



Forschungsvorhaben:

**unterstützt durch das
Bundesministerium für Bildung und Forschung**

**REGIONALES KLIMAMODELL ZUR METEOROLOGISCHEN
UND HYDROLOGISCHEN VORHERSAGE AM BEISPIEL
DES RHEINEINZUGSGEBIETES**

- ZUSAMMENFASSENDE ERLÄUTERUNGSBERICHT -

Hamburg und Karlsruhe im August 2001

**REGIONALES KLIMAMODELL ZUR METEOROLOGISCHEN
UND HYDROLOGISCHEN VORHERSAGE AM BEISPIEL
DES RHEINEINZUGSGEBIETES**

-- INHALT --

	Seite
1. Auftrag und Veranlassung.....	1
2. Zusammenfassung.....	2
3. Datengrundlagen.....	5
3.1 Datengrundlagen für Systemdaten	5
3.2 Datengrundlagen für Ereignisdaten	7
4. Theoretische Grundlagen.....	8
4.1 Grundlagen des atmosphärischen Regionalmodells REMO	8
4.2 Grundlagen des hydrologischen Modells LARSIM.....	9
4.3 Grundlagen der Modellkopplung	11
5. Modellaufbau für das Untersuchungsgebiet.....	13
6. Modellanwendung für das Untersuchungsgebiet	15
6.1 Modellanwendung bei der Einwegekopplung	15
6.1.1 Kalibrierung und Verifizierung des hydrologischen Modells LARSIM.....	15
6.1.2 Ergebnisse der Einwegekopplung	18
6.2 Modellanwendung bei der Zweiwegekopplung.....	40
6.2.1 Ergebnisse der Zweiwegekopplung.....	40
7. Literatur	47

VORWORT

Das hier bearbeitete Forschungsvorhaben zum Thema "Regionales Klimamodell zur meteorologischen und hydrologischen Vorhersage extremer Ereignisse am Beispiel des Rhein-Einzugsgebietes" wurde vom Ingenieurbüro Dr.-Ing. Karl Ludwig (IBL), Karlsruhe in Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg (MPI) durchgeführt.

Folgende Mitarbeiter waren an der Durchführung des Forschungsvorhabens beteiligt:

für das Max-Planck-Institut Hamburg:

Dr. Daniela Jacob (Projektleitung MPI)

Dr. Claus-Jürgen Lenz

Dr. Andreas Roesch (Eidgenössische Technische Hochschule Zürich im Auftrag des MPI's)

für das Ingenieurbüro Dr.-Ing. Karl Ludwig:

Dr.-Ing. Karl-Gerd Richter (Projektleitung IBL)

Dipl.-Hydr. Martin Ebel

Dipl.-Hydr. Bernd Hoffmann

ERKLÄRUNG

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde aus Mitteln des Bundesministerium für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 01 LA9872 und 01 LA9873 gefördert, Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

1. AUFTRAG UND VERANLASSUNG

Am 26 September 1997 wurde der Neuantrag zum Thema "Regionales Klimamodell zur meteorologischen und hydrologischen Vorhersage extremer Ereignisse am Beispiel des Rhein-Einzugsgebietes" vom Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg und dem Ingenieurbüro Dr.-Ing. Karl Ludwig, Karlsruhe gestellt. Das Forschungsvorhaben wurde insgesamt 2 Jahre vom 1.1.1999 bis 31.12.2000 für das Ingenieurbüro Dr.-Ing. Karl Ludwig und bis zum 28.2.2001 für das Max-Planck-Institut für Meteorologie vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert.

Die Vorhersage extremer meteorologischer Wetterphänomene hat sich im Laufe der letzten Jahre deutlich verbessert. Dennoch besteht heute noch ein großes Defizit an der genaueren Analyse und Vorhersage extremer meteorologischer Ereignisse und ihrer Auswirkung in der Praxis. Neben extremen Sturmereignissen wie z. B. dem Orkan Lothar am 26.12.1999 sind hier insbesondere die in den vergangenen 30 Jahren gehäuft auftretenden Starkniederschläge mit nachfolgendem Hochwasser (z.B. HW 05/1993, HW 12/1995 oder HW 05/1999) zu nennen.

Ziel des angestrebten Forschungsvorhabens soll eine verbesserte Vorhersagbarkeit meteorologischer und hydrologischer Situationen während Starkniederschlags- und Hochwasserereignissen mit Hilfe von atmosphärischen Zirkulationsmodellen sein. Dies kann durch eine Weiterentwicklung und direkte Kopplung des Atmosphärenmodells REMO (Regional Modell) mit dem Hydrologiemodell LARSIM (Large Area Runoff Simulation Model) ermöglicht werden.

Die modelltechnischen Weiterentwicklungen von REMO/LARSIM werden anhand von gemessenen bzw. berechneten extremen Niederschlags- und Hochwasserereignissen im Rhein-Einzugsgebiet verifiziert. Grund für die Auswahl des Rheingebietes ist seine mit ca. 160.000 km² ausreichende Flächengröße für die Erfassung großräumiger Extremereignisse und die für dieses Gebiet vorhandene hohe Datenverfügbarkeit und Datenqualität.

Die im Rheingebiet gewonnenen Erkenntnisse und Modellansätze können im Regionalen Klimamodell REMO auf beliebige Einzugsgebiete – zumindest in den gemäßigten Breiten - übertragen und angewandt werden.

Das Forschungsvorhaben gliedert sich in die folgenden zwei Teilvorhaben auf:

- Teilvorhaben 1 (Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI), Hamburg):
Weiterentwicklung des regionalen Klimamodells REMO im Hinblick auf eine erweiterte Bodenparametrisierung zur Verbesserung der Simulation extremer Niederschlagsereignisse.
- Teilvorhaben 2 (Ingenieurbüro Dr.-Ing. Karl Ludwig (IBL), Karlsruhe):
Weiterentwicklung des auf REMO abgestimmten hydrologischen Modells LARSIM zur verbesserten Modellierung der Bodenwasserspeicherung und Abflußbildung sowie für eine operationell einsetzbare Abflußvorhersage.

Die Ergebnisse beider Teilprojekte sind im vorliegenden Bericht zusammengefaßt.

2. ZUSAMMENFASSUNG + AUSBLICK

Das Ziel der hier durchgeführten Studie ist die genauere Vorhersage von extremen Niederschlags- und Hochwasserereignissen. Dies kann durch die Kopplung des atmosphärischen Modells REMO (Regionales Klimamodell) und des hydrologischen Modells LARSIM (Large Area Runoff Simulation Modell) erreicht werden. Als Untersuchungsgebiet wurde das Rhein-Einzugsgebiet gewählt.

Die Kopplung von REMO und LARSIM wurde schrittweise durchgeführt. Im ersten Schritt wurden zunächst für drei Starkniederschlags- und Hochwasserperioden (März 1988, Dezember 1993 und Januar 1995) die dreidimensionalen Felder des Windfeldes, der Temperatur, der spezifischen Feuchtigkeit, des Luftdrucks und des Niederschlages einschließlich deren zeitliche Entwicklung mit Hilfe des atmosphärischen Modells REMO berechnet. Die Berechnungen erfolgten auf einem Modellgitter mit einer horizontalen Auflösung von $\frac{1}{2}$ Grad (etwa 55 km), welches Gesamteuropa und angrenzende Gebiete umfaßte. Die Ergebnisse dieser Berechnungen wurden als Randwerte für jeweils eine zweite REMO-Simulation vorgegeben, welche für ein Modellgebiet zwischen etwa 0 Grad und 35 Grad Ost und 45 Grad bis 75 Grad nördlicher Breite mit einer horizontalen Auflösung von $\frac{1}{6}$ Grad (etwa 17 km) durchgeführt wurde. Die Ausgabe dieser Modellrechnungen (Niederschlag, bodennahe Werte für die Temperatur, Wind, Luftdruck, Strahlungsbilanz und relative Luftfeuchtigkeit) dient als obere Randbedingung für das hydrologische Modell LARSIM. Diese Art der Modellkopplung ist eine **Einwegekopplung**, d. h. es findet keine Rückkoppelung von LARSIM auf REMO statt.

Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM (**L**arge **A**rea **R**unoff **S**imulation **M**odel) ermöglicht eine prozess- und flächendetaillierte kontinuierliche Simulation des landgebundenen Wasserkreislaufes.

In LARSIM werden folgende Prozesse simuliert: Interzeption, aktuelle Evapotranspiration, Schneeschmelze (Akkumulation, Metamorphose und Ablation), Bodenwasser- und Grundwasserspeicherung, lateraler Wassertransport zu den Gewässern (Abflußkonzentration) sowie Translation und Retention im Gewässer. Zudem können anthropogene Maßnahmen (z.B. Wassereinleitungen und -überleitungen sowie Abflußregelungen durch Rückhaltebecken und Talsperren) im Modell nachgebildet werden.

Das Untersuchungsgebiet umfaßt das Rheineinzugsgebiet von der Schweiz bis zur deutsch-niederländischen Grenze. Als räumliche Modelldiskretisierung wurde eine Gitterweite von $\frac{1}{6}$ Grad (etwa 17 km) gewählt. Diese ist durch das atmosphärische Modell REMO vorgegeben.

Das hydrologische Modell LARSIM wird zunächst anhand gemessener hydrologischer und meteorologischer Daten (Niederschlag, Abfluß, Temperatur, Wind, Druck, Strahlung und relative Feuchte) für den Zeitraum 1992 - 1997 kalibriert und für den Zeitraum 1987 bis 1992 verifiziert. Zur Güte der Modellanpassungen werden Modelleffizienzen berech-

net. Die Modelleffizienzen liegen im allgemeinen bei Einzugsgebieten mit einer Größe von ca. 3000 km² über 0,80 in der Kalibrierungsperiode und über 0,82 bei der Verifizierungsperiode. Hieraus kann der Schluß gezogen werden, daß mit LARSIM der landgebundene Wasserhaushalt genügend genau beschrieben werden kann. Die Kopplung von LARSIM und REMO wurde nach der Kalibrierung und Verifizierung von LARSIM durchgeführt.

Die Ergebnisse der Modellrechnungen von REMO für die räumliche und zeitliche Verteilung des Niederschlages während der betrachteten Starkniederschlagsereignisse zeigen eine gute Übereinstimmung von Modellergebnis und Messungen innerhalb der ersten fünf bis acht Tage nach Simulationsstart im Bereich größerer Flußeinzugsgebiete bzw. von Teileinzugsgebieten. Bei einer zu kleinräumigen Betrachtung der Niederschlagsfelder können sich deutliche Unterschiede zwischen Modellergebnis und Messung einstellen. Nach dem genannten Zeitraum werden die gemessenen Niederschlagsmuster von REMO nur teilweise zufriedenstellend simuliert. Dies ist teilweise auf die Grenzen der Vorhersagbarkeit zurückzuführen.

Die mit den berechneten extremen meteorologischen Randbedingungen simulierten Hochwasserwellen stimmen in den ersten 8 - 12 Tagen mit den gemessenen Hochwasserwellen in größeren Einzugsgebieten gut überein. Dieses resultiert aus der guten Übereinstimmung des mit REMO berechneten Gebietsniederschlages mit dem gemessenen Niederschlag. Nach etwa 12 Tagen kann es zu größeren Abweichungen kommen. In kleineren Einzugsgebieten hingegen kann es unter Umständen zu größeren Abweichungen kommen, die in der Regel durch den mit REMO nicht so gut simulierten Niederschlag bedingt sind. Für kleinere Einzugsgebiete wäre eine noch höhere Auflösung für REMO-Rechnungen wünschenswert.

Für die Starkniederschlags- und Hochwasserperiode im März 1988 wurde exemplarisch eine **Zweiwegekopplung** von LARSIM und REMO durchgeführt. Hierbei wurde vor der REMO-Simulation die Parametrisierung der Bodenfeuchte in REMO an die entsprechende Parametrisierung in LARSIM angepaßt (Verwendung einer identischen digitalisierten Landnutzungskarte, Verwendung identischer Bodenkonstanten und -parameter sowie Öffnung eines dritten Bodenwasserspeichers in REMO). Die Reihenfolge der weiteren Berechnung erfolgte analog der oben beschriebenen Vorgehensweise. Die Ergebnisse der Zweiwegekopplung zeigen im betrachteten Fall nur relativ geringe Auswirkungen auf die Niederschlagsverteilung und -menge. Insbesondere durch die Öffnung des Grundwasserspeichers sowie die Verwendung identischer Felder für die nutzbare Feldkapazität wird der in REMO berechnete Abfluß auch bei nicht gesättigtem Boden deutlich erhöht.

Die Auswirkungen auf die simulierten Abflüsse an den Pegeln sind ggf. in kleineren Einzugsgebieten relevant. In größeren Gebieten spielen diese nur zum Teil eine Rolle. Eine signifikante Verbesserung ergibt sich jedoch hinsichtlich der mit REMO-LARSIM berechneten Abflußanteile (Perkolations-, Interflow- und Direktabfluß) im Vergleich zu den gemessenen Abflußanteilen. Bisher war bekannt, daß ohne Modellkopplung die Abflüsse, die mit REMO berechnet wurden, deutlich unterschätzt wurden. Hierbei konnte durch die Modellkopplung eine wesentliche Verbesserung erreicht werden.

Die in dem durchgeführten Forschungsvorhaben erreichten Ergebnisse dürften signifikanten Einfluß auf die Langfristsimulationen von REMO im Istzustand sowie bei Szenarienrechnungen haben. Durch die verbesserte Beschreibung des landgebundenen Wasserkreislaufes durch die direkte Modellkopplung ist eine verbesserte Berechnung der Flüsse von latenter und fühlbarer Wärme sowohl im Istzustand als auch bei Szenarienrechnungen zu erwarten. Diese dürfte insbesondere zu einem geringeren Temperaturanstieg bei Szenarienrechnungen mit CO₂-Anstieg führen.