Conference "Development in Hydrology of Mountainous areas", Stara Lesna (Slovakia).
- Grabs, W. (ed.) (1997): Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine River basin, CHR/KHR, Lelystad
- Grabs, W. (1998): Nijmwegener Erklärung vom 4./5. Dezember 1997. DGM 42, H.1
- Hulme, M., D. Conway, O. Brown and E. Barrow (1994): A 1961-1990 Baseline Climatology and Future Climate Change Scenarios for Great Britain and Europe. Part III: Climate Change Scenarios for Great Britain and Europe. Climate Research Unit, University of East Anglia, Norwich
- Krahe, P., N. B. Busch, K. Daamen, C. van Haselen, D. Herpertz, M. Hils and M. Werner (2000): Assessment of flood risk for the River Saar with respect to environmental changes- Results of a case study within the EUROTAS Project. In: Bronstert, A., C. Bismuth and L. Menzel (ed.) (2000): European Conference on advances in flood research. Proceedings Vol. 1 and 2, PIK Report No. 65, Potsdam
- Kwadijk, J.C.J. (1993): The impact of climate change on the discharge of the River Rhine, Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen, Universiteit Utrecht, Utrecht
- Werner, M., C. van Haselen, K. Daamen, P. Krahe and M. Mürlebach (2000): River Engineering Measures in an Integrated Modelling Environment – A Generic Method in the EUROTAS Project. In: Bronstert, A., C. Bismuth and L. Menzel (ed.) (2000): European Conference on advances in flood research. Proceedings Vol. 1 and 2, PIK Report No. 65, Potsdam
- Wendling, U. (1995): Berechnung der Gras-Referenzverdunstung mit der FAO Penman-Monteith-Beziehung. Wasserwirtschaft 85, H.12, Wiesbaden