

WIENER MITTEILUNGEN

WASSER • ABWASSER • GEWÄSSER

Hochwasservorhersage – Erfahrungen, Entwicklungen & Realität

Band 199 - Wien 2006

WIENER MITTEILUNGEN

WASSER • ABWASSER • GEWÄSSER

Band 199

Hochwasservorhersage Erfahrungen, Entwicklungen & Realität

ÖWAV – Seminar
Wirtschaftskammer Österreich
Rudolf Sallinger Saal
19. - 20. Oktober 2006

Herausgeber:
o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Dr.h.c. Dieter Gutknecht
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie
Technische Universität Wien

Veranstalter:



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

VIENNA
UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY

Institut für Wasserbau und
Ingenieurhydrologie
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/223
1040 Wien



Österreichischer Wasser- und
Abfallwirtschaftsverband
Marc-Aurel-Straße 5
1010 Wien

Druck: Riegelnik
Piaristengasse 19
1080 Wien

ISBN-10 3-85234-090-X
ISBN-13 978-3-85234-090-6

Vorwort

Galt das Gebiet der Hochwasservorhersage bis vor einigen Jahren vornehmlich als ein Aufgabengebiet, das nur einem relativ engen Kreis von damit Befassten zugeordnet wurde, so hat sich diese Einschätzung nach den Erfahrungen bei den großen Hochwässern der letzten Jahre stark geändert. Rechtzeitige Warnung vor einem solchen Ereignis und möglichst zutreffende Vorhersage während des Ereignisablaufes wurden in ihrer Bedeutung für zeitgerecht einsetzende Schutzmaßnahmen im Rahmen eines integrierten Hochwassermanagements erkannt. In allen betroffenen Ländern wurden Aktionsprogramme zur Weiterentwicklung der vorhandenen Prognosesysteme gestartet. Zentrale Punkte bildeten dabei die Einrichtung hochwassersicherer Messstellen und redundanter Übertragungseinrichtungen, die Überarbeitung der Warnpläne und die Entwicklung von Hochwasservorhersagemodellen, die den neuen – höheren – Anforderungen gerecht werden sollen.

Zu einem entsprechenden Neuansatz bei der Modellentwicklung tragen mehrere Faktoren bei: (i) die Verfügbarkeit von Vorhersagen über die Inputgrößen Niederschlag und Temperatur aus den numerischen Wettervorhersagemodellen; (ii) die Möglichkeit, in GIS aufbereitete, räumlich differenzierte Daten einzusetzen; (iii) die Verfügbarkeit einer breiten Palette von Software-Produkten für die Niederschlag-Abfluss-Simulation und die Abflussberechnung in Flussstrecken. An die damit verbundenen Entwicklungsmöglichkeiten werden große Erwartungen geknüpft – eine Verlängerung der Vorhersagezeiten und eine Erhöhung der Genauigkeit der Vorhersagen.

Mit der in diesem Band dokumentierten Veranstaltung wird eine Bestandsaufnahme in diese Richtung versucht. Mit dem Untertitel „Erfahrungen, Entwicklungen & Realität“ wird der Schwerpunkt auf die praxisrelevanten Aspekte gelegt. Die Tagung schließt in diesem Sinne an die vom Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverband bzw. dem Lebensministerium eingerichteten Veranstaltungen „Naturgefahr Wasser – Wahrnehmung und Management“ (Februar 2006) und „FloodRisk“ (November 2004) an. Sie soll den Erfahrungsaustausch zwischen den mit dem operationellen Dienst betrauten Dienststellen, den mit der Entwicklung von Vorhersagemodellen befassten Institutionen (Consulting, Universitäten) und mit den Abnehmern von Vorhersagen in den Einsatzorganisationen und Hilfsdiensten im Bereich des Zivilschutzes dienen.

Dieter Gutknecht

INTERNATIONALES HOCHWASSERPROGNOSEMODELL MUR

Robert Schatzl, Christophe Ruch

1. Einleitung

Im Rahmen des Interreg IIB - Projektes „Flussraumagenda Alpenraum“ wurde ein internationales Hochwasserprognosemodell für das Einzugsgebiet der Mur entwickelt. Zum momentanen Zeitpunkt sind Österreich (Steiermark) und Slowenien am System beteiligt, das von vornherein so gestaltet wurde, dass auch Ungarn und Kroatien jederzeit in die Struktur eingebaut werden können. Das System wurde von der Bietergemeinschaft „JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH“ aus Graz und „DHI Water and Environment“ aus Dänemark entwickelt und läuft seit Beginn des Jahres 2006 sowohl in der Steiermark als auch in Slowenien im operationellen Betrieb.

Im folgenden Bericht werden die Struktur des Modellsystems, die verwendeten Eingangsdaten, die Erstellung des Systems sowie kurz auch die bisherigen Erfahrungen mit den Prognosen dargestellt, zuvor wird auf grundlegende Daten des Einzugsgebietes eingegangen. Nähere Informationen können dem Endbericht zur Flussraumagenda Alpenraum (Ruch und Jörgensen, 2006) entnommen werden

2. Einzugsgebiet der Mur



Abb. 1: Einzugsgebiet der Mur mit Staatsgrenzen.

Abbildung 1 zeigt das Einzugsgebiet der Mur samt den Staatsgrenzen der am Einzugsgebiet beteiligten Länder Österreich, Slowenien, Kroatien und Ungarn. Die Mur entspringt in Salzburg (Lungau) auf einer Seehöhe von ca. 1900 m.ü.A., durchfließt in Österreich die Bundesländer Salzburg und Steiermark auf einer Gesamtlänge von ca. 350 km, durchquert Slowenien und bildet schließlich die Grenze zwischen Kroatien und Ungarn, wo sie letztendlich in die Drau mündet. Bei einem Gesamteinzugsgebiet von ca. 13800 km² liegt der weitaus größte Teil des Einzugsgebiets in Österreich (ca. 10000 km²), der Rest verteilt sich auf Slowenien (ca. 1400 km²), Kroatien (ca. 500 km²) und Ungarn (ca. 1900 km²).

3. Struktur des Prognosesystems

Aufgrund der geographischen Charakteristika ist die Wahrscheinlichkeit der Entstehung einer Hochwasserwelle in Österreich wesentlich höher, die damit verbundenen Risiken sind aber im gesamten Einzugsgebiet der Mur verteilt. Weiters ist offensichtlich, dass die Qualität der Hochwasserprognose in Österreich nicht von den Informationen der anderen Länder abhängig ist, wohl aber z.B. die Qualität der Hochwasserprognose in Slowenien oder Kroatien die Informationen aus Österreich benötigt. Aus diesem Grund war die Erarbeitung einer gemeinsamen Lösung die besondere Herausforderung in diesem Projekt.

Bei der Erarbeitung einer gemeinsamen Lösung wurden von Anfang an auch die ungarischen und kroatischen Repräsentanten miteinbezogen, wobei letztendlich, wie bereits erwähnt, momentan Österreich und Slowenien am System beteiligt sind. In mehreren Arbeitssitzungen im Rahmen der Ständigen österreichisch-slowenischen Kommission für die Mur ist ein globales Konzept entstanden, das auch für andere internationale Einzugsgebiete anwendbar wäre. Neben einer internationalen Hochwasserzentrale, die in Graz (Österreich) eingerichtet wurde, wurden zusätzlich zwei nationale Zentralen in Graz und in Laibach (Slowenien) installiert. In der internationalen Zentrale werden die Hochwasserprognosen kontinuierlich und automatisch berechnet, d.h. es ist grundsätzlich kein menschlicher Eingriff in das System notwendig. Dabei wurde vereinbart, für das System generell eine Vorhersagezeit von 48 Stunden zu wählen.

Die automatischen Simulationen der Abflüsse und Wasserstände der Hochwasserzentrale stützen sich einerseits auf Echtzeitmessungen der Niederschläge, Lufttemperaturen und Wasserstände, andererseits auf meteorologische Prognosen der Niederschläge und Lufttemperaturen, die von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG Wien) und von der nationalen slowenischen Agentur für Umwelt (ARSO) zur Verfügung gestellt werden. Zusätzlich zu diesem globalen System betreibt jedes Land ein eigenes lokales System, mit welchem Szenarien ergänzend zu den automatischen Prognosen berechnet werden können. Diese kombinierte „globale und lokale“ Lösung entspricht eindeutig den von der Europäischen Union definierten Zielen eines national übergreifenden Einzugsgebietsmanagements. Die Struktur des Systems ist in Abbildung 2 dargestellt.

3.1 Eingangsdaten

Als Eingangsdaten in das System werden im Moment folgende Daten verwendet:

- Online-Daten des hydrographischen Dienstes Steiermark sowie der slowenischen Agentur für Umwelt:
 - Niederschlag (in Österreich derzeit 43 Niederschlagsstationen)
 - Lufttemperatur (Ö: 11 Stationen)
 - Wasserstand (Ö: 26 Pegel)
- Niederschlags- und Lufttemperaturprognosen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) sowie von der nationalen slowenischen Agentur für Umwelt (ARSO):
 - Modell ALADIN: Niederschlags- und Lufttemperaturprognosen für die nächsten 48 Stunden mit einer zeitlichen Auflösung von 1 Stunde, Neuberechnung alle 12 Stunden
 - Geplant: Einbeziehung von Nowcasting-Daten (max. nächste 6 Stunden): INCA-Modell

Die vorhandenen Daten werden jede Stunde automatisch via ftp in das System eingelesen und die Prognosen berechnet. Die errechneten automatischen Prognosen werden nun einerseits an die nationalen Systeme weitergeleitet, wo bei Bedarf eigene Szenarien berechnet werden können, andererseits werden die Prognosen auf einer Internet-Seite, deren Zugang momentan noch verschlüsselt ist, dargestellt.

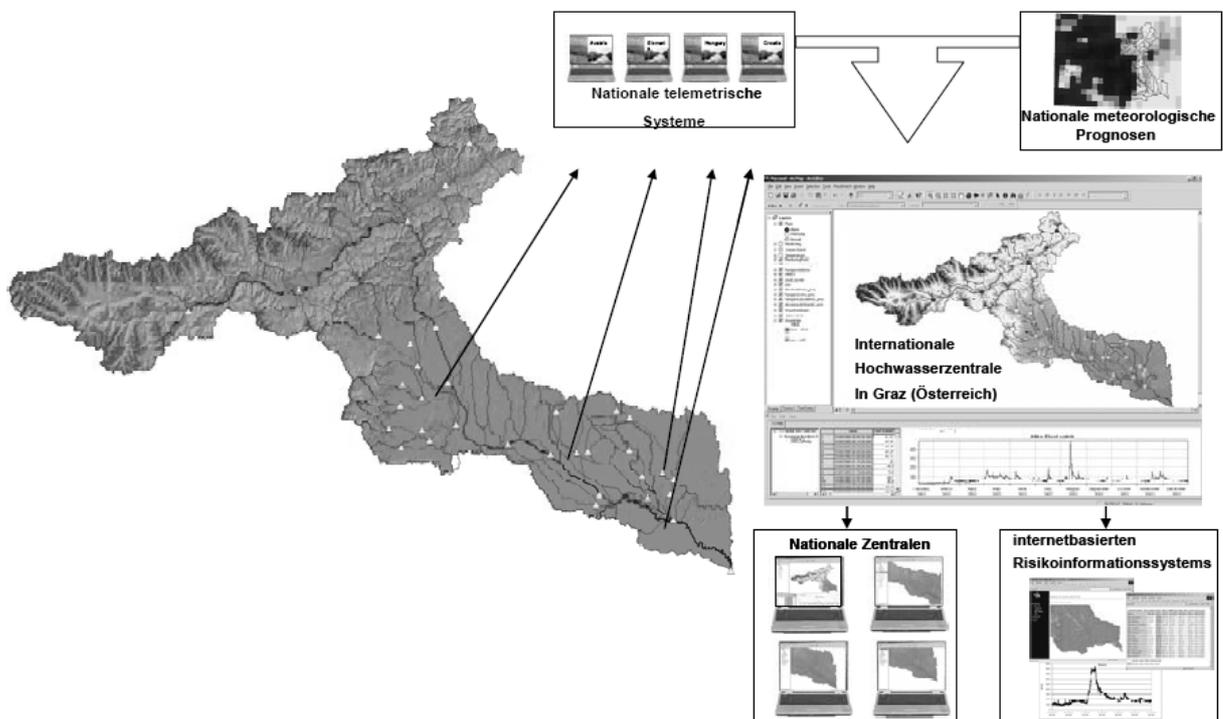


Abb. 2: Struktur des Hochwasserprognosesystems.

3.2 Softwarestruktur

Das Hochwasserprognosemodell Mur basiert auf dem von DHI entwickelten Softwarepaket „MIKE FLOOD WATCH“. Diese Software besteht aus drei Elementen:

- hydrologisches Modell „NAM“: dieses Modell ermöglicht die Simulation der wichtigsten hydrologischen Prozesse und liefert gleichzeitig die Inputdaten für das hydrodynamische Modell.
- hydrodynamisches Modell „MIKE11“: ein eindimensionales physikalisches Modell für die Simulation der Hochwasserdynamik entlang der Mur und ihrer Hauptzubringer.
- Hochwassermanagementsystem (decision support system) „MIKE FLOOD WATCH“: Software für die Aufbereitung von Echtzeitdaten zu Niederschlags- und Hochwasservorhersagen und die Darstellung von Informationen und Ergebnissen.

3.2.1 Hydrologisches Modell (NAM)

Der Niederschlags-Durchflussmodul (NAM) ist ein konzeptionelles Modell für ländliche Einzugsgebiete (DHI – Water and Environment, 2005), allgemein geeignet für generelle hydrologische Analysen und Hochwasservorhersagen.

Das Niederschlags-Durchfluss Modell ist vollständig und automatisch an das hydrodynamische Modell gekoppelt und simuliert den Wasserhaushalt kontinuierlich in vier miteinander verbundenen Speicherzonen (Abbildung 3):

- Schneespeicher: verteilt nach Geländehöhe
- Oberflächenspeicher: Vegetation, kleine Gerinne und Seen
- Bodenzonenspeicher: bis zur Wurzelzone
- Grundwasserspeicher

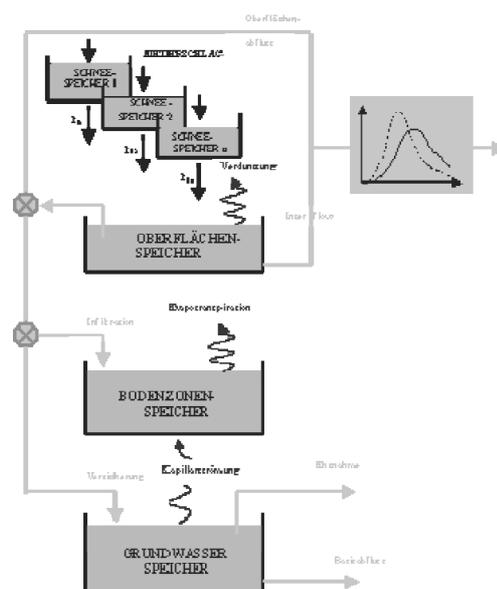


Abb. 3: Konzept zur Durchflusssimulation im Niederschlags-Durchfluss Modell (NAM).

Für jedes Teileinzugsgebiet benötigt „NAM“ Zeitreihen des Niederschlags und der potenziellen Verdunstung. Das Modell schreibt alle Kenngrößen des Wasserhaushaltes kontinuierlich fort, darunter auch die Sättigung der Speicherzonen. Das an „NAM“ gekoppelte hydrodynamische Modell benutzt diese Werte als Anfangsbedingungen, wobei die berechneten Abflüsse die laterale Zuströmung zum Flusssystem darstellen.

3.2.2 Hydrodynamisches Modell MIKE 11

Das hydrodynamische Modell „MIKE 11“ ist das Kernstück des Hochwassermanagementsystems. Es besitzt eine integrierte modulare Struktur mit Datenbanken für topographische Daten und Zeitreihen. Das hydrodynamische Modell wird auf Grundlage des digitalen Gewässernetzes generiert. Zusätzlich können auch operationelle Regeln von Kontrollbauwerken (Kraftwerke, etc.) im Modell integriert werden.

Die von „MIKE 11“ simulierten Abflüsse werden in diesem Projekt in Echtzeit an gemessene Werte angepasst, wobei automatisch Abweichungen zwischen beobachteten und simulierten Abflüssen und Wasserständen beurteilt und gegebenenfalls angepasst werden. Auf Grundlage der Wasserstandmessungen an den Pegeln werden Modellphasen- und amplitudenfehler durch das Verfahren identifiziert. Durch diesen iterativen Prozess wird das Modell automatisch an gemessene Werte angepasst (Abbildung 4), wobei die Aktualisierung innerhalb von vorher eingestellten Intervallen stattfindet.

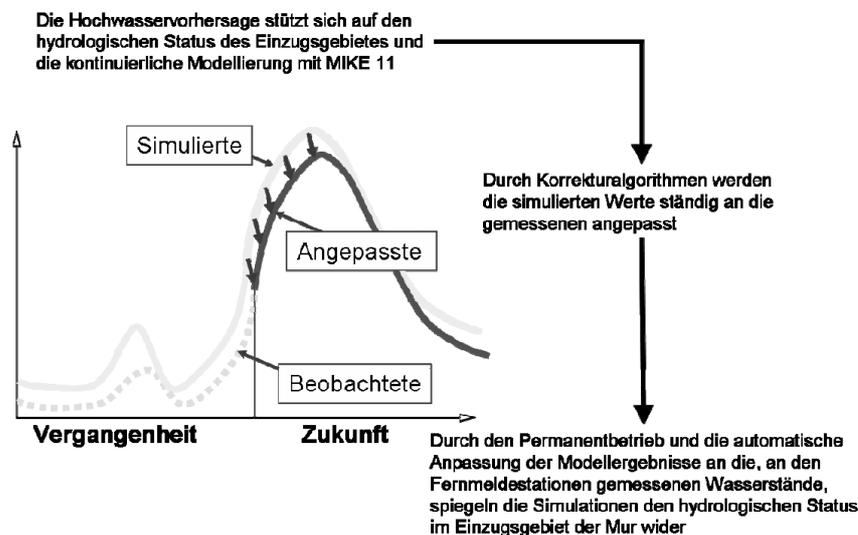


Abb. 4: Schematische Darstellung der automatischen Anpassung der simulierten an die gemessenen Werte und ihre Auswirkung auf die Prognosen.

3.2.3 Hochwassermanagementsystem „MIKE FLOOD WATCH“

„MIKE FLOOD WATCH“ ist ein Hochwassermanagementsystem (decision support system), mit dem Echtzeitdaten sowie Niederschlags- und Durchflussprognosen aufbereitet sowie Informationen und Ergebnisse dargestellt werden können. Das System besitzt eine ARCVIEW und eine ARCGIS Benutzerschnittstelle (Abbildung 5).

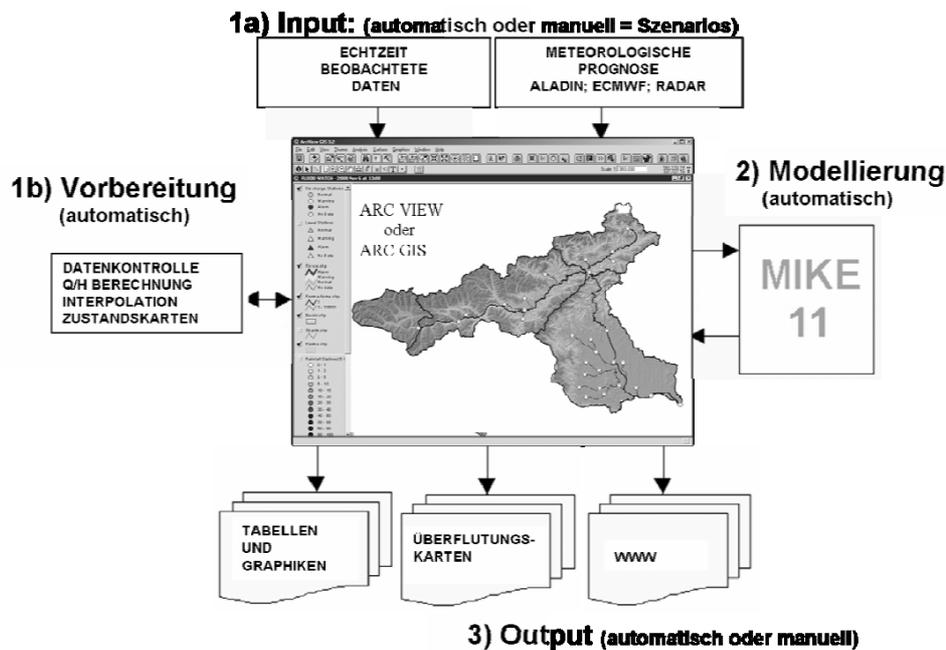


Abb. 5: ARCVIEW - Benutzerschnittstelle von MIKE FLOOD WATCH.

Die wesentlichen Schritte in der Bedienung sind automatisiert (internationale Zentrale) oder können mit wenigen Mausklicks in den nationalen Zentralen abgerufen werden:

- Echtzeitdatenmanagement mit Bearbeitung und Qualitätskontrolle
- Automatischer Zugriff auf die Echtzeit Niederschlags- und Wasserstandsdaten
- Automatischer Zugriff auf die Niederschlagsprognosemodelle
- Betrieb des Hochwasservorhersagesystems
- Graphische und tabellarische Darstellung der aktuellen Niederschlags- und Wasserstandsdaten sowie der Niederschlags-, Wasserstands- und Durchflussprognosen
- Erstellung von Hochwasserwarnungen in textlicher, tabellarischer, graphischer und kartographischer Form

4. Erstellung des Prognosesystems

4.1 Preprocessing

Das Pre-processing umfasste die Erhebung und Kontrolle aller für die Erstellung des Systems benötigten Daten. Folgende Datengrundlagen standen zur Verfügung:

- Digitales Höhenmodell: Das digitale Höhenmodell lag mit einer Auflösung von 25x25 Metern vor. Wie aus Abbildung 6 ersichtlich, erstreckt sich das Einzugsgebiet der Mur über die Bundesländer Steiermark, Salzburg und Niederösterreich und umfasst ungefähr 10000 km², wobei das Höhenmodell als Basis für die Abgrenzungen der Teileinzugsgebiete und für die

Berechnung der Höhenverteilung in 100 m Intervallen für jedes dieser Teileinzugsgebiete diente.

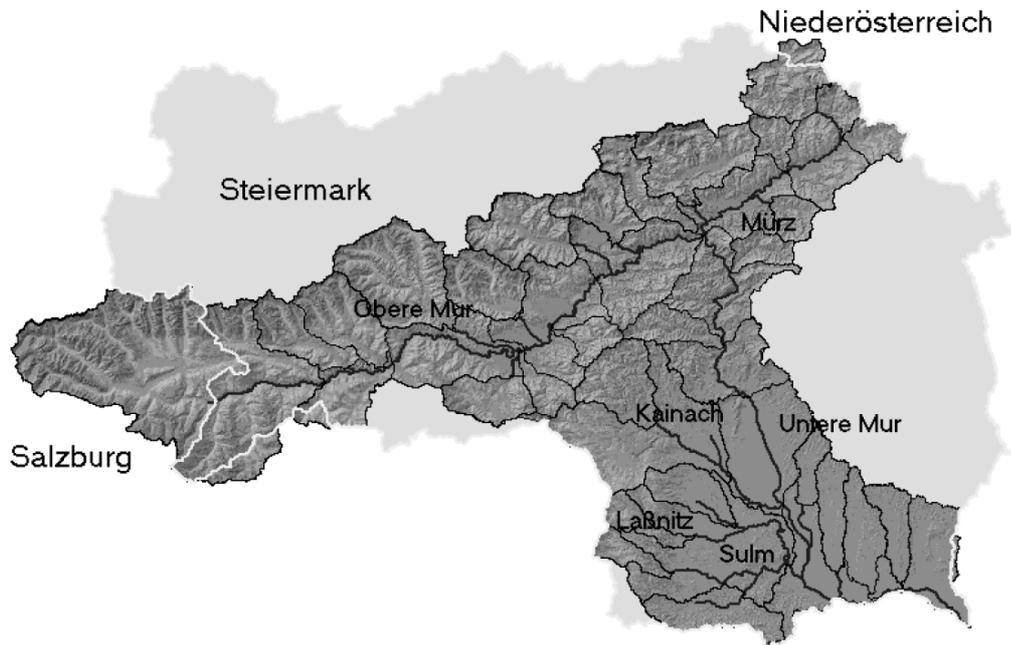


Abb. 6: Digitales Höhenmodell: Abgrenzungen der Teileinzugsgebiete, digitales Gewässernetz: schwarze Linien; Landesgrenzen der Steiermark: helle Linien.

- **Landnutzung:** Für die Landnutzung standen so genannte CORINNE – Daten zur Verfügung. Aufgrund der mangelnden Information über die potentielle Verdunstung im Gesamteinzugsgebiet war eine Vereinfachung der Landnutzung notwendig. Diese wurde auf vier Klassen reduziert:
 - Wald,
 - Wiese,
 - Acker und
 - versiegelte Flächen.
- **Digitales Gewässernetz:** Das digitale Gewässernetz diente als Grundlage für die hydrodynamische Modellierung mit Mike 11. Um die Fließzeiten möglichst gut zu simulieren, wurden neben der Mur auch die größten Zubringer in das System integriert, wobei die Mürz, Kainach, Laßnitz und Sulm berücksichtigt wurden (Abbildung 6).
- **Gewässerquerprofile:** eine weiter wichtige Grundlage für die hydrodynamische Modellierung mit Mike 11 bildeten die Querprofile des Flussschlauches (in jedem Querprofil findet eine Simulation des Wasserstandes statt). Das Hauptproblem bei der Erhebung der vorhandenen Querprofile bestand darin, dass diese aus verschiedenen Studien von unterschiedlichen Bearbeitern stammten und daher deren Qualität teilweise nicht zufrieden stellend war. So waren vom Oberlauf der Mur sowie der Kainach, Laßnitz und Sulm nur relativ alte, analoge Profile vorhanden, die digitalisiert werden

mussten. Schlussendlich wurden insgesamt ca. 2000 Querprofile in der Mike11 - Datenbank inkludiert, wobei die Distanz zwischen den Querprofilen von der Qualität der vorliegenden Untersuchungen abhängig war und sich wie folgt darstellte:

- ca. 100 m für die untere Mur,
- ca. 500 m für die obere Mur und Mürz und
- ca. 1000 m für alle anderen Zubringer (Abbildung 7).

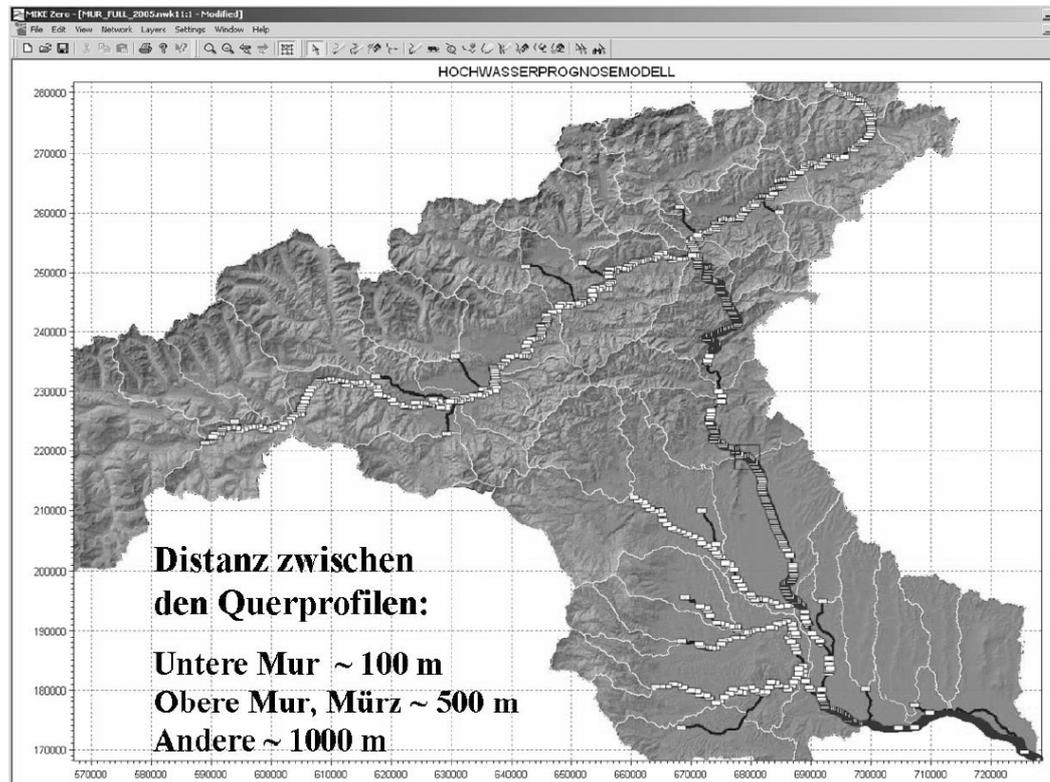


Abb. 7: Geographische Lage der Querprofile (helle Vierecke) implementiert in Mike11 für die Simulation der Wasserstände.

- Kraftwerke: Die Mur und ihre Nebenflüsse sind stark von anthropogenen Einflüssen geprägt. Neben Regulierungsmaßnahmen findet man sehr viele Kraftwerke, die den Hochwasserablauf beeinflussen. Die Regelungen dieser Kraftwerke sind zwar in Mike11 implementierbar, wirken aber als Instabilitätsfaktor auf die Berechnungen. Bei den Stabilitätstests wurde eine Simulation mit bis zu fünfzehn Kraftwerken durchgeführt, wobei aber, um einen „Sicherheitspolster“ zu schaffen, nur neun Kraftwerke implementiert wurden. Diese sind in Abbildung 8 dargestellt.

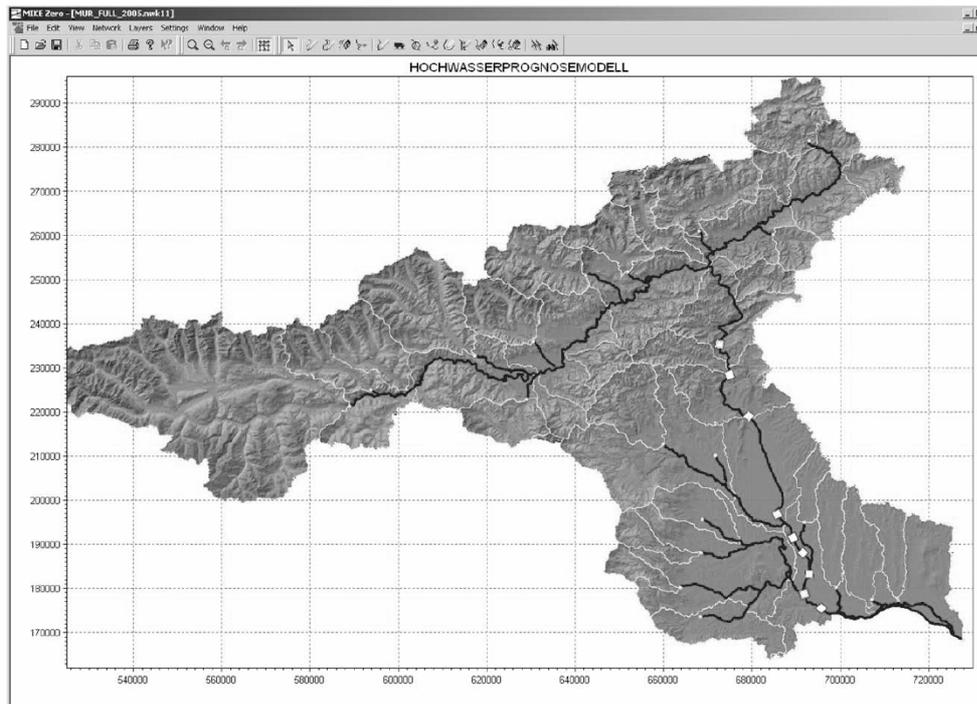


Abb. 8: Geographische Lage der neun Kraftwerke.

- Definition der Teileinzugsgebiete: Die Festlegung der Einzugsgebietsgrenzen aller größeren beobachteten und unbeobachteten Teileinzugsgebiete ($> 50 \text{ km}^2$) und ihrer Höhenverteilung in 100 m Intervallen wurde auf Basis des digitalen Höhenmodells durchgeführt. Das hydrologische Modell wurde basierend auf den Teileinzugsgebieten kalibriert, wobei dafür 12 beobachtete Teileinzugsgebiete verwendet wurden (Abbildung 9).

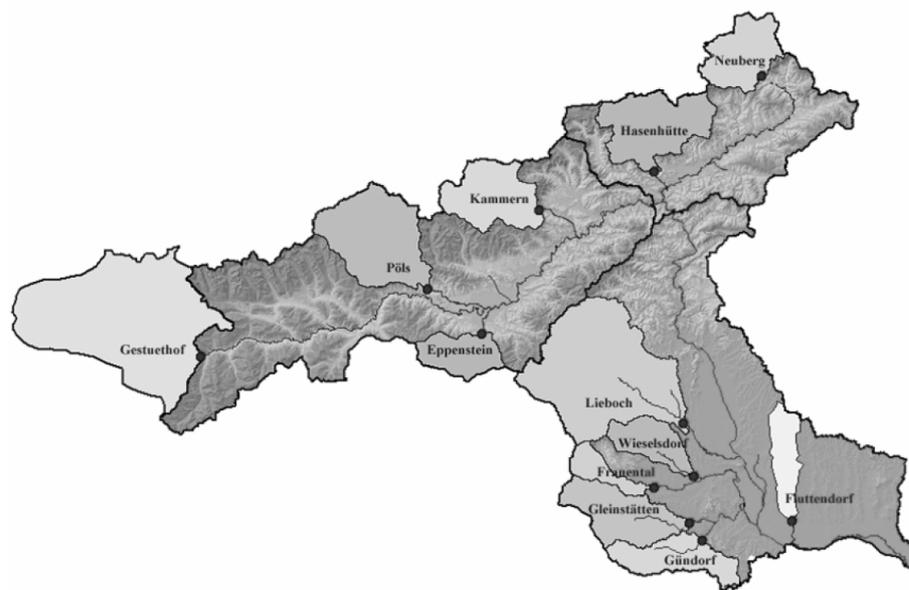


Abb. 9: Geographische Lage der Teileinzugsgebiete, die für die Kalibrierung des hydrologischen Modells verwendet wurden.

- Zeitreihen: Folgende Zeitreihen standen zur Verfügung: Wasserstände (15 - Minutenwerte), Durchflüsse (15 - Minutenwerte), Niederschlag (Tageswerte für Stationen mit Beobachter, Stundenwerte für Stationen mit Datensammler) und Lufttemperatur (Tageswerte für Stationen mit Beobachter, Stundenwerte für Stationen mit Datensammler), wobei die Zeitreihen der potentiellen Verdunstung berechnet wurden. Als Kalibrierungsperiode wurden die Daten von Oktober 1998 bis Dezember 2002 verwendet. Folgende Zeitreihen wurden bearbeitet:
 - Wasserstände und Durchflüsse: der 12 beobachteten Teileinzugsgebiete sowie der Stationen an der Mur und an den Hauptzubringern.
 - Niederschläge und Lufttemperaturen: bei den Niederschlägen ist sowohl die räumliche als auch die zeitliche Verteilung für die Modellierung von Hochwasserwellen von Bedeutung. Deshalb wurde für jedes Teileinzugsgebiet mindestens eine Niederschlagsstation mit hochaufgelösten Aufzeichnungen in den Kalibrierungsprozess einbezogen, sodass die zeitliche Komponente eines Hochwasserereignisses bestmöglich simuliert werden konnte.
 - Potentielle Verdunstung: Die Zeitreihen der potentiellen Verdunstung sind mittels der für die Steiermark (Wasserversorgungsplan Steiermark, 2002) entwickelten Formel berechnet worden. Diese Formel beschreibt die Beziehung zwischen potentieller Verdunstung und Seehöhe für Jahresmittelwerte. Diese Werte wurden für jede Landnutzungsart mittels eines Koeffizienten (FAO, 1998) auf Monatswerte (DWK, 1996) umgerechnet. Somit konnten für jede Landnutzungsart und für jeden Monat mittlere Verdunstungswerte abgeleitet werden, die für die Niederschlags-Abfluss Modellierung verwendet wurden.

4.2 Kalibrierung des hydrologischen und hydrodynamischen Modells

Die Kalibrierungsperiode sollte so ausgewählt werden, dass einerseits mehrere Hochwasserereignisse erfasst sind und andererseits sich die Eigenschaften des Einzugsgebietes in diesem Zeitraum kaum geändert haben. Obwohl es in den letzten Jahren nicht viele ausgeprägte Hochwasserereignisse gegeben hat, wurde die Periode von Oktober 1998 bis Dezember 2002 als Kalibrierungsperiode definiert. Diese Periode enthält nur das Hochwasserereignis vom August 2002, dafür sind aber keine großen Veränderungen im Einzugsgebiet der Mur aufgetreten. Obwohl es in der Projektplanung nicht vorgesehen war, wurde für die Ereignisse von August und Oktober 2005 eine zusätzliche Kalibrierung durchgeführt. Diese zusätzliche Kalibrierung war für das gesamte Projekt sehr wichtig, da:

- die Ereignisse im Jahr 2005 ausgeprägter waren als das Ereignis 2002
- sie nur mit Online-Stationen realisiert werden konnte und daher auf dasselbe Messstellennetz zugreift wie der operationelle Betrieb

Die Kalibrierung des Niederschlags-Abfluss Modells (NAM) wurde, wie bereits erwähnt, in 12 Teileinzugsgebieten der Mur durchgeführt, wobei die Auswahl nach folgenden Kriterien erfolgte:

- gute Gesamtverteilung der 12 Teileinzugsgebiete im Einzugsgebiet der Mur, um unterschiedliche Klimazonen und geologische Eigenschaften bestmöglich zu erfassen.
- entsprechende Qualität der Durchflussdaten

Die 12 Teileinzugsgebiete sind in Abbildung 9 dargestellt, als Beispiel ist in Abbildung 10 die Kalibrierung für das größte Teileinzugsgebiet (Gestüthof) dargestellt, wobei die Kalibrierung nicht nur auf Hochwasserspitzen durchgeführt wurde (Graphik oben), sondern auch die gesamte Wasserbilanz (Graphik unten) berücksichtigte.

Nach der Kalibrierung des NAM - Modells wurden die Parameter unter Berücksichtigung der Topographie, Fläche und Landnutzung auf unbeobachtete Einzugsgebiete übertragen. Damit war das gesamte Einzugsgebiet der Mur parametrisiert und die Verknüpfungen zwischen dem hydrologischen und dem hydrodynamischen Modell konnten implementiert werden.

Die für die Simulationen des Wasserstände notwendigen Rauigkeitsbeiwerte wurden aus den bestehenden Abflussuntersuchungen übernommen, womit auch das hydrodynamische Modell parametrisiert war.

Als nächster Schritt wurden die Simulationen an den an der Mur und den Zubringern liegenden Pegelstationen kontrolliert. Bei schlechter Anpassung der simulierten an die gemessenen Werte wurden die transferierten Parameter entsprechend justiert.

Die gesamte Kalibrierung wurde nur zum Teil mit Online-Niederschlagsstationen durchgeführt, wohingegen im operationellen Betrieb ausschließlich mit Daten der Online-Stationen simuliert werden kann. Diese Tatsache schwächt zwar die Kalibrierung in geringem Maße, allerdings wurden für die beiden Hochwasserereignisse im August und Oktober 2005 die Parameter ebenfalls nur mit Daten der Online-Stationen nachkalibriert.

Bei der hydrodynamischen Modellierung wurden Wasserstände und Durchflüsse gleichzeitig simuliert. Um theoretisch eine gute Anpassung der simulierten an die gemessenen Wasserstände zu erreichen, müssen die Querprofile der Pegelstationen genau sein. Da aber, wie bereits erwähnt, die Querprofile einiger verwendeter Abflussuntersuchungen diese Genauigkeitsanforderungen nicht oder nur in geringem Maße erfüllten, war diese Anpassung nur sehr unzureichend oder gar nicht möglich.

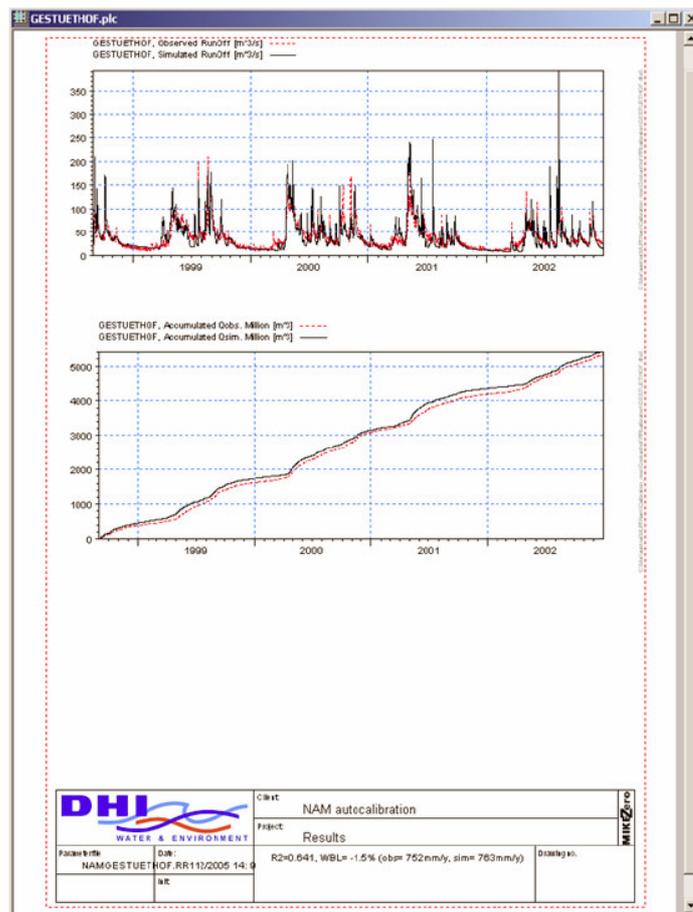


Abb. 10: Kalibrierung des hydrologischen Modells NAM (gemessene Werte - rot, simulierte Werte - schwarz). Oben: 15-minütige Durchflusszeitreihe, unten: kumulierte Durchflusszeitreihe.

5. Betrieb des Prognosesystems

5.1 Internationale Hochwasserzentrale

Nach der Kalibrierung des Modells und Aktivierung des automatischen Anpassungstools (siehe Kap. 3.2.2) begannen die operationellen Tests, wobei besonders die folgenden Punkte zu implementieren und überprüfen waren:

- Verbindung zur hydro-meteorologischen Datenbank des hydrographischen Dienstes Steiermark (Oracle-Datenbank)
- Import der meteorologischen Prognosen für Österreich (ZAMG)
- Import der gesamten slowenischen Daten
- Automatisierung der Simulationen
- Export des internationalen Modellsetups zur österreichischen und slowenischen lokalen Hochwasserzentrale

Zusätzlich wurden diese Schritte derart in die Software MIKE FLOOD WATCH implementiert, dass sie jede Stunde automatisch durchgeführt werden. Des Weiteren können die Hauptergebnisse auf einer Homepage mit derzeit noch geschütztem Zugang eingesehen werden.

Die Software MIKE FLOOD WATCH kann als eine ARC GIS “Extension” betrachtet werden, sodass alle Arbeitsschritte sowie pre- und postprocessing-Bearbeitung über die ARC GIS Oberfläche durchzuführen sind. Abbildung 11 zeigt die Einstiegsseite des Systems mit den unterschiedlichen Menüs, die zur Verfügung stehen.

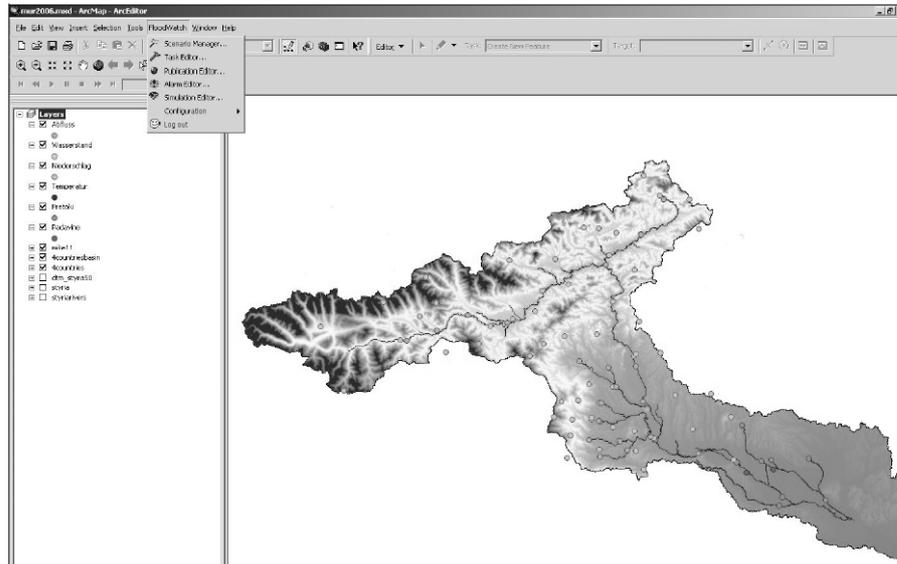


Abb. 11: Einstiegsseite von MIKE FLOOD WATCH.

Der Ablauf der automatischen Berechnungen in der internationalen Zentrale besteht aus insgesamt 14 Arbeitsschritten, wobei jeder Schritt nur nach Beendigung des vorherigen Schrittes starten kann. Die wichtigsten Arbeitsschritte sind im folgenden angeführt:

- Import der slowenischen Daten (Hydrometeorologie, Niederschlagsprognosen)
- Import der Niederschlagsprognosen (Österreich)
- Import der hydrometeorologischen Daten (Österreich), wobei sämtliche Online-Daten vom lokalen System importiert und über Intranet an die internationale Zentrale geschickt werden.
- Durchführung der Simulationen
- Darstellung der Ergebnisse im Internet (Zugang momentan noch verschlüsselt)

5.2 Darstellung der Ergebnisse im Internet

Die Hauptergebnisse der Prognosesimulationen werden jede Stunde auf einer momentan noch mit Passwort geschützten Homepage publiziert bzw. aktualisiert. Dabei werden die gesamten Informationen in Deutsch, Slowenisch und Englisch veröffentlicht. Folgende Informationen werden auf der Homepage dargestellt:

- Prognostizierte Wasserstände und Durchflüsse für die nächsten 48 Stunden für die Pegel an Mur und an den Hauptzubringern in Österreich und Slowenien in grafischer und tabellarischer Form inklusive Warnmarken
- Anschlaglinien (momentan noch im Versuchsstadium)
- Visualisierung der Niederschlagsprognosen für Österreich und Slowenien

Die Einstiegsseite der Homepage ist in Abbildung 12 zu erkennen.

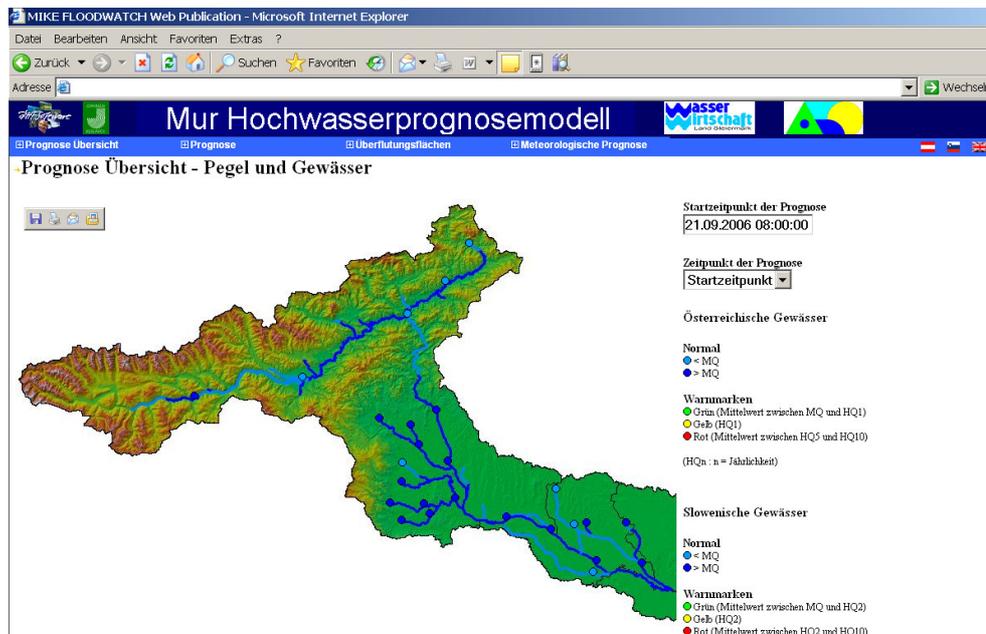


Abb. 12: Einstiegsseite der Homepage.

6. Bisherige Erfahrungen mit den Ergebnissen des Prognosemodells

Seit Beginn des Jahres 2006 läuft das Hochwasserprognosemodell für die Mur sowohl in Österreich als auch in Slowenien im operationellen Betrieb. Folgende Erfahrungen wurden bisher gemacht, wobei zu beachten ist, dass an der Mur selbst die bisher höchsten Ereignisse im Bereich eines HQ1 lagen, an den Zubringern (im speziellen an der Mürz) Ereignisse bis zu etwa HQ50 auftraten.

6.1 Prognosen für Mur

Es ist nochmals darauf hinzuweisen, dass das System zum momentanen Zeitpunkt ein Prognosesystem für die Mur darstellt und (noch) nicht für die Zubringer. Hinsichtlich der Prognosegüte für die Mur ist zu bemerken, dass für die Pegeln im unteren Bereich des Einzugsgebietes (Graz, Mellach und speziell Mureck) die Prognosen zumindest bis zu 24 Stunden im voraus gute Ergebnisse zeigten (Abweichungen in der Hochwasserspitze bzw. im Zeitpunkt des Auftretens von max. $\pm 10\%$). Für Prognosen bis 48 Stunden nimmt die Prognosegüte ab, da hier der Einfluss der Niederschlagsprognosen höher wird.

Für die Pegeln im oberen Einzugsgebiet nimmt der Einfluss der Niederschlagsprognosen auf die Prognosegüte der Abflüsse zu, wobei sich bei den bisher

beobachteten Ereignissen doch zum Teil beträchtliche Probleme in den Niederschlagsprognosedaten zeigten.

6.2 Prognosen für die Zubringer (Mürz und Weststeiermark)

Wie bereits erwähnt ist das bisher implementierte System ein Prognosesystem für die Mur, dennoch wurde versucht, auch die Hauptzubringer (Mürz bzw. weststeirische Einzugsgebiete) in das System zu integrieren. An der Mürz konnten im Juni (etwa HQ10) bzw. auch im August (etwa HQ50) bedeutende Hochwasserereignisse beobachtet werden. Die tatsächlich auftretenden Hochwasserdurchflüsse wurden vom Modell erheblich unterschätzt, was aber zum größten Teil auf die zumindest für diesen Bereich nicht zuverlässigen Niederschlagsprognosen zurückzuführen war.

6.3 Kritische Bemerkungen

Nach den bisherigen Erfahrungen zeigte sich, dass, obwohl das Hochwasserprognosemodell Mur ein zum größten Teil automatisiertes System darstellt, ein nicht unbeträchtlicher Aufwand zur Routinekontrolle (täglich) notwendig ist. Darüber hinaus bietet das System auch die Möglichkeit, eigene Szenarien zu berechnen bzw. wäre es auch notwendig und sinnvoll, in weitergehenden Untersuchungen zu analysieren, inwieweit „Fehler“ in der Prognose auf Niederschlagsprognosen, das hydrologische oder das hydraulische Modell zurückzuführen waren. All diese Analysen wären notwendig, um das System besser verstehen zu lernen, konnten aber aufgrund Zeit- (oder Personal)mangels noch nicht durchgeführt werden.

7. Schlussfolgerungen

Das Projekt “Hochwasserprognosemodell Mur” stellt ein konkretes Beispiel einer internationalen Zusammenarbeit im Bereich Hochwasser dar, aber ist momentan leider auf Österreich und Slowenien begrenzt. Die gute und lange Kooperation der vier Länder, die sich im Rahmen der ständigen österreichisch-slowenischen Kommission für die Mur ergab, sowie die finanzielle Unterstützung der Europäischen Kommission waren die notwendige Voraussetzung für die Entstehung dieses Projektes. Die aufgebaute Struktur ermöglicht einerseits die Implementierung künftiger komplementärer Studien, wie z. B. die Modellierung der Wasserqualität, der Fracht- und Geschiebetransporte sowie des Niedrigwassers, andererseits aber auch die Erweiterung des Modellgebiets auf Ungarn und Kroatien oder sogar auf das Einzugsgebiet der Drau.

Die in diesem Projekt ausgearbeitete Struktur besteht aus einer internationalen und zwei nationalen Hochwasserzentralen. Als Hauptelement dieser Struktur dient die in Graz installierte internationale Hochwasserzentrale, wo alle notwendigen Online-Daten und meteorologischen Prognosen automatisch gesammelt und für die Modellierung formatiert werden. Weiters startet jede Stunde eine Simulation mit einer Prognosezeit von 48 Stunden, wobei die Hauptergebnisse auf einer Internetseite publiziert werden und die pre- und postprocessing Datei zu den zwei nationalen

Zentralen transferiert wird. Somit ist es den zwei nationalen Zentralen möglich, alle Detailergebnisse abzurufen und alternative Simulationen zu starten, wie z.B. mit anderen bzw. modifizierten meteorologischen Prognosen oder mit anderen Anfangsbedingungen.

Die Entwicklung dieser technischen Lösung ermöglicht eine Synchronisation der Online-Daten, pre- und postprocessing Dateien, Modellierungsinformationen sowie der Hauptmodellergebnisse zwischen den drei eingerichteten Hochwasserzentralen und trägt somit zu einer deutlichen Verbesserung des Informationsstandes zwischen Österreich und Slowenien bei und kann als neue Vorhersage- und Risikomanagementmethode betrachtet werden.

8. Literatur

DHI – Water and Environment (2005) MIKE 11 – NAM and HD – Reference and User Guide. September 2005.

DWK (1996) Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. – Deutscher Verb. für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. ISBN 3-89554-034-X, Heft 238/1996.

FAO (1998) Crop evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, Italia.

Ruch, C. und G. Jörgensen (2006) Endbericht zur Flussraumagenda Alpenraum – Internationales Hochwasserprognosemodell Mur. Graz, Österreich.

Wasserversorgungsplan Steiermark, (2002) Wasserversorgungsplan Steiermark. Fachabteilung 19A, Wasserwirtschaftliche Planung u. Hydrographie. Graz, Österreich.

Anschrift der Verfasser:

Dipl. –Ing. Dr. Robert Schatzl
Amt der Steiermärkischen Landesregierung
FA 19A-Referat 1 – Hydrographischer Dienst
Stempfergasse 7, A-8010 Graz
Tel.: +43 (0)316 877 2014
Fax: +43 (0)316 877 2116
Email: robert.schatzl@stmk.gv.at

Mag. Dr. Christophe Ruch
Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH
Institut für Wasserressourcenmanagement – Nachhaltigkeit und Umwelt
Elisabethstraße 16/II, A-8010 Graz
Tel.: +43 (0)316 876 1489
Fax.: +43 (0)316 8769 1489
www.joanneum.at/wrm

HOCHWASSERWARNUNG IN KÄRNTEN

Johannes Moser und Christian Kopeinig

1. Einleitung

Die rechtzeitige Hochwasserwarnung, und letztendlich die bestmögliche Bewältigung von Hochwasserkatastrophen, erfordert ein enges Zusammenspiel von vielen Beteiligten unterschiedlicher Fachrichtungen. Hochwasserkatastrophenschutz ist also interdisziplinär!

Für das Funktionieren des Hochwassermanagements ist deshalb eine Gesamtbetrachtung über viele Fachbereiche hinweg notwendig. Dazu gehören Meteorologen und Hydrologen, welche sich im Vorfeld anhand von ersten Prognosen Erkenntnisse über das zu erwartende Ausmaß verschaffen und bei Bedarf entsprechende Vorwarnungen verbreiten, die Landesalarmzentrale, welche vorwiegend die Einsatzkräfte anweist und koordiniert, diverse Krisenstäbe auf Gemeinde-, Bezirks- und Landesebene, eine Reihe von Sachverständigen, wie der Hochwasserdienst der Abteilung 18 – Wasserwirtschaft (Abbildung 1), Wehrverantwortliche der Kraftwerksbetreiber, Gewässerökologen, Geologen, Chemiker, Straßendienst und letztendlich natürlich die Einsatzkräfte vor Ort wie Feuerwehr, Polizei, Bundesheer, Rettung und freiwillige Helfer. Dies ist eine große Gruppe von Beteiligten worin der einzelne vom Fachwissen der jeweilig anderen Disziplin oft kaum bzw. nur unzureichend bescheid weiß. Das muss auch nicht unbedingt so sein (es können nicht alle alles wissen), doch ist eine aufeinander abgestimmte Aufgabenteilung, Vorgangsweise und Kommunikation wichtig.

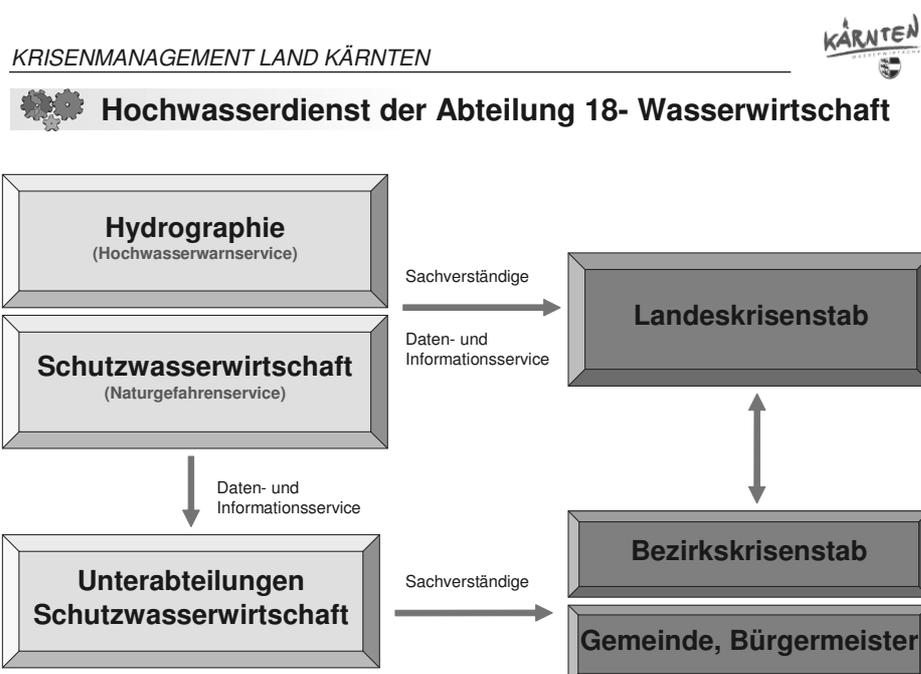


Abb. 1: Struktur des Hochwasserdienstes der Abt. 18 – Wasserwirtschaft im Krisenmanagement des Landes Kärnten.

Der Aufbereitung und breiten Zugänglichkeit von hochwasserrelevanten Daten und Informationen, sowie einer klaren Organisation kommt daher große Bedeutung zu. Unter diesem Gesichtspunkt wurde in Kärnten ein Expertensystem entwickelt, das die Grundsätze der Vermittlung von wesentlichen und klaren fachlichen Informationen (aktuelle und prognostizierte Daten von Niederschlägen, Wasserständen und Abflüssen, Pegelprofilen, Kennwerten, Ausuferungsmengen und mögliche Überschwemmungsflächen bei bestimmten Hochwässern und letztendlich Alarmpläne etc.) aber auch eine Handlungsstruktur (Warnung, Alarmierung bzw. Informationsfluss) zum Inhalt hat. Dabei ist es wichtig festzulegen, wer welchen Teil dieses Ganzen übernimmt, verantwortet und wie die Zusammenwirkung zu erfolgen hat. Im Katastrophenschutz ist eine klare Regelung wichtig, die auch Flexibilität zulässt! Das Proben anhand von Planspielen mit verschiedensten HW-Szenarien ist dabei sehr behilflich.

Hydrographischer Dienst und Schutzwasserwirtschaft kooperieren beim Daten- und Informationsservice sowie im Sachverständigendienst sehr eng miteinander. Es hat sich in der Vergangenheit immer wieder gezeigt, dass während des Hochwassers der Zeitfaktor sehr wesentlich ist. Aufgrund der Seltenheit der Ereignisse kommt einer guten Vorbereitung besondere Bedeutung zu. Daher ist das Hochwasserwarnservice des Hydrographischen Dienstes im Grunde genommen eine zentrale, funktionale Datenbank, in welcher im Vorfeld viele Daten und Informationen aufbereitet und eingearbeitet werden, um sie im Ernstfall rasch verfügbar zu haben. Naturgefahrenservice und Warnservice sind miteinander verknüpft, das heißt, dass über das Warnservice zum Beispiel auch die Überflutungsflächen aus den Gefahrenzonenplänen des Naturgefahrenservices abrufbar sind. Daten und Wehrordnungen von Kraftwerksbetreibern (zB. AHP) werden ebenfalls mitverwaltet. Durch die Vielzahl an Beteiligten und der Komplexität von Hochwässern ist es entscheidend, über einen gleichen Informationsstand zu verfügen!

ABT. 18 – WASSERWIRTSCHAFT / HOCHWASSERDIENST



Anforderungen an ein Hochwasserwarnservice

Hochwasserrelevantes Fachwissen

- Hydrologische Daten**
(hydrologische Kennwerte, aktuelle Messdaten, Prognosen, Pegelmarken, Retention...)
- Schutzwasserwirtschaftliche Daten**
(Bordvolles Abflussvermögen, Ausbaugrad, Überschwemmungsflächen, Bauwerke...)
- Daten von Kraftwerksbetreibern**
(Wehrordnungen, Wehrwarte...)
- Warn- und Alarmpläne**
(Warn- und Alarmierungsmarken, Alarmpläne, Maßnahmen im Katastrophenfall, Planspiele...)

Organisation, Zusammenwirkung und Information

(klare Organisationsschemas, Warn-, Alarmierungs- und Informationsschienen, um für alle Beteiligten den gleichen Wissensstand zu vermitteln. Planspiele...)

Abb. 2: Anforderungen an ein Hochwasserwarnservice

Der Hydrographische Dienst arbeitet derzeit beim Aufbau des Warnservices auf mehreren Ebenen:

- Ausbau und Redundanz des fernübertragenen Messnetzes
- Fernübertragungszentrale „Aquanaut“
- Aufstellung und Betrieb von Flussgebietsmodellen für die Flussgebiete Drau, Möll, Lieser, Gail, Gurk, Glan und Lavant (Projektpartner: TU Wien - Prof. Gutknecht)
- Entwicklung und Verwirklichung der Hochwasserzentrale – Hydromap Kärnten
- Erstellung von Hochwasserkatalogen auf Basis von Analysen und Simulationen
- Erstellung der generellen Alarmpläne
- Abstimmung der relevanten Daten mit der Schutzwasserwirtschaft
- Mitentwicklung der Detail-Alarmpläne
- Gemeinsame Informationsschiene (Hydrographischer Dienst / ZAMG Wetterdienst Klagenfurt); Warn- und Alarmierungsschienen

2. Ausbau und Verbesserung des fernübertragenen Messnetzes

Das bestehende Messnetz aus Wasserstands- bzw. Abflusspegeln sowie Niederschlagsstationen wurde vergrößert, sodass dem Hydrographischen Dienst derzeit ca. 53 Wasserstandsmessstellen und 73 Niederschlagsstationen online zur Verfügung stehen (Abbildung 3). Die Daten werden von einer Zentrale aus automatisiert abgerufen (Aquanaut), in der Datenbank des Hydrographischen Dienstes (HyDaMS) gespeichert und im Internet zur Verfügung gestellt (öffentlicher Informations- und Hochwassernachrichtendienst).

Bei den letzten großen Hochwässern in Tirol und Vorarlberg (2005) sowie Niederösterreich und Oberösterreich (2002) ist die Datenübertragung zahlreicher Stationen durch den Zusammenbruch des Telekom-Netzes ausgefallen. Um eine möglichst sichere Datenübertragung zu gewährleisten erscheint aus heutiger Sicht eine Funk- bzw. Satellitenübertragung als bessere Lösung. Es sind hier noch Verbesserungen in der Sicherheit der Übertragungstechnik zu erwarten.

Ein Datenaustausch zwischen dem HD Kärnten, der ZAMG, der AHP und dem italienischen Wetterdienst OSMER wurde in Betrieb genommen. Mit Slowenien wird diesbezüglich noch Kontakt aufgenommen. Erforderliche Niederschlagsprognosen werden von der ZAMG im Anlassfall eingeholt (kostenpflichtig).

Eine Hochwasserprognose erfordert gesicherte Pegelschlüssel (Kurven zur Umrechnung der gemessenen Wasserstände in Abflussmengen). Daher wurden für die Hochwasserwarnung wichtige Pegelprofile geodätisch vermessen und die erforderlichen Hochwasser-Pegelschlüssel hydraulisch berechnet. Bei großen Hochwässern sind kaum Messungen möglich.

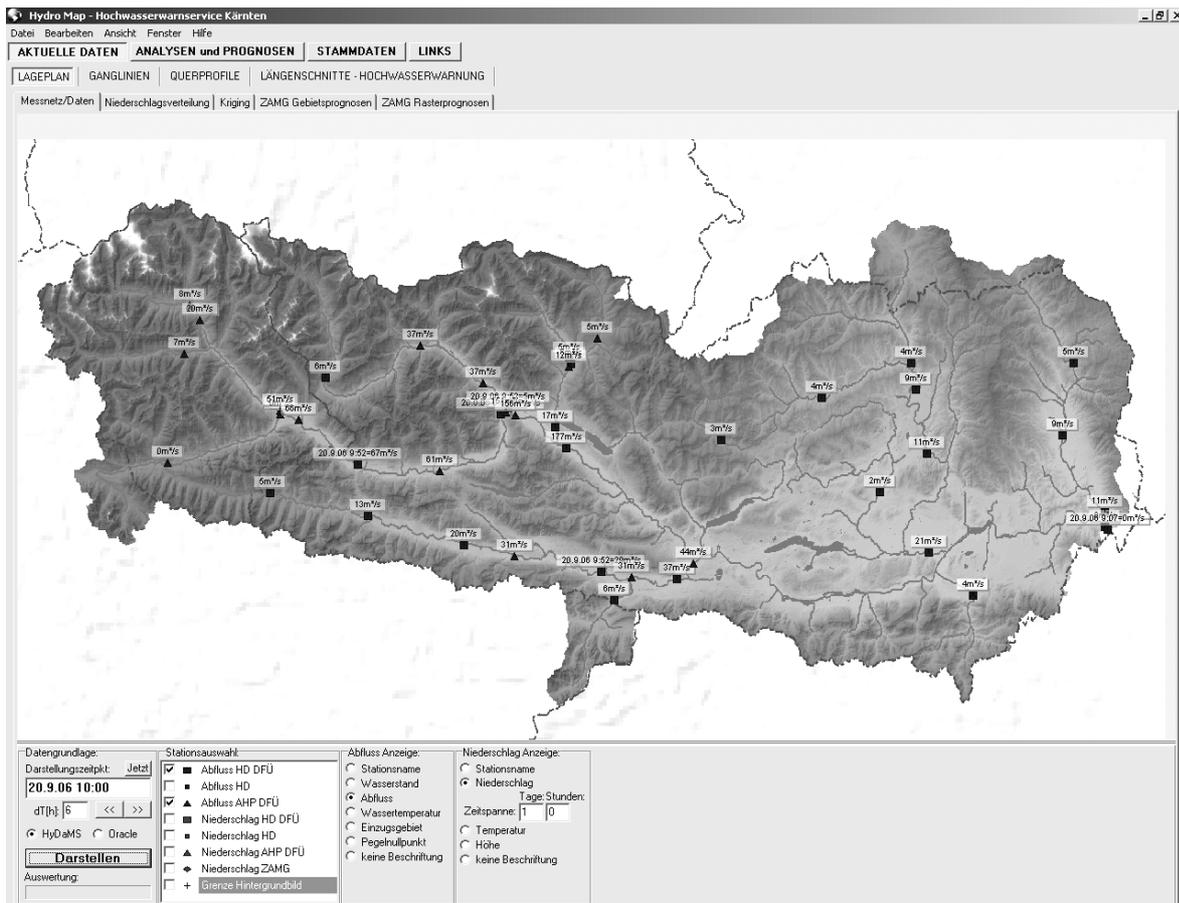


Abb. 3: Abflussmessnetz, Übersicht

3. Hochwasserwarnservice – Software

Dieser Teil des Gesamtkonzeptes wurde von der Hydrographie selbst entwickelt und programmiert. Das Programm beinhaltet zahlreiche Tools zur Visualisierung und Auswertung der umfangreichen wasserwirtschaftlichen Informationen. Es erfüllt automatisiert wichtige Aufgaben, wie zum Beispiel den Internetdienst. Es werden wesentliche Daten zusammengeführt, um rasch einen Überblick über die Situation zu bekommen und um eine weitere Abschätzung der Hochwasserentwicklung vornehmen zu können.

Für das Flussgebiet der Gail wurden die Daten bereits im Zuge der Entwicklung eingearbeitet. Die Datenbank ist bei neuen Anforderungen jederzeit erweiterbar und soll zukünftig auch mit Informationen für die Flussgebiete Drau, Möll, Lieser, Gurk, Glan und Lavant befüllt werden. Für den Notbetrieb (Computer- oder Netzwerkausfall) stehen die wesentlichen Informationen auch analog in Mappen zur Verfügung.

3.1 Hochwasserprognosemodell – Katalogsystem

Dieser Teil beinhaltet die Möglichkeit zur Abschätzung von Hochwasserereignissen anhand eines vorbereiteten Katalogsystems (rasche Erstabschätzung) oder durch Echtzeitsimulationen mit Flussgebietsmodellen. Er ist in das Warnservice-Paket integriert

und kann als Versuch verstanden werden, Expertenwissen und Simulationstechnik zu vereinen.

Mit Hilfe der Niederschlagsprognose (ZAMG) und der Einschätzung des Gebietsfeuchtezustandes (Ausgangszustand) wird anhand von vorbereiteten Szenarienkatalogen die erwartete Hochwasserkategorie an einem bestimmten Pegel eingeschätzt.

Die Ereigniskataloge sind mit Hilfe von Flussgebietsmodellen (in der Entwicklungsphase für das Gailtal) und Auswertungen von beobachteten Ereignissen zusammengestellt worden. Die Modellrechnungen für verschiedenste Hochwasserszenarien und die Katalogisierung der Ergebnisse für das Gailgebiet wurden von der TU Wien (DI Schindler) durchgeführt.

Dieses System bietet unter anderem auch den Vorteil, dass man sich bei der Erstellung mit Hochwasserszenarien im Vorhinein auseinandersetzt und dadurch Kenntnisse und Erfahrungen gewinnt. Die Echtzeit-Integration des Niederschlag-Abflussmodells in das Warnmodell ist unter dem Punkt „Programmsystem HydroMap Kärnten – Details“ beschrieben.

3.2 Verknüpfung Hydrologie – Schutzwasserwirtschaft

Über Längenschnittdarstellungen von Ausuferungsdurchflüssen und Gefährdungspunkten wird eine Verknüpfung zur Schutzwasserwirtschaft hergestellt. Durch eine synchrone Darstellung von Längenschnitten und den aus Gefahrenzonenplänen bekannten Überflutungsflächen kann schnell ein Überblick über ein Hochwasserszenario gewonnen werden. Es sind daher bei Einschätzung des Hochwassertyps (Kategorie) auch die möglichen Auswirkungen (Überschwemmungen) abschätzbar (Abbildung 4 und 5).

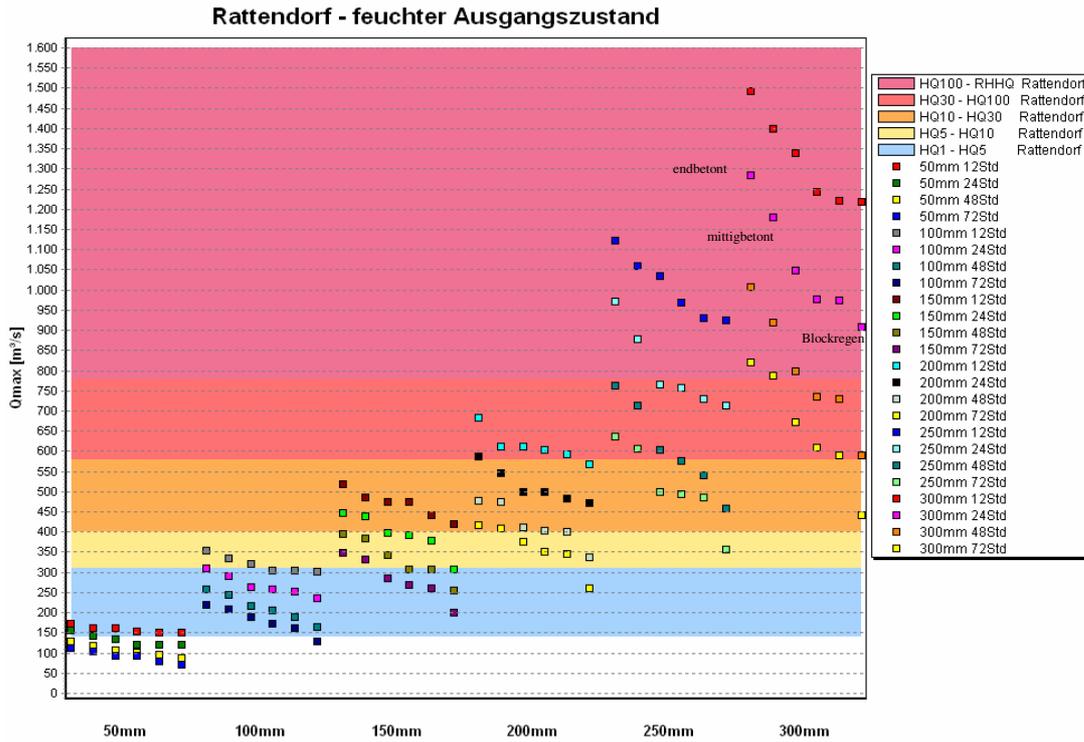


Abb. 4: Auszug aus dem Hochwasserszenarienatalog, Spitzenabflüsse, Stand 2005.

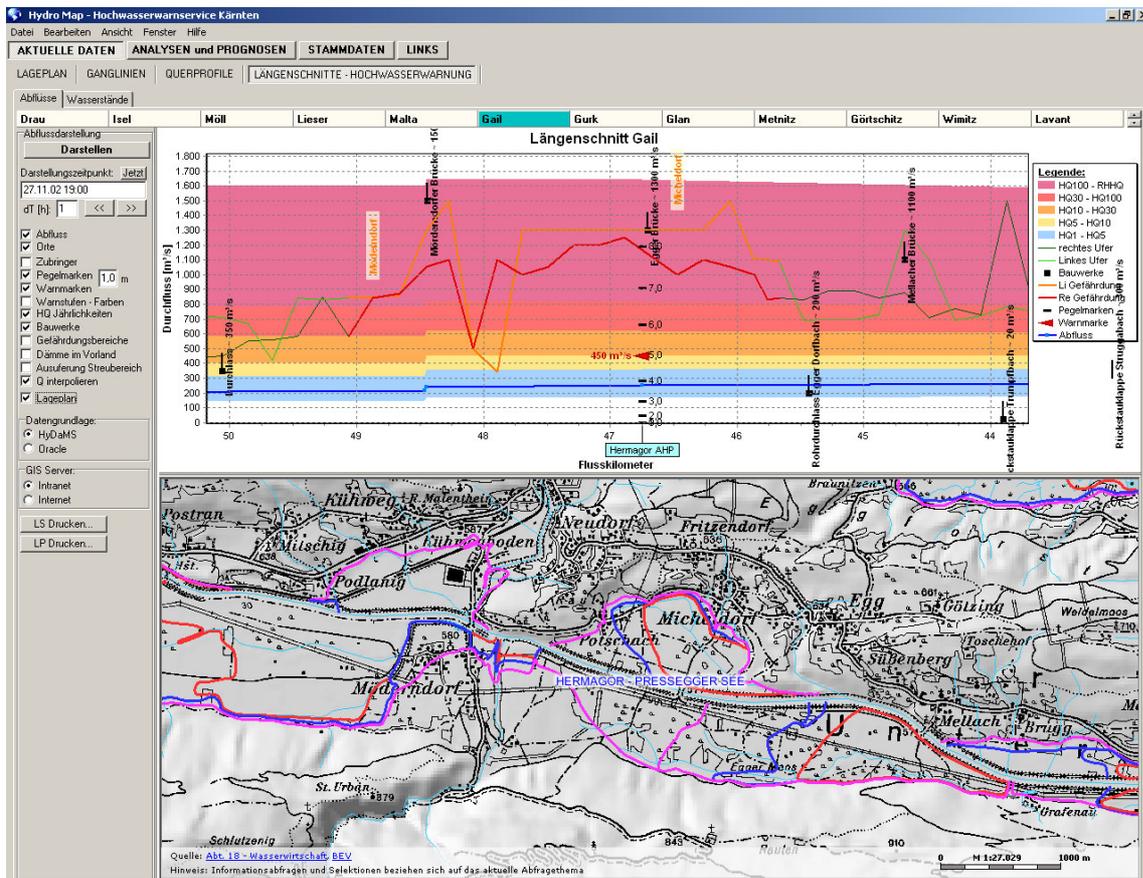


Abb. 5: Parallele Darstellung von Längenschnitt und Lageplan.

4. Organisation, Informationsaufbereitung und Weitergabe

Der Hochwasserdienst der Abteilung 18 - Wasserwirtschaft umfasst ca. 35 Sachverständige. Diese stehen den Krisenstäben (Gemeinde, Bezirk, Land) im Hochwasserfall zur Verfügung. Die Daten und Informationen des Hochwasserwarnservices (digital und analog) sollen vor allem diesen Sachverständigen dienen. Insgesamt erfordert die Befüllung der Datenbank eine enge und gute Zusammenarbeit aller Sachverständigen. Sehr viele Leistungen werden dabei von der Abt. 18 –Wasserwirtschaft aus eigenen Personalressourcen abgedeckt.

4.1 Warnung - Alarmierungsschema

Hochwasservorwarnung

Bei der Festlegung und Verbreitung von Hochwasserwarnungen gibt es eine enge Kooperation mit dem Wetterdienst Klagenfurt (ZAMG). Erste Starkregenprognosen des Wetterdienstes werden vom Hydrographischen Dienst analysiert und auf mögliche Überschwemmungsgefahren hin überprüft (zumeist 1 Tag zuvor).

Sind Hochwässer größer dem HQ1 zu erwarten, wird die Warnung per E-Mail an vorbereitete Verteilerlisten verschickt. Bei großen zu erwartenden Hochwässern wird auch telefonischer Kontakt mit sonstigen Beteiligten aufgenommen (Hochwasserdienst Abt. 18, Abteilung für Sicherheitsangelegenheiten, AHP ...).

Hochwasserwarnung (Prognose-Warnung, Pegel-Warnung und Alarmierung)

Diese erfolgt nach dem Einsetzen der ersten Regenfälle (in der Regel nach 3-8 Stunden) durch die Hydrographie. Sie enthält eine bereits detaillierte Prognose-Warnung und erste Berichte zum Ereignis. Bei Erreichen der Warn- und Alarmierungsmarken an den Pegeln werden von der Hydrographie über die Bereitschaftsdienste die Sicherheitsbeauftragten der betroffenen Bezirkshauptmannschaften und Gemeinden (Bürgermeister) informiert.

Grundsätzlich werden Hochwässer nach Jährlichkeitskategorie und nach Gefährdungskategorie eingeschätzt. Bei den Jährlichkeitskategorien wird zwischen HQ1-5, HQ5-10, HQ10-30, HQ30-100, >HQ100 und hinsichtlich der Gefährdungskategorie zwischen Keine – Gering – Mittel - Hoch und Sehr hoch unterschieden. Je nach Einschätzung wird entsprechend vorgegangen.

Bisherige Beobachtungen von Hochwässern und Ergebnisse aus Modellierungen und Gefahrenzonenplänen zeigen, dass in der Regel bis HQ1 keine Überschwemmungen auftreten, bis HQ5 sind nur selten Gebäude direkt am Ufer betroffen, ab HQ5 bis HQ10 treten sehr viele Flüsse in nicht regulierten Bereichen bereits aus ihren Flussbetten. Es kommt zu beträchtlichen Freilandüberschwemmungen und Gebäude direkt an niederen Ufern sind betroffen. Ab HQ10 – HQ30 sind vereinzelt bereits Siedlungsbereiche mit unzureichendem Hochwasserschutz betroffen. Bei HQ30 und höher herrscht für viele Orte und Siedlungsbereiche akute Überschwemmungsgefahr.

Im folgenden Beispiel ist ein Auszug aus dem generellen Alarmplan für das obere Drautal zu sehen (Tabelle 1). Betroffene Bereiche sind getrennt für einzelne Ort-

schaften und Siedlungsbereiche ausgewiesen (pegelbezogen). Die Daten sind auf Grundlage von Gefahrenzonenplänen und Beobachtungen erstellt worden. Sie sind je nach Datengrundlage mehr oder weniger genau. Es ist geplant, zukünftige Beobachtungen und Ergebnisse aus Berechnungen in die Datenbank einzuarbeiten und entsprechend in den Festlegungen und Alarmplänen zu berücksichtigen. Es ist also eine stetige Verbesserung der Datengrundlage zu erwarten.

Der Inhalt des Hochwasseralarmplanes für Siedlungsbereiche besteht im Wesentlichen aus festgelegten Warnmarken am Bezugspegel und aus Maßnahmen, die mit Erreichen der Warnmarken zu tätigen sind.

Tab. 1: Beispiel: Pegelbezogene Liste der Hochwassergefährdungen bei jeweiliger Hochwasserkategorie, Stand 2005

Fluss	Pegel	HQ-Kategorie	Gefährdung	Freiland /Straßen	Ortschaft/Objekt	Flussbauwerk	Warnung	
Drau	Oberdrauburg	HQ1-5	gering					
		HQ5-10	mittel	Beginn bei Gröfelhof				
					Zufahrt Pflüggen			
						Sportplatz Dellach		
		HQ10-30	hoch	Riesige Überschwemmungen Gröfelhof - Dellach	Teile von Golfplatz, Sportplatz Berg			
					Zufahrt Stein/Dellacher Brücke			
					Bundesstraße bei Holztratten	Grundwasserproblem - Siedlg. Drauweg Oberdrauburg		
					Auenfelder	Fußballplatz Oberdrauburg		
						Teile von Pflügen		
		HQ30-100	sehr hoch		Teile v. Ötting, Straße-Hof	Dammbruch -gefahr		
						Bahntrasse	oberh. Oberdraub.	
						Bahnhaltestelle Irschen		
						Bahnhof Dellach und Teile von Dellach-Gewerbegeb.		Detailalarmplan!
						Bad Raßnig – Camping Dellach		
						Teile von Tratten bei Berg		
						Bahnhof Oberdrauburg		Detailalarmplan!
				Siedlung Drauweg – Obdrauburg		Detailalarmplan!		
				Teile von Holztratten				
		>HQ100	sehr hoch		Tratten-Ort		Detailalarmplan!	
		Extrem Katastrophe			Gesamt Ort Oberdrauburg		Detailalarmplan!	

Der Hydrographische Dienst Kärnten betreibt für das Hochwasserwarnservice eine Internetseite: www.wasser.ktn.gv.at/hydrographie

Anmerkung dazu: Das Warnservice ist noch in Entwicklung. Für die einzelnen Flussgebiete liegt uns unterschiedlicher Daten- und Wissensstand vor. Hochwasserabläufe sind von Natur aus sehr komplexe Ereignisse, daher gibt es bei der Erstellung von Prognosen sehr viele Unsicherheiten. Dennoch sind wir bemüht, unser Fachwissen in Kooperation mit anderen Dienststellen (Wetterdienst, Schutzwasserwirtschaft, Kraftwerksbetreiber AHP, Kelag) bestmöglich einzusetzen.

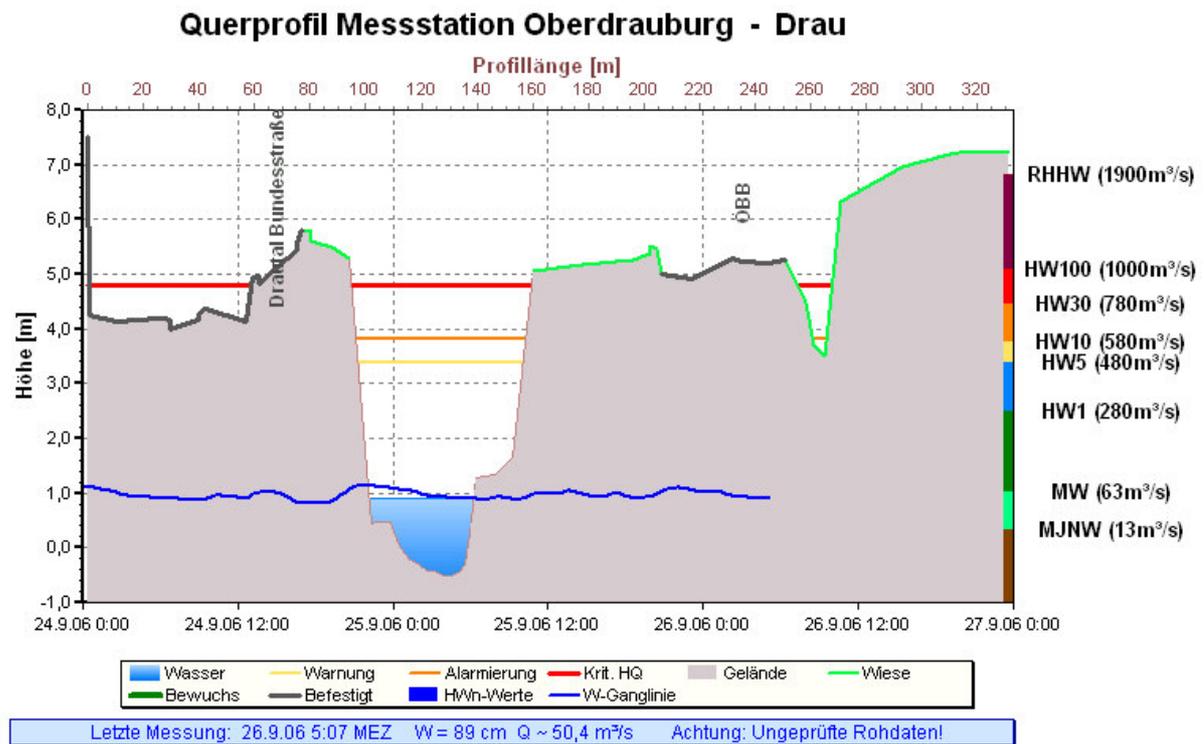


Abb. 6: Pegelquerprofil mit Online Wasserstand/Abfluss Verlauf im Internet

5. Programmsystem HydroMap Kärnten – Details

Das Programm unterstützt folgende Aufgabenbereiche:

- Visualisierungen von Mess- und Prognosedaten in
 - Lageplänen
 - Längenschnitten
 - Querprofilen
 - Ganglinien
- Datenbereitstellung für den Internetdienst
- Auswerten von Abflussmessungen und Verwalten von einheitlichen Pegelschlüsseln für Abflussmodelle, Internetdienst und Echtzeitdarstellungen
- Verwalten von hydrologischen Stammdaten
- Datenaufbereitung für Niederschlag-Abflussmodelle

- Ergebnisdarstellung von Niederschlag-Abflussmodellen
- Erstellen, Verwalten und Darstellen von Alarmplänen
- Zusammenführen von hydrologischen und schutzwasserwirtschaftlichen Daten inklusive graphischer Aufbereitung
- Schnittstelle zum Wasserinformationssystem „WIS“

5.1 Programmgrundlagen

Das Programm kann in gewisser Weise wie eine Mappe gesehen werden, in der hydrologische und schutzwasserwirtschaftliche Inhalte zusammengefasst und dargestellt werden. Dabei war es besonders wichtig, vorhandene Quellen zu nutzen und, wenn möglich, nicht eine doppelte Datenhaltung aufzubauen.

Es besteht aus zwei Modulen, dem Programm HydroMap, welches das eigentliche Benutzerprogramm darstellt, und dem Programm HydroNet, welches regelmäßig anfallende Aufgaben wie Datenbereitstellungen, Erzeugen von Internetgrafiken oder Download von meteorologischen Prognosedaten erfüllt (Abbildung 7).

Die in Hydromap integrierte Datenbank enthält eine Benutzerverwaltung mit fachlich zugehörigen Gruppenrechten. Als Zeitreihendatenbank wird die im Hydrographischen Dienst vorhandene HyDaMS Datenbank genutzt (mit Datenabrufsystem Aquanaut, der Datenzugriff ist auch über Internet möglich). Dies hat den Vorteil, dass die Wartung und Kontrolle der Daten gut in den Routinebetrieb integriert ist. Es gibt aber auch Schnittstellen zu SQL-basierten Datenbanken (Oracle) und zu ASCII-Dateien.

Zusätzlich sind Schnittstellen zu diversen externen Datenquellen wie ZAMG-Prognosedaten, GIS-Daten oder HEC-HMS und HEC-RAS Abflussmodellen integriert.

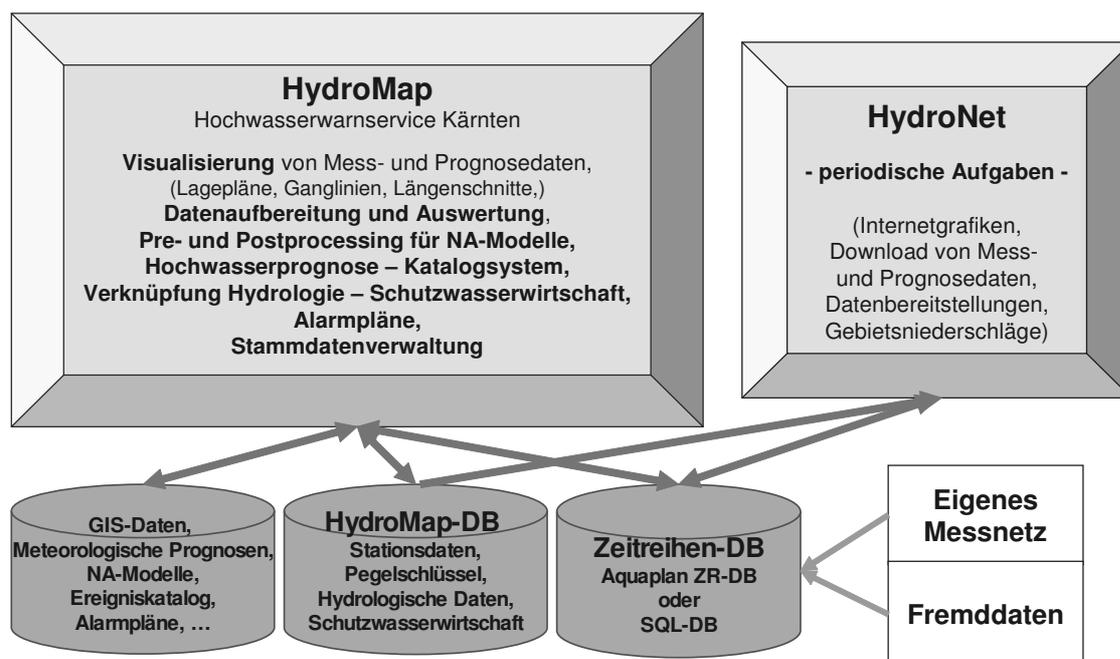


Abb. 7: Programmstruktur und Datenfluss.

5.2 Ermittlung des Gebietsniederschlages

Im Programm HydroMap kann die Ermittlung von Gebietsniederschlägen mittels 2-dimensionaler Kriging-Interpolation durchgeführt werden. Es werden dafür Routinen des Open-Source-Projektes „gstat“ verwendet (Pebesma und Wesseling, 1998). Damit wird eine flächige Niederschlags- und Temperaturverteilung auf Basis der in der Zeitreihendatenbank vorhandenen Messwerte generiert. Als Datenquelle dient die beim Hydrographischen Dienst verwendete HyDaMS – Datenbank oder eine sonstige, SQL-fähige Datenbank wie z.B. Oracle. Das Programm führt selbstständig eine automatische Behandlung von Lücken in den Messdatenzeitreihen durch.

Sowohl bei der Interpolation von Temperatur- als auch bei Niederschlagswerten kann eine Höhenabhängigkeit der Messwerte berücksichtigt werden (Abbildung 8). Dabei werden die Messwerte zuerst mittels Höhengradienten auf ein Bezugsniveau transformiert. Die Interpolation erfolgt am Bezugsniveau, danach werden alle Rasterwerte mit dem Höhengradienten wieder auf die im digitalen Höhenmodell definierte Geländehöhe „verschoben“. Der Gradient wird bei Temperaturwerten automatisch aus den in unterschiedlichen Höhen gemessenen Werten durch Berechnen einer Ausgleichsgerade ermittelt. Bei Niederschlagswerten kann ein Gradient (in % Niederschlagszunahme pro 100 m Höhendifferenz) vorgegeben werden. Als plausibler Wert hat sich hier eine Niederschlagszunahme von ca. 2 % pro 100 m Höhenzunahme herausgestellt.

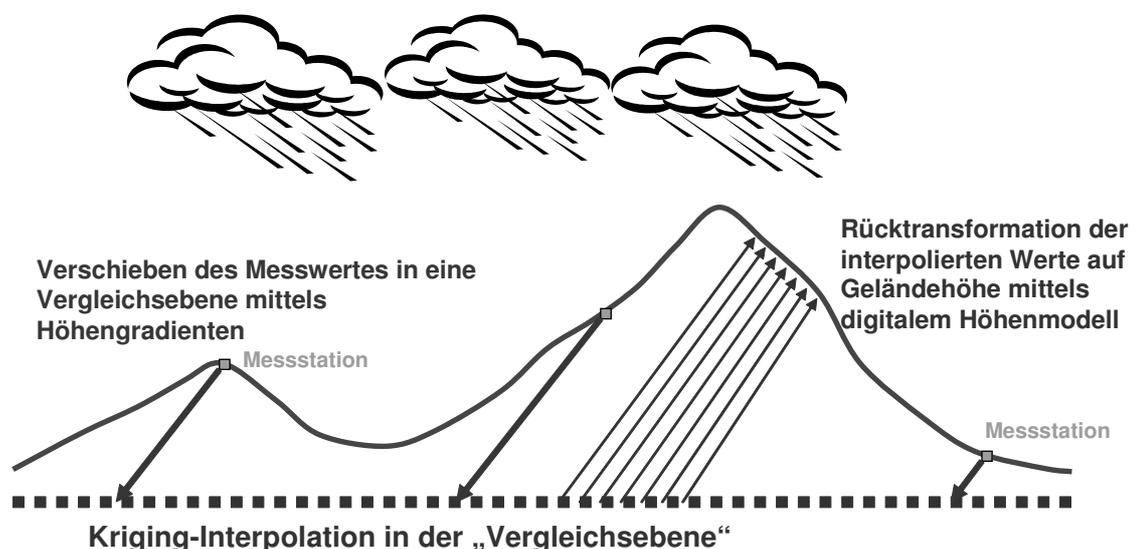


Abb. 8: Höhenabhängige Ermittlung von Temperatur und Niederschlagswerten.

Nach Ermittlung der höhenabhängigen Temperatur- und Niederschlagsverteilungen kann durch Kombination dieser Datensätze und Angabe einer Schneefallgrenze (in °C) der als Regen gefallene, abflusswirksame Niederschlag ermittelt werden. Als nächster Schritt wird für definierte Teilgebiete der mittlere Gebietsniederschlag bzw. der abflusswirksame Gebietsregen ermittelt. Durch Aneinanderreihen der Werte der einzelnen Zeitschritte werden für diese Gebiete Ganglinien der entsprechenden Parameter erzeugt und in der Zeitreihendatenbank gespeichert (Abbildung 9 und 10).

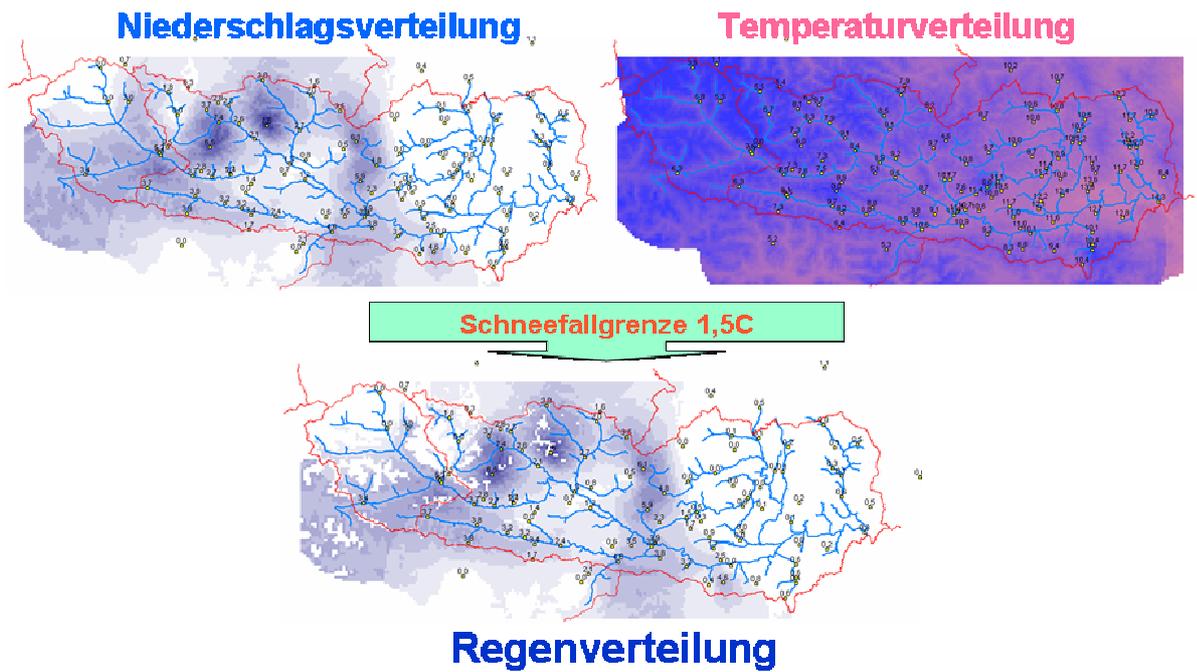


Abb. 9: Ermittlung des Regenanteils aus dem Gesamtniederschlag.

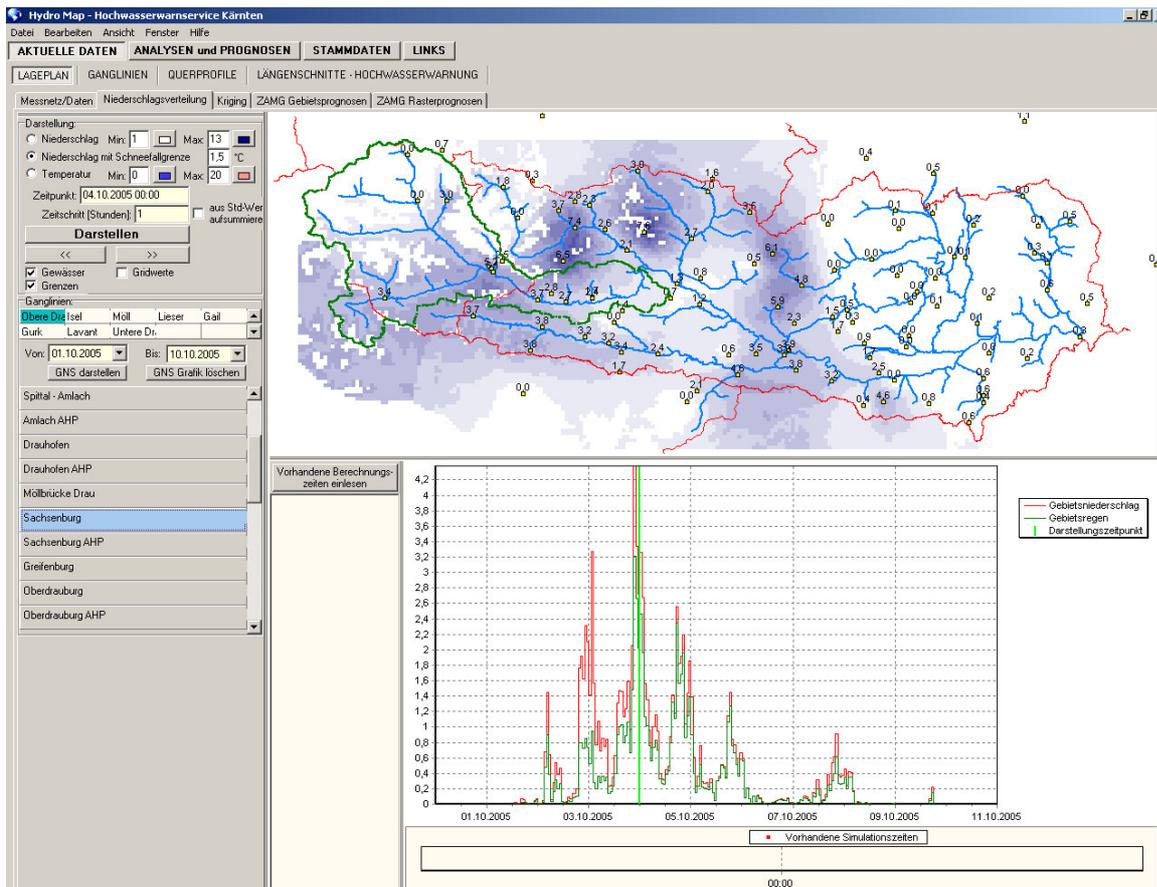


Abb. 10: Ermittlung von Ganglinien des Gebietsniederschlags bzw. Gebietsregens.

Diese Werte bilden in weiterer Folge auch die Eingangsdaten für Niederschlag-Abflussmodelle.

Als großer Vorteil der Kriging-Interpolation gegenüber einer statischen Methode mit z.B. Thiessen-Polygonen kann neben der besseren räumlichen Auflösung die automatische Berücksichtigung von neuen Stationen oder die Lückenerkennung bei Ausfall von bestehenden Messstationen angeführt werden.

5.3 Anbindung an Niederschlag-Abflussmodelle

Niederschlag-Abflussmodelle werden im Rahmen des Hochwasserwarnservices Kärnten sowohl für Echtzeitprognosen als auch für Szenarienanalysen im Rahmen des Hochwasserkatalogsystems verwendet. Zum Einsatz kommen Programme des US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (HEC). Diese Programme wurden aufgrund folgender Kriterien ausgewählt.

- ausreichende Genauigkeit
- gute Dokumentation
- grafische Benutzeroberfläche
- flexibles Datenmanagement
- stetige Weiterentwicklung
- frei verfügbar
- HEC-Programme werden in Österreich bereits oft verwendet, es ist deshalb auch entsprechendes Know-how bei Zivilingenieuren vorhanden.

Zur Simulation des Niederschlag-Abflussprozesses wird das Programm HEC-HMS verwendet. Bei komplexeren Verhältnissen des Gewässerabflusses mit zum Beispiel großen Retentionsräumen kann anschließend mit den durch HEC-HMS generierten Zuflussganglinien, automatisch gekoppelt, mit dem Programm HEC-RAS eine eindimensionale, instationäre hydraulische Berechnung des Gewässers durchgeführt werden.

Hauptziel bei der Entwicklung war es, einen guten Kompromiss zwischen einem einfachen System mit doch ausreichender Genauigkeit, guter Erfassung der ablaufenden hydrologischen Prozesse und Steuerungsmöglichkeit der Simulationsberechnungen durch einen erfahrenen Hydrologen zu erreichen. Dazu wurde von Schindler (2006) ein 3-Speicheransatz innerhalb des Programms HEC-HMS entwickelt (Abbildung 11). Bei diesem Ansatz werden die drei maßgebenden Abflusskomponenten Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss und Basisabfluss durch drei parallel angeordnete Linearspeicher abgebildet. Es wird also jedes Teileinzugsgebiet in drei übereinander liegende Teilspeicher aufgespaltet und mit einem Teil des Gesamtniederschlags beaufschlagt. Diese Flow-Ratio-Werte bilden während der Prognoseerstellung die Eichparameter des Modells. Die übrigen Gebietswerte sind konstant und werden vorweg bei der Modellerstellung aus einer Ganglinienanalyse gewonnen.

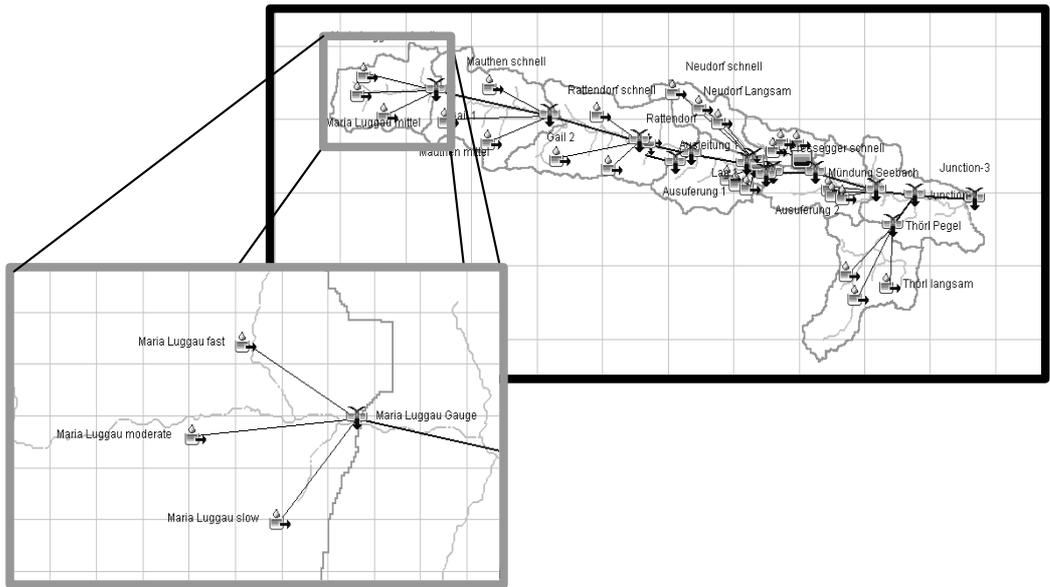


Abb. 11: HEC-HMS Teilgebiete und 3-Speicheransatz.

Im Zuge der Modellerstellung wurden für in der Vergangenheit abgelaufene Hochwasserereignisse optimale Flow-Ratio-Werte für eine möglichst gute Anpassung von gemessenen und berechneten Ganglinien gesucht. Diese Werte wurden dann in Abhängigkeit vom Ereignisniederschlag und Vorregen aufgetragen. Durch diese Punktwolke wurde eine angenäherte „Eichfläche“ gelegt (Abbildung 12).

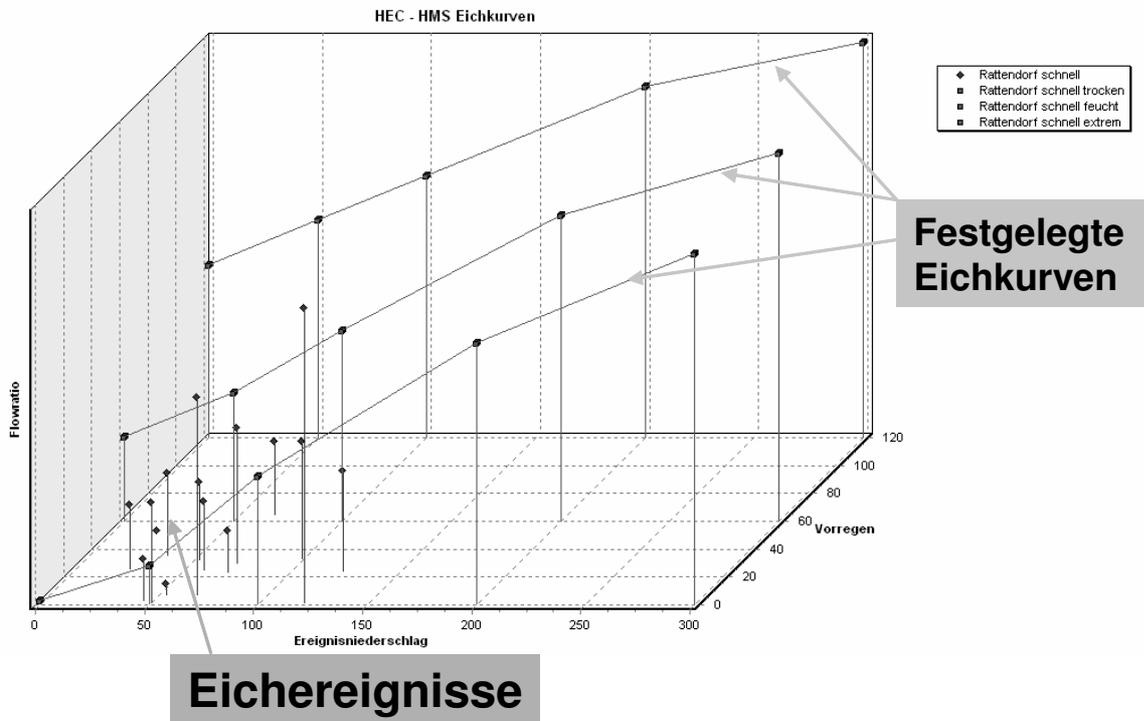


Abb. 12: Flow Ratio – Eichereignisse und Eichkurven.

Im Prognosefall wird durch das Programm zuerst der Vorregen und der Ereignisregen für jedes Teilgebiet ermittelt und daraus wird dann mithilfe der definierten Eichkurven für alle Teilspeicher der aktuelle Flow-Ratio-Wert bestimmt (Abbildung 13).

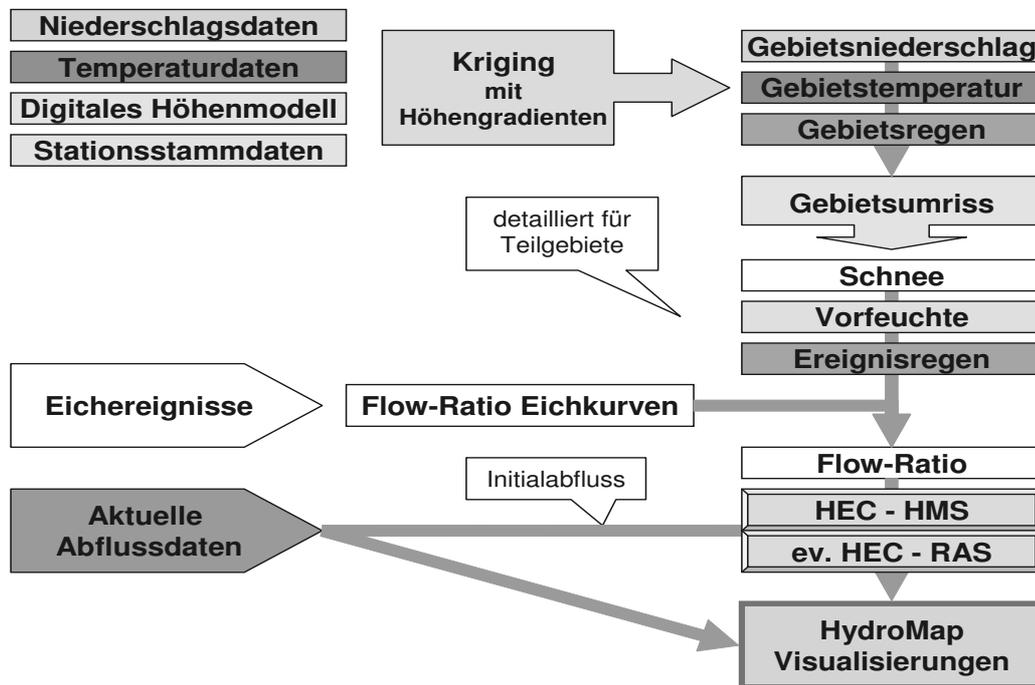


Abb. 13: Ablaufschema NA-Modellierung.

Die Anpassung der Prognoseparameter an die aktuelle Situation erfolgt also automatisch. Trotzdem kann durch manuelle Korrektur der automatisch ermittelten Parameter die Berechnung nachjustiert werden. Die Ergebnisse der Berechnungen können wieder direkt in der Programmoberfläche von HydroMap visualisiert werden.

Durch die Einführung der durch Kriging ermittelten, in Gridform vorliegenden Niederschlagsdaten wurde die NA-Berechnung von der aktuellen Situierung der Niederschlagsstationen unabhängig. Es können ohne Veränderungen am Modell auch Niederschlagsdaten aus Wettermodellen, Niederschlagsverteilungen für Szenarienanalysen oder zukünftig auch aus Radar- oder Nowcasting-Verfahren verwendet werden.

6. Literatur

Pebesma, E.J. und Wesseling, C.G. (1998), Gstat: A program for geostatistical modelling, prediction and simulation. Computers and Geosciences, Vol. 24 (1), Seiten 17-31; (siehe auch: www.gstat.org, Department of Geography at Utrecht University).

Schindler, H. (2006) Modifikation des HEC-HMS Modells im Rahmen der Entwicklung eines Hochwasserprognosemodells. Diplomarbeit am Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Abteilung Ingenieurhydrologie.

Anschrift der Verfasser:

Dipl.-Ing. Johannes Moser
Dipl.-Ing. Christian Kopeinig
Hydrographischer Dienst
Völkermarkter Ring 29, A-9020 Klagenfurt
Tel +43 (0) 50 536-31806
Fax +43 (0) 50 536-31828
Mobil: +43 (0)50 80536-31806
e-mail: johannes.moser@ktn.gv.at
<http://www.wasser.ktn.gv.at>

HOCHWASSERVORHERSAGE FÜR DEN KAMP

Günter Blöschl, Christian Reszler und Jürgen Komma

1. Konzeption

Die Hochwasserentstehung im Einzugsgebiet des Kamp ist im Vergleich zu anderen Einzugsgebieten Österreichs durch einige Besonderheiten gekennzeichnet. Zum einen trägt in der Regel nur ein geringer Anteil des Niederschlages zum Abflussgeschehen bei. Bei großen Niederschlägen ändert sich aber das Abflussverhalten wegen der Änderung des Feuchtezustandes des Gebietes sprunghaft, wodurch Hochwässer entstehen können, die ein Vielfaches des Durchflusses von durchschnittlichen Hochwässern aufweisen. Bei der Hochwasservorhersage für den Kamp wird dieses Verhalten dadurch berücksichtigt, dass der Feuchtezustand der Gebiete kontinuierlich simuliert wird, so dass bei Beginn eines Hochwasserereignisses ein aktueller Wert der Bodenfeuchte für die Prognosen verwendet werden kann. Zum anderen ist das Gebiet des Kamp räumlich sehr heterogen, sowohl in Hinblick auf die Einzugsgebietseigenschaften als auch auf den Niederschlagsinput. Das Zusammenwirken der räumlichen Verteilung von Niederschlag und abflussbeitragenden Flächen beeinflusst die Größe und Form von Hochwasserwellen wesentlich. Bei der Hochwasservorhersage für den Kamp wird dieser Umstand dadurch berücksichtigt, dass ein hydrologisches Vorhersagemodell herangezogen wird, das das unterschiedliche Verhalten von Teilgebieten sowie den Ablauf der Hochwasserwelle im Kamp und den Zubringern beschreibt und Radarinformationen über die räumliche Verteilung des Niederschlages in die Abflussvorhersagen einbezieht.

Die Güte der Vorhersagen unterscheidet sich wesentlich je nach Vorhersagefrist und den damit zweckmäßig einzusetzenden Methoden. Bei der Hochwasservorhersage für den Kamp wird deshalb ein gestufter Vorhersageansatz verwendet (Abb. 1). Die genauesten Vorhersagen sind mittels Wellenablaufmodelle möglich, bei denen der beobachtete Abfluss der Oberliegerpegel als Eingangsdaten verwendet wird. Die damit erzielbare Vorhersagefrist entspricht den Laufzeiten im Gerinne. Das Kampgebiet ist ein eher kleines Gebiet, deshalb betragen die Laufzeiten nur wenige Stunden. Um die Prognosefrist über diese Zeitspanne auf einige Stunden zu verlängern, kommt ein Niederschlag-Abflussmodell zum Einsatz, das beobachtete Niederschläge und Lufttemperaturen als Eingangsdaten verwendet. Eine Verlängerung der Vorhersagefrist auf 48 Stunden wird schließlich durch die Verwendung von Niederschlags- und Lufttemperaturprognosen ermöglicht. Allerdings sind in diesem Fall die Unsicherheiten am größten. Um diese Unsicherheiten abschätzen zu können, werden Ensembleprognosen erstellt, die einen Streubereich der prognostizierten Abflüsse angeben. Im Einzugsgebiet befindet sich die Kraftwerkskette Ottenstein. Um den Einfluss der Kraftwerke auf die Wellenverformung zu beschreiben, wurde eine eigene Simulationsroutine entwickelt.

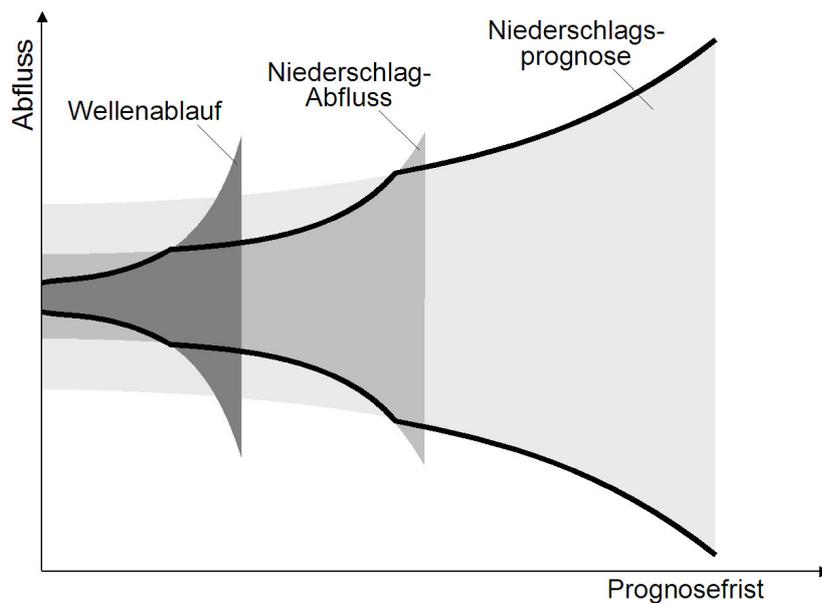


Abb. 1: Gestufter Vorhersageansatz. Die genauesten Vorhersagen sind mittels Wellenablaufmodell unter Verwendung der Abflussdaten am Oberlieger möglich, aber die Prognosefrist ist kurz. Mit einem Niederschlag-Abflussmodell unter Verwendung beobachteter Niederschläge kann die Prognosefrist verlängert werden. Die längsten Prognosefristen sind unter Verwendung prognostizierter Niederschläge möglich, allerdings sind die Prognosen am unschärfsten. Die dicke Linie entspricht der Kombination der Modelle durch den gestuften Vorhersageansatz.

Abb. 2 zeigt das Kampgebiet mit den Prognosestellen des Vorhersagesystems. Die unterste Prognosestelle ist Zöbing am Kamp mit 1550 km² Einzugsgebietsfläche, die anderen Prognosestellen sind Zulauf Ottenstein am Kamp (889 km²), Abgabe Thurnberg am Kamp (1015 km²), Rosenberg am Kamp nach Einmündung der Taffa (1412 km²) und Stiefern am Kamp (1493 km²). Alle Vorhersagen werden über einen Zeitraum von 48 Stunden mit einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten berechnet.

Im operationellen Betrieb dienen als Eingangsdaten ein Raster mit räumlich verteilten Niederschlägen, die von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) durch Interpolation von den in Abb. 2 dargestellten fernübertragenen Stationsdaten unter Zuhilfenahme von Radardaten ermittelt werden. Die prognostizierten Niederschläge werden ebenfalls von der ZAMG aus meteorologischen Prognoserechnungen des European Center for Medium Range Weather Forecast (ECMWF) und der ZAMG abgeleitet. Außerdem werden als Eingangsgrößen Lufttemperaturraaster verwendet (beobachtet und prognostiziert), beobachtete Abflussdaten an den in Abb. 2 dargestellten Pegeln sowie Betriebsdaten der Kraftwerke. Für die Modellentwicklung wurden zahlreiche zusätzliche Beobachtungsstellen verwendet, insbesondere zahlreiche Niederschlagsstationen mit Tageswerten (Abb. 2).

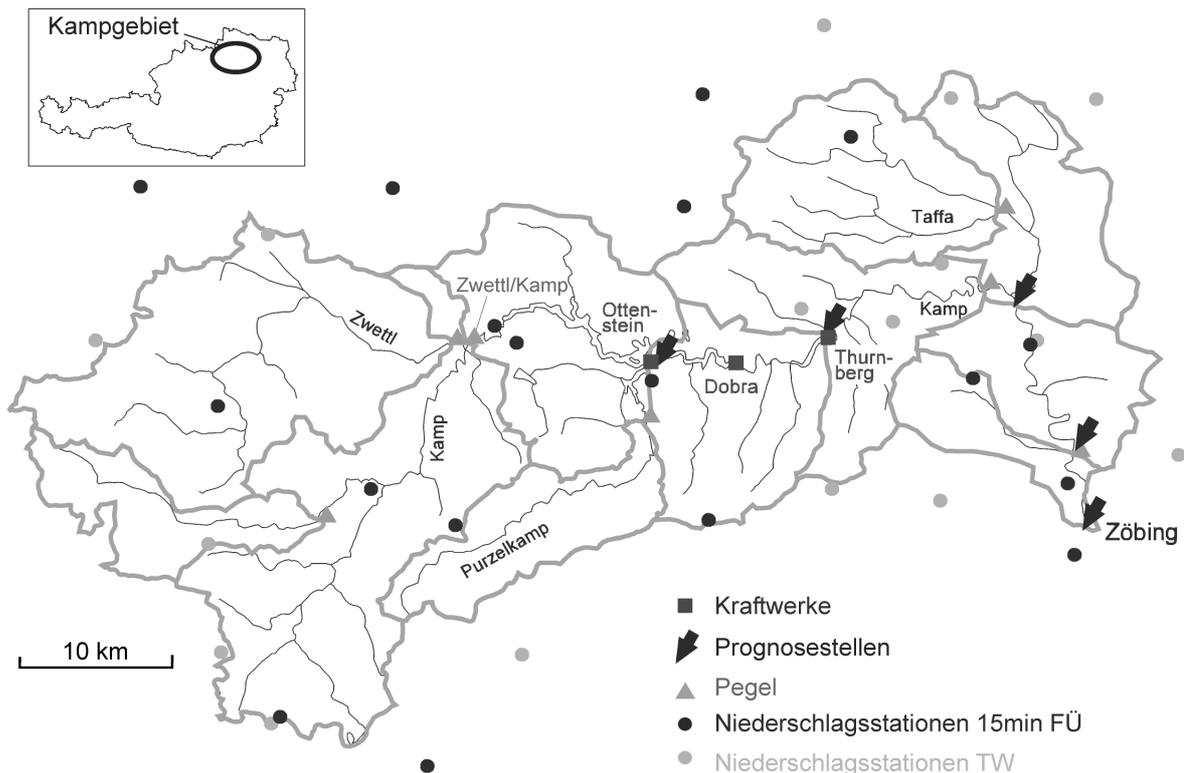


Abb. 2: Kampgebiet mit Prognosestellen. FÜ bedeutet fernübertragene Stationen, TW bedeutet Tageswerte (nicht fernübertragen).

Alle 15 Minuten wird eine Prognose erstellt. Das Vorhersageproblem wurde dabei in drei Teilschritte aufgelöst (Abb. 3). Im ersten als Simulation bezeichneten Teilschritt werden für vergangene Zeitschritte die hydrologischen Kenngrößen im Gebiet berechnet und damit der Systemzustand bestimmt. Zum Systemzustand zählen die Bodenfeuchteverteilung und gegebenenfalls die Schneeverteilung im Gebiet. Ausgehend von diesem Systemzustand zum aktuellen Zeitpunkt wird die Prognose (in die Zukunft) erstellt, wobei zusätzliche Daten wie z.B. die Niederschlagsprognosen einfließen. Schließlich wird das Ergebnis der Prognose durch einen Sachbearbeiter geprüft und weitergeleitet. Die Funktion dieses als Prognosebeauftragten (englisch "Forecaster") bezeichneten Experten ist die Interpretation der Prognoseergebnisse in Hinblick auf vorhandene Erfahrungen und andere nicht im Prognosesystem quantifizierten Informationen. Es handelt sich dabei um einen Bestandteil des Gesamtprognoseprozesses, der in vielen Ländern als essentiell angesehen wird. Doswell (1986) schreibt beispielsweise: "Since machines do not have access to qualitative information, they cannot provide as complete a diagnosis as humans. Further, in humans, the diagnostic and prognostic steps are blurred, allowing qualitative knowledge to influence the forecast as well." Bei der Hochwasservorhersage ist dies ein sehr wichtiger Aspekt, insbesondere wenn außergewöhnliche Ereignisse auftreten.

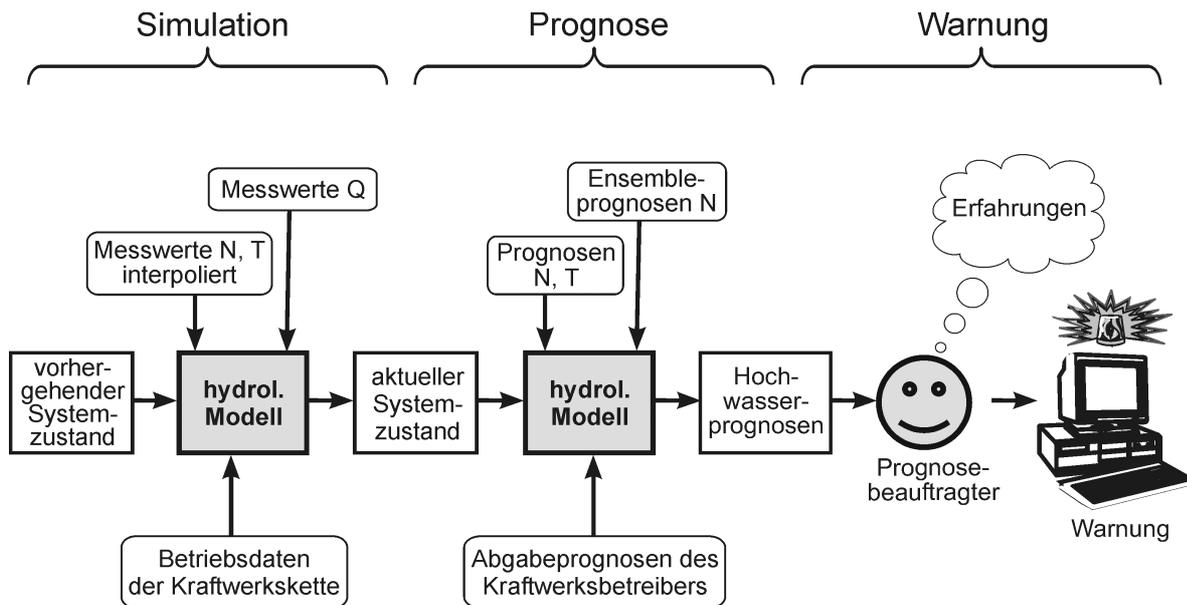


Abb. 3: Ablaufschema der Hochwasservorhersage für den Kamp. N ist der Niederschlag, T die Lufttemperatur und Q der Abfluss.

2. Abflussmodell

Das Kampgebiet wurde in 13 Teilgebiete gegliedert, in denen die Abflussbildung im 1 km Quadratraster berechnet wird. Die Teilgebiete sind durch 10 Wellenablaufstrecken verbunden, und das hydraulische Verhalten der Kraftwerke wird durch drei Kraftwerksmodule beschrieben (Abb. 4).

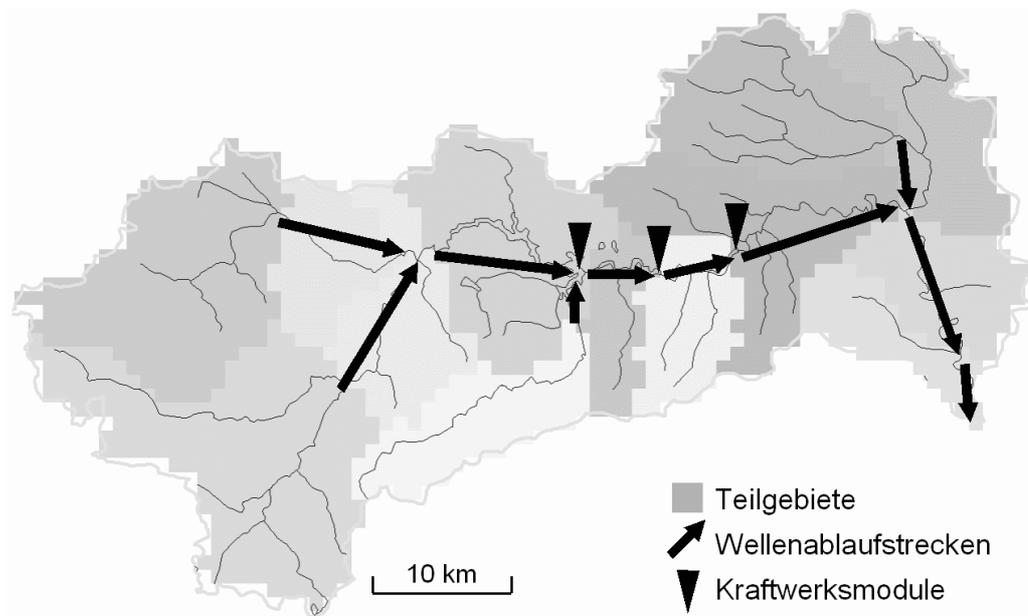


Abb. 4: Modellkomponenten des Vorhersagemodells Kamp: 13 Teilgebiete in denen die Abflussbildung im 1km Quadratraster berechnet wird; 10 Wellenablaufstrecken (Pfeile); 3 Kraftwerksmodule (Dreiecke).

Der Vorteil eines derartigen flächendifferenzierten Abflussmodells besteht darin, die räumlich unterschiedlichen Niederschlags- und Abflussbildungsverhältnisse berücksichtigen zu können. Allerdings benötigen solche Modelle für jedes Rechenelement eine große Zahl von Modellparametern. Werden die Modellparameter nicht passend gewählt, sondern etwa Standardwerte auf Basis von Boden-, Gelände- und Landnutzungskarten verwendet, so sind die Simulationen mit solchen Modellen in der Regel ungenauer als solche, die mit traditionellen ingenieurhydrologischen Systemansätzen erzielt werden können (Grayson und Blöschl, 2000). Der Kernpunkt für die Eignung des Modells ist, ob die hydrologische Dynamik im jeweiligen Gebiet treffend beschrieben wird, und dafür sind Informationen über eben diese Dynamik im jeweiligen Gebiet notwendig (Blöschl, 2005). Für die Erstellung des vorliegenden Vorhersagemodells wurde deshalb eine Vorgangsweise entwickelt, die sich von der herkömmlichen Verwendung von Standardwerten für flächendifferenzierte Modelle im Grundsatz unterscheidet (Reszler et al., 2006a). Die zugrundeliegende Philosophie der Parameter- und Modellidentifikation besteht darin, in detektivischer Arbeit alle zugänglichen Belege für das hydrologische Verhalten zu sammeln und daraus eine Modellvorstellung über die Funktion des hydrologischen Systems für unterschiedliche Situationen abzuleiten. Die Belege unterscheiden sich nach dem zu beschreibenden Prozess.

Die Abflussbildung wird für jedes Rasterelement durch einen konzeptionellen Bodenfeuchteansatz beschrieben, der an eine Variante des HBV-Modells (Parajka et al., 2005) angelehnt ist. Die Parameter- und Modellidentifikation besteht aus fünf Schritten, die in Reszler et al. (2006a) im Detail angeführt sind:

- Schritt 1: Setzen von a priori Parameterwerten
- Schritt 2: Feinabstimmung der räumlichen Muster durch spektrale Entmischung
- Schritt 3: Parametereichung (Feinabstimmung)
- Schritt 4: Feinabstimmung der Modellstruktur
- Schritt 5: Plausibilitätskontrolle der simulierten räumlichen Muster

Die a priori Parameterwerte für jedes Pixel wurden manuell festgelegt auf Basis von Voranalysen von beobachteten Abfluss- und Grundwasserganglinien und Feldbegehungen. Die Abflusssimulationen wurden in den einzelnen Schritten mit den Abflussbeobachtungen verglichen, wobei die Dynamik des Abflusses differenziert betrachtet wurde. Eine Analyse auf Basis der jahreszeitlichen Variabilität ergab Belege für die Größe der Verdunstungsparameter, der Perkulationsparameter und der langsamen Grundwasserparameter. Im Zusammenhang mit der Hochwasservorhersage ist die saisonale Dynamik wichtig, um die Anfangsbedingungen für die Prognose möglichst gut zu bestimmen, insbesondere die Bodenfeuchteverteilung im Gebiet, aber auch gegebenenfalls die Schneeverteilung (Abb. 5). Eine Analyse der Wellenform und des Wellenvolumens auf Ereignisbasis ergab Belege für das Verhalten der rascher reagierenden Systemkomponenten und den damit zusammenhängenden Modellparametern bzw. Modellkomponenten (Abb. 6). Dabei wurde nach Ereignisgrößen und Ereignistypen unterschieden. Synoptische (großräumige) und konvektive (kleinräumige) Ereignisse, Schneeschmelz- und Regen-auf-Schnee Ereignisse besitzen eine

unterschiedliche Abflussdynamik. Diese getrennt zu betrachten ist wichtig, um mit dem Modell möglichst gut unterschiedliche hydrologische Situationen zu beschreiben. Diese Vorgangsweise unterscheidet sich vollkommen von der manchmal angewandten Minimierung einer Zielfunktion, bei der eine derartige Differenzierung nicht möglich ist und demnach eine passende Beschreibung unterschiedlicher Situationen nicht im gleichen Ausmaß zu erwarten ist. Im Zuge der Modellidentifikation wurden auch Modellkomponenten an die Situation im Kampfgebiet angepasst. So wurde beispielsweise in Schritt 5 ein Bypass in die Modellstruktur eingeführt, der eine schnelle Entwässerung der obersten Bodenschicht während eines Ereignisses zufolge Perkolation in den geklüfteten Fels wiedergibt. Die Plausibilität des Modells wurde durch eine Beurteilung der simulierten räumlichen Muster getestet. So wurde etwa die Plausibilität der räumlichen Verteilung des Oberflächenabflusses für unterschiedliche Situationen beurteilt im Vergleich zur Auskunft von Ortskundigen, die räumliche Verteilung der Bodenfeuchte im Vergleich zu Feldbegehungen und die räumliche Schneeverteilung im Vergleich zu Schneehöhendaten und Schneemustern (Parajka et al., 2006).

Als Modell für den Wellenablauf wurde eine lineare Speicherkaskade mit durchflussabhängigen Parametern gewählt, die rechentechnisch sehr effizient ist und somit die Anwendung der Nachführalgorithmen und die Erstellung der Ensembleprognosen erleichtert. Die geringe Anzahl der Parameter erleichtert auch deren Bestimmung auf Basis von Belegen. Im ersten Schritt wurden vorläufige Parameterwerte für jede Wellenablaufstrecke gewählt. Dies erfolgte durch Beurteilung der topographischen Gegebenheiten (Fließlänge, -gefälle, Ausuferungsflächen, etc.) auf Basis von Querprofilen, Begehungen, Photos und Gesprächen mit Ortskundigen. Im zweiten Schritt wurden Pegeldata für unterschiedlich große Ereignisse ausgewertet und daraus die Modellparameter rückgerechnet. Im dritten Schritt wurden die Modellparameter angeeicht an Ergebnisse von instationären zweidimensionalen hydrodynamischen Simulationen. Die Vorteile dieser Vorgangsweise bestehen darin, dass die Funktion des Systems (in diesem Fall durchflussabhängige Wellenverformung, etwa durch Ausuferung) beschrieben werden kann, ohne die numerisch aufwendigen hydrodynamischen Berechnungen im Vorhersagesystem durchführen zu müssen, sowie aus einer Plausibilitätsprüfung der Parameter. Aus einer Kombination der o.a. Belege ergibt sich für jeden Gewässerabschnitt eine Beziehung zwischen Modellparameter und Durchfluss, die dem Vorhersagesystem zugrundegelegt wird. Abb. 7 zeigt ein Beispiel für die Anpassung des Wellenablaufmodells an die Ergebnisse der hydrodynamischen Modellierung für die Teilstrecke zwischen Rosenberg und Stiefen.

Die Modellerstellung auf Basis von Belegen erfordert einen großen Arbeitsaufwand. Dieser Arbeitsaufwand besteht nicht in der Durchführung zahlreicher Simulationen und Minimierung einer Zielfunktion, sondern in einer detaillierten hydrologischen Interpretation und Argumentation der Konzeptionen. Vorwissen über die Eigenschaften hydrologischer Prozesse ist dafür Voraussetzung. Dieser Einsatz wird als notwendig erachtet, um die Modellstruktur und Modellparameter in einer plausiblen Weise zu bestimmen und damit ein für unterschiedliche Situationen zutreffendes Modell zu erhalten.

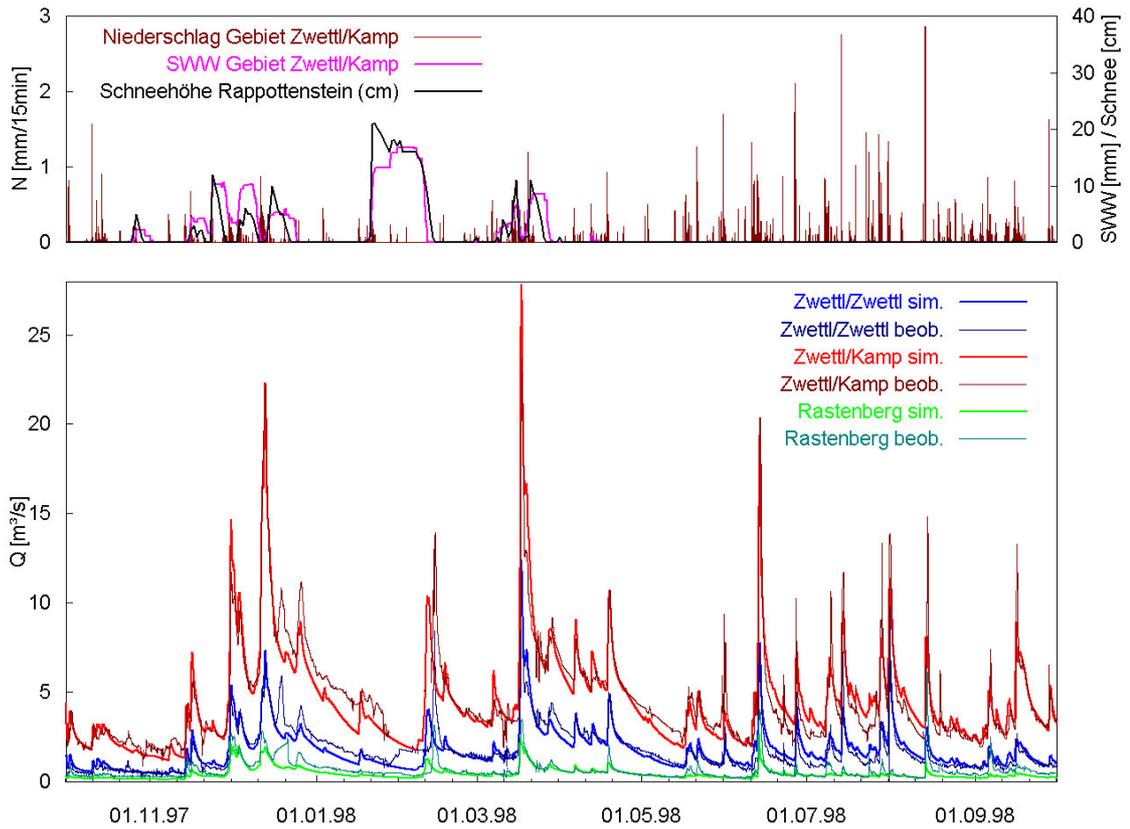


Abb. 5: Abflusssimulationen zur Identifikation der Modellstruktur, die die saisonale Dynamik betrifft. Oktober 1997 bis Oktober 1998 für drei Pegel im oberen Kampgebiet.

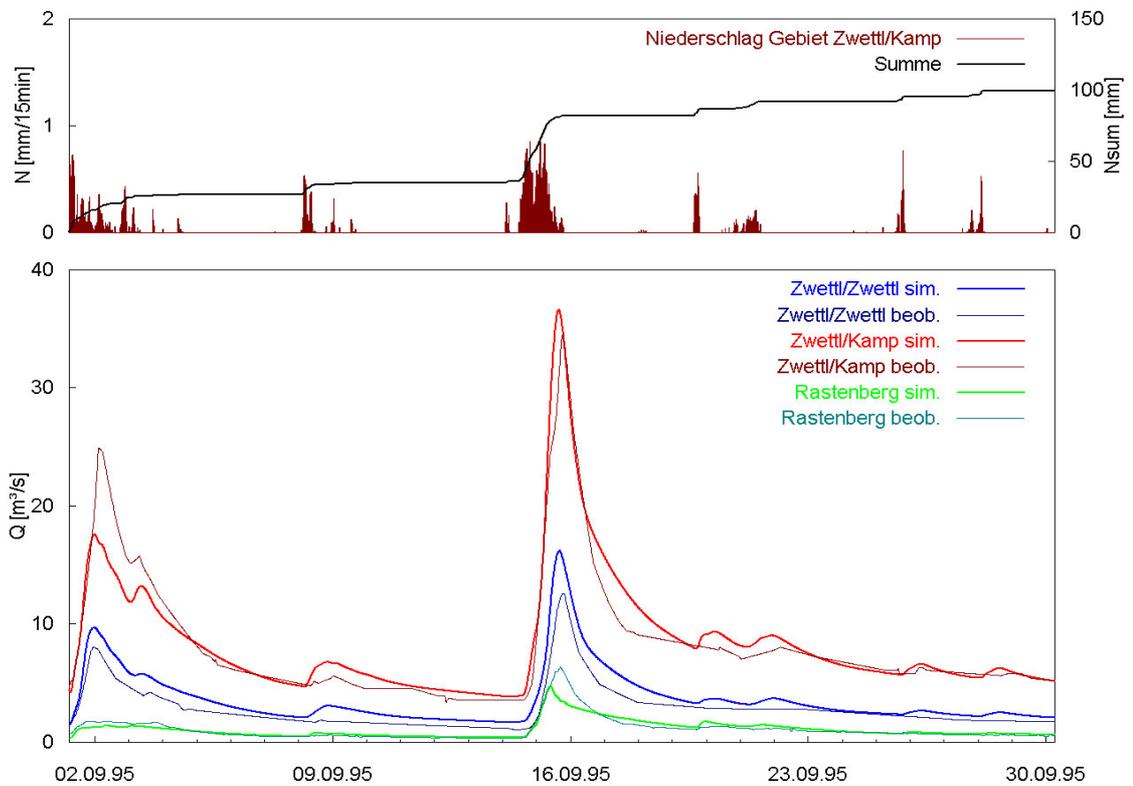


Abb. 6: Abflusssimulationen zur Identifikation der Modellstruktur, die die Dynamik von Einzelereignissen betrifft. September 1995 für drei Pegel im oberen Kampgebiet.

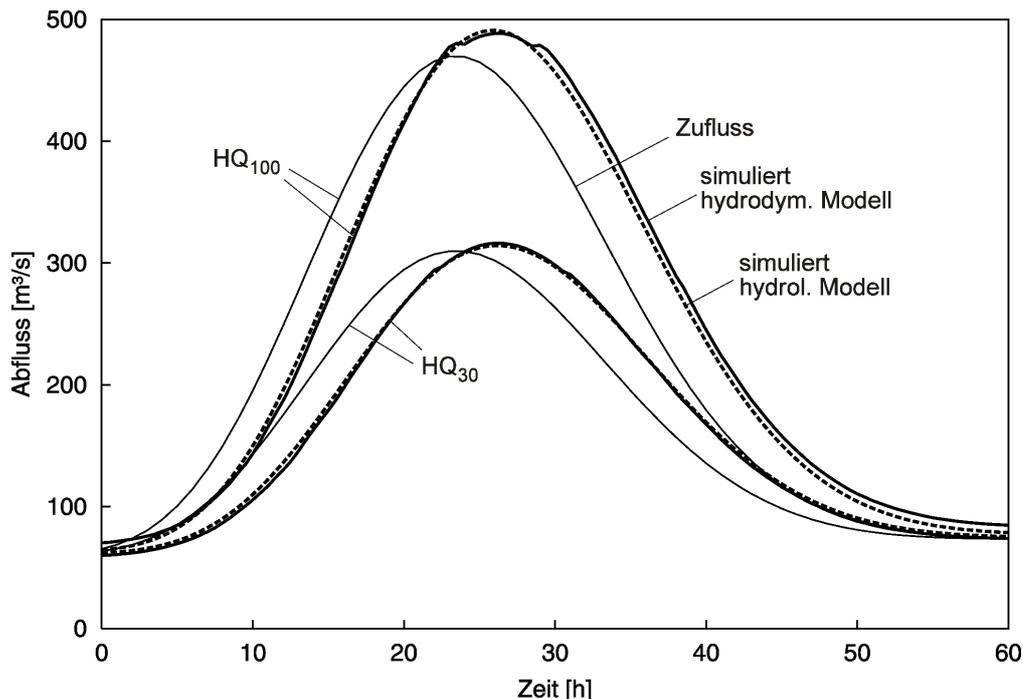


Abb. 7: Anpassung des Wellenablaufmodells (strichlierte Linie) an die Ergebnisse der hydrodynamischen Modellierung (dicke durchgezogene Linie) für die Teilstrecke zwischen Rosenberg und Stiefern (HQ₃₀ und HQ₁₀₀).

3. Nachführung

Ziel der Hochwasservorhersagen ist es, für alle Prognosefristen die Unsicherheiten möglichst klein zu halten. Es wurden deshalb zwei Nachführalgorithmen eingesetzt, um die Unsicherheiten weiter zu reduzieren. Der erste Algorithmus (Komma et al., 2006a) führt den Bodenfeuchtezustand des Gebietes nach. Im Kampgebiet hängen die Abflussbeiwerte sehr stark von der Vorbefeuchtung ab. Wird diese Vorbefeuchtung durch eine systematische Über- oder Unterschätzung der Verdunstung bzw. des Niederschlages im Modell ungenau abgebildet, sind entsprechende Fehler in der Abflussprognose zu erwarten. Der aktuelle Abfluss ist ein ausgezeichneter Indikator für den Bodenfeuchtezustand des Gebietes und deshalb sollte es möglich sein, durch Verwendung aktueller Abflussdaten die Abflussprognosen zu verbessern. Ein in der Wasserwirtschaft für derartige Zwecke häufig verwendetes Verfahren ist der Kalman Filter (Schilling, 1987). Dieser besteht aus einer Wichtung von Beobachtung und Simulation, wobei das dafür notwendige Kalmangewicht aus den Messvarianzen und Modellvarianzen (d.h. angenommenen Messfehlern und Modellfehlern) ermittelt wird. Die ursprüngliche Form des Kalman Filters ist für lineare Modelle geeignet. Für nicht-lineare Modelle wurden in der Literatur verschiedene Erweiterungen vorgeschlagen, wie etwa der Erweiterte Kalman Filter und der Ensemble Kalman Filter. Die Vorteile des Ensemble Kalman Filters (EnKF) (Evensen, 1994) bestehen darin, dass keine Linearisierung notwendig ist und der Algorithmus durch die Vorwärtsrechnung stabil ist. Für die Hochwasserprognosen am Kamp wurde der Ensemble Kalman Filter herangezogen. Als Messunsicherheit wurde dabei die Unsicherheit in den Abflussdaten angesetzt. Als Modellunsicherheit wurde die Unsicherheit im Input (Nieder-

schlag, Verdunstung) und dessen Auswirkung auf die Bodenfeuchte angesetzt. Im Ensemble Kalman Filter erfolgt die Berechnung des Kalmangewichts durch zahlreiche interne Simulationen (d.h. ein Ensemble), die sich durch kleine Differenzen im Niederschlagsinput (Perturbationen) unterscheiden. Zur Aktualisierung der Bodenfeuchte wurde ein Ähnlichkeitsansatz gewählt, der die Bodenfeuchte mit dem geschätzten Abfluss in Übereinstimmung bringt. Im Gegensatz zu anderen Nachführalgorithmen mit Hilfe des Abflusses (z.B. Schilling, 1987) wird im vorliegenden Ansatz nicht die Abflussbildung während des Ereignisses nachgeführt, sondern die Entwicklung der Bodenfeuchte zwischen den Ereignissen. Die Wirkungsweise des Ensemble Kalman Filters für das Kampmodell ist in Abb. 8 dargestellt. Zwei Simulationsläufe wurden durchgeführt, die mit den gleichen Anfangsbedingungen der Bodenfeuchte gestartet wurden, die zu Testzwecken auf vollständig trocken gesetzt wurde. Im ersten Simulationslauf ohne Nachführung (rote Linien in Abb. 8) ist deshalb die relative Bodenfeuchte während des gesamten Simulationszeitraumes klein und durch die Unterschätzung der Bodenfeuchte wird auch der Abfluss unterschätzt. Im zweiten Simulationslauf mit Nachführung (grüne Linien in Abb. 8) interpretiert der Ensemble Kalman Filter die Differenz zwischen simuliertem Abfluss und beobachtetem Abfluss im Juli und Anfang August 2002 als Fehler im Niederschlag und Verdunstung. Die Verdunstung wird rechnerisch verkleinert (bzw. der Niederschlag vergrößert), dadurch steigt die Bodenfeuchte stärker an. Die Anfangsbedingungen für das Ereignis am 8. August werden dann besser geschätzt als ohne Nachführung und damit ist zu erwarten, dass auch das Ereignis selbst genauer prognostiziert wird.

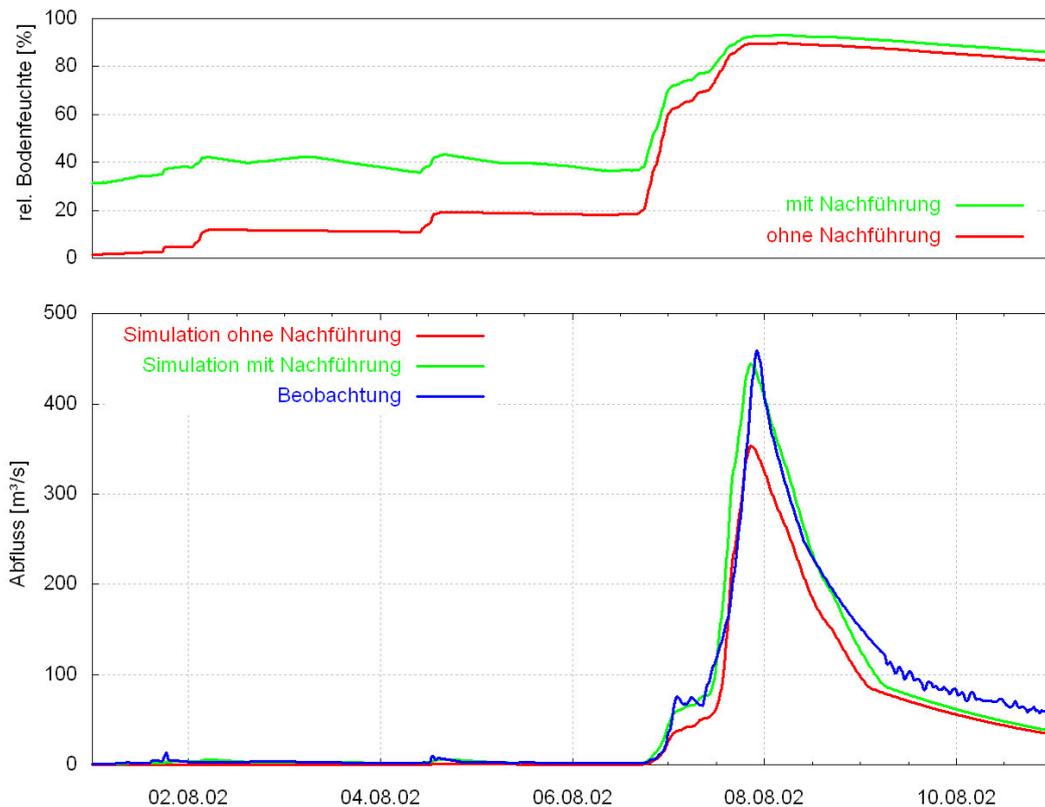


Abb. 8: Wirkungsweise des Ensemble Kalman Filters für den Pegel Zwettl/Kamp (622 km² Einzugsgebietsfläche).

Der zweite Nachführalgorithmus besteht aus einem additiven statistischen Fehlermodell, das die Autokorrelation der Abflussprognosefehler ausnützt. Die statistischen Eigenschaften des Fehlers unterscheiden sich stark je nach hydrologischer Situation. Im Bereich des Anstieges und des Scheitels von Abflusswellen dominieren die raschen Abflusskomponenten und die raum-zeitliche Dynamik des Niederschlages. Die Fehler sind deshalb nur über wenige Stunden korreliert. Bei Trockenwetterabfluss bzw. im Auslaufbereich von Abflusswellen dominieren die langsamen Abflussanteile aus den unteren Bodenschichten, welche einer geringeren zeitlichen und räumlichen Dynamik unterliegen. Dadurch ergibt sich eine zeitlich gleichmäßigere Fehlerstruktur und damit eine längere Autokorrelation. Die passende Autokorrelationslänge wurde für die Vorhersage als eine Funktion des Gebietsniederschlages des jeweiligen Gebietes und der Zeit seit diesem Niederschlag angesetzt. Dadurch war es möglich, die statistische Fehlerstruktur je nach hydrologischer Situation zu unterscheiden. Mit Hilfe eines autoregressiven Fehlermodells (AR1 Modell) wird der Abfluss auf Basis der Differenz zwischen beobachtetem und simuliertem Abfluss nachgeführt.

Die beiden Nachführalgorithmen arbeiten auf unterschiedlichen Zeitskalen – Wochen im Falle des Ensemble Kalman Filters und Stunden im Falle des additiven statistischen Fehlermodells. Daher war eine Kombination der beiden Nachführalgorithmen sinnvoll.

4. Kraftwerkssimulation

Die westliche Hälfte des Kampgebietes entwässert in die Kraftwerkskette Kamp der EVN-AG mit den Kraftwerken Ottenstein, Dobra und Thurnberg. Der gesamte Nutzhalt der Kette beträgt 72 Mil. m³. Deshalb kann sich die von der Kette abgegebene Wellenform des Abflusses von der Zulaufwelle deutlich unterscheiden. Im Rahmen des Hochwasservorhersagesystems geben die Betreiber eine geplante Abgabe über die nächsten 48 Stunden bekannt. Diese wird in einer Variante des Vorhersagesystems mittels des Wellenablaufmodells auf die Vorhersagestellen des Unteren Kamp transformiert. Parallel dazu werden die zukünftigen Regelungsmaßnahmen und damit die Verformung der Hochwasserwelle durch die Kraftwerkskette im Vorhersageverfahren simuliert. Dies ist vor allem deshalb notwendig, um den Einfluss der Kraftwerkskette auf die Vorhersageunsicherheit im Rahmen der Ensembleprognosen zu beschreiben.

Die Kraftwerkssimulation emuliert das Verhalten eines Betriebsführenden in Hinblick auf die Durchflussabgabe (Turbinen, Klappen, Schützen). Der Kraftwerksmodul verwendet hierarchische Regeln, die als Funktion der Zustandsgrößen der drei Speicher und der Zuflussprognose formuliert sind. Vier Typen von Regeln werden unterschieden: (a) Schönwetterregeln, bei denen keine Änderungen der Steuerungsoperationen simuliert werden, da der Zufluss klein ist; (b) Freies-Volumen-Regeln, bei denen ebenfalls keine Änderungen simuliert werden, da das freie Speichervolumen groß ist; (c) Vorabsenk-Regeln, bei denen der Speicher rechnerisch vor dem Ereignis abgesenkt wird, ohne die für den Regelfall zulässige Abgabe zu überschreiten; (d) Schlechtwetterregeln, bei denen die Steuerung von Klappen bzw. Schützen auf Basis eines Optimierungsalgorithmus simuliert wird. Die Optimalitätskriterien für diesen Fall sind: Abgabe womöglich über Turbinen und Senken und Heben von Klappen

bzw. Schützen, sodass ein maximaler Wasserstand innerhalb der Prognosefrist womöglich nicht überschritten wird und die Speicher nach dem Ereignis möglichst voll sind.

Die Regeln wurden in einer iterativen Vorgangsweise ermittelt, in die der Kraftwerksbetreiber eingebunden war. Im ersten Schritt wurden vorläufige Regeln aufgestellt auf Basis der bisher praktizierten Betriebsführung im Hochwasserfall. Zu diesen Regeln wurden Beispielsrechnungen durchgeführt unter Verwendung der prognostizierten Zuflüsse zur Speicherkette und deren Unsicherheit. Im zweiten Schritt wurden diese Beispiele mit den Betreibern diskutiert, um die Frage zu beantworten, ob der Betreiber bei Vorliegen einer Prognose die Verschlussorgane ähnlich der Simulation gesteuert hätte. Im dritten Schritt wurden die Regeln der Einschätzung der Betreiber angepasst. Die Schritte wurden wiederholt bis eine Übereinstimmung mit der Einschätzung des Betreibers erzielt wurde. Das Modell wurde also angeeicht an den gefahrenen Betrieb in der Vergangenheit, sowie an die Einschätzung der Betriebsführung bei hypothetischen Szenarien. Dies bietet auch die Möglichkeit des Trainings anhand von Szenarien unterschiedlicher meteorologischer und hydrologischer Situationen. Das Einbinden des Betriebspersonals besaß den zusätzlichen Vorteil, dessen Vertrauen in das Vorhersagesystem zu erhöhen. Als Beispiel zeigt Abb. 9 die Simulationen für ein beobachtetes Hochwasserereignis am Speicher Ottenstein, bei dem die Hochwasserentlastung über Klappen ausgebildet ist. Liegt der Wasserspiegel oberhalb der Oberkante der Klappen, wird über die Klappen Wasser abgegeben.

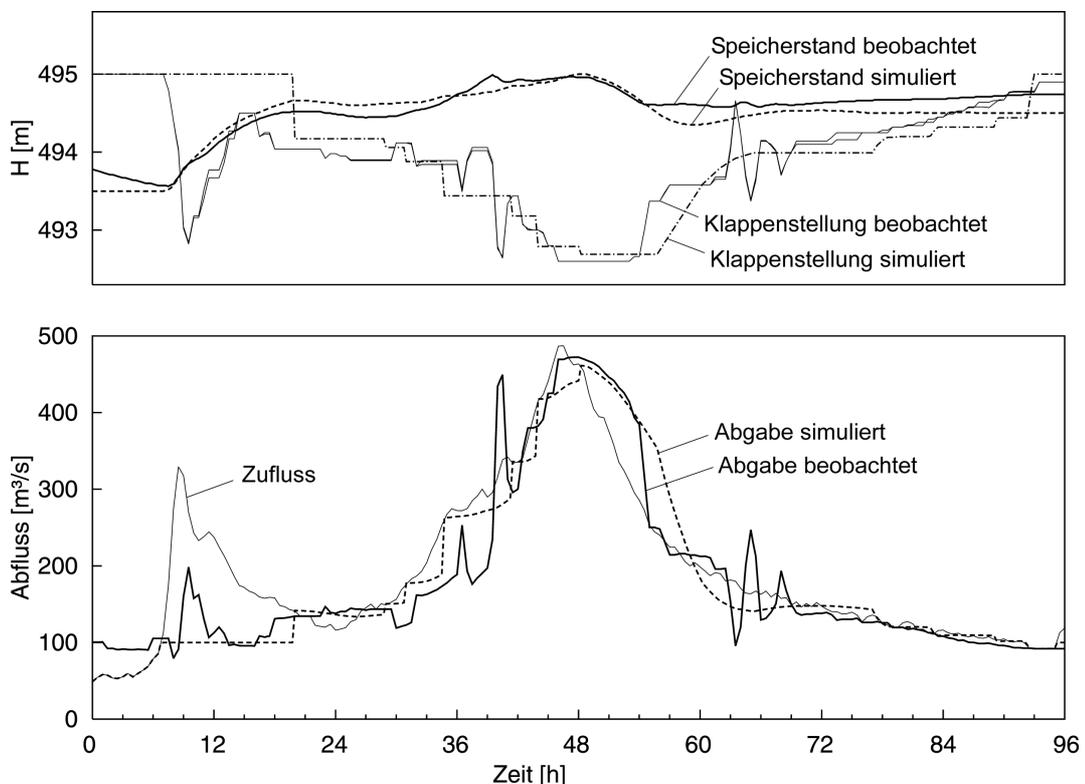


Abb. 9: Simulation der Steuerung des Speichers Ottenstein für ein aufgetretenes Hochwasserereignis. Der obere Teil der Abbildung zeigt die Klappenstellungen (Niveau der Oberkante der Klappen) und den Wasserspiegel. Der untere Teil der Abbildung zeigt den Zufluss zum Speicher Ottenstein und die Abgabe.

Im Diagramm ist eine gute Übereinstimmung zwischen den simulierten und tatsächlichen Klappenstellungen erkennbar. Lediglich am Beginn des Ereignisses schlägt das Simulationsmodell ein späteres Senken der Klappen vor. Reszler et al. (2006b) beschreiben die Methode der Kraftwerksimulationen im Detail.

5. Vorhersage der Vorhersagegenauigkeit

Um den Beitrag der einzelnen Modellkomponenten zur Prognosegüte zu testen, wurden umfangreiche Tests durchgeführt. Da es sich um ein Hochwasservorhersagemodell handelt, sind vor allem die Fehler bei Hochwässern von Interesse und nicht so sehr die Fehler im Nieder- und Mittelwasserbereich. Als Beispiel zeigt Abb. 10 die mittleren absoluten normierten Fehler für fünf große Ereignisse am Pegel Zwettl/Kamp (622 km²), unterschieden nach einer Auswertung über die Dauer des gesamten Hochwasserereignisses (Abb. 10 links) und über den Bereich des Wellenanstieges bis kurz nach dem Scheitel (Abb. 10 rechts). Vier Berechnungsvarianten wurden analysiert. In der ersten Variante (strichlierte Linie in Abb. 10) wurde der zukünftige Niederschlag als bekannt angenommen und die Anfangsbedingungen der Bodenfeuchte wurden nicht nachgeführt. Die mittleren Fehler für die gesamten Ereignisse betragen etwa 15 % und sind kaum von der Prognosefrist abhängig. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es sich in dieser Variante um ein Simulationsproblem (und kein Prognoseproblem) handelt. In der zweiten Variante (dünne durchgezogene Linie in Abb. 10) wurden die Anfangsbedingungen der Bodenfeuchte mittels des Ensemble Kalman Filters nachgeführt, ebenfalls unter Annahme eines zukünftig bekannten Niederschlages. Durch die Nachführung werden die Fehler reduziert und es ist erkennbar, dass dies vor allem für die kürzeren Prognosefristen der Fall ist, die näher am nachgeführten Zeitpunkt liegen. Werden darüber hinausgehend die Vorhersagen mit dem statistischen Fehlermodell korrigiert (punktierte Linie in Abb. 10) tritt eine weitere Verbesserung ein, allerdings nur im Bereich von weniger als sechs Stunden. Dies entspricht etwa der Autokorrelationslänge der Fehler im Hochwasserfall. In der vierten Variante wurden schließlich die beiden Nachführungen in der gleichen Weise eingesetzt, allerdings wurde der zukünftige Niederschlag nicht als bekannt angenommen, sondern die Niederschlagsprognosen verwendet (dicke durchgezogene Linie in Abb. 10). Für die ersten Stunden sind die Fehler identisch mit der vorhergehenden Variante, da die Prognosen vor allem durch den bereits gefallenem Niederschlag bestimmt sind. Für größere Prognosefristen steigt hingegen der Fehler deutlich an. Dies ist auf die Unsicherheit des prognostizierten Niederschlages zurückzuführen. Die Fehler sind auch wegen des gestuften Vorhersageansatzes (Abb. 1) stark von der Prognosefrist abhängig. Für eine kurze Vorhersagefrist sind die Fehler klein, da die Wellenablaufmodelle am genauesten sind und die Nachführalgorithmen zusätzlich die Genauigkeit erhöhen. Abb. 10 rechts zeigt analoge Auswertungen allerdings nur für den Anstiegsbereich der Hochwässer. Grundsätzlich ist das Verhalten der Fehler ähnlich wie für das gesamte Ereignis, allerdings sind die Fehler betragsmäßig größer, insbesondere für die Variante der prognostizierten Niederschläge, die für die operationellen Prognosen maßgebend ist. Die größeren Fehler sind darauf zurückzuführen, dass sich im Anstiegsbereich der Welle die Unsicherheiten im Niederschlag stärker auswirken als sonst.

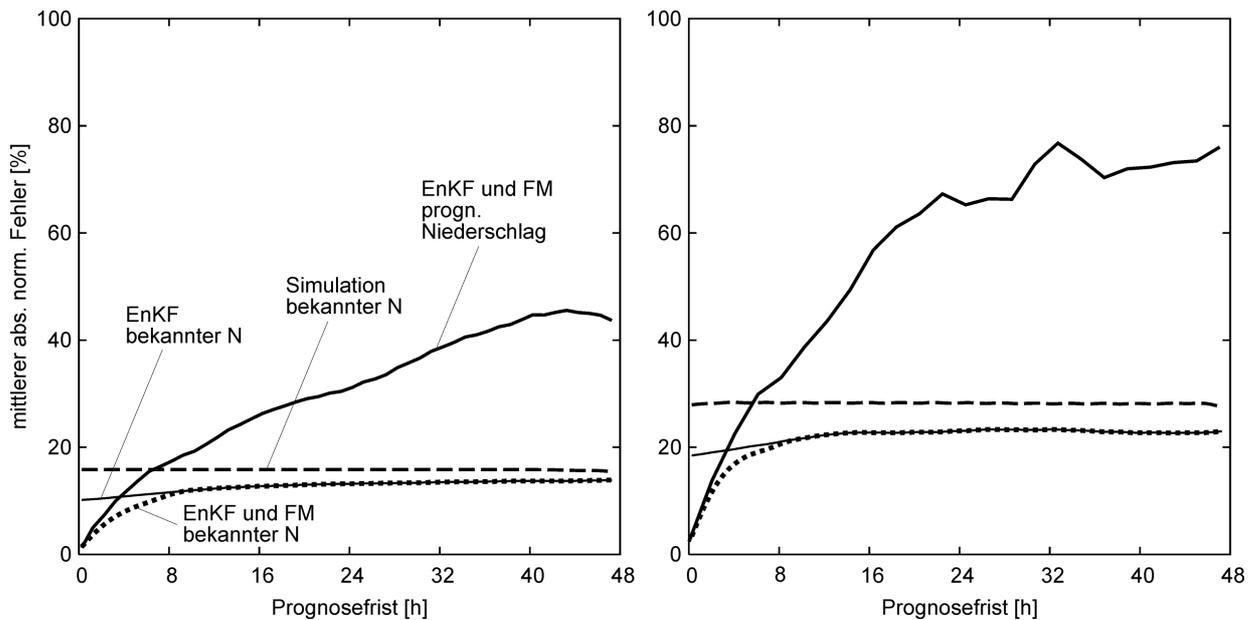


Abb. 10: Genauigkeit der Hochwasservorhersage für den Pegel Zwettl/Kamp (622 km²) für unterschiedliche Modellkomponenten ausgewertet für fünf große Hochwasserereignisse im Zeitraum 2002-2005. Links: Fehler über das gesamte Ereignis. Rechts: Fehler nur für den Anstieg der Hochwasserwelle.

Die Durchführung von Ensembleprognosen erlaubt es nun, die auf den prognostizierten Niederschlag zurückzuführenden Unsicherheiten im Prognosefall zu erfassen. Die Grundidee ist dabei, dass die Unsicherheit der Hochwasservorhersagen je nach meteorologischer Situation sehr unterschiedlich sein kann, auch wenn die deterministische Vorhersage ähnlich ist. Bei einer stabilen meteorologischen Situation ist auszuschließen, dass es in der unmittelbaren Zukunft zu starken Regenfällen kommt. Bei einer labilen Situation zeigt die deterministische Prognose vielleicht auch keine Niederschläge an, die Wahrscheinlichkeit starker Regenfälle kann jedoch groß sein. Das European Center for Medium Range Weather Forecast (ECMWF) erstellt neben den deterministischen Wettervorhersagen auch Ensemblevorhersagen, die aus 50 unterschiedlichen Prognoseläufen bestehen. Die Prognoseläufe unterscheiden sich durch die Anfangsbedingungen, die ein wesentlicher Grund für die Unsicherheit in den Wetterprognosen sind. Jeder dieser 50 Prognosen beschreibt eine mögliche Entwicklung des Wettergeschehens über die Prognoseperiode. Für die Hochwasservorhersage am Kamp werden diese 50 Prognoseläufe mit den Vorhersagen der ZAMG kombiniert (Komma et al., 2006b) wodurch sich 50 mögliche Niederschlagsfelder für das Kampgebiet ergeben. Diese Niederschlagsfelder werden jeweils als Eingangsgröße in das Abflussmodell verwendet. Als Anfangsbedingung wird dafür der aktuelle Systemzustand des Gebietes (Bodenfeuchte, Schnee, ..) der letzten deterministischen Simulation verwendet. Diese 50 Niederschlagsfelder führen zu 50 Abflussprognosen an jeder Vorhersagestelle. Ausgewertet werden schließlich die Quantile dieser Abflüsse unter der Annahme, dass jede der Simulationen gleich wahrscheinlich ist. Diese Quantile werden als 10% und 90% Vertrauensbänder dargestellt. Abb. 11 zeigt ein Beispiel dieser Ensemblevorhersagen. Für eine kurze Prognosefrist ist der Ver-

trauensbereich eng und nimmt mit zunehmender Prognosefrist stark zu. Dies entspricht auch der Zunahme der Vorhersagefehler wie in Abb. 10 gezeigt. Für stabile Wetter-situationen ist hingegen der Vertrauensbereich über die ganze Prognosefrist von 48 Stunden eng und lässt den Schluss zu, dass in diesem Zeitraum nicht mit einem Hochwasser zu rechnen ist.

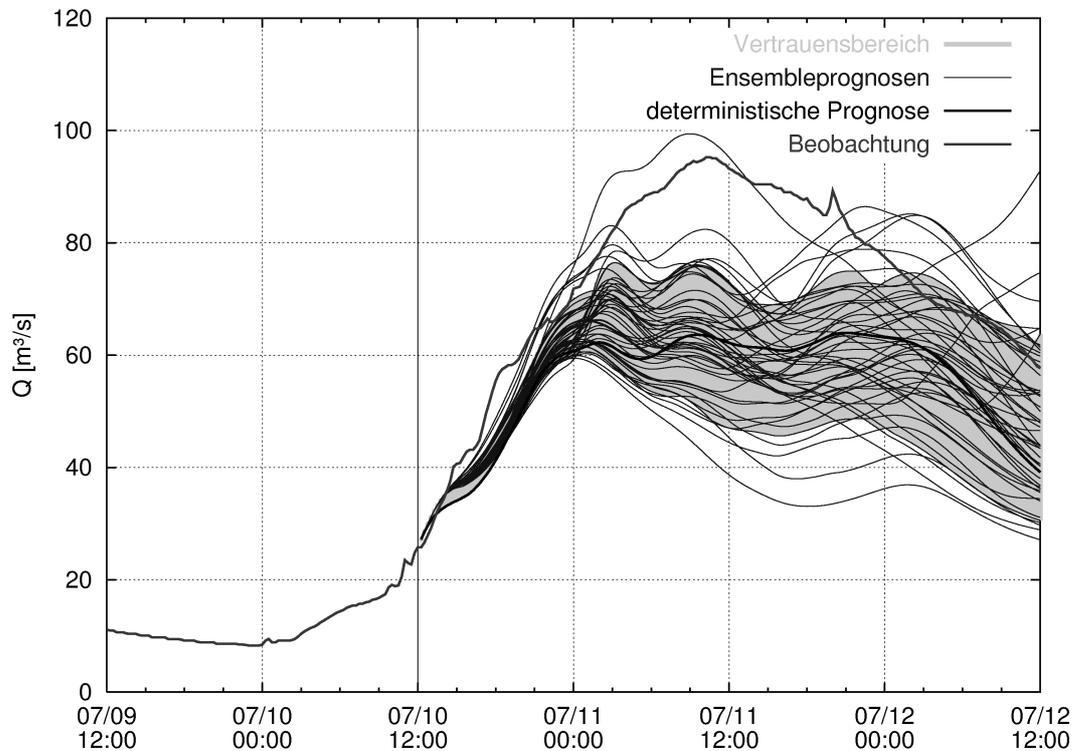


Abb. 11: Ensemblevorhersagen des Abflusses im Juli 2005 für den Pegel Zwettl am Kamp (622 km²).

6. Zusammenfassung und Implikationen für den operationellen Betrieb

Die spezielle Situation am Kamp stellte eine besondere Herausforderung für die hydrologische Modellbildung dar. Zum einen kommt im Kampgebiet nur ein kleiner Teil des Niederschlages zum Abfluss, und deswegen tritt eine starke Nichtlinearität in der Niederschlag-Abflussbeziehung auf. Kleine Änderungen des Niederschlages führen zu großen Änderungen des Abflusses. Unsicherheiten verstärken sich dadurch. Zum anderen sind die Abflussbeiträge der Zwischeneinzugsgebiete nahe an den Prognosestellen oft groß, wodurch sich die mögliche Prognosefrist verkürzt. Beiden Herausforderungen wurde Rechnung getragen durch das Ausschöpfen aller verfügbarer Informationen bei der Modellentwicklung und der Prognose, sehr umfangreichen Analysen der Ereignisse, und der Wahl eines komplexen Vorhersagesystems einschließlich Kraftwerksmoduls, Nachführung und Ensembleprognosen. Bei der Modellentwicklung wurde besonders auf die zutreffende Beschreibung von Hochwässern Bedacht genommen.

Jedes Modellergebnis ist nur so gut wie seine Eingangsdaten. Für den ordnungsgemäßen Betrieb des Modells ist sicherzustellen, dass alle erforderlichen Eingangsdaten, und womöglich alle optionalen Daten, dem hydrologischen Prognosesystem zur

Verfügung stehen. Da im Hochwasserfall mit einem Ausfall oder Störungen gerechnet werden muss, ist die Schaffung von Redundanz in allen Systemkomponenten sehr wichtig für die Zuverlässigkeit der Vorhersagen. Zutreffende Abflussvorhersagen erfordern zwei Gruppen von Eingangsdaten in das hydrologische Prognosesystem Kamp: Anfangsbedingungen der Bodenfeuchte und anderer den Systemzustand beschreibenden Größen, die mit ausreichender Vorlaufzeit ermittelt wurden sowie Niederschlags- und Lufttemperaturdaten bzw. Prognosen als Raster. Die anderen Eingangsdaten (Abfluss, Kraftwerksdaten) sind optional. Bei Ausfall dieser Daten arbeitet das Abflussmodell ordnungsgemäß, allerdings ist mit einer reduzierten Genauigkeit zu rechnen, da die Nachführalgorithmen nicht eingesetzt werden können.

Grundsätzlich sind die genauesten Vorhersagen für eine kurze Vorhersagefrist zu erwarten. Mit zunehmender Vorhersagefrist nimmt die Genauigkeit der Vorhersagen aus verschiedenen Gründen ab. Deshalb kann das Modell herangezogen werden für die Berechnung von

- Hochwasserprognosen (Vorhersagefrist von wenigen Stunden)
- Vorhersagen für die Frühwarnung (Vorhersagefrist von 48 Stunden)

Wenn ein mittlerer Prognosefehler von ca. 8% für Ereignisse und ca. 20% für den Anstieg von Ereignissen zugelassen wird, lassen die umfangreichen Fehlerauswertungen an Hand beobachteter Hochwasserereignisse die folgenden mittleren Prognosefristen erwarten: Zulauf Ottenstein am Kamp: 4h; Abgabe Thurnberg am Kamp: 4h; Rosenberg am Kamp nach Einmündung der Taffa: 4h; Stiefern am Kamp: 6h; Zöbing am Kamp: 7h. Die Genauigkeit der Prognosen schwankt jedoch stark von Ereignis zu Ereignis. Für diese Abschätzung der Prognosefrist wurde angenommen, dass sämtliche Eingangsdaten ordnungsgemäß zur Verfügung stehen.

Die Frühwarnung hat den Zweck, über diese Prognosefristen hinausgehend die Möglichkeit eines Hochwassers anzuzeigen. Für die Frühwarnung wird empfohlen, das Überschreiten eines Durchfluss-Schwellenwertes an den Vorhersagestellen durch den oberen Vertrauensbereich der Ensemble-Vorhersagen als Warnkriterium heranzuziehen. Dieser Schwellenwert könnte sich an existierenden Schwellenwerten für die Warnung, die mit beobachteten Abflüssen verknüpft sind, orientieren. Komma et al. (2006b) erläutert, wie der obere Vertrauensbereich als Warnkriterium zu interpretieren ist. Das Vorhersagesystem ist seit dem Frühjahr 2006 im operationellen Einsatz.

7. Danksagung

Die Studie wurde durchgeführt im Auftrag des Amtes der Niederösterreichischen Landesregierung und der Energieversorgung Niederösterreich AG. Die Autoren sind Prof. Gutknecht für die vielfältige Förderung des Projektes zu Dank verpflichtet.

8. Literatur

Blöschl, G. (2005) Rainfall-runoff modelling of ungauged catchments. In: Encyclopedia of Hydrological Sciences, M. G. Anderson (Hrsg.), J. Wiley & Sons, Chichester, S. 2061-2080.

Doswell, Ch. (1986) The human element in weather forecasting. National Weather Digest, 11 (2), 6-17.

Evensen G. (1994) Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. Journal of Geophysical Research 99, 10143-10162.

Grayson, R. B. und Blöschl G. (Hrsg.) (2000) Spatial Patterns in Catchment Hydrology: Observations and Modelling. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 404 Seiten.

Komma, J., Ch. Reszler, G. Blöschl und T. Haiden (2006b) Ensembleprognosen von Hochwasserabflüssen. In: Hochwasservorhersage. Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 199. Technische Universität Wien, Seiten 279-294.

Komma, J., G. Blöschl und Ch. Reszler (2006a) Nachführung mittels Ensemble-Kalmanfilter. In: Hochwasservorhersage. Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 199. Technische Universität Wien, Seiten 243-258.

Parajka J., R. Merz und G. Blöschl (2005) Regionale Wasserbilanzkomponenten für Österreich auf Tagesbasis. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 57, H 3/4, 43-56

Parajka, J., G. Blöschl und R. Kirnbauer (2006) Schneeinformationen aus Fernerkundungsdaten für die Hochwasservorhersage. In: Hochwasservorhersage. Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 199. Technische Universität Wien, Seiten 209-226.

Reszler, Ch., G. Blöschl und J. Komma (2006b) Simulation der Kraftwerkssteuerung am Kamp. In: Hochwasservorhersage. Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 199. Technische Universität Wien, Seiten 85-102.

Reszler, Ch., J. Komma, G. Blöschl und D. Gutknecht (2006a) Identifikation von Modellparametern in detaillierten Modellen. In: Hochwasservorhersage. Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 199. Technische Universität Wien, Seiten 259-278.

Schilling, W. (Hrsg.) (1987) Anwendungsmöglichkeiten des Kalman-Filters in der Wasserwirtschaft. DFG Mitteilung VII der Senatskommission für Wasserforschung, VCH Weinheim.

Anschrift der Verfasser:

A.o.Univ.Prof. Dr. Günter Blöschl
Dipl.-Ing. Christian Reszler
Dipl.-Ing. Jürgen Komma
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/222, A-1040 Wien
Email: bloeschl@hydro.tuwien.ac.at

ZUFLUSSVORHERSAGE DER BREGENZERACH FÜR DEN BODENSEE

Clemens Mathis

1. Einleitung

Die Möglichkeit einer Hochwasservorhersage mittels operationellen Modellen am Bodensee und in Vorarlberg wurde bis zum Hochwasser im Frühjahr 1999 als gering eingeschätzt. Die Einzugsgebiete der Flüsse sind mit Ausnahme des Rheins und der Ill kleiner als 1 000 km² (Tabelle 1). Durch die Lage im Gebirge sind auch die Fließzeiten sehr kurz, so dass sich schnelle Anstiegszeiten der Hochwasserwellen ergeben.

Beim Alpenrhein liegt der größte Teil des Einzugsgebietes in der Schweiz. Die Fließstrecke von ca. 90 km vom Zusammenfluss von Vorder- und Hinterrhein bis zur Mündung in den Bodensee wurde von der Internationalen Rheinregulierung (IRR) für die Hochwasserwarnung genutzt, indem bei Erreichen einer Meldestufe beim Pegel Domat-Ems Alarm ausgelöst wurde. Dadurch bestand die Möglichkeit, die vielfältig genutzten Vorländer im Unterlauf des Alpenrhains vor der Überflutung zu räumen.

Tab. 1: Einzugsgebiete von Flüssen in Vorarlberg.

Fluss	Mündungspegel	Einzugsgebiet Pegel [km ²]	Einzugsgebiet Mündung [km ²]
Rhein	Lustenau	6 110	6 111
Ill	Gisingen	1 281	1 281
Bregenzerach	Kennelbach	826	835
Dornbirnerach	Lauterach	196	224
Alfenz	Lorüns	173	173
Lutz	wurde aufgelassen (Kraftwerk)		186
Frutz	Sulz	87	107

Im Mai 1999 gab es nach einem Winter mit überdurchschnittlichen Schneemengen zweimal intensive Niederschläge. Am 21.05.1999 sind Tagesniederschlagssummen bis zu 250 mm aufgetreten und bei manchen Niederschlagsmessstellen wurden die höchsten Tagessummen seit Messbeginn gemessen (Grabher und Mathis, 2000). Der Bodenseewasserstand stieg darauf innerhalb 24 Stunden um 43 Zentimeter (Abbildung 1).

Die großflächigen Überflutungen am Bodensee führten dazu, dass ein Informationsbedarf über die weitere Entwicklung des Wasserstandes gegeben war. Das Einzugsgebiet des Bodensees umfasst mehrere Staaten. Es werden daher für eine Wasserstandsvorhersage Daten aus der Schweiz, Baden-Württemberg und Vorarlberg benötigt. Die Fachdienste der Länder am Bodensee tauschten Daten aus und begannen mit einfachen Mitteln die weitere Entwicklung des Wasserstandes abzuschätzen.

Im Anschluss an das Hochwasser 1999 wurde auf Vorschlag der Hochwasservorhersage-Zentrale Baden-Württemberg eine Arbeitsgruppe mit Vertretern der Länder Baden-Württemberg, Schweiz und Vorarlberg eingerichtet. Diese erarbeitete ein Konzept für eine modellbasierte Wasserstandsvorhersage für den Bodensee (Bremicker et al., 2004). Im Jahr 2000 wurde daraufhin eine Verwaltungsvereinbarung über die Zusammenarbeit bei der Wasserstandsvorhersage für den Bodensee abgeschlossen.

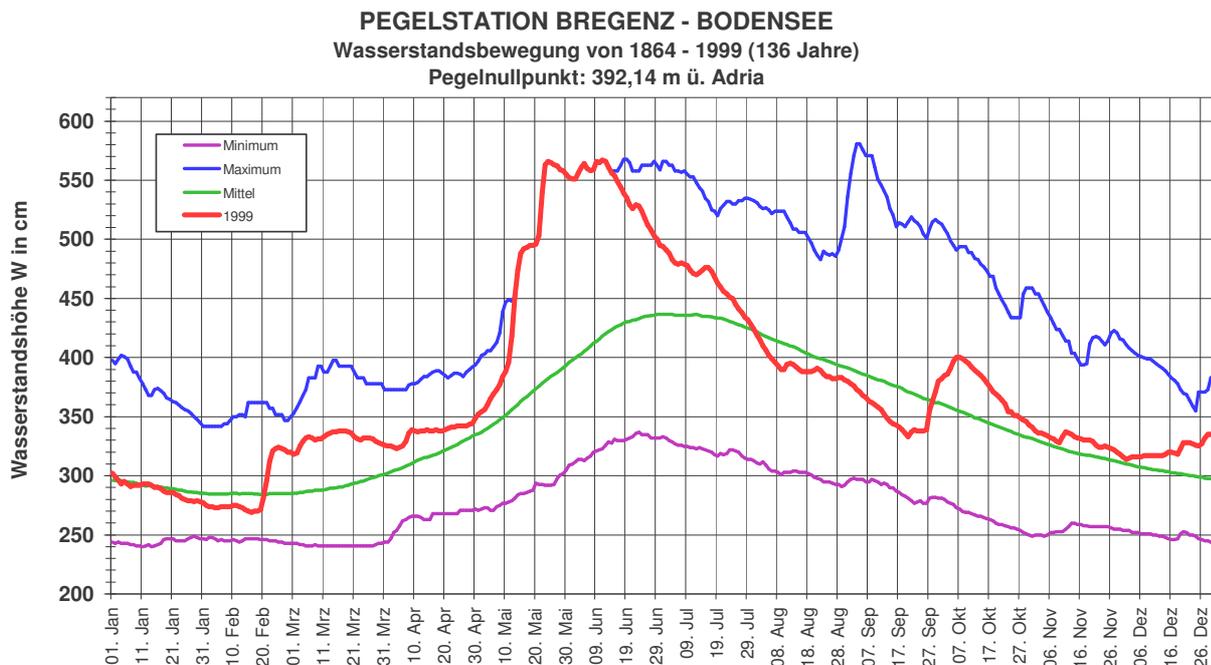


Abb. 1: Wasserstandsganglinie des Bodensees bei Bregenz im Jahre 1999 im Vergleich zum langjährigen Mittelwert und Extremwerten.

2. Wasserstandsvorhersage Bodensee

Einige Kernpunkte der Dreiländer-Vereinbarung über die Zusammenarbeit bei der Wasserstandsvorhersage sind:

- Länderspezifische Erstellung von Hochwasservorhersagemodellen für die zugehörigen Flussgebiete
- Gemeinsame Erstellung eines Seemodells für den Bodensee

Die Aufgabenteilung sieht vor, dass die Zuflussvorhersage für den größten Bodenseezubringer, den Alpenrhein, von der Schweiz gerechnet wird. In der Schweiz wurden und werden Hochwasservorhersagen auch für kleinere Einzugsgebiete als das des Alpenrheins erstellt. Für den Zufluss zum Bodensee musste ein eigenes Vorhersagemodell erstellt werden (Vogt, 2006). Das Vorhersagemodell FEWS wurde auf Basis des Modells HBV erstellt und ist seit 2003 im Testbetrieb und seit 2006 im operationellen Betrieb für das Bodenseemodell.

Von der Hochwasser-Vorhersage-Zentrale Baden-Württemberg wird eine Vorhersage für die baden-württembergischen Bodensee-Zuflüsse (2.380 km²) gerechnet. Das

Vorhersagemodell auf Basis des Modells LARSIM ist seit 2001 im operationellen Betrieb.

Die Bregenzerach ist nach dem Alpenrhein der zweitgrößte direkte Bodenseezufluss. Mit 835 km² umfasst sie 6,9 % des Einzugsgebiets des Pegels Neuhausen am Hochrhein. Infolge der hohen Niederschlagssummen und der Geologie im Einzugsgebiet ist der Abflussanteil wesentlich höher und beträgt 12,6 % (Luft et al., 1990). Die Vorhersage für die Bregenzerach wird von Vorarlberg erstellt. Vorgesehen ist auch die Berechnung einer Zuflussvorhersage für die Dornbirnerach. Nachdem in Vorarlberg keine Erfahrungen mit operationellen Modellen vorlagen, wurde die Erstellung des Modells für die Dornbirnerach zeitlich verschoben.

Die Zuflussvorhersagen bilden zusammen mit dem Niederschlag auf die Seefläche und den aktuellen Seewasserständen die Eingangsdaten zur Berechnung der Wasserstandsvorhersagen für den Ober- und Untersee (Abbildung 2). Ursprünglich war vorgesehen, eine Wasserstandsvorhersage erst bei Überschreitung eines Wasserstandes von 450 cm am Pegel Konstanz zu veröffentlichen. Auf Grund des großen Interesses an der Entwicklung des Wasserstands des Bodensees beim Niederwasser im Winter 2005/2006 wurde während des Niederwassers ein Lagebericht und eine Abschätzung der Entwicklung des Wasserstandes im Internet veröffentlicht. Im Jahre 2006 wurde beschlossen, ständig einen Lagebericht und Vorhersagegraphiken für die Seepiegel auf der gemeinsamen Internetseite (<http://www.bodensee-hochwasser.info/>) zu veröffentlichen.

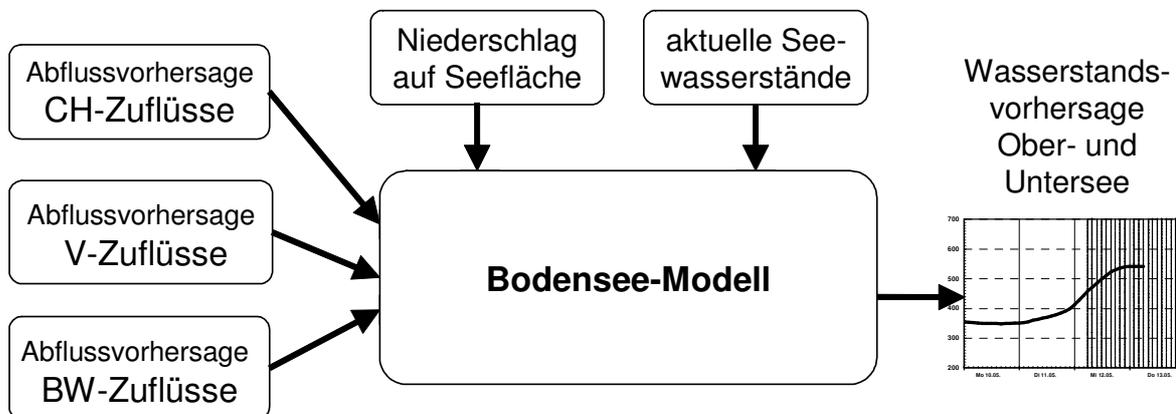


Abb. 2: Schema des Vorhersagesystems Bodensee

3. Hochwasservorhersagemodell Bregenzerach

3.1 Gebietscharakteristik, Vorgaben

Die Bregenzerach hat bei der Mündung in den Bodensee ein Einzugsgebiet von 835 km² und ist durch kurze Reaktionszeiten geprägt. Insbesondere beim Hochwasser August 2005 kam es zu einem raschen Ansteigen des Wasserstandes bei den Pegeln der Bregenzerach.

Das Einzugsgebiet der Bregenzerach (Abbildung 3) hat eine Höhenlage zwischen 400 m und 2600 m ü.A. und liegt zu einem Viertel in Deutschland. Auf Grund der Geologie (Flyschzone) hat das Einzugsgebiet eine hohe und rasche Abflussbereitschaft. Die jährliche Abflusshöhe für den Pegel Kennelbach beträgt im Mittel 1777 mm (Reihe 1951 – 2003).

Die Wasserstandsvorhersage für den Bodensee sieht eine Vorhersagezeit von 48 Stunden vor. Diese Vorhersagezeit ist für die Bregenzerach nur bei Verwendung von Niederschlagsvorhersagen zu erreichen. Mit der Erstellung des Vorhersagemodells für die Bregenzerach wurde das Ingenieurbüro Dr. Ludwig, Karlsruhe beauftragt.

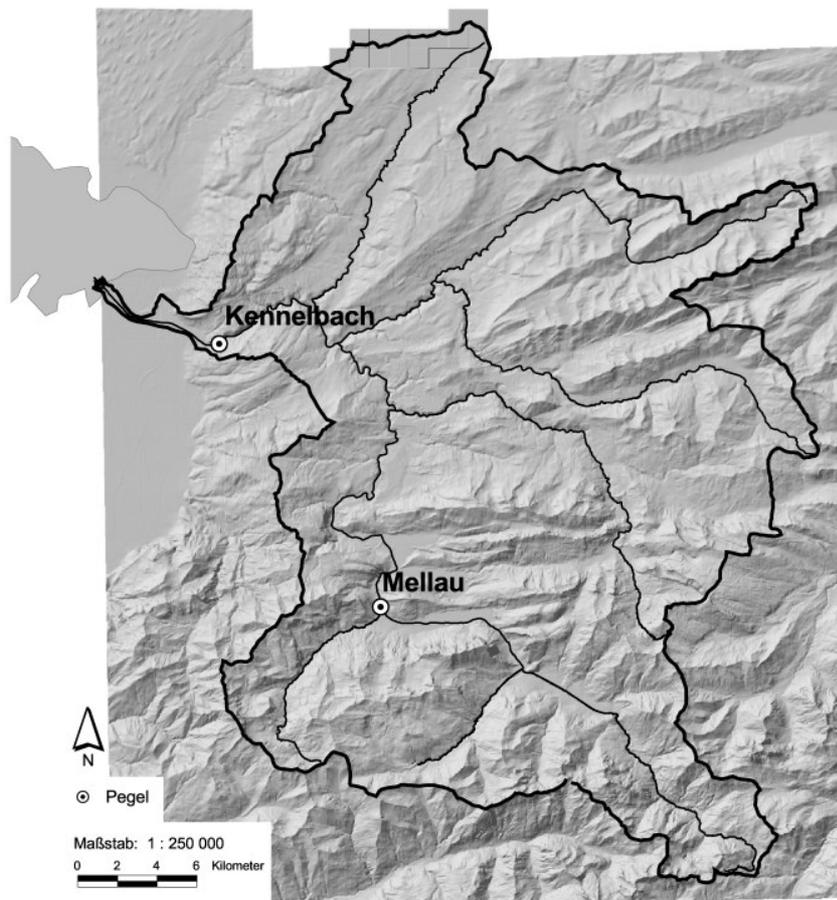


Abb. 3: Einzugsgebiet Bregenzerach und Lage der operationell betriebenen Pegel.

3.2 Modellaufbau

Für die Modellierung des Hochwasserabflussgeschehens im Einzugsgebiet der Bregenzerach wird das Programmsystem LARSIM (Large Area Runoff Simulation Model) im Berechnungsmodus „Flussgebietsmodell“ eingesetzt (Ludwig, 1978; Bremicker, 2000).

Für das Hochwasservorhersagemodell für die Bregenzerach wurde eine quadratrasterbasierte Flächenaufteilung mit einer Kantenlänge von einem Kilometer gewählt. Insgesamt ergeben sich dabei für das Einzugsgebiet der Bregenzerach 838 Teilgebiete. Für jede Rasterfläche des Modells sind die Reliefverhältnisse sowie Schätzwerte für

mittlere Gerinnegeometriedaten berücksichtigt. Für die Bregenzerach selber wurden zum größten Teil gemessene Querprofile in das Modell integriert, um die Wellenverformung adäquat abbilden zu können.

Die Erstellung des Rastermodells für die Bregenzerach und die Vernetzung der Rasterzellen basiert auf einem digitalisierten Gewässernetz (Abbildung 4). Für die Rasterzellen, für die kein digitalisiertes Gewässernetz vorliegt, wurde das Flussnetz auf Grundlage des digitalen Geländemodells ergänzt.

Im Modell sind Gewässerstecken von insgesamt 1.526 km Länge berücksichtigt. Die Längen der Gerinneteilstrecken werden anhand des Gewässernetzes für jede Rasterzelle ermittelt.

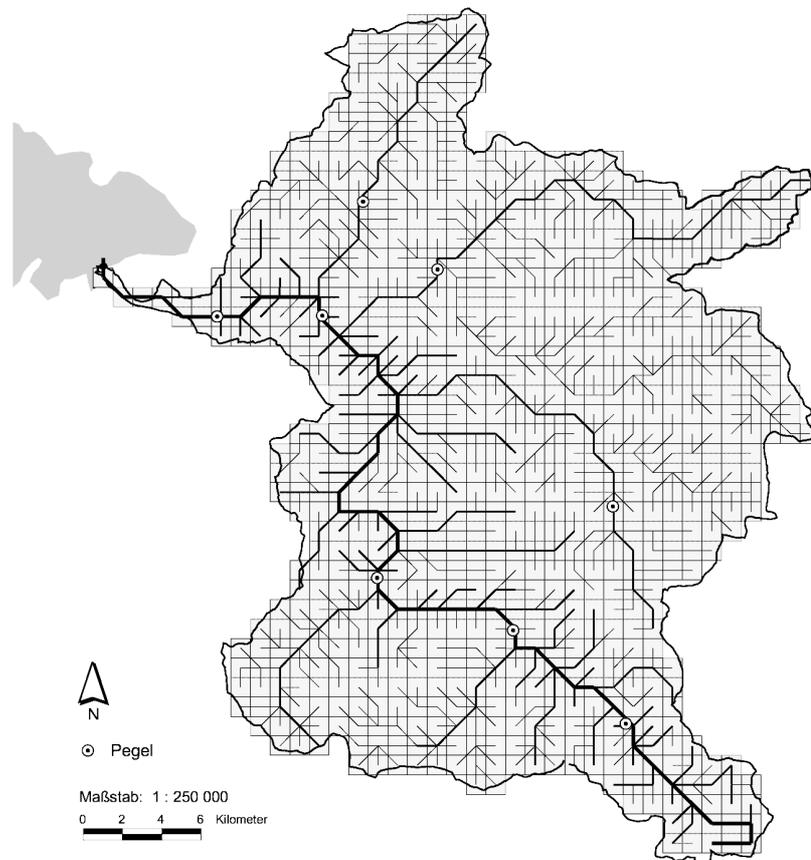


Abb. 4: Vernetzung der Rasterflächen und Lage der zur Modelleichung verwendeten Pegel.

Die Simulation des Niederschlag-Abfluss-Prozesses und des Ablaufs der Hochwasserwelle im Gerinne basiert auf der Berechnung mehrerer hintereinandergeschalteter hydrologischer Teilmodelle. Abbildung 5 zeigt das Modellschema von LARSIM im Flussgebietsmodus. Die Basis für die Erstellung der Vorhersagen sind die hydrometeorologischen Messdaten, die meteorologischen Vorhersagen des Niederschlags sowie Programme zum Abrufen und Auswerten dieser Daten. Die Berechnung erfolgt in Zeitschritten von einer Stunde.

3.2.1 Abflussbildung

Der Gebietsniederschlag wird über das Rasterpunkt-Verfahren aus den gemessenen Niederschlägen berechnet. Dabei werden die Mittelpunkte der Rasterflächen betrachtet und die in den vier Quadranten jeweils nächstgelegene Niederschlagsstation für jeden dieser Rasterpunkte bestimmt. Der Niederschlagsverlauf für jedes Teilgebiet wird über ein gewichtetes Mittel aus den Niederschlägen der in den vier Quadranten jeweils nächstgelegenen Niederschlagsstationen berechnet.

Aus dem Gebietsniederschlag wird über eine Abflussbeiwertfunktion der Effektivniederschlag bestimmt, wobei der während eines Ereignisses variierende Abflussbeiwert modellintern optimiert wird.

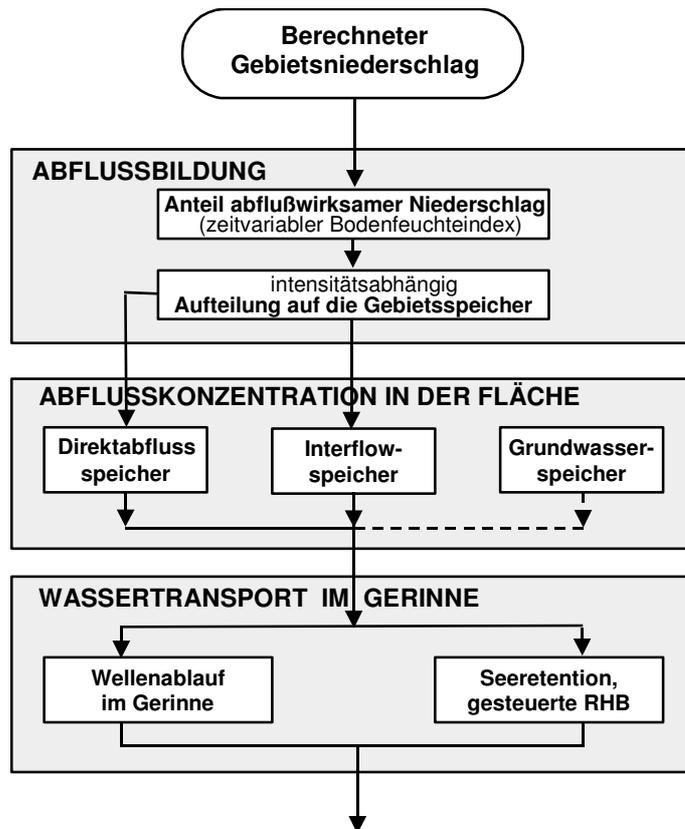


Abb. 5: Modellschema von LARSIM im Flussgebietsmodus.

Mit Hilfe der Abflussbeiwertfunktion können an Stelle eines konstanten Faktors variable Verlustraten zur Ermittlung des Effektivniederschlags verwendet werden. Der Abflussbeiwert ergibt sich dabei als Funktion eines modellintern berechneten Indices für den im Teilgebiet gebildeten Interflow. Dadurch erhöht sich der Abflussbeiwert während des Wellendurchganges bei ansteigendem Abfluss und verringert sich, wenn der Abfluss wieder zurückgeht. Dies entspricht dem natürlichen Verlauf der Bodensättigung während hochwassererzeugender Niederschläge.

Der variable Abflussbeiwert ψ wird berechnet, indem zunächst ein Index aus dem Interflow zum vorherigen Zeitschritt gebildet wird. Dieser Index wird mit dem

Parameter CAF potenziert und mit dem Parameter ($\psi_{\text{gegeben}} \cdot \text{BAF}$) multipliziert. Anschließend wird der minimale Abflussbeiwert ψ_{min} addiert (Ludwig, 1989):

$$\psi_I = \psi_{\text{min}} + ((\psi_{\text{gegeben}} \cdot \text{BAF}) \cdot \frac{100 \cdot Q1_{i-1}}{3,6 \cdot \text{FT} \cdot \text{TA}})^{\text{CAF}} \quad (1)$$

mit	ψ_{min}	minimaler Abflussbeiwert [-]
	ψ_{gegeben}	pro Teilgebiet des Untersuchungsgebietes vorgegebener Abflussbeiwert [-]
	BAF	gebietspezifischer Parameter der Multiplikation [-]
	CAF	gebietspezifischer Parameter des Exponenten [-]
	Q1	Index für den Interflow [10^3 m^3]
	FT	Flächengröße des Teilgebietes [km^2]
	TA	Berechnungszeitschritt [h]

Der Abflussbeiwert wird ermittelt, indem zunächst das Minimum aus dem maximalen Abflussbeiwert ψ_{max} und dem variablen Abflussbeiwert ψ_I ermittelt wird. Dieser Wert wird dann verglichen mit dem minimalen Abflussbeiwert ψ_{min} . Das Maximum dieser Werte stellt dann den Abflussbeiwert dar. Somit gilt:

$$\psi_I = \max(\psi_{\text{min}}, \min(\psi_{\text{max}}, \psi_I)) \quad (2)$$

Neben dem Abfluss aus dem Interflow beeinflussen die gebietsspezifischen Parameter CAF und ($\psi_{\text{gegeben}} \cdot \text{BAF}$) den Verlauf der Abflussbeiwertfunktion und das erreichte Maximum des Abflussbeiwertes. Der Parameter CAF ist ereignisunabhängig und wird bei der Modellierung gebietsspezifisch festgelegt. Als Wert für den Parameter BAF wird zunächst ein aus mehreren Ereignissen gemittelter Wert vorgegeben. Im operationellen Fall ergibt sich durch die Optimierung der Differenz zwischen berechneter und gemessener Ganglinie vor dem Vorhersagezeitpunkt für jedes Hochwasserereignis ein für das Ereignis spezifischer Wert des Parameters BAF.

3.2.2 Abflusskonzentration in der Fläche

Der Anteil des Basisabflusses am Gesamtabfluss wird über den Ereigniszeitraum als konstant angenommen und durch den während des Ereignisses minimal am Pegel gemessenen Abflusswert festgelegt.

Der Anteil des Effektivniederschlags, der bei der Abflussverformung in den Teilgebieten den langsamen Speicher des Parallelspeichers speist, wird durch die Anwendung eines Einzellinearspeichers in Interflow transformiert. Der verbleibende Anteil des Effektivniederschlags wird durch ein Speichermodell nach dem modifizierten Clark-Verfahren (Ludwig, 1979) in Direktabfluss umgewandelt.

3.2.3 Wellenverformung in den Gewässerteilstrecken

Für das Modell der Bregenzerach wurde die Wellenablaufberechnung im Gerinne für alle Gewässerteilstrecken nach dem Verfahren von Williams (Williams, 1969) ermittelt. Das unterschiedliche Retentionsverhalten von Hauptbett und Vorländern kann dadurch im Modell berücksichtigt werden.

3.3 Operationeller Betrieb des Hochwasservorhersagemodells

Die Vorhersagen werden für die Pegel Mellau und Kennelbach erstellt (Tab. 2, Abb. 1). Der Modellaufbau lässt die Berechnung einer Vorhersage für jede Rasterzelle zu. Die berechnete Vorhersagedauer ist abhängig von den verwendeten Niederschlagsvorhersagen. Die Vorhersagen können händisch über eine Benutzeroberfläche oder automatisch gestartet werden. Die Vorhersagen werden derzeit im Routinebetrieb automatisch einmal am Tag erstellt. Im Hochwasserfall wird auf einen automatischen Betrieb umgestellt, der jede Stunde eine neue Vorhersage erstellt.

In Abbildung 6 ist die Benutzeroberfläche für die Bregenzerach dargestellt. Mit Hilfe der Benutzeroberfläche können die Vorgaben für die Berechnungen gewählt sowie die Eingangsdaten und die berechneten Ergebnisse dargestellt werden.

Tab. 2: Daten zu den operationell genutzten Pegeln des Vorhersagemodells Bregenzerach.

Pegel	Einzugsgebiet [km ²]	Lage [Fluss-km]	MQ [m ³ /s]	HQ ₁₀₀ [m ³ /s] (HORA)
Mellau	228,6	39,3	13,6	410
Kennelbach	826,3	7,5	46,6	1300

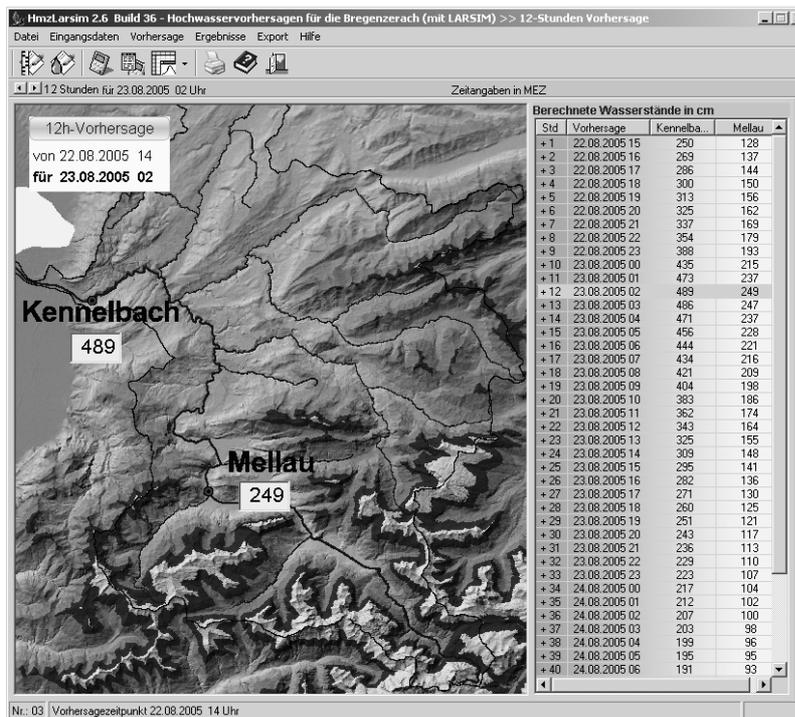


Abb. 6: Benutzeroberfläche HMZLARSIM für die Bregenzerach.

Eingangsdaten für die Berechnung sind die gemessenen Wasserstände – und damit die mit der Wasserstands-Abflussbeziehung umgerechneten Abflüsse - der Pegel Mellau und Kennelbach. Derzeit werden die gemessenen Niederschlagswerte von 11 mit Datenfernübertragung ausgerüsteten Messstellen verwendet (Abbildung 7).

Für die Berechnung können sowohl die Niederschlagsvorhersagen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) des Modells ALADIN als auch die Vorhersagen des Lokalen Modells (bis November 2005 LM, heute LME) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verwendet werden. Die ALADIN-Vorhersagen werden für ein 10 x 10 km²-Raster mit einem Vorhersagezeitraum von 48 h und die LME-Vorhersagen für ein 7 x 7 km²-Raster mit einem Vorhersagezeitraum von 78 h erstellt. Beide Vorhersagen werden zweimal täglich aktualisiert. Zur Darstellung der räumlichen Verteilung der vorhergesagten Niederschläge des DWD und der ZAMG steht ein Visualisierungsprogramm zur Verfügung.

Für die Berechnung von schneebeeinflussten Hochwässern können die Vorhersagen des Modells SNOW3 des DWD verwendet werden. Die SNOW3-Vorhersagen werden für ein 1 x 1 km²-Raster mit einem Vorhersagezeitraum von 72 h viermal täglich zur Verfügung gestellt.



Abb. 7: Operationell eingesetzte Niederschlagsstationen und Abflusspegel.

3.4 Erfahrungen

Im August 2005 sind im Einzugsgebiet der Bregenzerach starke Niederschläge gefallen, die zu extremem Hochwasser führten. Die Erfahrungen bei diesem Ereignis zeigen, wie wichtig es ist, die Wasserstands-Messsysteme, die Datenfernübertragung und die Wasserstand-Abfluss-Beziehungen auch für extreme Ereignisse auszuliegen.

So überschritt der Wasserstand am Pegel Mellau bei diesem Ereignis den Wert von 300 cm. Da die Drucksonde am Pegel für höhere Wasserstände nicht eingerichtet war, konnten die Wasserstandsdaten oberhalb 300 cm erst nach dem Hochwasserereignis manuell mit Hilfe des Pegels Au und der auf Grund von Spuren abschätzbaren Hochwasserspitze (ca. 350 cm am 23.08.2006 um 1 Uhr) rekonstruiert werden. Auch am Pegel Kennelbach wurde die Wasserstandsganglinie nach dem Hochwasser korrigiert, da die Messsonde beim Hochwasser beschädigt wurde.

Ebenfalls korrigiert wurden die Wasserstand-Abfluss-Beziehungen im oberen Abflussbereich sowohl für den Pegel Mellau wie für den Pegel Kennelbach. Durch den hochwasserbedingten Ausfall eines Teiles des Telefon- und Mobiltelefonnetzes standen zudem für den operationellen Betrieb teilweise die Wasserstandsdaten nicht zur Verfügung.

Auf Grund der genannten Schwierigkeiten mit den Daten während des Hochwasserereignisses August 2005 konnte das Hochwasservorhersagemodell nicht im operationellen Betrieb eingesetzt werden. Mit den rekonstruierten Wasserstandsdaten wurden Nachrechnungen mit dem Vorhersagemodell für das Ereignis August 2005 durchgeführt, um die Modellgüte zu überprüfen.

Abbildung 8 zeigt beispielhaft Modellergebnisse für den Pegel Mellau (links) und für den Pegel Kennelbach (rechts) für den Vorhersagezeitpunkt am 22.08.2005 um 6 Uhr (obere Reihe) und um 14 Uhr (untere Reihe). Dabei sind die Ergebnisse sowohl unter Verwendung der LM- als auch der ALADIN-Vorhersagen dargestellt. Die LM- und ALADIN-Vorhersagen werden jeweils um 0 Uhr und um 12 Uhr aktualisiert. Für den ersten Vorhersagezeitpunkt um 6 Uhr wurden die Niederschlagsvorhersagen vom 22.08.2005 0 Uhr verwendet. Für den zweiten Vorhersagezeitpunkt um 14 Uhr die Vorhersagen vom 22.08.2005 12 Uhr.

In Abb. 8 sind ebenfalls die Vorhersagen aufgetragen, wenn anstelle der vorhergesagten Niederschläge die gemessenen Niederschläge auch im Vorhersagezeitraum verwendet werden. Diese Berechnungen zeigen die Modellgüte unabhängig von den Unsicherheiten der Niederschlagsvorhersagen.

Die Ergebnisse mit dem Vorhersagezeitpunkt um 6 Uhr am 22.08.2005 zeigen:

- Die Wasserstandsvorhersagen mit den LM-Vorhersagen vom 22.08.2005 0 Uhr überschätzen das Ereignis an beiden Pegeln etwas. Der Anstieg der Welle wird zu früh vorhergesagt. Zudem wird eine Doppelwelle simuliert, während die gemessene Welle nur eingipfelig ist. Insgesamt werden mit den LM-Vorhersagen aber bereits frühzeitig vor Anstieg der Ganglinie die hohen zu erwartenden Wasserstände simuliert.

- Die mit den ALADIN-Vorhersagen vom 22.08.2005 0 Uhr berechneten Wasserstandsvorhersagen liegen deutlich unter den gemessenen Werten, das Ereignis wurde an beiden Pegeln unterschätzt. Der Anstieg der Welle wird ebenfalls zu früh vorhergesagt. Der Zeitpunkt des Scheitelwertes wird dagegen besser als mit den LM-Vorhersagen getroffen.

Die Ergebnisse mit dem Vorhersagezeitpunkt um 14 Uhr am 22.08.2005 zeigen:

- Die Wasserstandsvorhersagen unter Verwendung der LM-Vorhersage vom 22.08.2005 um 12 Uhr weisen deutlich geringere Niederschlagswerte auf. Die zum späteren Zeitpunkt berechnete LM-Vorhersage führt daher zu schlechteren Ergebnissen wie die Verwendung der vorherigen LM-Vorhersage. Das Ereignis wird unterschätzt. Es wird wieder eine Welle mit mehreren Scheiteln simuliert.
- Die Wasserstandsvorhersagen unter Verwendung der ALADIN-Vorhersagen vom 22.08.2005 12 Uhr stimmen im Zeitpunkt des Scheitels sehr gut mit den Messwerten überein. Während am Pegel Mellau die Höhe des Scheitels noch deutlich unterschätzt wird, ergibt sich am Pegel Kennelbach eine bessere Wasserstandsvorhersage. Dabei wird auch der Anstieg der Welle gut erfasst.

Bei diesem Ereignis liegen große Unterschiede zwischen den Wasserstandsvorhersagen mit den LM- und den ALADIN-Vorhersagen vor. Gleichzeitig wird aber auch deutlich, dass auch beim gleichen Niederschlags-Vorhersagemodell von einem Vorhersagezeitpunkt zum nächsten große Unterschiede in den vorhergesagten Niederschlägen bestehen können.

Aus den Nachrechnungen zu einem Ereignis lassen sich keine generellen Schlüsse über die Eignung der jeweiligen Niederschlagsvorhersage-Modelle ziehen. Prinzipiell erscheint es ratsam, mit beiden Niederschlagsvorhersage-Modellen Simulationen zu berechnen, um eine mögliche Spannweite der zu erwartenden Wasserstandsänderungen zu erhalten. Zudem sollten die Vorhersagen beider Modelle für zurückliegende Zeitpunkte vor dem Vorhersagezeitpunkt mit Niederschlagsmesswerten verglichen werden, um zu überprüfen, ob systematische Unter- oder Überschätzungen des Niederschlags im betrachteten Untersuchungsgebiet auftreten.

Eine stündliche Neuberechnung ist ebenfalls ratsam, um immer das aktuelle Abflussgeschehen im Einzugsgebiet zu modellieren. Dies ist auch wichtig, da die Abflussbeiwerte des Modells im operationellen Fall automatisch an Hand der gemessenen Abflussdaten vor dem Vorhersagezeitpunkt angepasst werden. Unter Umständen können dabei (z.B. bei Messwertschwankungen) zu hohe oder zu niedrige Abflussbeiwerte ermittelt werden. Daher ist die regelmäßige Kontrolle der optimierten Abflussbeiwerte des Modells durch den diensthabenden Hydrologen wichtig. Durch die Benutzeroberfläche werden bei großen Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Abflussdaten Warnungen ausgegeben, an Hand derer der Hydrologe die zu erwartende Vorhersagegüte des Modells besser einschätzen kann.

Die Wasserstandsvorhersagen in Abb. 8 unter Verwendung der gemessenen Niederschläge zeigen zu beiden Vorhersagezeitpunkten um 6 Uhr und um 14 Uhr am

22.08.2005, dass das Modell bei einer guten Niederschlagsdatenlage den Wasserstand in Höhe und Zeitpunkt recht gut vorhersagen kann. Insbesondere die gemessene Ganglinie am Pegel Kennelbach wird bereits frühzeitig sehr gut vorhergesagt. Aber auch die Wasserstände am Pegel Mellau werden noch recht gut abgebildet.

Somit scheint das Vorhersagemodell geeignet zu sein, auch extreme Hochwasser zuverlässig nachbilden zu können, wenn die Niederschlagsdaten die meteorologische Situation gut wiedergeben. Die Genauigkeit der Niederschlagsvorhersage ist somit entscheidend für die Güte der hydrologischen Vorhersage.

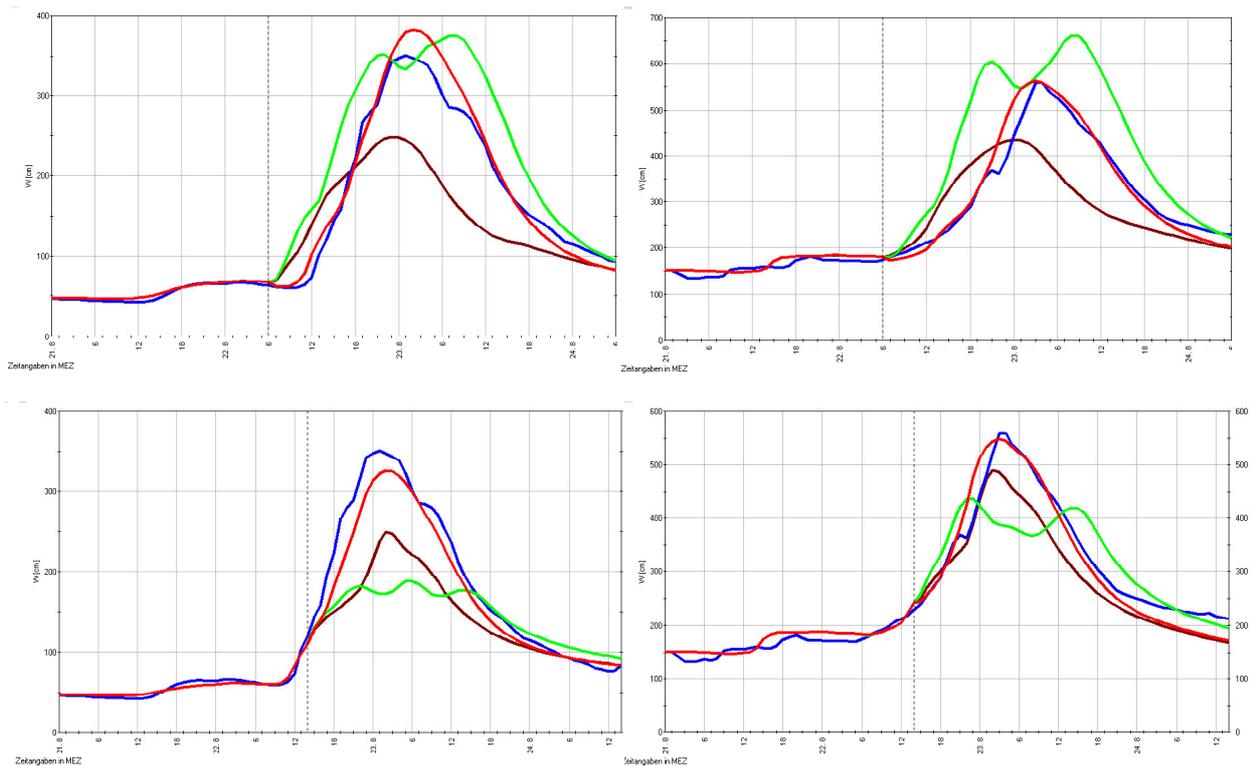


Abb. 8: Modellergebnisse für das Hochwasserereignis August 2005 mit LARSIM für den Wasserstand am Pegel Mellau (linke Seite) und am Pegel Kennelbach (rechte Seite): grün: mit LM-Vorhersage, braun: mit ALADIN-Vorhersage, rot: mit gemessenen Niederschlagsdaten; blau: gemessene Ganglinie. Vorhersagezeitpunkt 22.08.2005 6 Uhr (obere Reihe) und 22.08.2005 14 Uhr (untere Reihe). Simulationsbeginn immer 21.08.2005 0 Uhr.

3.5 Weitere Entwicklung

Bei der Erstellung des Hochwasservorhersagemodells wurde davon ausgegangen, dass der Kraftwerksbetrieb an der Bregenzerach im Hochwasserfall keine Bedeutung für den Abfluss hat. Wenn Hochwasser aus einer Niederwasserphase entstehen, gibt es aber beim Pegel Kennelbach durch die kraftwerksbeeinflusste Abflussganglinie Schwierigkeiten, den aktuellen Abflussbeiwert automatisch zu ermitteln. Daher ist für die verbesserte Optimierung des aktuellen Abflussbeiwertes vorgesehen, eine um den Kraftwerksbetrieb korrigierte Abflussganglinie zu erstellen.

Geplant ist auch, das bestehende Flussgebietsmodell zu einem Wasserhaushaltsmodell zu erweitern. Dafür wird die Gebietsdatei von LARSIM um Boden- und Land-

nutzungsparameter ergänzt und eine erneute Modellkalibrierung unter zusätzlicher Einbeziehung von klimatologischen Parametern wie Windgeschwindigkeit und Lufttemperatur durchgeführt. Dies ermöglicht dann die kontinuierliche Simulation des gesamten Abflussbereichs vom Nieder- zum Hochwasser. Neben der verbesserten Vorhersage der Niedrigwassersituation in der Bregenzerach und im Bodensee können dadurch auch Verbesserungen vor allem im Bereich einer Hochwasser-Frühwarnung erreicht werden (vgl. Bremicker et al., 2006).

4. Literatur

Bremicker, M. (2000) Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM - Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 11. Institut für Hydrologie der Universität Freiburg.

Bremicker, M., Bürgi, T., Mathis, C. (2004) Gemeinsame Wasserstandsvorhersage der Bodenseeanlieger. In: Schriftenreihe der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, 6/2004.

Bremicker, M., Homagk, P., Ludwig, K. (2006) Hochwasserfrühwarnung und Hochwasservorhersage in Baden-Württemberg. Wasserwirtschaft, 7-8, S. 46-50.

Grabher, R. und Mathis, C. (2000) Hochwasserereignisse im Mai und Juni 1999 in Vorarlberg. Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich, Nr. 79, S. 59 – 68.

Ludwig, K. (1978) Systematische Berechnung von Hochwasser-Abflussvorgängen mit Flussgebietsmodellen. In: Mitteilungen des Institutes für Hydrologie, Wasserwirtschaft und landwirtschaftlichen Wasserbau der Technischen Universität Hannover, Nr. 44, S. 263 - 462.

Ludwig, K. (1979) Hydrologische Verfahren und Beispiele für die wasserwirtschaftliche Bemessung von Hochwasserrückhaltebecken. Schriftenreihe des DVWK Heft 44, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin

Ludwig, K. (1989) Hochwasservorhersage für große, semiaride Einzugsgebiete am Beispiel des Gelben Flusses. Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover, Heft 70.

Luft, G., Eertwegh, G.v.d., Vieser, H. (1990) Veränderungen der Bodenseewasserstände von 1887 bis 1987. Handbuch Hydrologie Baden-Württemberg, Teil 6.2, Berichte, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe

Vogt, S. (2006) Operationelle Vorhersagen in der Schweiz. In: Hochwasservorhersage. Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 199. Technische Universität Wien. Seiten 143-162.

Williams, J.R. (1969): Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. Transactions of the ASAE 12(1): S.100-103.

Anschrift des Verfassers:

Dipl.-Ing. Clemens Mathis
Abteilung VIIId (Wasserwirtschaft)
Amt der Vorarlberger Landesregierung
Josef-Huter-Straße 35, A-6901 Bregenz
Tel: +43(0)5574/511-27441
Fax: +43(0)5574/511-927495
E-Mail: clemens.mathis@vorarlberg.at
<http://www.vorarlberg.at>

VORHERSAGE FÜR DEN INN

Robert Kirnbauer und Helmut Schönlaub

1. Einleitung

Der Inn, als wichtigster Fluss Tirols, durchfließt auf seinen ca. 200 Kilometern Lauf-länge von der Schweizer bis zur bayrischen Grenze eine Landschaft, die durch eine äußerst dynamische Entwicklung der Wirtschaft und der Siedlungstätigkeit gekenn-zeichnet ist. Der zunehmende Siedlungsdruck bewirkt ein fortschreitendes Heran-rücken von Siedlungs- und Gewerbegebieten an den Inn, wo absolute Hochwasserfrei-heit nicht gewährleistet sein kann. Hierdurch kommt es zu einer signifikanten Steige-rung des Schadenspotenzials und einer enormen Kostensteigerung im Schadensfall. Des weiteren bewirkt die Liberalisierung des Strommarktes einen zunehmenden Druck auf die Betreiber von Wasserkraftanlagen in Richtung einer vorausschauenden Betriebsoptimierung.

Die mittlere Jahreswasserfracht des Inn nimmt auf seinem Weg durch Tirol von ca. 1,9 Mrd. m³ auf ca. 9,3 Mrd. m³ zu, die größten beobachteten Hochwässer von ca. 650 m³/s auf ca. 2200 m³/s. Durch die Speicher der Kraftwerke auf Tiroler Gebiet wird das Abflussregime jahreszeitlich umgelagert und das Hochwasserregime insbesondere der rechtsseitigen Zubringer insofern günstig beeinflusst, als die Hochwässer aus den oberhalb der Jahresspeicher liegenden Einzugsgebietsteilen zurückgehalten werden. Die speziell auf den Gletschern Tirols entstandenen Hochwässer des Jahres 1987 waren Anlass diesbezüglicher Untersuchungen (siehe z.B. Gmeinhard, 1988; Pircher, 1988; Tschada und Moschen, 1988).

Zum Schutz des Lebens- und Wirtschaftsraumes vor der Hochwassergefahr im Inntal und als Grundlage für Betriebsoptimierungen wurde daher von dem Energie-versorgungsunternehmen TIWAG (Tiroler Wasserkraft AG) gemeinsam mit der Tiroler Landesregierung die Initiative ergriffen, ein Hochwasservorhersageverfahren für den Inn erstellen und installieren zu lassen. Mit dieser Aufgabe wurde das Kompetenzzentrum alpS - Zentrum für Naturgefahren Management betraut. Entsprechend der Struktur von alpS fließt hier Know How von Universitäten (Universität Innsbruck und Technische Universität Wien) und aus der Praxis (TIWAG und Ingenieurbüros) zusammen, um die Aufgabe zu lösen. Einen kurzen Überblick über das Kompetenzzentrum alpS geben Schöberl und Schönlaub (2003) sowie Schönlaub (2003).

2. Das Vorhersageverfahren im Überblick

Als Vorhersagemodell wurde ein modular aufgebautes Flussgebietsmodell gewählt. Es besteht aus den Haupt-Bausteinen

- Preprocessing des meteorologischen Input incl. meteorologische Vorhersagen
- Gletschermodell SES ("Schnee- und Eis-Schmelze")

- Niederschlag-Abfluss-Modell für unvergletscherte Einzugsgebietsteile der Zubringer des Inn unter Einschluss eines Routing-Modells HQsim
- Hydrodynamisches 1D-Modell für den Hochwasserwellenablauf im Inn.

Daneben sind für den operationellen Betrieb weitere Funktionalitäten erforderlich, für die im Modell Vorsorge getroffen ist: Die von den Modellbausteinen errechneten Simulationsergebnisse müssen nach Möglichkeit an Hand von Beobachtungsdaten überprüft und gegebenenfalls korrigiert werden. Hierzu müssen diese Daten einer automatisierten Plausibilitätskontrolle unterzogen werden, um sicher zu stellen, dass die Simulationsergebnisse nur mit plausiblen Daten korrigiert werden. Eine übersichtliche und intuitiv handhabbare Benutzeroberfläche erlaubt es dem Hochwasserbeauftragten, sich im Hochwasserfall alle für Frühwarnung, Warnung und Alarm notwendigen Informationen zu verschaffen. Im Routinebetrieb, außerhalb von Hochwasserzeiten, dient die Benutzeroberfläche der manuellen Sichtung und Kontrolle der Daten und somit der Messeinrichtungen und Übertragungswege sowie der nachträglichen Sichtung und Beurteilung der berechneten Vorhersagen. Derartige Nachbearbeitungen von Hochwassersimulationen dienen als Grundlage für die regelmäßig geplante Modellpflege.

Die oben skizzierte Modellstruktur ergibt sich aus den naturräumlichen Gegebenheiten im Einzugsgebiet. Die südlichen, orographisch rechten, Inn-Zubringer sind in ihren obersten Einzugsgebietsteilen stark vergletschert, und die Gletscher beeinflussen das Abflussregime ganz wesentlich. Sind sie im Frühsommer noch tief verschneit, wirken sie durch kapillare und eventuell auch noch thermische Speicherung von Regenwasser in der Schnee- und Firnauflage hochwasserdämpfend, während die stark ausgeaperten Gletscher des Hoch- und Spätsommers im Fall starker Überregnung nahezu wie versiegelte Flächen wirken und somit zu Entstehungsgebieten von Hochwässern werden können. Bei starker Ausaperung und hoher Sonneneinstrahlung kann der Gletscherabfluss allein schon in den Hochwasserbereich anschwellen (siehe z.B. Braun und Weber, 2006). Diese Dynamik der Prozesse auf den Gletschern sollte möglichst adäquat im Modell abgebildet werden.

Die nicht vergletscherten Teile Tirols sind von ihrem geologischen Aufbau und ihren Böden her recht heterogen: Nördliche Kalkalpen, Kristallin der Zentralalpen sowie Grauwackenzone bilden die Hauptformationen im Einzugsgebiet des Tiroler Inn. Alle Zubringer zum Inn mit speziell auf sie zugeschnittenen Modellen abzudecken, war in der Projektlaufzeit nicht möglich. Daher wurde ein Modell gewählt, das es Dank seiner Prozessorientierung gestattet, wesentliche Naturraum-Information zu verwerten. Die wichtigsten Modellparameter wurden an Hand von Referenzgebieten in den Hauptformationen kalibriert und diese Parameter auf andere Zubringer der entsprechenden Hauptformation übertragen. Sofern an diesen Flüssen Pegelbeobachtungen vorlagen, wurde mit ihrer Hilfe eine gewisse Nachkalibrierung vorgenommen, auch wenn diese Pegel später nicht online übertragen werden.

Das hydrodynamische Modell für die Strömungsprozesse im Inn wurde gewählt, da einerseits für den Flusslauf des Inn entsprechend gute Daten in hoher räumlicher Auflösung für die hydrodynamische Modellierung zur Verfügung stehen, andererseits

Eingriffe in das Abflussgeschehen, z.B. durch Laufkraftwerke, mit hydrodynamischen Ansätzen prozessadäquat berücksichtigt werden können. Die zu diesem Zweck angewendete Software ist das Programm FLUX^{DSS/DESIGNER} der Firma SCIETEC, das als Kern das Programm FLORIS2000 verwendet (Reichel und Baumhackl, 2000; Leonhardt et al., 2006).

In der vorliegenden Arbeit kann nur über Teilaspekte der Arbeiten am Vorhersageverfahren für den Inn eingehender berichtet werden. Dies betrifft insbesondere das Gletschermodell und die hydrologische Modellierung, soweit sie Tiroler Einzugsgebiete betrifft. Über die hydrodynamische Modellierung berichten Leonhardt et al. (2006), Veröffentlichungen über die Bearbeitung der meteorologischen Daten sowie über die Realisierung in der EDV-Umgebung des Hydrographischen Dienstes von Tirol stehen noch aus. Dasselbe gilt für die Weiterführung des Vorhersagemodells in Bayern.

3. Modellbausteine des Vorhersagemodells Inn

3.1 Preprocessing der meteorologischen Daten

Das meteorologische Preprocessing wird über das in *Perl* geschriebene Programm *meteoPreprocessing.pl* gesteuert. Es kann in beliebigen Zeitintervallen gestartet werden und führt folgende Schritte aus:

- Import der Daten aus der WISKI-Alpin Datenbank der Hydrographie Tirol
- Import der Daten vom TIWAG-ftp-Server
- Qualitätskontrolle der TIWAG-Daten und Berechnung der Stundenwerte der TIWAG-Daten
- Interpolation der Niederschlagsdaten
- Interpolation der Temperaturdaten

Die Niederschlagsdaten werden mit Inverse Distance Weighting auf einen Raster von 5 km interpoliert. Für die Lufttemperaturen erfolgt die Interpolation ähnlich, nur dass Temperaturfelder in Schichten mit jeweils 100 m Höhenunterschied ausgegeben werden.

Die Übertragung von meteorologischen Vorhersagen von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) wird derzeit installiert.

3.2 Gletschermodell SES

Die schon erwähnte Dynamik der Prozesse auf Gletschern und ihre Auswirkung auf das Abflussgeschehen sollte durch das Gletschermodell beschrieben werden. Insbesondere betrifft dies folgende Prozesse:

- Aufbau der Schneedecke im Winter
- Ausaperung der Eis- und Firnflächen
- Unterbrechung des Ausaperungsvorganges durch Schneefälle
- Wasserabgabe des Gletschers an den Vorfluter mit unterschiedlicher Verzögerung je nach Ausaperungszustand.

- Umwandlung des im Herbst verbliebenen Schnees in Firn des nächsten Jahres.

Weil der Ausaperungszustand des Gletschers die Abflusststehung und ihre Dynamik wesentlich beeinflusst, sollte auch die Dynamik der Ausaperung im Modell abgebildet werden. Daher wurde ein flächendetaillierter Ansatz basierend auf der Energiebilanz an der Grenzfläche zwischen Gletscher und Atmosphäre gewählt. Ein Flussdiagramm der Grundzüge des Energiebilanzansatzes ist bei Blöschl et al. (1987) veröffentlicht, für tiefgreifende Einblicke in die Physik der Ablation von Gletschern siehe Weber, (2005). Die internen Prozesse in der Schneedecke wurden durch stark vereinfachende empirische Ansätze beschrieben (Braun, 1985). Die numerische Lösung des Systems von gekoppelten Differentialgleichungen für Energie- und Massenbilanz von Eis, Wasser und Wasserdampf in der Schneedecke (Blöschl, 1990) ist außerordentlich rechenintensiv und wäre für den Anwendungsfall im Vorhersageverfahren nicht gerechtfertigt.

Speziell in größeren Seehöhen trägt die kurzweilige Sonnenstrahlung den Löwenanteil der Schmelz-Energie in die Schneedecke ein. Der steuernde Parameter dieses Prozesses ist die Albedo, das Reflexionsvermögen der Schneedecke. Die im Jahreslauf und auch kurzfristig sehr unterschiedliche Oberfläche des Gletschers (bedeckt mit Neuschnee, mit Altschnee, mit Firn oder aper) bedingt stark unterschiedliche Albedo und somit auch stark unterschiedliche Strahlungsenergie-Aufnahme, die ihrerseits Rückwirkungen auf die Dynamik des Ausaperungsvorganges hat. Für das Gletschermodell wurde daher ein spezieller Baustein zur Modellierung des zeitlichen Verlaufes der Albedo als Folge unterschiedlicher Einflussfaktoren entwickelt. Dieser Baustein setzt die Beobachtung, dass es im wesentlichen der Energiegenuss ist, der die Metamorphose der Schneedecke und somit auch die Veränderung der Albedo bewirkt, in einen entsprechenden Algorithmus um. Eine nähere Beschreibung dieses Bausteines findet sich in Asztalos (2004) und weiter unten, in Abschnitt 4.1. Das an der Gletscheroberfläche entstehende Schmelzwasser ist auf seinem Weg zum Vorfluter unterschiedlichen Speicherprozessen unterworfen, deren dämpfende Wirkung sich nach dem Zustand des Gletschers richtet. Ist er tief verschneit und/oder mit einer mächtigen Firnaufgabe bedeckt, wirkt dies stark dämpfend und verzögernd auf den Abfluss, ist er aper, dann sind Dämpfung und Verzögerung deutlich geringer. Somit ist das Dämpfungsverhalten auf dem Gletscher sehr heterogen. Ein Teil des Abflusses erfolgt an der Gletscheroberfläche, ein Teil durch das System von intraglazialen Fließwegen. Diese Prozesse werden im Modell durch das Konzept der Kaskade von Linearspeichern beschrieben, deren Speicherkoeffizient und -anzahl für Schnee- oder Firnaufgabe bzw. aperen Gletscher jeweils unterschiedlich ist. Die Kalibrierung bzw. Verifizierung der einzelnen Bausteine wurde an Hand von Daten der Messstellen der Kommission für Glaziologie (KfG) der Bayerischen Akademie der Wissenschaften im Bereich des Vernagtferners im hinteren Ötztal vorgenommen (Escher-Vetter et al., 2005). Speziell betraf dies: a) Bausteine der Energiebilanz incl. Albedomodell an der hydrometeorologischen Messstelle Vernagtbach, und b) die Überprüfung der flächendetaillierten Simulation der Ausaperung des Vernagtferners an Hand von den mit ORIENT/ORPHEUS (Kager, 1989) entzerrten Fotografien des Gletschers, die täglich vom Schwarzkögele (3.079 m)

im ESE des Gletschers aufgenommen worden waren (vgl. Blöschl et al., 1991) und c) die Modellierung des Gletscherabflusses an Hand der Abflussmessstelle der KfG am Vernagtbach. Abbildung 1 zeigt den Ausaperungszustand des Vernagtferners am 15.8.2000 im Foto und als Entzerrung.

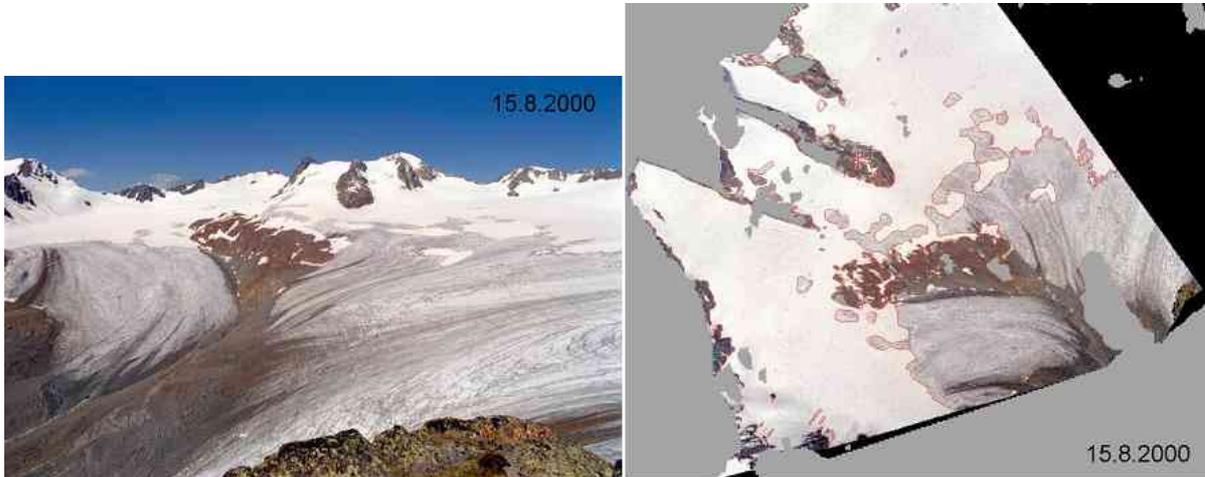


Abb. 1: Foto (KfG) des Vernagtferners und Entzerrung.

3.3 Hydrologisches Modell

Zur Simulation der Abflüsse aus den nicht vergletscherten Einzugsgebietsteilen des Inn wurde das Modell HQsim (Kleindienst, 1996) eingesetzt. Dieses Modell baut auf dem in den USA entwickelten Wasserhaushaltsmodell BROOK auf, das ursprünglich für kleine (ca. 1-2 km² große), in sich einigermaßen homogene Einzugsgebiete entwickelt worden war (Federer und Lash, 1978). An der WSL Birmensdorf wurde das Modell zum Hydrotopmodell umgebaut, sodass die ursprünglichen "homogenen Einzugsgebiete" als Hydrotope innerhalb eines größeren, heterogenen Einzugsgebietes modelliert werden. Der Abfluss aus den Hydrotopen wird sodann zum Abfluss aus dem Gesamtgebiet superponiert. Nach gewissen Modifikationen am Modell (Kirnbauer et al., 1996) wurde das Modell, das ursprünglich mit einer zeitlichen Diskretisierung von einem Tag rechnete, auf beliebige, auch kürzere Zeitintervalle umgeschrieben (Kleindienst, 1996). Hiermit verbunden war die Notwendigkeit, einen Ansatz für das Floodrouting einzubauen. Weitere Modifikationen sind in Kleindienst, (1996) dokumentiert.

In seiner im Vorhersageverfahren für den Inn realisierten Form stellt sich der Kern von HQsim wie folgt dar:

- Kontinuierlich im Stundenschritt arbeitendes Wasserhaushaltsmodell
- Hydrotopgliederung nach den Kriterien: Seehöhe, Neigung, Exposition, Böden, Vegetation.
- Input: Niederschlag, Lufttemperatur, optional: mehrere Niederschlagsstationen, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Bewölkung
- Topographie: Seehöhe, Exposition, Neigung

- Schneeschmelze: modifiziertes Gradtagfaktor-Verfahren, berücksichtigt Topographie, Datum, Uhrzeit
- Vegetation: Blattfläche, Stammfläche
- Bodenwasserhaushalt: unterschieden nach Ober- und Unterboden, nichtlineare Speicher
 - Mualem-Van Genuchten-Approximation der Desorptionskurven
- Oberflächenabfluss: Abflussbeiwert abhängig von der Bodensättigung
 - (variable source area concept)
- Felsuntergrund: Linearspeicher für den Grundwasserabfluss
- Gerinneabfluss: hydrologischer Speicheransatz mit Geschwindigkeitsabschätzung nach Rickenmann (1994), in die das Gerinnegefälle und der Korndurchmesser d_{90} eingeht.
- Output:
 - Flüsse (Q, Verdunstung, Schneeschmelze, ...)
 - Speicherfüllungen (Interzeption, Schnee, Bodenwasser, ...)

Im Vorhersagesystem für den Inn ist das Modell HQsim als JAVA-Programm implementiert.

3.4 Hydrodynamisches Modell

Eine essentielle Aufgabe des hydrodynamischen Modells für das Hochwasserprognosesystem besteht darin, die Beeinflussung des Wellenablaufs am Inn im Voraus möglichst gut abzubilden. Der Betrieb der am Inn liegenden Wasserkraftwerke beeinflusst im Hochwasserfall das Abflussgeschehen vor allem für die stromabwärts liegenden Abschnitte in wesentlicher Weise (Leonhardt et al., 2006). Die große Zahl an Kraftwerken im Gebiet des Tiroler Inn (siehe Abb. 2) ist mitbestimmend für die Modellwahl. An Hand des Beispiels des Ausleitungskraftwerkes Kirchbichl/Inn zeigen Leonhardt et al. (2006) die Möglichkeiten des hydrodynamischen Ansatzes auf, und sie nehmen Bezug auf die bei der Kalibrierung der Modellparameter auftretenden Probleme: Die Ermittlung des Rauigkeitsparameters nach Strickler ist mit Hilfe der inversen Modellierung im Normalfall möglich, in Sonderfällen versagt die Methode, und eine manuelle Kalibrierung erweist sich als überlegen.

In den ersten Stunden des Anstieges einer Hochwasserwelle stützt sich eine etwa vorzunehmende Regelung des Abflusses auf die Ergebnisse des hydrodynamischen Modells. Daher werden Vorhersagen in das Meldesystem der TIWAG eingebunden, um den Diensthabenden mit allen für das Hochwassermanagement notwendigen Informationen zu versorgen. Die folgenden Abbildungen 3 und 4 geben einen Eindruck von zwei möglichen Layouts der Benutzeroberfläche in der Vorhersagezentrale der TIWAG.

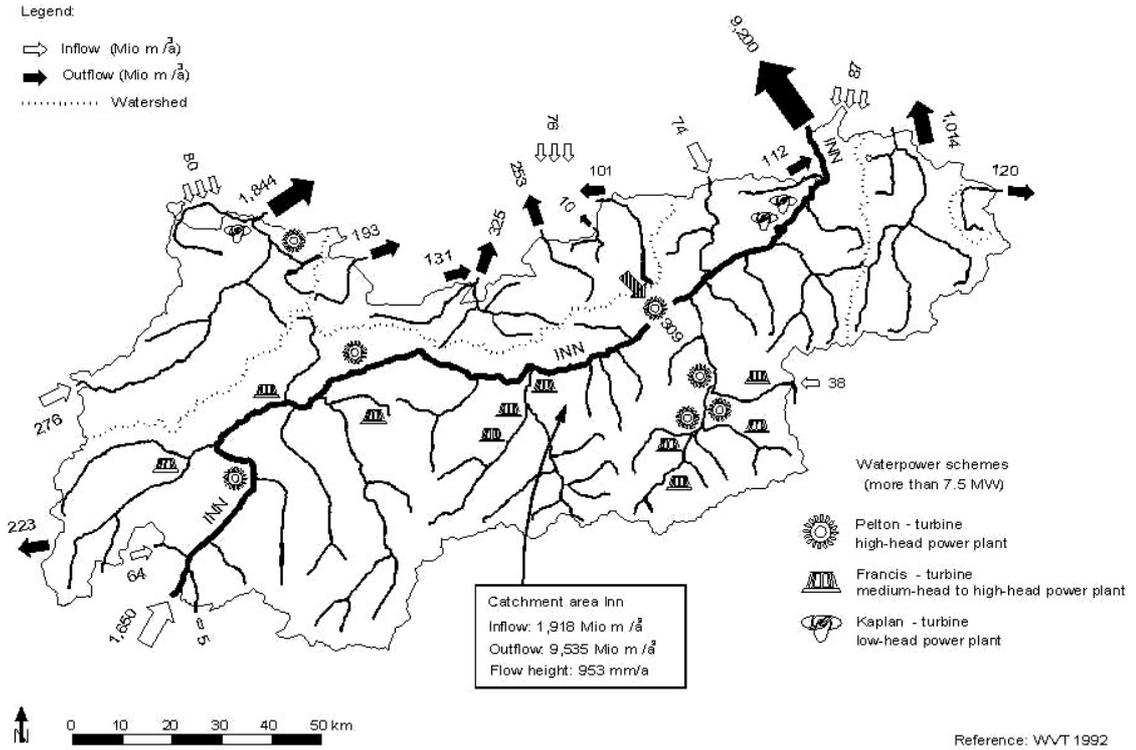


Abb. 2: Tiroler Inn mit Kraftwerksstandorten (Stand 1992).

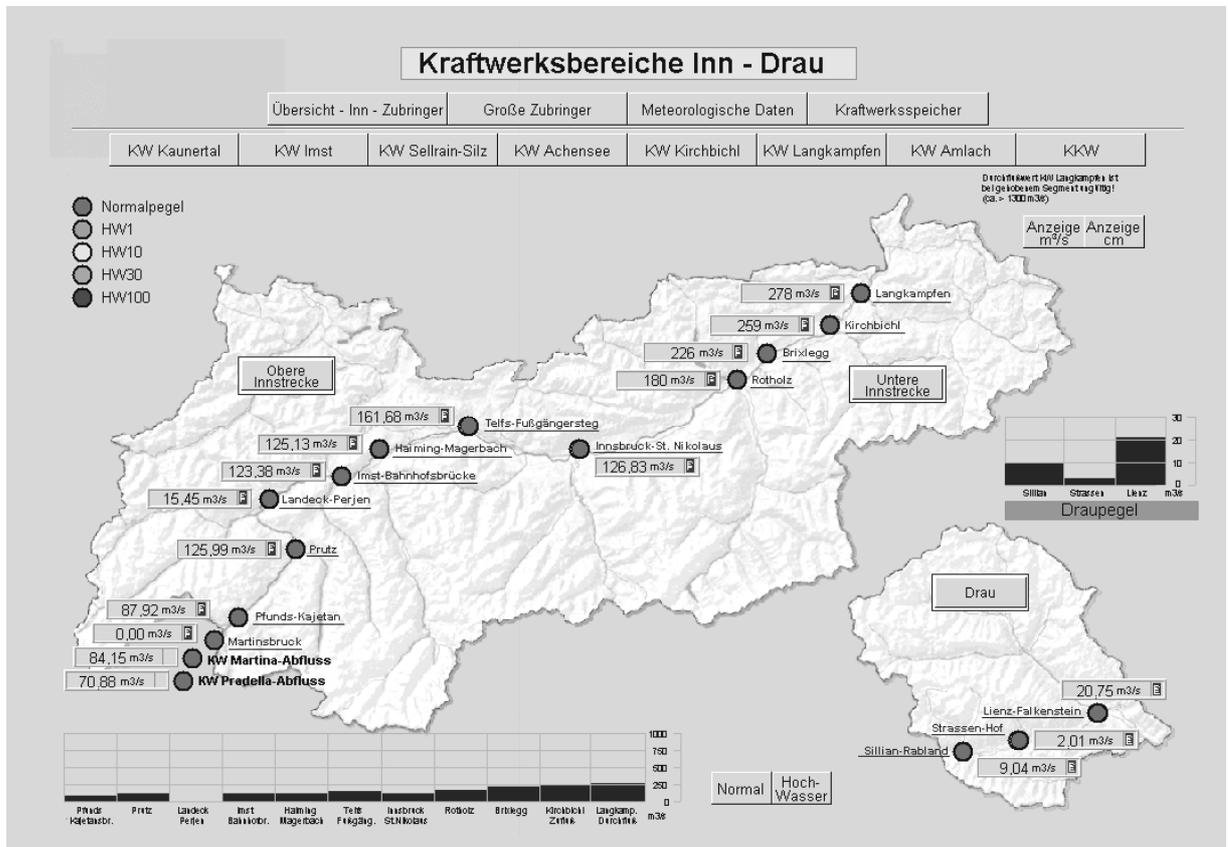


Abb. 3: Benutzeroberfläche der TIWAG für das HW-Management am Inn.

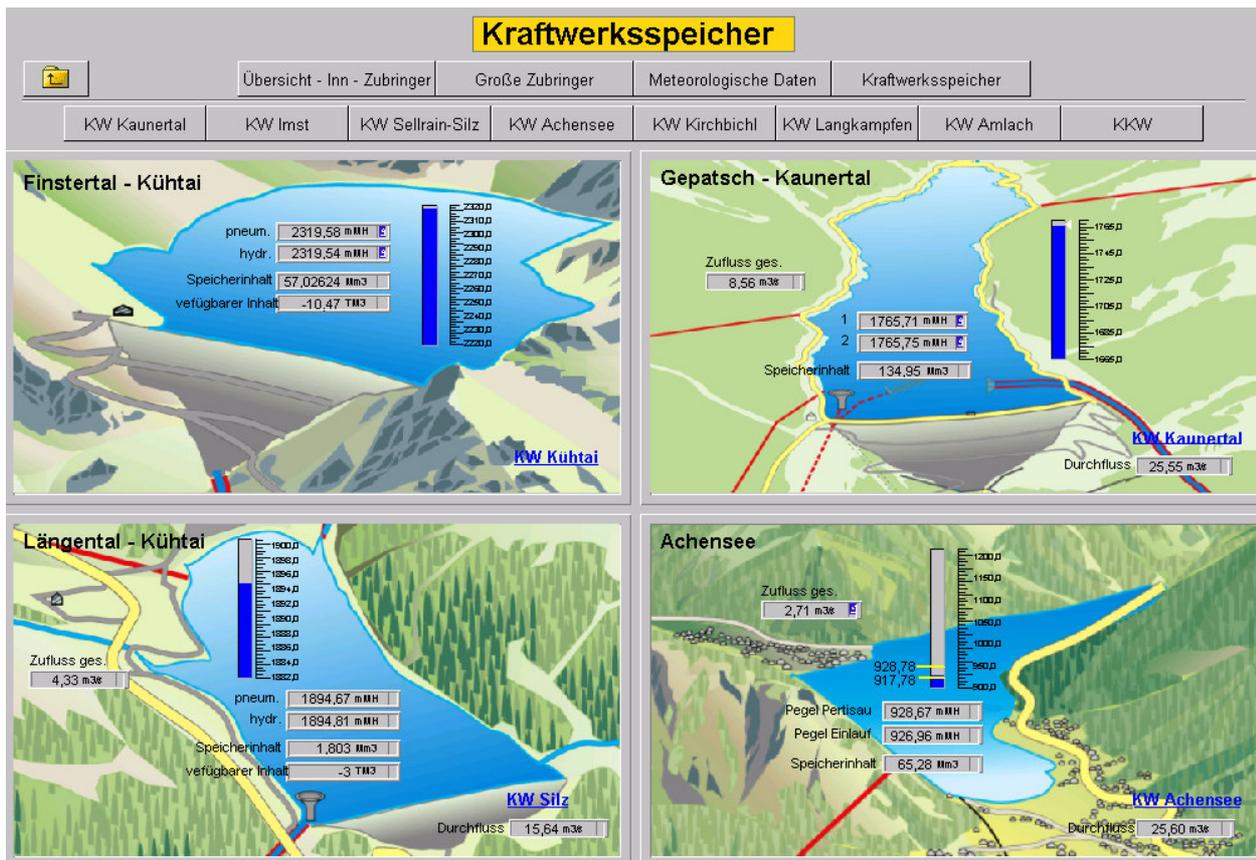


Abb. 4: Benutzeroberfläche der TIWAG für die Bewirtschaftung der Kraftwerksspeicher.

4. Methodische Überlegungen zu einzelnen Modellbausteinen

4.1 Gletschermodell: Albedo

Ein weltweit angewendetes Verfahren zur Beschreibung der Änderung der Albedo nach einem Schneefall ist jenes des U.S. Army Corps of Engineers (1956). Hier wird die Abnahme der Albedo mit der Zeit als abnehmende Exponentialfunktion modelliert (aging curve approach). Dieser Ansatz beschreibt zwar das Phänomen, nicht aber dessen eigentliche Ursachen: Durch die Energiezufuhr kommt es zur Metamorphose der Schneedecke, und die damit verbundene Änderung von Korngröße und -form bewirkt eine Abnahme der Albedo. Ein weiterer Grund liegt in der Verschmutzung des Schnees durch Staub, Algen, o.ä. Im Gletschermodell wird ein Ansatz von Trofimova (1970) in einer abgewandelten Form verwendet. Im Original lautet der Ansatz (Gleichung (2.19) in Asztalos, 2004):

$$a(t) = f(a_N, a_0; Q(t)) \quad 1$$

Hierin sind $a(t)$ die Albedo, a_N , a_0 die Neuschnee- bzw. Altschneealbedo, $Q(t)$ ist die Energiebilanz und f ist eine abnehmende Exponentialfunktion, die sich von der Neuschneealbedo jener des Altschnees annähert. Wie Albedomessungen an Testflächen zeigen (z.B. Blöschl, 1990; Segal et al., 1991; Weber, 2001), ist aber die Al-

bedo keine monoton abnehmende Funktion sondern hat einen ausgeprägten Tagesgang mit einem Minimum um Mittag und einem Anstieg gegen den Abend zu ("Badewannenkurve"). Asztalos (2004) wählte daher einen Ansatz, der außer der Energiebilanz auch deren Ableitung nach der Zeit enthält (a.a.O. Gleichung (4.19)). Hierdurch wird auch ein Anstieg der Albedo ermöglicht. Die Lösung der Gleichung erfordert im Prinzip einige wenige Iterationsschritte, doch kann in der Energiebilanzgleichung auch mit der Albedo des letzten Zeitschrittes gerechnet werden. In der abgeänderten Form lautet der Ansatz

$$a(t_2) = f(a_N, a_0; Q(t_2), \Delta Q(t_2-t_1)) \quad 2$$

mit $\Delta Q(t_2-t_1)$ gleich der Änderung der Energiebilanz von t_1 nach t_2 .

Nach einem Schneefall wird die Albedo wieder auf den Wert der Neuschneealbedo gesetzt. Dies erfolgt aber nur dann, wenn der in einer definierten Zeit gefallene Schnee eine gewisse Menge übersteigt (im Gletschermodell wird dieser Kalibrierparameter auf 2 mm Wasseräquivalent in 6 Stunden gesetzt), denn kleinere Schneemengen geben wegen Windverfrachtung etc. sehr bald die ursprüngliche Oberfläche wieder frei.

Durch die Ausaperung wird im Allgemeinen zuerst die Eisoberfläche der Gletscherzunge, später dann die Firnauflage in der Nährzone des Gletschers freigesetzt. Sind diese Flächen schneefrei, wird auf ihnen die Eis- bzw. Firn-Albedo wirksam. Bei den nicht vergletscherten Flächen erfolgt der Übergang zur Felsalbedo. Im Gletschermodell sind für diese Übergänge von einer zur anderen Oberflächenform Annahmen getroffen, die in Abbildung 5 schematisch wiedergegeben sind.

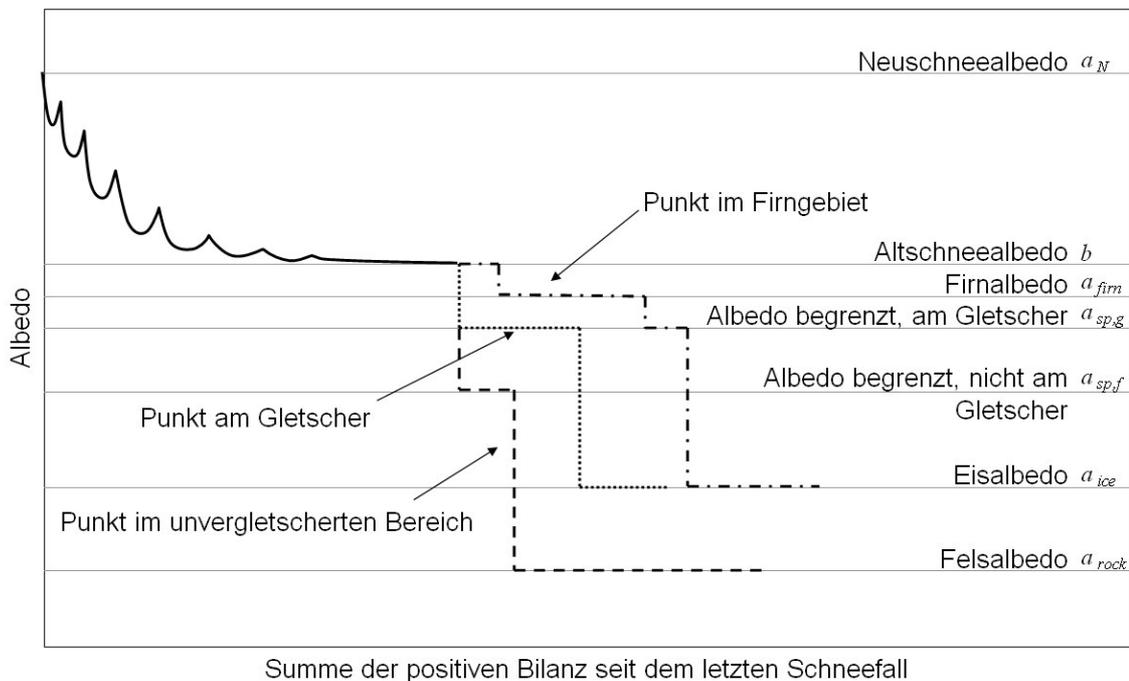


Abb. 5: Albedoverlauf auf unterschiedlichen Oberflächen als Funktion der positiven Energiebilanz seit dem letzten Schneefall.

4.2 Gletschermodell: Bewölkung

Die Bewölkung beeinflusst nicht nur die kurzweilige Strahlungsbilanz untertags sondern die langwellige Bilanz ganztägig. Deshalb ist sie ein wesentlicher Einflussfaktor auf die Energiebilanz. Mangels Bewölkungsmessungen wird im Gletschermodell die Bewölkung derzeit aus der gemessenen und der astronomisch möglichen Globalstrahlung zurückgerechnet (Neuwirth, 1982). Nachts ist letztere Null, und daher versagt dann die Rückrechnung. Es muss also eine Annahme über die Bewölkung in der Nacht getroffen werden: Sensitivitätsanalysen haben ergeben, dass dieser Wert für die nächste Nacht auf den letzten gerechneten Wert des Tages gesetzt werden soll. Im operationellen Betrieb werden die entsprechenden Ergebnisse des Nowcasting-Verfahrens INCA (Haiden et al., 2005) der ZAMG verwendet.

4.3 Gletschermodell: Abfluss vom Gletscher

Der Abfluss des am Gletscher entstehenden Schmelzwassers in den Vorfluter folgt unterschiedlichen Fließwegen und ist auf ihnen unterschiedlichen Retentionsvorgängen unterworfen. Am stärksten retendiert wird das Schmelzwasser aus dem Schnee, sofern es auch den Firn durchsickern muss. Firnschmelze dringt in die intraglazialen Fließwege ein oder bewegt sich an der Grenze zum Gletschereis zu Tal. Eisschmelze gelangt am wenigsten verzögert in den Vorfluter. Schmelzwasser von allen Teilen des Gletschers, und auch jenes aus den nicht vergletscherten Gebieten gelangt partiell auf dem Umweg über den Fels- und Lockergesteinsuntergrund ins Gerinne. Diese Fließwege werden im Modell wie in Abbildung 6 schematisch dargestellt beschrieben. Als Konzept wurde die lineare Speicherkaskade nach Nash gewählt. Die Parameter für die einzelnen Fließwege wurden an Hand der Abflussganglinien am Pegel Vernagtbach bei unterschiedlichen Ausaperungszuständen des Vernagtferners durch manuelle Kalibrierung bestimmt.

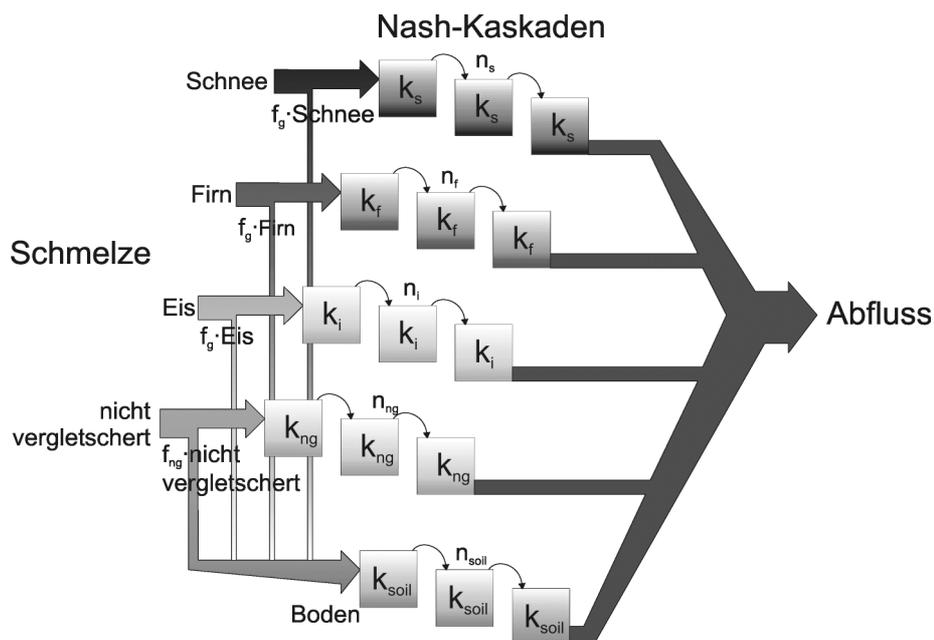


Abb. 6: Fließwege und ihre Abbildung im Modell SES.

4.4 Hydrologisches Modell: Hydrotop-Gliederung

Das Gewässernetz von Tirol ist sehr dicht: Für die hydraulische Modellierung wurden insgesamt ca. 260 Zubringer und Zwischeneinzugsgebiete identifiziert. Einerseits macht es die Struktur des hydrodynamischen Modells unmöglich, eine solche Menge von Zubringern einzubinden, andererseits ist dies auch nicht sinnvoll. Daher wurden kleine Zubringer und Zwischeneinzugsgebiete zu Gruppen zusammengefasst. In Abbildung 7 ist diese vereinfachte Gebietsgliederung für das Gesamtmodell dargestellt.

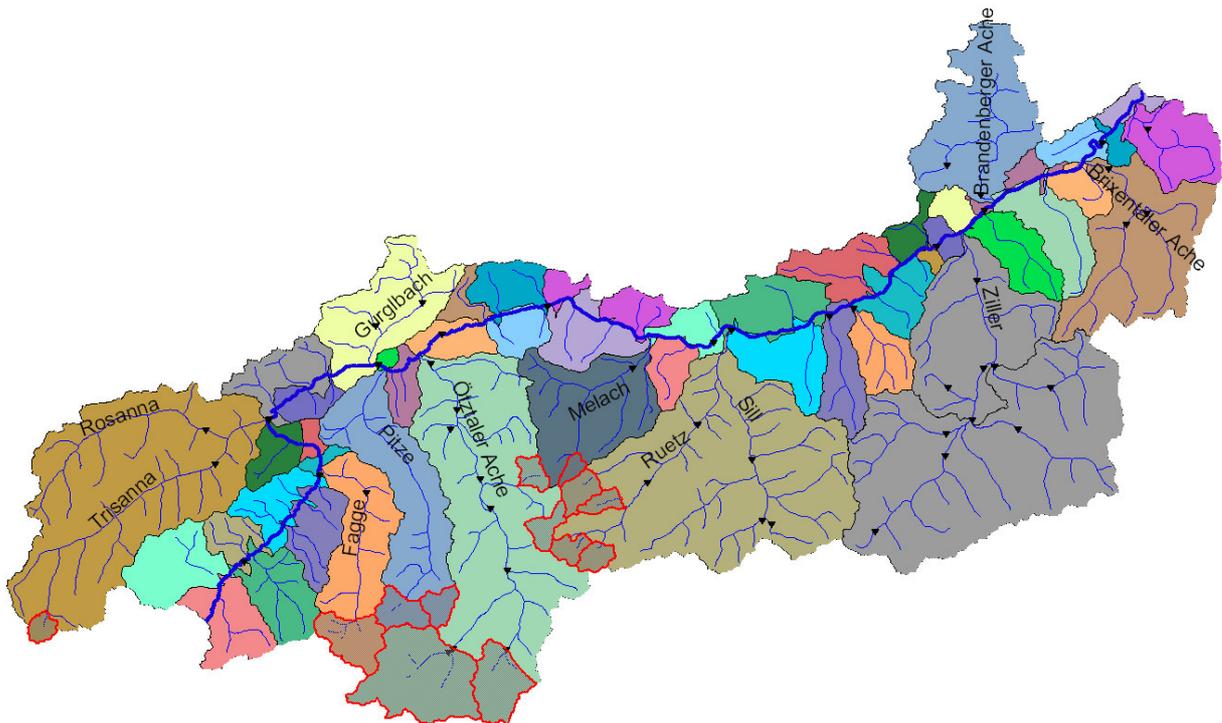


Abb. 7: Gebietsgliederung des Inn-Modells. Rot umrandet: Gletschermodell.

Als Trainingsgebiete für die Ermittlung der Hydrotope und als Referenzgebiete für die Parameterermittlung waren die nachstehenden Gebiete gewählt worden:

- Brandenberger Ache: Kalkalpen - unvergletschert - unbeeinflusst
- Brixentaler Ache: Kristallin - unvergletschert - unbeeinflusst
- Öztaler Ache: Kristallin - vergletschert - unbeeinflusst
- Ziller: Kristallin - vergletschert - beeinflusst
- Fagge (Kaunertal): Kristallin - vergletschert - beeinflusst.

Als Grundlage der Ermittlung der Hydrotope konnte auf folgende digital vorhandenen Unterlagen zurückgegriffen werden: Digitales Höhenmodell (DHM) von Österreich, Bodentypen, Vegetation (Digitaler Hydrologischer Atlas von Österreich).

Die Erfahrungen mit den Referenzgebieten Brixentaler und Brandenberger Ache zeigen: Versucht man eine automatisierte Hydrotop-Ermittlung nach den Kriterien Seehöhe, Neigung, Exposition, Böden, Vegetation durch Verschneidung der entsprechen-

den Layer im GIS, ergeben sich je Einzugsgebiet Hunderte (700 bis 800) Hydrotope. Abgesehen vom großen Aufwand, der notwendig wäre, diese Zahl von Hydrotopen mit Parametern auszustatten und die Fließwege zu konfigurieren, würde das eine deutliche Überparametrisierung (Jakeman and Hornberger, 1993) bedeuten. Manuelles Vereinfachen der Hydrotope ist in diesem Fall notwendig, wenn auch sehr arbeitsaufwändig. Bei der Bearbeitung der weiteren Einzugsgebiete wurden, je nach deren Bedeutung, vereinfachte Kriterien angewendet: Bei kleinen Gebieten ohne Pegelbeobachtungen und bei Zwischeneinzugsgebieten wurde nur nach Seehöhe (Gliederung nach Höhenstufen von 500 m) und nach 6 Bodenarten unterschieden, bei größeren Gebieten mit Pegeln kam noch die Exposition (vier Kategorien) als weiteres Kriterium dazu. Unter diesen Annahmen ergeben sich mit den Kriterien Höhe und Bodenart im gesamten Ötztal mit Ausnahme der Gletschergebiete 19 Hydrotope, mit dem zusätzlichen Kriterium Exposition sind es 74. Die Abbildung 8 zeigt die Gliederung nach der einfacheren der beiden Varianten.

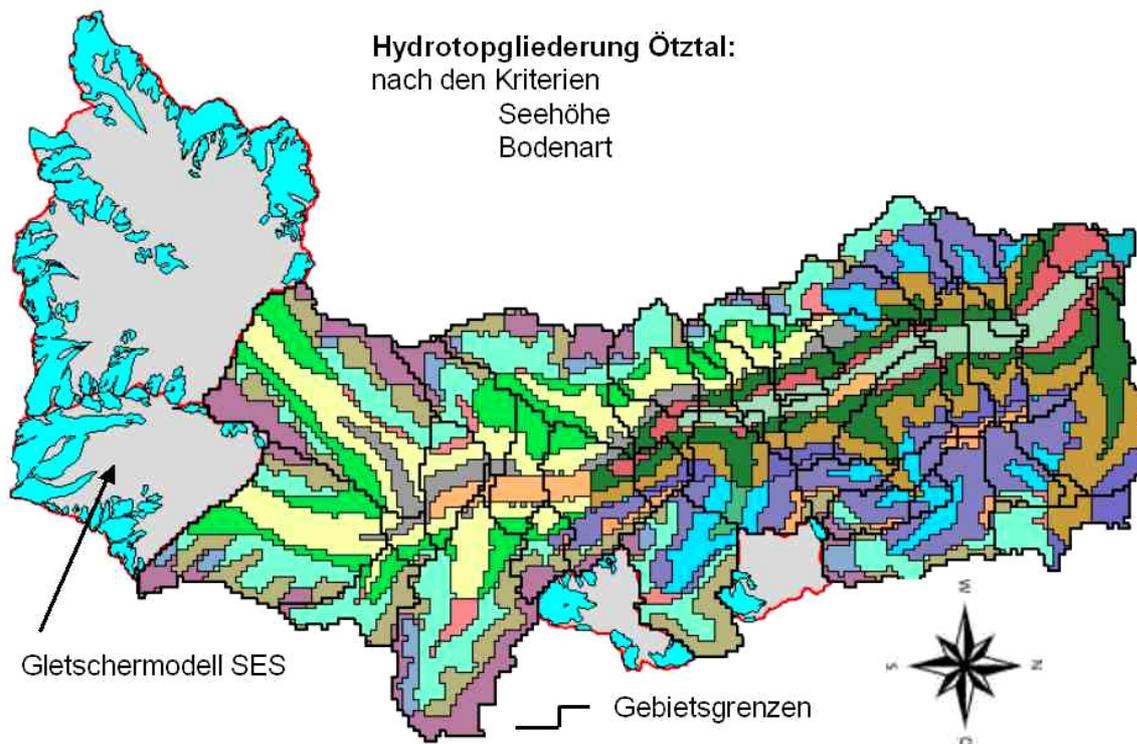


Abb. 8: Hydrotopgliederung des Ötztales nach 6 Höhen- und 6 Bodenkategorien.

5. Zusammenfassung

Das Hochwasservorhersageverfahren für den Inn besteht aus den Hauptbausteinen Preprocessing des meteorologischen Input incl. meteorologische Vorhersagen, Gletscher-Modell, Niederschlag-Abfluss-Modell für unvergletscherte Einzugsgebietsteile der Zubringer des Inn unter Einschluss eines Routing-Modells und einem hydrodynamischen 1D-Modell für den Hochwasserwellenablauf im Inn. Durch die Wahl der Modellbausteine wird versucht, den im Einzugsgebiet des Inn ablaufenden Prozessen bestmöglich gerecht zu werden. Der Heterogenität des Wettergeschehens wird durch

Einbringen von flächendetaillierter Information über die meteorologischen Größen in die hydrologischen Modellbausteine Rechnung getragen. Der im Ereignisfall gravierende Einfluss der Gletscher auf das Hochwassergeschehen bedingt die Aufnahme eines speziellen Gletschermodells in das Vorhersagesystem. Mit seiner Hilfe wird die jahreszeitlich große Variabilität der Abflussreaktion der Gletscher flächendetailliert beschrieben. Das hydrologische Modell bildet dank seiner Hydrotopstruktur die Heterogenität des Einzugsgebietes vereinfachend, aber phänomenorientiert ab, und das hydrodynamische Modell ist geeignet, den Ablauf der Hochwasserwellen im Inn und deren Beeinflussung durch Regelungsvorgänge an den vielen Kraftwerken in Tirol zu beschreiben. Über die Bewährung des eben fertiggestellten Vorhersagesystems im operationellen Betrieb wird noch zu berichten sein.

6. Danksagung

Unser Dank gilt Prof. Dr. F. Schöberl, dem alpS Keyresearcher für den hydraulischen Teil des Vorhersageverfahrens Inn, sowie dem gesamten Team: J. Asztalos, C. Oberparleiter, G. Leonhardt und St. Senfter für wichtige Hinweise zu dieser Arbeit und für gute Zusammenarbeit bei der Erarbeitung des Modells.

7. Literatur

Asztalos, J. (2004) Ein Schnee- und Eisschmelzmodell für vergletscherte Einzugsgebiete. Diplomarbeit Technische Universität Wien.

Blöschl, G. (1990) Snowmelt Simulation in Rugged Terrain - The Gap Between Point and Catchment Scale Approaches. Wiener Mitteilungen Wasser - Abwasser - Gewässer Band 91.

Blöschl, G., Kirnbauer, R., Gutknecht, D. (1991) Distributed snowmelt simulations in an Alpine catchment. 1. Model evaluation on the basis of snow cover patterns. Water Resources Research, 27(1991), vol. 12, pp. 3171-3179.

Blöschl, G., Kirnbauer, R., und Gutknecht, D. (1987) Zur Berechnung des Wärmeintrages an einem Punkt der Schneedecke. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen. 31(1987) H. 5, pp. 149-155.

Braun, L. N. (1985) Simulation of snowmelt-runoff in lowland and lower alpine regions of Switzerland. Zürcher Geographische Schriften, 21: 166 pp.

Braun, L.N. und Weber, M. (2006) Hochwässer in vergletscherten alpinen Einzugsgebieten. In: Tag der Hydrologie 2006 "Risikomanagement extremer hydrologischer Ereignisse" 22. & 23. März 2006 in München

Escher-Vetter, H. Braun, L.N., Siebers, M. and Weber, M. (2005) Water balance of the Vernagtferner high alpine basin based on long-term measurements and modelling. In: Landschaftsökologie und Umweltforschung, TU Braunschweig, Vol. 48, pp. 19-32. <http://www.lrz-muenchen.de/~a2901ad/webserver/webdata/download/BerchtesgadenFullPaper.pdf>

Federer, C. A. and Lash, D. (1978) BROOK: A Hydrologic Simulation Model for Eastern Forests. Water Resource Research Centre, University of New Hampshire, Research Report No. 19.

Forster, F. (1994) Die Simulation hydrologischer Prozesse mit dem Modell BROOK - eine Analyse. In.: Hydrologie kleiner Einzugsgebiete, Gedenkschrift für Hans M. Keller. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz Nr. 35. Hrsg.: Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie (SGHL), Bern und Eidgen. Forschungsanstalt f. Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf. S. 195-208.

Gmeinhardt, W. (1988) Die Hochgebirgsstauseen der Tauernkraftwerke AG als Hochwasserschutzbauten. ÖZE 41(1988), H. 8, S. 240-256

Haiden, T., Kann, A., Pistotnik, G., Stadlbacher, K., Steinheimer, M., Wimmer, F., and Wittmann, C. (2005) Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA). System Overview. Interner Bericht ZAMG. 37pp

Jakeman, A. J. and Hornberger, G. M. (1993) How Much Complexity is Warranted in a Rainfall-Runoff Model? Water Resources Research, Vol. 29, No. 8, pp. 2637-2649.

Kager H. (1989) Orient: A Universal Photogrammetric Adjustment System. In: Optical 3-D Measurement Techniques, Wichmann Verlag, Karlsruhe 1989, pp. 447-455. http://www.ipf.tuwien.ac.at/products/produktinfo/orient/html_hjk/orient.html

Kirnbauer, R., Pirkl, H., Haas, P. und Steidl, R.(1996) Abflußmechanismen - Beobachtung und Modellierung. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 48 (1996) H. 1/2, S. 15-26.

Kleindienst, H. (1996) Erweiterung und Erprobung eines anwendungsorientierten hydrologischen Modells zur Gangliniensimulation in kleinen Wildbacheinzugsgebieten Diplomarbeit, Institut für Geographie, Ludwig Maximilians Universität München, September 1996

Leonhardt, G., Senfter, St., Schöberl, F. und Schönlaub, H. (2006) Ein hybrider Ansatz zur adäquaten Berücksichtigung des Betriebs von Wehr- und Kraftwerksanlagen im Rahmen des Hochwasservorhersagemodells Inn. In: Wasserbaukolloquium 2006: Strömungssimulation im Wasserbau; Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen H. 32, S. 23-30.

Neuwirth, F. (1982): Beiträge zur Strahlungsmeteorologie Österreichs. Habilitationsschrift, Universität Wien.

Pircher, W. (1988) Der Hochwasserschutz als Teil der Mehrzweckfunktion unserer Wasserkraftwerke. ÖZE 41(1988), H. 8, S. 203-209

Reichel, G. Baumhackl, G. (2000) A New Simulation Tool for Flood Routing in Mancontrolled River Systems Focusing on to the Needs of Operational Hydrology, International Symposium on Flood Defense, Kassel, 2000

Rickenmann, D. (1994) Fließgeschwindigkeit in Wildbächen und Gebirgsflüssen. Manuskript für 'wasser, energie, luft'. Baden, Schweiz.

Schöberl, F. und Schönlaub, H. (2003) Efforts for an Improved Management of Floods and Natural Hazards by Linked Research Cooperation in Innsbruck/Austria. In: Proceedings XXX IAHR Congress, August 2003, Thessaloniki, Greece, Theme E, pp.259-266

Schönlaub, H. (2003) Neue Wege des Informationsmanagements im Hochwasserfall. In: Tagungsband Symposium "Wasserkraft im Wettbewerb", Hrsg: Arbeitsgemeinschaft alpine Wasserkraft e.V. (AGAW), Salzburg, 2003.

Segal, M., J. R. Garratt, R. A. Pielke und Z. Ye (1991) Scaling and numerical model evaluation of snow-cover effects on the generation and modification of daytime mesoscale circulations. Journal of the Atmospheric Sciences, 48(8): 1024-1042, <http://blue.atmos.colostate.edu/publications/pdf/R-112.pdf>.

Siemer, A. H. (1988) Ein eindimensionales Energie-Massenbilanzmodell einer Schneedecke unter Berücksichtigung der Flüssigwassertransmission. Berichte des Inst. für Meteorologie u. Klimatologie der Universität Hannover, 34: 167 S.

Trofimova, E. (1970) Metod rascheta otrazhayushchej sposobnosti snezhnogo pokrova (Eine Methode zur Berechnung der Reflexionseigenschaften von Schneeoberflächen). Sredneaziatskij Nauchno Issledovatel'skij Gidrometeorologicheskij Institut, Leningrad, 52(67): 21-25, zitiert in Siemer (1988).

Tschada, H. und Moschen, H. (1988) Die Hochwasserschutzfunktion der Speicherkraftwerke der TIWAG. ÖZE 41(1988), H. 8, S. 256-265

U.S. Army Corps of Engineers (1956) Snow hydrology, Summary report of the snow investigations. North Pacific Division, Portland (Oregon).

Weber, M. (2001) Der Einfluß der Luftfeuchte auf die Ablation des Vernagtferners - Ergebnisse der Feldmesskampagnen HyMEX98 und HyMEX2000, Beitrag zur Tagung DACH-MT 2001 in Wien
<http://www.lrz-muenchen.de/~a2901ad/webserver/webdata/download/dach2001.pdf>

Weber, M. (2005) Mikrometeorologische Prozesse bei der Ablation eines Alpengletschers. Dissertation Universität Innsbruck;
http://meteo9.uibk.ac.at/dissertations/Weber_Markus_2005_Diss.pdf

Anschrift der Verfasser:

Dr. Robert Kirnbauer
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/222, A-1040 Wien
Email: kirnbauer@hydro.tuwien.ac.at

Dipl.-Ing. Dr. Helmut Schönlaub
Tiroler Wasserkraft TIWAG
Eduard-Wallnöfer-Platz 2, A- 6020 Innsbruck
Email: helmut.schoenlaub@tiwag.at

SIMULATION DER KRAFTWERKSSTEUERUNG AM KAMP

Christian Reszler, Günter Blöschl, Jürgen Komma

1. Einleitung

Nach dem Hochwasser im August 2002 wurde mit der Entwicklung eines Hochwasservorhersagesystems für den beim damaligen Ereignis stark betroffenen Kamp begonnen. Ziel ist die Erstellung von kontinuierlichen Vorhersagen für 48 Stunden für fünf Prognosestellen im Kamptal. Zur Erstellung von Abflussprognosen unterhalb der Kraftwerke ist die für die nächsten 48 Stunden prognostizierte Abgabe aus der Speicherkette erforderlich. Hierfür kann die geplante Abgabe vom Betriebsleiter manuell eingegeben werden. Darüber hinaus wurde ein Modell erstellt, das in Echtzeit die Verformung der Hochwasserwelle durch die Kraftwerkskette beschreibt. Der sogenannte „Kraftwerksmodul“ simuliert basierend auf den prognostizierten Zuflüssen zu den drei Speichern die Wasserführung der Speicherkette, wie z.B. Speicherstände, Wehrverschlussstellungen, Turbinendurchflüsse, und somit die Abgabe aus der Speicherkette für 48 Stunden im Voraus. Er ermöglicht eine automatische und kontinuierliche Erstellung von Prognosen der Abgabe aus der Speicherkette, wodurch vor allem im Hochwasserfall die Betriebsführung unterstützt werden soll. Eine rasche automatische Simulation ist aber auch Voraussetzung für die Erstellung von Ensemblevorhersagen, wodurch die Unsicherheit der Niederschlagsprognosen in die Hochwasserprognosen einbezogen werden kann. Zur Erstellung eines Ensembles von Abflussprognosen müssen bei einem Prognoselauf bis zu 50 Berechnungsläufe mit unterschiedlichem Niederschlagsinput durchgeführt werden.

Bei der Berechnung der zukünftigen Abgabe aus einer Speicherkette handelt es sich um ein Optimierungsproblem. In der Regel stehen sich beim Betrieb von Kraftwerken mehrere - sich teilweise konkurrierende - Bewirtschaftungsziele bzw. -strategien gegenüber. Durch Lösung der Optimierungsaufgabe kann diejenige Steuerung der Betriebsorgane - und somit die Gesamtabgabe aus den Speichern - gefunden werden, die nach den verschiedenen Bewirtschaftungszielen ein Optimum darstellt. Ein Überblick über verbreitete Optimierungsmethoden und -modelle (z.B. lineare Programmierung, dynamische Programmierung, nichtlineare Programmierung und Simulation) wird von Yeh (1985) und Wurbs (1993) sowie in einer jüngeren Publikation von Labadie (2004) gegeben. Mathematische Optimierungsmodelle werden formuliert, indem eine Zielfunktion durch einen Satz von Entscheidungsvariablen unter Berücksichtigung der Randbedingungen minimiert oder maximiert wird. Typischerweise fließen in die Formulierung der Zielfunktion ökonomische Kosten-Nutzen-Aspekte, Wasserverfügbarkeit und -qualität sowie Energieerzeugung ein. Im Gegensatz zur rein mathematischen Optimierung liefert die Simulation nicht direkt eine optimale Lösung. Es wird keine explizite Zielfunktion minimiert oder maximiert. Mit Simulationsmodellen wird im Kraftwerks- und Speichermanagement gearbeitet, um das mitunter komplexe physikalische und hydrologische Systemverhalten eines Speichers näherungsweise mit einem Modell nachzubilden. Mit

alternativen Annahmen können dann mehrere Läufe gerechnet werden, wodurch ersichtlich wird, wie das System auf veränderte Bedingungen reagiert. Dadurch ist es indirekt möglich, ein Optimum oder eine Lösung nahe an der optimalen zu erreichen.

Aus der Erfahrung der Betreiber bestimmen zusätzlich zur rein physikalischen Charakteristik der Anlage weitere Einflussgrößen die Bewirtschaftung der Kraftwerkskette am Kamp. Wasserwirtschaftliche Aspekte, wie zum Beispiel das Nutzen des freien Speichervolumens zum Auffangen der Hochwasserwelle oder der Wunsch zur Reduktion der Hochwasserspitze unterhalb der Kraftwerke, aber auch Rücksichtnahme auf zusätzliche Nutzungsinteressen (z.B. Tourismus) werden in den Betrieb einbezogen. Auch besitzt der Kraftwerksbetreiber Erfahrungen mit meteorologischen und hydrologischen Prognosen und deren Bezug zur Betriebssituation. Viele dieser oft konkurrierenden Aspekte der Bewirtschaftung liegen meist in verbaler oder textlicher Form vor und sind nicht in Zahlen zu fassen bzw. in zufriedenstellender Genauigkeit zu quantifizieren. In der jüngeren Literatur (z.B. Ahmad und Simonovic, 2000) wird vorgeschlagen, die Modellierung der Speicherbewirtschaftung nicht nur auf Basis komplexer, dynamischer Systeme zu beschreiben, sondern auch den Nutzer - in diesem Fall den Kraftwerksbetreiber - in die Entwicklung mit einzubeziehen, um einerseits dessen Erfahrungen zu berücksichtigen und andererseits dessen Vertrauen in das Modell zu stärken.

Ziel des Kraftwerksmoduls ist daher ein Ansatz zur Lösung des Optimierungsproblems, der auch die zusätzlichen Aspekte aus den Erfahrungen der Kraftwerksbetreiber berücksichtigen soll. Aufgrund der Vielzahl an Einflussgrößen wurde kein rein mathematisch/analytischer Ansatz gewählt. Es wurde keine umfassende Zielfunktion aufgestellt, sondern ein Simulationsmodell basierend auf einem Satz von Steuerungsregeln erstellt, welcher die Bewirtschaftungsziele implizit enthält. Die Steuerungsregeln wurden in ausführlichen Gesprächen mit dem Betreiber in einem iterativen Prozess aus einer Analyse der bisher praktizierten Betriebsführung im Hochwasserfall entwickelt. Das Modell wurde angeeicht an den gefahrenen Betrieb in der Vergangenheit, sowie an die Einschätzung der Betriebsführung bei hypothetischen Szenarien. Dies bietet auch die Möglichkeit des Trainings anhand von Szenarien unterschiedlicher meteorologischer und hydrologischer Situationen.

2. Grundlagen

2.1 Technische Daten

Der Speicher *Ottenstein* (Abbildung 1) besitzt den größten Stauraum der Speicherkette mit 4,3 km² Oberfläche und 51 Mio. m³ Nutzinhalt. Bezüglich Speichercharakteristik stellt Ottenstein einen Jahresspeicher dar; der Speicher wird im Zuge eines Jahres abgearbeitet. Die Hochwasserentlastung besteht aus zwei Klappen mit einer Überfallbreite von je 27 m. Der maximale Turbinendurchfluss beträgt für die 4 Maschinen in Summe 100 m³/s. Zwei der Maschinen sind als Pumpen einsetzbar (Umkehrung). Vom unterliegenden Speicher Dobra wird bei Bedarf Wasser in den Speicher Ottenstein zurück gepumpt.

Der Speicher *Dobra* besitzt bei Stauziel eine Oberfläche von 1,5 km² und einen Nutzinhalt von 20 Mio. m³. Er dient als Wochenspeicher bzw. Ausgleichsspeicher des Kraftwerks Ottenstein. Die Hochwasserentlastung ist ein freier Überfall über einen festen Wehrrücken mit einer Breite von 65 m. Eine Steuerung der Abgabe ist nur über die Turbinen möglich. Der maximale Turbinendurchfluss im Kraftwerk Krumau beträgt für die drei Maschinen in Summe 30 m³/s.

Der Speicher *Thurnberg* hat die Funktion eines Ausgleichsbeckens und besitzt bei Stauziel eine Oberfläche von 0,4 km² und einen Nutzinhalt von 0,8 Mio. m³. Die Höhendifferenz zwischen Stauziel und Absenkziel beträgt im Normalfall lediglich 2 m, in Ausnahmefällen 4 m (Tagesspeicher). Die Hochwasserentlastungsanlage besteht aus drei Senkschützen mit je 8,60 m Breite. Die Betriebswassermenge beträgt 16,5 m³/s (2 Maschinen).



Abb. 1: Kraftwerk Ottenstein (Foto: EVN).

Tabelle 1 zeigt einen Überblick über die technischen Daten der Kraftwerkskette Ottenstein-Dobra-Thurnberg am Kamp. Grundsätzlich hat der größte Speicher Ottenstein den größten Einfluss auf die Verformung der Hochwasserwelle. Bei genügend großem Speicherfreiraum am Beginn des Ereignisses ist durch eine entsprechende Steuerung der Klappen eine gewisse Volumen- und Scheitelreduktion möglich. Sind die Klappen vollständig gesenkt, erfolgt nur noch die natürliche Retention durch den Überstau im Speichersee. Die Speicher Dobra und Thurnberg besitzen einen viel geringeren Einfluss auf die Hochwasserwelle. Im Speicher Dobra kann es lediglich zu einer Verzögerung der Welle kommen, wenn der Speicher

abgesenkt ist. Es benötigt einige Zeit, bis der Wasserspiegel bis auf Stauziel ansteigt und der Überlauf anspringt.

Tab. 1: Technische Daten der Kraftwerkskette Ottenstein-Dobra-Thurnberg (KW bedeutet Kraftwerk, AE die Einzugsgebietsfläche, STZ das Stauziel, V den Nutzinhalt, O die Oberfläche bei Stauziel, HWE die Art der Hochwasserentlastung, Ma die Maschinen.

Speicher	KW	A _E (km ²)	STZ (m)	V (10 ⁶ m ³)	O (km ²)	HWE	Turbinen
Ottenstein	Ottenstein	889	495,0	51	4,3	2 Stau- klappen	4 Ma Σ100m ³ /s
Dobra	Krumau	940	437,0	20	1,5	freier Überfall	3 Ma Σ30m ³ /s
Thurnberg	Wegscheid	1015	364,0	0,8	0,4	3 Senk- schützen	2 Ma Σ16,5m ³ /s

2.2 Typische Betriebssituationen

Im Hochwasserfall betreffen bescheidmäßige Vorgaben zulässige Staukoten in den Speichern. Der typische Betrieb der Speicher ist abhängig von der jeweiligen Situation. Je nach Ereignistyp (Ereignisgröße, saisonales Auftreten) werden vom Betreiber unterschiedliche Betriebsweisen angewandt. So wird zum Beispiel vor Beginn der Schneeschmelze oder nach einem Hochwasserereignis, wenn die Böden gesättigt sind, Stauraum freigehalten, um eventuell nachfolgende erhöhte Zuflüsse in den Speichern auffangen zu können. Bei trockenen Verhältnissen oder bei kurzen Gewittern wird die Abgabe oftmals unverändert gelassen, da aufgrund der geringeren Zuflussvolumina zu erwarten ist, dass die Welle in den Speichern aufgefangen werden kann.

Konkret stellt sich im Hochwasserfall die typische Betriebsführung folgendermaßen dar, dass in Abhängigkeit der gemeldeten Durchflüsse an den Oberliegerpegeln und der im Einzugsgebiet gefallenen Niederschläge sowie unter Einbeziehung des vorhandenen freien Speichervolumens aller drei Speicher die Abgabe (Turbinenabgabe, Abgabe über das Wehr) für die nächsten Stunden vom Werksleiter in Ottenstein festgelegt wird. Fällt die Entscheidung für eine Erhöhung der Abgabe, so werden üblicherweise zuerst in Thurnberg/Wegscheid die 2 Maschinen angeworfen und die Abgabe auf 16,5 m³/s erhöht. Steigt der Zulauf weiter, werden die Schützen an der Sperre Thurnberg gesenkt und die Abgabe bis auf in Summe 30 m³/s erhöht. Im nächsten Schritt wird unter Bedachtnahme auf die Zuflüsse zum Kamp unterhalb der Speicherkette entschieden, zu welchem Zeitpunkt mehr als 30 m³/s in den Unterlauf des Kamp abgegeben werden. Bei entsprechenden Gegebenheiten kann die Abgabe in Ottenstein frühzeitig erhöht und der Wasserspiegel im Speicher (vor)abgesenkt werden, um ein möglichst großes Volumen der zulaufenden Welle in der freigemachten Lamelle auffangen zu können. Die Abgabe erfolgt so lange wie möglich

ausschließlich über die Turbinen (in Ottenstein z.B. bis 100 m³/s). Die Pumpen werden bei Hochwasser nicht eingesetzt.

Fällt die Entscheidung für eine Verringerung der Abgabe, werden die Klappen bzw. Schützen gehoben. Wird weniger abgegeben als zuläuft, kommt es zu einer Aufspiegelung im Speicher. Im Scheitelsbereich der Hochwasserwelle ist der Zeitpunkt der Klappen- bzw. Schützenhebung kritisch und schwer entscheidbar. Beginnt man im Falle des Speichers Ottenstein mit der Klappenhebung zu früh, wird der Speicher vor Eintreffen des Scheitels vollständig aufgefüllt, und es besteht keine Möglichkeit mehr, die Zulaufwelle im Bereich der Spitze zurückzuhalten. Denn ist das Stauziel einmal erreicht, muss der Wasserspiegel konstant gehalten werden. Um den Wasserspiegel konstant zu halten, werden die Klappen derart gesteuert, dass gleich viel abgegeben wird wie zuläuft. Sind die Klappen einmal vollständig gelegt, kann die Hochwasserwelle nicht mehr beeinflusst werden. Steigt der Zulauf nun weiter an, setzt die natürliche Seeretention durch den Überstau ein, die aufgrund der großen Oberfläche in Ottenstein beträchtlich ist. Erfolgt die Aufspiegelung erst nach dem optimalen Zeitpunkt, bleibt der Wasserspiegel im Speicher nach dem Ereignis womöglich weit unter dem Stauziel, was aus energiewirtschaftlichen Gründen nicht angestrebt wird. Das Wissen über Zeitpunkt und Ausmaß der zulaufenden Hochwasserspitze ist zur Steuerung also äußerst wichtig.

Mittels dieser Vorgangsweise der Nutzung des freien Speichervolumens wurden vom Betreiber in der Vergangenheit kleinere und mittlere Hochwässer in den Speichern aufgefangen bzw. deren Scheitel reduziert. Wie das Extremhochwasser im August 2002 zeigte, sind allerdings die Möglichkeiten des Hochwasserschutzes durch die Charakteristik der Anlage begrenzt, da die Zuflussvolumina im Vergleich zu den freien Speichervolumina sehr groß sein können (Gutknecht et al., 2002).

Die wichtigsten Fragestellungen zum Setzen von Maßnahmen aus der bisherigen Praxis können daher wie folgt zusammengefasst werden:

- Wie groß ist der Zulauf zu den drei Speichern?
- Wie groß ist das freie Speichervolumen?
- Wie ist die Situation im Unterlauf des Kamp?

3. Entwicklung der Regeln für die Kraftwerkssteuerung

3.1 Steuerungsprinzip des Kraftwerksmoduls

Der Kraftwerksmodul soll die Betriebsweise im Hochwasserfall simulieren, indem die zukünftige Turbinenabgabe bzw. Klappen- und Schützenstellung über 48 Stunden basierend auf die Zuflussprognosen berechnet wird. Die Basis für die künftige Steuerung bilden REGELN, die unter Berücksichtigung der bescheidmäßigen Vorgaben, der typischen Betriebsführung und der technischen Daten der drei Speicher folgendermaßen formuliert wurden: „WENN (REGELKRITERIUM), DANN (REGELMASSNAHME)“.

Abbildung 2 zeigt das Prinzip des Kraftwerksmoduls. Jeder zukünftige Zeitschritt t_{pi} innerhalb der Prognosefrist von 48 h wird als ein Prognosezeitpunkt (Anfangspunkt einer „eigenen“ Prognose - t_0^*) angesehen. Die Prognosen und somit die Prognosefrist zur Kraftwerkssteuerung werden bei Fortschreiten in die Zukunft dabei immer kürzer; die Prognosefrist wird schließlich beim letzten Zeitschritt 0. An jedem dieser künftigen Zeitpunkte wird dann die Abgabe aus dem jeweiligen Speicher (Turbinendurchfluss und Klappen- bzw. Schützenstellung) anhand der Regeln berechnet (192 Zeitpunkte). In Abbildung 3 ist ein Beispiel für eine Regelmaßnahme in der Zukunft dargestellt. Das Beispiel zeigt die Prognose der Abgabe in Form einer stufenweisen Erhöhung. Der prognostizierte Zulauf ist größer als die Abgabe, wodurch in der Prognose der Speicher rechnerisch aufgestaut und die Welle aufgefangen wird.

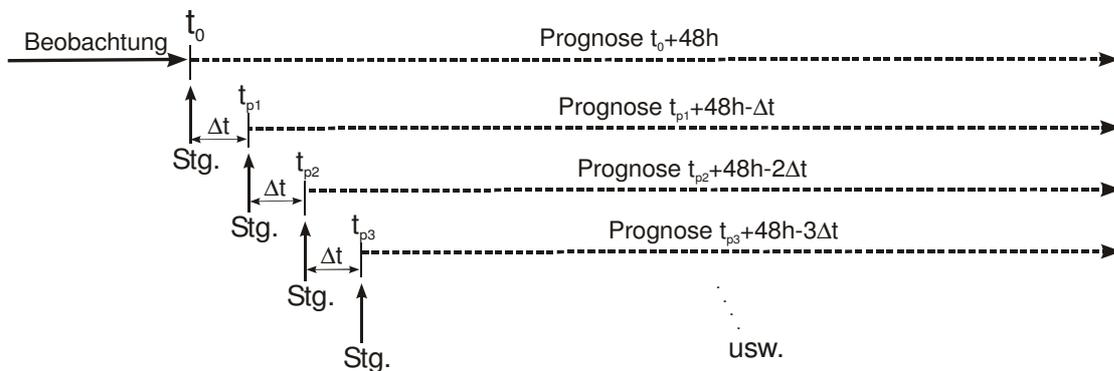


Abb. 2: Prinzip der Steuerungssimulation: Fortschreiten des Prognosezeitpunkts t_{pi} . Stg. steht für Steuerung. Δt ist der Zeitschritt (15min).

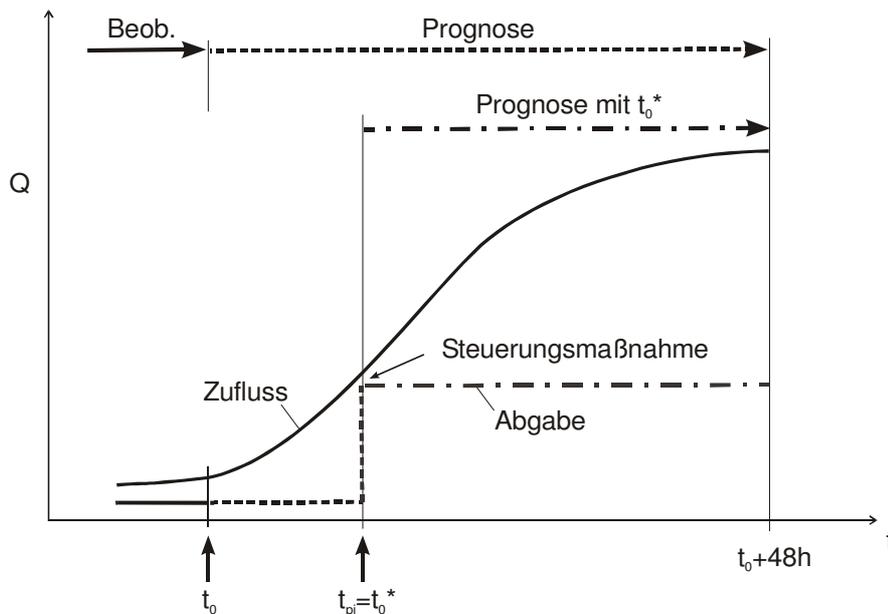


Abb. 3: Beispiel für die Simulation einer Steuerungsmaßnahme an einem zukünftigen Zeitpunkt.

3.2 Vorgangsweise zur Ermittlung der Regeln

Die Entwicklung der Regeln ging in einem iterativen Prozess unter Einbindung der Erfahrungen des Kraftwerksbetreibers vor sich. Unter Vorlage von Beispielsrechnungen (unterschiedliche Ereignisgrößen, Randbedingungen) wurde in eingehenden Gesprächen nach jedem Entwicklungsschritt die Betriebsweise (Regelmaßnahmen) diskutiert und bewertet. Es wurde versucht, die Frage zu beantworten, ob in diesem Fall bei Vorliegen einer Prognose ähnlich gehandelt werden würde, und Vergleiche mit durchgeführten Betriebsweisen bei vergangenen Ereignissen hergestellt. So wurden zum Beispiel Grenzen bzw. Marken für den Übergang vom Regelbetrieb (Nieder- und Mittelwasser) zum Hochwasserbetrieb diskutiert. Der Vorgang bei Erhöhung der Abgabe wurde stufenförmig festgelegt. Zuerst soll im Kraftwerksmodul die Turbinenkapazität voll ausgenutzt werden, das heißt die gesamte Abgabe erfolgt über die Turbinen, dann erst erfolgt die Abgabe über das Wehr. Diskutiert wurde auch, bis zu welchem Maße eine Vorabsenkung gerechtfertigt wäre, ohne dass es im Falle von Fehlprognosen zu energiewirtschaftlichen Einbußen durch Absenkung des Stauspiegels oder gar zu einer Erzeugung künstlicher Hochwässer im Unterlauf käme.

Anhand der Szenarien und vorläufigen Regeln wurden Testrechnungen durchgeführt (siehe Kapitel 4). Wurden die Ergebnisse akzeptiert, dann wurden Regelkriterium und Regelmaßnahme beibehalten. Andernfalls kam es zu einer Neuformulierung der Regeln (Iteration). Dieser Prozess kann als eine Optimierung im Sinne der Modellentwicklung angesehen werden. Der Betreiber wurde aktiv in die Erstellung und Adaptierung der Regeln eingebunden; seine Einschätzung, z.B. der Realisierbarkeit, etc., der vorgelegten Szenarien entschied über eine Beibehaltung oder Neuformulierung der Regeln. Der endgültige Regelsatz kann daher als Expertensystem bezeichnet werden, in Hinblick auf vorhandenes Expertenwissen über das Systemverhalten.

3.3 Regeln zur Kraftwerkssteuerung

Aus den drei grundsätzlichen Fragen zur Kraftwerkssteuerung im Hochwasserfall beziehend auf die bisherige Praxis (siehe Kap. 2.2) ergibt sich, dass die Betriebsweise der Kraftwerke hauptsächlich vom prognostizierten Zufluss und vom freien Speichervolumen der Kampkette innerhalb der Prognosefrist abhängt. Werden bestimmte Marken des Zuflusses zu den Speichern oder des freien Speichervolumens über- bzw. unterschritten (REGELKRITERIUM), tritt eine Änderung der Betriebsweise bzw. ein Übergang von einer Regel zur anderen in Kraft (REGELMASSNAHME). Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden für diese Kriterien der Zufluss und das freie Volumen lediglich im obersten Speicher Ottenstein gewählt. Das verhältnismäßig geringe Volumen der Speicher Dobra und Thurnberg sowie deren geringe direkte Einzugsgebietsflächen unterstützen die Plausibilität dieser Annahme.

Die dritte Frage nach Kriterien, die den Hochwasserschutz für den Unterlauf betreffen, wurde implizit in den Regeln berücksichtigt, wie zum Beispiel die zusammen mit dem Betreiber gewählten Beschränkungen der Abgabe beziehend auf kritische Koten

im Unterlauf des Kamp etwa im Falle der Vorabsenkung. Darüber hinaus können durch Analyse der Prognoseergebnisse an unterliegenden Prognosestellen - entweder visuell innerhalb des Prognosesystems online oder durch Szenarienrechnungen offline - die Auswirkungen der vom Kraftwerksmodul berechneten Betriebsweise sehr schnell abgeschätzt werden.

Aus der Diskussion der Szenarien wurden acht Regeln definiert, wobei zwischen den einzelnen Regeln Übergangsbereiche geschaffen wurden. Ein Oszillieren der Abgabe aufgrund unmittelbar aufeinanderfolgender Über- und Unterschreitung der Abfrageparameter (schnelles „Hin- und Herspringen“ zwischen den Regeln) wurde durch die Formulierung einer Hysterese innerhalb des definierten Übergangsbereiches vermieden.

Die acht Regeln gliedern sich unter Bedachtnahme auf die betrieblichen Anforderungen abgeleiteten Typen/Fälle in vier Gruppen mit den folgenden Bezeichnungen: Schönwetterregeln; Freies-Volumen-Regel; Regeln zur Vorabsenkung; und Schlechtwetterregeln (siehe Tabelle 2). Ist zum Beispiel der prognostizierte Zufluss klein, besteht kein Handlungsbedarf (Schönwetter – Regelnummer SCHÖ_R1). Sind größere Zuflüsse prognostiziert, aber das freie Speichervolumen über die Prognosefrist relativ groß, kann ebenfalls die Abgabe belassen werden (Fall Freies Volumen maßgebend – Regelnummer FV_R3). Schrumpft das freie Speichervolumen über die Prognosefrist unter einen definierten Wert, wird – soweit möglich – vorabgesenkt (Regelnummer VA_R4 und VA_R5).

Im Hochwasserfall treten dann die Regeln SCHL_R6 bis SCHL_R8 in Kraft. Vorerst wird im Kraftwerksmodul versucht, die Hochwasserwelle nur unter Verwendung der Turbinen in den Speichern aufzufangen (SCHL_R6). Ist dies nicht möglich, das heißt, unterschreitet das freie Speichervolumen über die Prognosefrist einen kritischen Wert, müssen die Klappen und Schützen rechnerisch gesenkt werden. In dieser Phase wird unter Ausnutzen der vollen Turbinenleistung die Steuerung der Klappen und Schützen optimiert, sodass zulässige Koten über die Prognosefrist nicht überschritten werden und der Speicher nach dem Ereignis möglichst voll ist. Können die Klappen bzw. Schützen rechnerisch gehoben werden, ohne dass die genannten Bedingungen verletzt werden, kommt es zu einer rechnerischen Aufspiegelung im Speicher und einer Reduktion der Abgabe (SCHL_R8). Falls dies nicht möglich ist, wird der Stauspiegel konstant gehalten (SCHL_R7). Letzteres wird erreicht, indem im Kraftwerksmodul die Abgabe gleich dem Zufluss gesetzt wird. Die entsprechenden Wehrstellungen werden daraus rückgerechnet. Im Kraftwerksmodul sind für die Kriterien in Tabelle 2 Zahlenwerte bzw. Kombinationen von Zahlenwerten hinterlegt.

Tab. 2: Regeln zur Kraftwerkssteuerung.

Fall	Kriterium Zufluss	Kriterium freies Vol.	Maßnahme	Regel Nr.
Schönwetter	klein	groß	kein Handlungsbedarf, Abgabe unverändert	SCHÖ_R1
		rel. klein	Abgabe = Max(Zufluss, bestehende Abgabe)	SCHÖ_R2
Freies Volumen	---	groß	kein Handlungsbedarf, Abgabe unverändert	FV_R3
Vorabsenkung	<30m ³ /s	groß	Vorabsenkung mit max. 18m ³ /s	VA_R4
		klein	Vorabsenkung mit max. 30m ³ /s	VA_R5
Schlechtwetter	<150m ³ /s	rel. groß	Auffangen der Welle im Speicher (Aufstau) bis zu zulässiger Kote	SCHL_R6
	>150m ³ /s	Optimierung von Steuerungsvarianten, sodass zulässige Koten nicht überschritten und Speicher nach Ereignis voll		
		Abgabe = Zufluss (Steuerung der Turbinen oder Klappen/Schützen), sodass Speicherstand konstant	SCHL_R7	
	Aufspiegelung im Speicher (Abgabe < Zulauf) durch Belassen oder Heben der Klappen bzw. Schützen	SCHL_R8		

Unter Annahme einer perfekten Prognose (Prognosefehler innerhalb der Prognosefrist gleich null) existiert also eine optimale Betriebsweise, mittels welcher sowohl die Zulaufwelle bestmöglich aufgefangen als auch der Scheitel größtmöglich reduziert wird. Gleichzeitig kann auch die Betriebsweise der Speicher den energiewirtschaftlichen Gesichtspunkten Rechnung tragen (Regeln SCHL_R7 und SCHL_R8). Da Zuflussprognosen jedoch immer fehlerbehaftet (d.h. unsicher) sind, müssen in der Optimierung zusätzliche Überlegungen angestellt werden. Es ist denkbar, dass bei einer Überschätzung der zukünftigen Zulaufwelle der Speicher nach Ende des Ereignisses nicht gefüllt ist bzw. bei einer Unterschätzung der zukünftigen Zulaufwelle die maximalen Staukoten überschritten werden. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wurde die Unsicherheit des prognostizierten Zuflusses explizit berücksichtigt, indem ein Prognosefehler angesetzt wurde. Das Vorzeichen des angesetzten Fehlers bestimmt, welchen der beiden Bedingungen – Speicher nach Hochwasserereignis möglichst voll bzw. Vermeiden eines Überstaus – mehr Gewicht zugemessen wird. Bei einem negativen Fehler liegt mehr Gewicht auf einer vollständigen Speicherfüllung nach dem Ereignis, bei einem positiven Fehler mehr Gewicht auf dem Vermeiden eines Überstaus. Um eine simulierte Füllung des Speichers nach dem Ereignis sicherzustellen, wird im Kraftwerksmodul ein negatives

Vorzeichen des Fehlers angesetzt. Für die Optimierung wird also eine um den angesetzten Fehler verminderte prognostizierte Zuflussganglinie verwendet.

In den Regeln für den Nieder- und Mittelwasserfall bzw. kleine Hochwässer (R1 bis R6) wird die Prognoseunsicherheit nicht in Form eines expliziten Prognosefehlers, wie oben beschrieben, berücksichtigt. Sie ist jedoch in den Regeln implizit enthalten, wie zum Beispiel die Beschränkung der Maximalabgabe im Falle einer Vorabsenkung aufgrund der Gefahr eines Fehlalarms. Eine Vorabsenkung ist im Modell nur bis zu der für den Unterlauf des Kamp kritischen Durchflussmarke vorgesehen. Steigt der (prognostizierte) Zufluss zu den Speichern über diesen kritischen Wert, gilt im Modell generell die Vorschrift, dass die Abgabe nicht größer ist als der Zulauf.

4. Szenarien

Anhand der Szenarien von unterschiedlichen Zuflusswellen und Anfangsbedingungen wurde die Wirkungsweise der Regeln innerhalb des Kraftwerksmoduls im Detail analysiert. Für die Szenarienrechnungen wurde angenommen, dass für jeden Zeitpunkt die zulaufende Welle für die nächsten 48 Stunden im Voraus bekannt ist (Prognosefrist 48 Stunden). Als für die Kraftwerkssteuerung maßgebliche Anfangsbedingungen wurden vor allem der Anfangswasserstand im Speicher Ottenstein und die Abgabe am Beginn der Prognose aus der gesamten Kraftwerkskette in Thurnberg variiert.

Die folgenden Abbildungen 4 und 5 zeigen Beispiele für Szenarienrechnungen für den Speicher Ottenstein und den unterliegenden Speicher Thurnberg. Eingezeichnet in das Diagramm sind jeweils die Speicherstände und Klappen- bzw. Schützenstellungen (oben) sowie der Zulauf zum Speicher Ottenstein und die Abgabe aus dem Speicher Ottenstein und Thurnberg (unten). Der dazwischen liegende Speicher Dobra besitzt keine steuerbare Hochwasserentlastungsanlage und wurde daher in der Abbildung ausgeklammert. Dazu ist der Verlauf der simulierten Regeln eingezeichnet. Unter Annahme der Kenntnis des innerhalb der nächsten 48 Stunden zufließenden Welle simuliert der Kraftwerksmodul in beiden Szenarien eine Vorabsenkung bis zu maximal $30 \text{ m}^3/\text{s}$ (Regelnummern 4 und 5). Der Wasserspiegel im Speicher Ottenstein fällt, zu sehen in den Abbildungen jeweils oben. In Thurnberg müssen schon bei Erhöhung der Abgabe auf $30 \text{ m}^3/\text{s}$ die Schützen gesenkt werden, da die Turbinenkapazität mit $16,5 \text{ m}^3/\text{s}$ begrenzt ist. Beim Anstieg der Hochwasserwelle wird die Abgabe gleich Zufluss gewählt, um den Stauspiegel konstant zu halten. Bei $100 \text{ m}^3/\text{s}$, das entspricht der maximalen Turbinenkapazität, wird im Modul versucht die Abgabe aus Ottenstein zu begrenzen. Im Szenario in Abb. 4 bei einem Zufluss von max. $250 \text{ m}^3/\text{s}$ gelingt dies auch und die Hochwasserwelle kann gekappt werden. Da im Szenario in Abb. 5 der Zufluss weiter steigt und das freie Speichervolumen rasch schrumpft, müssen auch in Ottenstein die Klappen gelegt werden (Regelnummern 7 und 8).

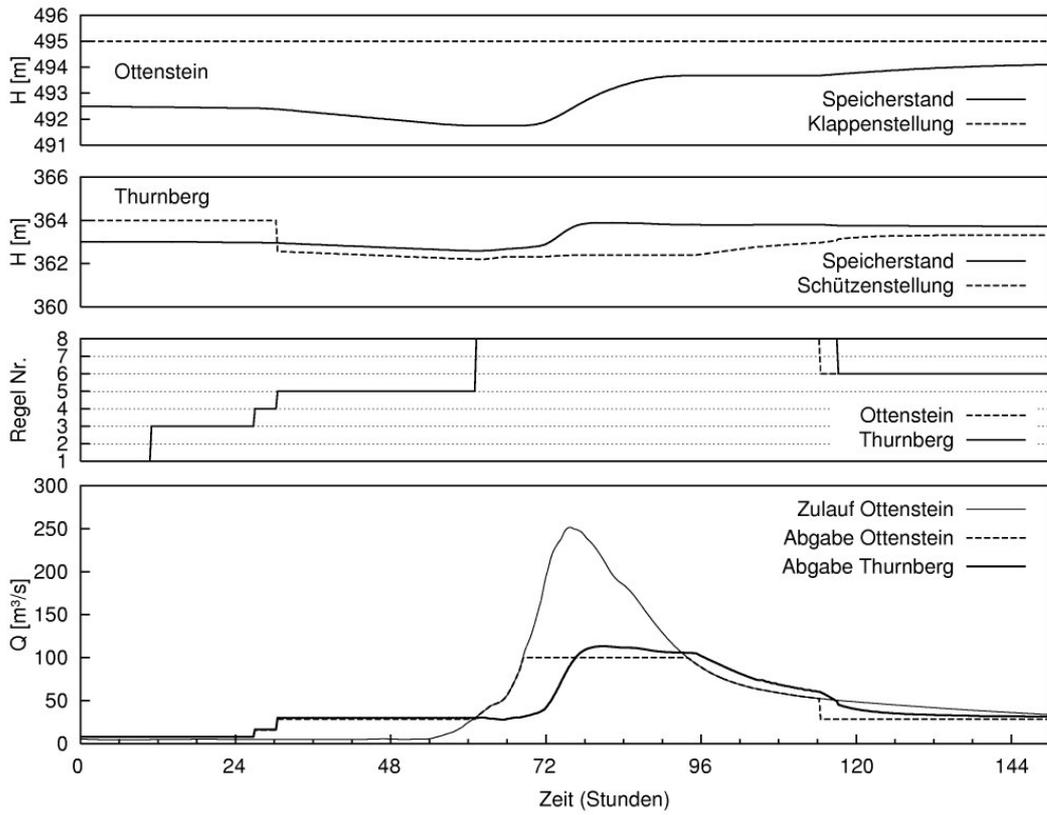


Abb. 4: Szenarienrechnung für die Speicher Ottenstein und Thurnberg (mittleres Hochwasser).

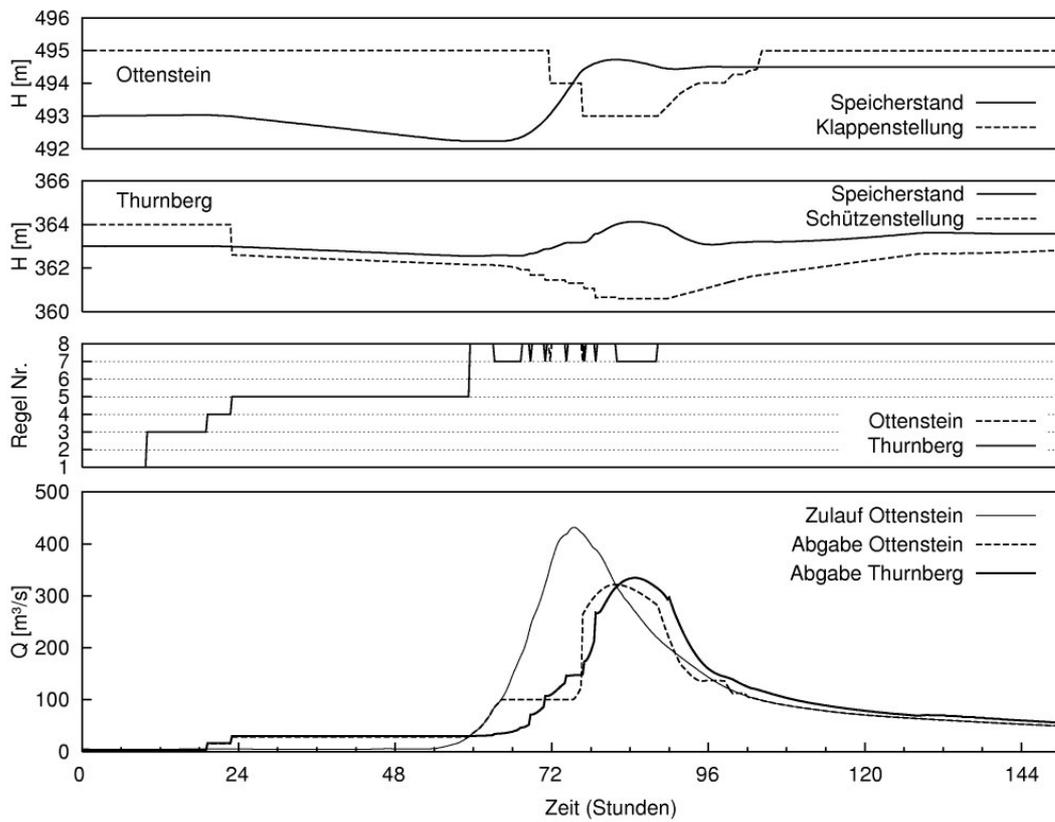


Abb. 5: Szenarienrechnung für die Speicher Ottenstein und Thurnberg (großes Hochwasser).

In den Abbildungen ist weiters die Zeitverzögerung zwischen Ottenstein und dem unterliegenden Speicher Thurnberg zu sehen, vor allem am Beginn des Anstiegs. Dieser wird durch das Rückhaltevermögen des dazwischen liegenden Speichers Dobra noch verstärkt. Bei kleinen Zuflüssen sind die Regeln für Ottenstein und Thurnberg gleich, die Abgabe aus Ottenstein, Dobra und Thurnberg wird gleich gewählt.

5. Prognosen

Ziel des Kraftwerksmoduls ist die Bereitstellung von 48 Stunden Prognosen der Abgabe aus der Speicherkette Kamp, automatisch alle 15 Minuten. Die Prognosen der Abgabe werden als Eingangsgröße für die Erstellung von Abflussprognosen für den Unterlauf des Kamp benötigt. Die rasche und automatische Simulation im Kraftwerksmodul bietet die Möglichkeit, bei einem Prognoselauf eine große Anzahl von Berechnungen in relativ kurzer Zeit durchzuführen. Aus dem hydrologischen Vorhersagemodell wird unter Verwendung unterschiedlicher Niederschlagsinputs neben einer deterministischen Prognose auch ein Ensemble von 50 Prognosen des Zuflusses zur Speicherkette bereitgestellt (Blöschl et al., 2006). Der Kraftwerksmodul ermöglicht nun, dass jeder dieser 51 Zuflüsse innerhalb eines Prognoselaufs (alle 15 Minuten) verarbeitet werden kann. Hierzu wird für jede Realisation des Zuflussensembles die Simulation durch den Kraftwerksmodul durchgeführt und somit ein Ensemble der Abgabe aus der Speicherkette erzeugt. Dabei wird bei jeder Realisation der explizite Prognosefehler, wie in Abschnitt 3.3 beschrieben, angesetzt. Unter Berücksichtigung des Wellenablaufs im Gerinne und der Zuflussprognosen aus dem Zwischeneinzugsgebiet wird dann eine 48 Stunden Prognose – deterministisch und ein Ensemble – für den Unterlauf des Kamp erstellt.

Abbildung 6 zeigt ein Beispiel einer Ensembleprognose bei einem kleinen aufgetretenen Hochwasser für die Prognosestelle Stiefern im unteren Kampthal, an welcher Abflussdaten zur Verfügung stehen. Aufgetragen sind die deterministischen und die Ensembleprognosen des Abflusses (unten), des Niederschlags (Mitte) und der entsprechenden Regel, die am untersten Kraftwerk Thurnberg simuliert wird (vgl. Tab. 2). Die Niederschlagsvorhersage zeigt für das gesamte Ensemble eine zeitliche Verzögerung der größten Niederschlagsintensitäten gegenüber der Beobachtung. Dementsprechend wird die Spitze des gesamten Abflussensembles am Pegel Stiefern später prognostiziert. Die meisten Realisationen des durch den Kraftwerksmodul beeinflussten Ensembles liegen im Bereich der deterministischen Prognose. In derartigen Fällen zeigt die Prognose am Pegel Stiefern nur eine geringe Abflussspitze. Im Kraftwerksmodul wird keine Änderung der Abgabe zum Prognosezeitpunkt t_0 simuliert und somit die prognostizierte Zuflusswelle in den Speichern aufgefangen (Regel Nr. 3, Freie-Volumen-Regel). Der Streubereich des Abflusses am Pegel Stiefern ergibt sich allein aus dem Streubereich der Ensembleprognose des Zuflusses aus dem Zwischeneinzugsgebiet vom untersten Kraftwerk bis zum Pegel. Einzelne Ensemblerealisationen zeigen schon am Beginn des Ereignisses einen Anstieg des Abflusses, ähnlich der Beobachtung. In diesen Fällen simuliert der Kraftwerksmodul schon am Beginn des Ereignisses eine Erhöhung der Abgabe aus der Speicherkette. Das sind

jene Prognosen, welche auf den größeren Niederschlags- und somit Zuflussprognosen basieren. Bei diesen Prognoseläufen werden hinsichtlich der prognostizierten Zuflüsse und des freien Speichervolumens über die Prognosefrist bestimmte Grenzen und Marken über- bzw. unterschritten. Der Kraftwerksmodul simuliert daher eine frühzeitige Erhöhung der Abgabe, wodurch der Stauspiegel im Speicher konstant gehalten oder abgesenkt wird (Regel Nr. 4). Bei einigen wenigen Läufen steigt der prognostizierte Abfluss am Pegel Stiefern im Laufe des Ereignisses weiter an. Hier simuliert der Modul eine weitere Erhöhung der Abgabe (Regel Nr. 6), die dann zeitverzögert am Pegel Stiefern abgebildet wird.

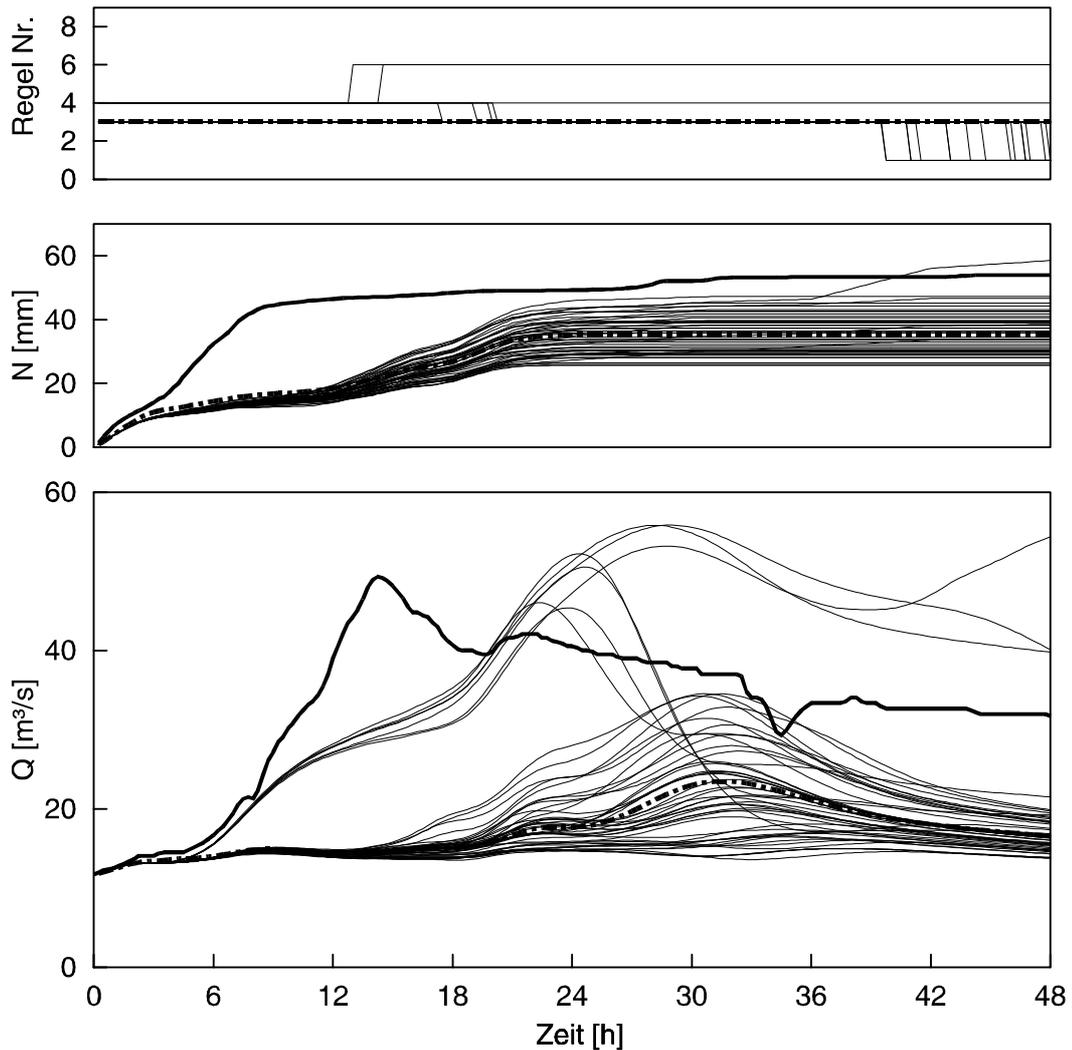


Abb. 6: Ensembleprognose für die Prognosestelle Stiefern für ein kleines Ereignis. Dicke Linien: Beobachtung; strich-punktierte Linien: deterministische Prognose; dünne Linien: Ensemble-realisationen. Prognosezeitpunkt ist t_0 .

Zur Veranschaulichung der Wirkungsweise des Kraftwerksmoduls sind in Abbildung 7 einzelne charakteristische Realisationen des Ensembles herausgehoben. Jede Realisation ist in einer anderen Farbe dargestellt. Die roten, grünen und blauen Linien zeigen Prognoseläufe, die auf den größten Niederschlags- bzw. Zuflussprognosen beruhen. In diesen Fällen simuliert der Kraftwerksmodul eine frühzeitige Erhöhung

der Abgabe (Regel Nr. 4). Im Falle der etwas niedriger prognostizierten Niederschläge wird eine Reduktion der Abgabe nach etwa 20 Stunden simuliert, der entsprechende Regelverlauf zeigt einen Rückgang von 4 auf 3, bei dem kleineren Lauf früher, bei dem größeren Lauf später (rote und grüne Linien). Die simulierte Reduktion der Abgabe aus der Speicherkette ist entsprechend den Laufzeiten am unteren Kamp am Pegel Stiefern zeitverzögert zu erkennen. Im Fall der größten prognostizierten Abgabe wird diese Reduktion allerdings nicht simuliert (blaue Linien). Hier ist in der Niederschlagssummenlinie erkennbar, dass am Ende des Ereignisses weitere Niederschläge prognostiziert sind. Die erhöhten prognostizierten Niederschläge am Ende des Ereignisses werden im Kraftwerksmodul zu jedem Zeitpunkt innerhalb der Prognosefrist berücksichtigt. Sie bewirken in diesem Fall, dass im Modul die Abgabe im Verlauf des Ereignisses nicht reduziert wird. Die erhöhte Abgabe wird belassen, um die zulaufende Welle aufzufangen, ohne dass kritische Knoten in den Speichern über die Prognosefrist in der Simulation überschritten werden.

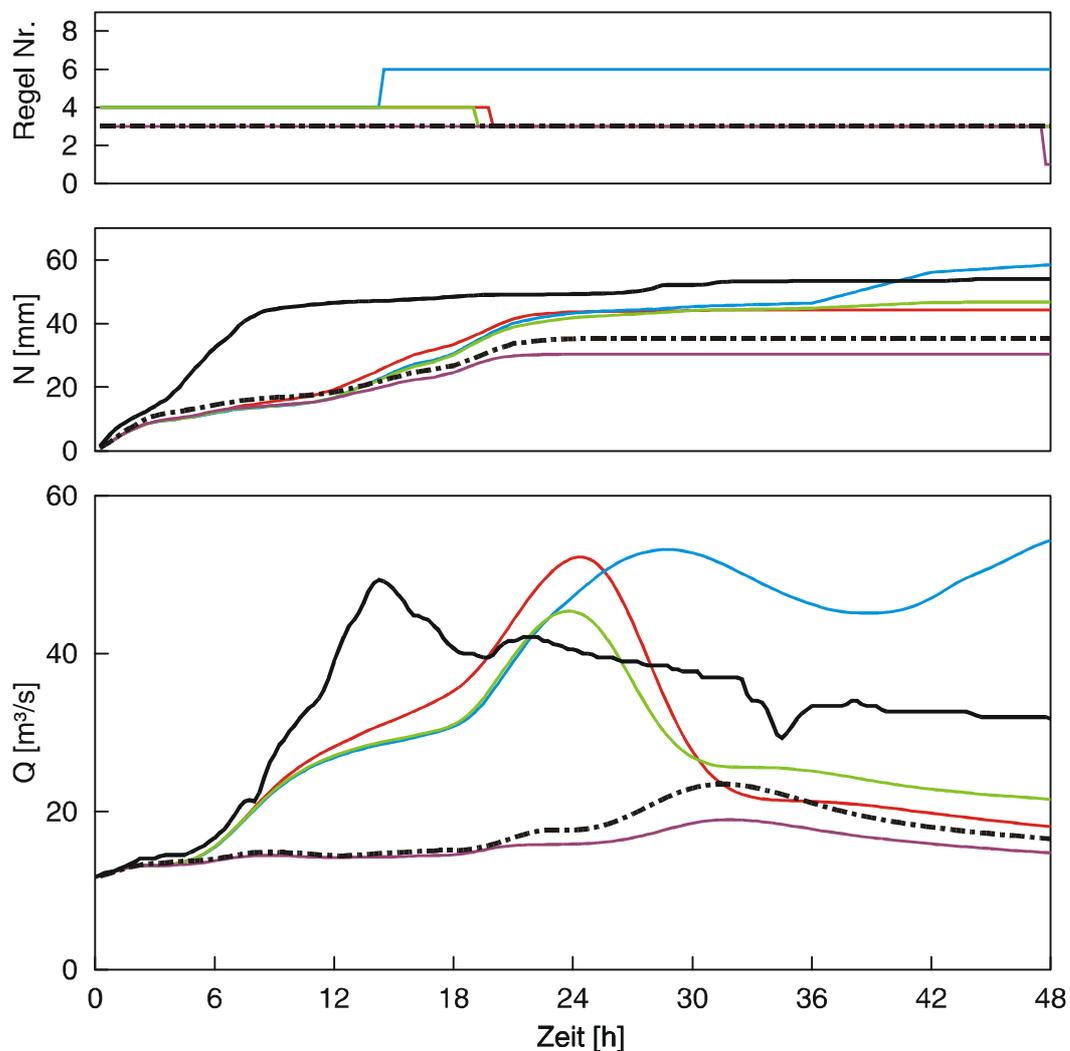


Abb. 7: Ausgewählte Realisationen des Ensembles aus Abb. 6. Dicke Linien: Beobachtung; strichpunktuelle Linien: deterministische Prognose; dünne und farbige Linien: Ensemble-realisationen. Prognosezeitpunkt ist t_0 .

Schließlich ist eine Realisation dargestellt, bei der die Prognose unterhalb der deterministischen Prognose liegt. Entsprechend sind die prognostizierten Niederschläge geringer als die des deterministischen Laufes. Der Kraftwerksmodul simuliert eine konstante Abgabe bzw. Beibehaltung der Regel (violette Linien). Der prognostizierte Beitrag aus dem Zwischeneinzugsgebiet ist gering.

Die Idee einer Ensembleprognose ist, dass jede Realisation des Ensembles als gleichwahrscheinlich angesehen wird, wodurch ein Streubereich bzw. Unsicherheitsbereich der Prognosen abgeschätzt werden kann (Komma et al., 2006). Mithilfe des Kraftwerksmoduls ist es nun möglich, nicht nur für die Abflussprognosen aus den unbeeinflussten Gebieten, sondern auch für die Abgabe aus den Kraftwerken und somit für den Unterlauf des Kamp, einen Streubereich der Prognosen anzugeben. Abbildung 8 zeigt dazu den aus den Ensembleprognosen für die Prognosestelle Stiefern aus Abb. 6 abgeleiteten Vertrauensbereich, der durch das 10%-Quantil und das 90%-Quantil gebildet wird. Das heißt, dass 80% der Prognosen innerhalb des grau schraffierten Bereichs zu liegen kommen, 10% liegen über der oberen Grenze und 10% unterhalb der unteren Grenze. Im Vergleich zu Abb. 6 (50 Prognoseläufe) liegen also die 5 größten und die 5 kleinsten Prognosen außerhalb des Bereichs. Der Vertrauensbereich in dieser Form lässt Aussagen über die Unsicherheit der Prognosen zu; er dient als Indikator für die Möglichkeit des Auftretens eines Hochwassers.

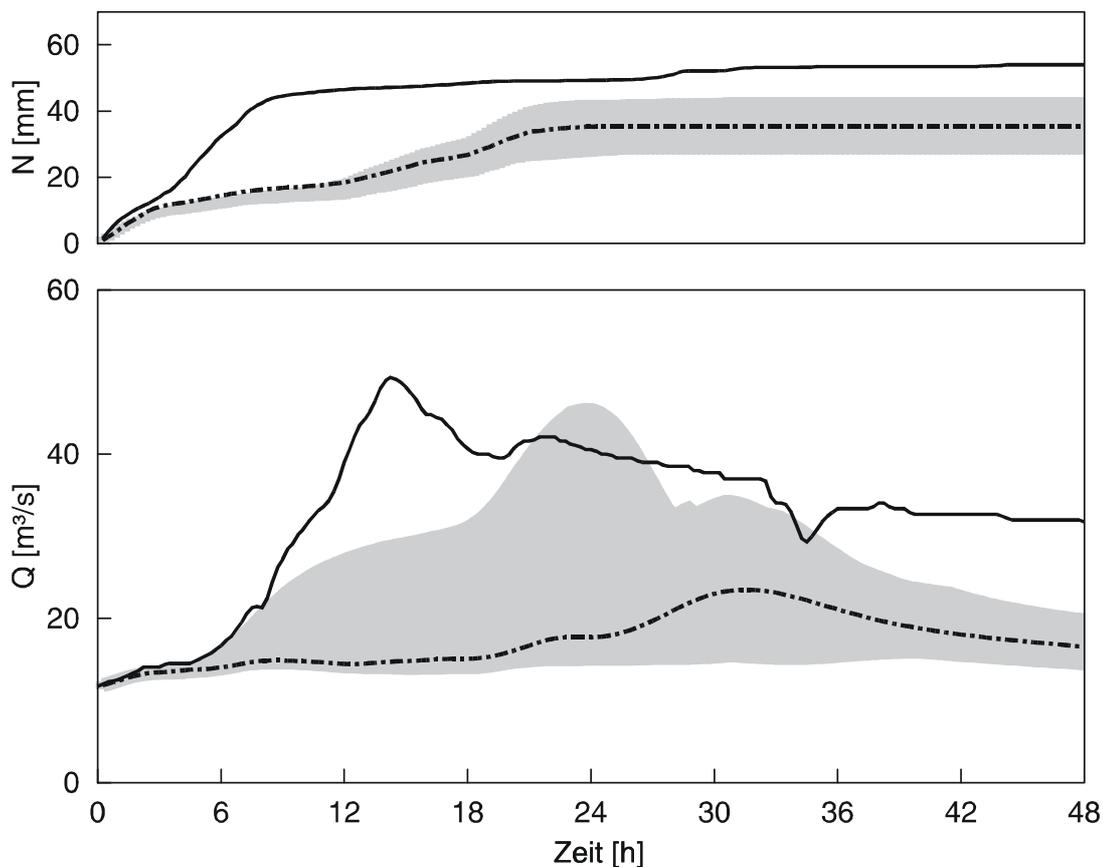


Abb. 8: Vertrauensbereich der Ensembleprognose für Stiefern aus Abb. 6. Dicke Linien: Beobachtung; strich-punktierte Linien: deterministische Prognose; grau: Vertrauensbereich (10% bis 90%). Prognosezeitpunkt ist t_0 .

Beim zuvor beschriebenen Ereignis handelt es sich um ein kleines Hochwasser am Kamp. Zum Vergleich ist in Abbildung 9 die Ensembleprognose für ein großes Hochwasser dargestellt. Die Darstellung zeigt die Prognose beim Anstieg der Welle und einen Vergleich mit den beobachteten Pegeldaten in Stiefern. Die Niederschlagsprognosen zeigen im Vergleich zu den Abflüssen relativ geringe Werte, der Großteil des Niederschlages im Einzugsgebiet ist bereits gefallen. Der steile Anstieg des Abflusses ist das Resultat der Abflussreaktion auf den bereits gefallenen Niederschlag bzw. der bereits erfolgten Erhöhung der Abgabe aus der Speicherkette, die sich entsprechend den Laufzeiten im unteren Kamp am Pegel Stiefern abbildet. Der Kraftwerksmodul simuliert bei allen Ensemblerealisierungen einen ähnlichen Verlauf der Abgabe. Es kommen die Regeln für den Hochwasserfall zur Anwendung (Regeln Nr. 7 und 8). Entsprechend den Unterschieden der prognostizierten Niederschläge bzw. Zuflüsse wird die Steuerung der Klappen in Ottenstein und der Schützen in Thurnberg unterschiedlich simuliert. Der Einfluss der Steuerung ist in diesem Fall allerdings gering; in dieser Phase bestimmt die natürliche Seeretention die Form der Abgabewelle.

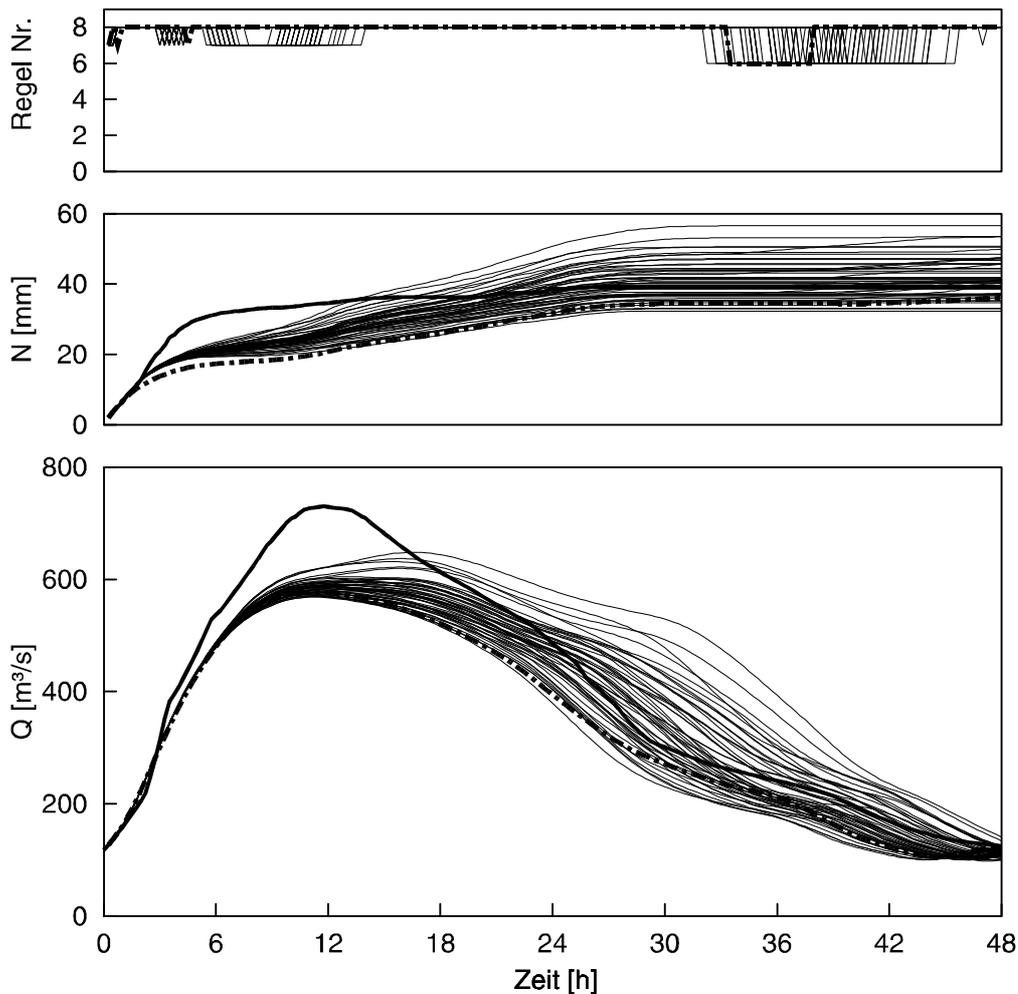


Abb. 9: Ensembleprognose für die Prognosestelle Stiefern für ein großes Ereignis. Dick: Beobachtung; strich-punktuelle Linien: deterministische Prognose; dünne Linien: Ensemble-realisationen. Prognosezeitpunkt ist t_0 .

Zur Veranschaulichung der Unterschiede in der Größenordnung der beiden beschriebenen Beispiele zeigt Abbildung 10 beide Ereignisse in der gleichen Skalierung aufgetragen.

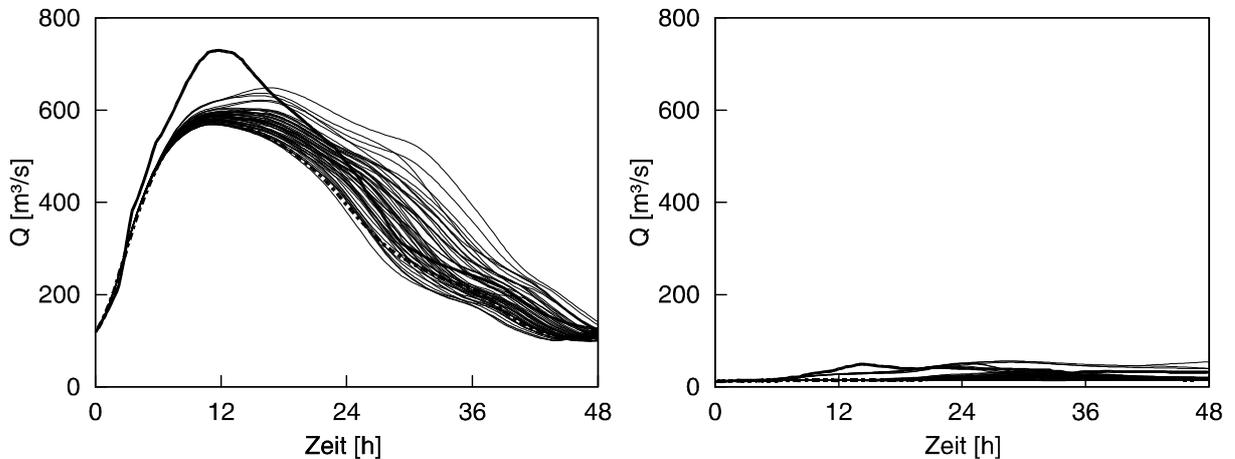


Abb. 10: Größenordnung der Prognosebeispiele. Links: großes Hochwasser (Abb. 9); rechts: kleines Hochwasserereignis (Abb. 6 bis 8). Prognosezeitpunkt ist t_0 .

6. Zusammenfassung

Im Rahmen der Entwicklung eines Hochwasservorhersagesystems für den Kamp wurde ein Modell entwickelt, das in Echtzeit die Verformung der Hochwasserwelle durch die Kraftwerkskette Ottenstein/Dobra/Thurnberg beschreibt. Dieser sogenannte „Kraftwerksmodul“ simuliert basierend auf den prognostizierten Zuflüssen zu den drei Speichern die Wasserführung der Speicherkette, wie z.B. Speicherstände, Wehrverschlussstellungen, Turbinendurchflüsse, für 48 Stunden im Voraus.

Bei der Berechnung der zukünftigen Abgabe aus der Speicherkette handelte es sich um ein Optimierungsproblem, welches nicht nur auf Basis analytischer und physikalischer Gleichungen gelöst wurde, sondern auch zusätzliche Einflussgrößen auf die Bewirtschaftung der Kraftwerke aus den Erfahrungen der Betreiber einbezieht. In einem iterativen Prozess wurden Steuerungsregeln entwickelt, die an die bisher praktizierte Betriebsführung angeeicht wurden und die Bewirtschaftungsziele implizit enthalten.

Der Kraftwerksmodul ist Teil des operativen Hochwasservorhersagesystems am Kamp, das seit Jänner 2006 im Einsatz ist. Auswirkungen der gesetzten oder prognostizierten Maßnahmen auf die Speicherbewirtschaftung oder auch auf den unteren Kamp sind durch den Kraftwerksmodul simulierbar. Der Kraftwerksmodul liefert automatisch und kontinuierlich Prognosen der Abgabe aus der Speicherkette. Diese dienen als Eingangsgröße für die Hochwasserprognose am unteren Kamp, insbesondere zur Erstellung der Ensembleprognosen. Außerdem können sie als Informationen im Echtzeitbetrieb der Kraftwerke bei Hochwasser genutzt werden. Zusätzlich kann der Modul auch im offline-Betrieb zu Simulations- und Trainingszwecken verwendet werden.

7. Danksagung

Die Entwicklung des Hochwasservorhersagemodells für den Kamp wurde vom Amt der Niederösterreichischen Landesregierung und der EVN-AG gefördert.

8. Literatur

Ahmad, S. and S. Simonovic (2000) System Dynamics Modeling of reservoir operations for flood management. *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 14 (3), Seiten 190-198.

Blöschl, G., Ch. Reszler und J. Komma (2006) Hochwasservorhersage für den Kamp. In: *Hochwasservorhersage. Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 199*. Technische Universität Wien, Seiten 39-54.

Gutknecht, D., Ch. Reszler und G. Blöschl, (2002) Das Katastrophenhochwasser vom 7. August 2002 am Kamp – eine erste Einschätzung. *Elektrotechnik und Informationstechnik (e&i)*, 119. Jg., 2002, Nr.12, Seiten 411 - 413.

Komma, J., Ch. Reszler, G. Blöschl, T. Haiden (2006) Ensembleprognosen von Hochwasserabflüssen. In: *Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 199*. Technische Universität Wien Seiten 279-294.

Labadie, J. W. (2004) Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-of-the-Art Review. *J. of Water Resour. Plann. and Management*, Vol. 130 (2), Seiten 93-111.

Wurbs, R. A. (1993) Reservoir-System Simulation and Optimization Models. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 119 (4), Seiten 445-472.

Yeh, W. W.-G. (1985) Reservoir Management and Operations Models: A State-of-the-Art Review. *Water Resources Research*, Vol. 21 (12), Seiten 1997-1818.

Anschrift der Verfasser:

Dipl.-Ing. Christian Reszler
A.o.Univ.Prof. Dr. Günter Blöschl
Dipl.-Ing. Jürgen Komma
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/222, A-1040 Wien
Email: reszler@hydro.tuwien.ac.at

MODELL ZUR HOCHWASSERVORHERSAGE UND HOCHWASSERMANAGEMENT DER RHONE

Frédéric Jordan, Jean-Louis Boillat, Jérôme Dubois,
Anton Schleiss, Benoît Hingray

1. Einleitung

Die Abflussvorhersage stellt einen wichtigen Faktor für das Echtzeit-Management von Flusseinzugsgebieten als auch von Speicherkraftwerken dar (Andrade-Leal et al., 2002; Bürgi, 2002; Jasper et al., 2002; Boillat, 2005). Typische Anwendungsfälle in diesem Zusammenhang sind die Hochwasservorhersage in großen Einzugsgebieten zur Notfallplanung (Homagk und Ludwig, 1998; Koussis et al., 2003) sowie die Zuflussabschätzung zur optimalen Speicherbewirtschaftung (Turcotte et al., 2004). Zur Abflussvorhersage stehen verschiedene Methoden zur Verfügung, welche die zahlreichen Charakteristika und Gegebenheiten des jeweiligen Einzugsgebietes berücksichtigen.

Der Betrieb von Mehrzweckspeichern hängt stark vom Speicherzufluss ab. Ein optimales Bewirtschaftungskonzept zu finden ist schwierig und hängt im Wesentlichen von der gewählten Strategie ab. Da die zahlreichen Einflussfaktoren häufig in enger Wechselbeziehung zueinander stehen, müssen bei der Optimierung oftmals mehrere Ziele gleichzeitig verfolgt werden (Labadie, 2004). Methoden wie lineares (Kumar et al., 2001) oder nicht-lineares Programmieren (Barros et al., 2003) sowie Evolutionsalgorithmen (Strafaci, 2001) werden häufig dann verwendet, wenn der Zufluss zum betrachteten System bekannt ist.

Im vorliegenden Beitrag wird ein neues konzeptionelles hydrologisches Modell vorgestellt. Das Modell berücksichtigt Schneeschmelze, Gletscherschmelze, Infiltration, Oberflächenabfluss sowie Fortpflanzung und Verformung einer Hochwasserwelle entlang eines Gewässers (flood routing) (Hamdi et al., 2005). Darüber hinaus ist der komplette Kraftwerksbetrieb inklusive Fassungen, Triebwassersystem, Stauseen, Pumpstationen, Maschinenhaus sowie gesteuerter Auslassorgane und Hochwasserentlastungsanlagen implementiert (Dubois, 2005). Modelle dieser Art erfordern ein robustes Kalibrierungsverfahren, um versteckte hydrologische Fehler im Simulationsprozess zu unterbinden. Die zahlreichen hydrologischen Einflussgrößen müssen in Anlehnung an die zu untersuchende Situation in der Bandbreite typischer Werte gewählt werden. Darüber hinaus ist der Einfluss von Wasserkraftanlagen zu berücksichtigen. Aus diesem Grund werden mehrere Kontrollpunkte im Einzugsgebiet zur Modelleichung verwendet.

Sind Speicherkraftwerke im Einzugsgebiet vorhanden, so können diese zur Abflusszwischenlagerung und somit zur Hochwasserdämpfung verwendet werden. Zu diesem Zweck kann der Einsatz der Turbinen und der Entlastungsorgane präventiv erfolgen, d. h. im Bedarfsfall kann zusätzliches Speichervolumen geschaffen und zur Abflussspitzenreduktion verwendet werden. Auf Grund der komplexen und vernetzten Situation der vorhandenen Kraftwerke ist eine deterministische Optimierungsmethode

entwickelt worden (Jordan et al., 2005a). Das vorgestellte Modell berücksichtigt den Einfluss des Präventivbetriebs auf die Energieproduktion als auch auf potentielle Schäden an mehreren Kontrollpunkten innerhalb des Flussgebiets. Die entwickelte Simulationsoptimierung ermöglicht es, in kürzester Zeit den optimalen Präventivbetrieb zu bestimmen. Hierzu werden Zuflussvorhersagen in den Speicher und Durchflussvorhersagen an verschiedenen Messpunkten im Einzugsgebiet verwendet. Diese Daten werden in ein regel-gestütztes Optimierungsmodell eingespeist, welches wiederum einen Wasserabgabezeitplan für jedes der an einen großen Speicher angeschlossenen Kraftwerke berechnet. Die auf diese Weise ermittelte Lösung wird vor der endgültigen Entscheidung und Umsetzung mittels einer vollständigen Simulation nochmals überprüft.

Das Einzugsgebiet der Rhone oberhalb des Genfer Sees dient als Fall- und Anwendungsbeispiel für das neu entwickelte Modell. Dieses alpine Einzugsgebiet erstreckt sich über 5520 km² und beinhaltet 10 größere Hochdruckwasserkraftanlagen mit großen Talsperren und Speicherbecken. Während der Hochwasserereignisse 1987, 1993 und 2000 konnte der Spitzenabfluss in der Rhone mittels der Reservoirs um 10% bis 15% reduziert werden. Ein optimales Zusammenspiel von Turbinenbetrieb und Entlastungsorganen (Grundablässe und Hochwasserentlastungen) hätte den Spitzenabfluss allerdings um 25% bis 30% reduzieren können.

2. Hydrologische Modellierung

In Einzugsgebieten mit komplexer Morphologie finden zahlreiche unterschiedliche Prozesse statt. In gebirgigen Gegenden haben Schnee und Gletscher einen bedeutenden Einfluss auf das Abflussgeschehen. In diesem Fall müssen neben Infiltrations- und oberflächennahen Prozessen auch temperaturgesteuerte Prozesse wie Schnee- und Gletscherschmelze berücksichtigt werden. Wegen der Temperaturabhängigkeit der beiden letztgenannten Prozesse stellt die Seehöhe des Einzugsgebietes einen wichtigen Parameter dar. Darüber hinaus sind die für diese Gegend typischen tiefen Täler durch lokal variable Niederschläge gekennzeichnet. Folglich erfordert die Simulation eines solchen Einzugsgebietes eine geeignete enge räumliche Diskretisierung. Das auf einer Vorgängerversion (tägliche Zeitschritte) beruhende hydrologische Modell (Schäfli et al., 2005) berücksichtigt diese lokalen morphologischen und meteorologischen Eigenschaften (Hamdi et al., 2005). Das Grundprinzip des hydraulischen Modells kann wie folgt beschrieben werden: Zur Berücksichtigung der temperaturabhängigen Prozesse wird jedes Einzeleinzugsgebiet (EG) in Höhenstreifen eingeteilt. Diese Höhenbänder werden entweder als Gletschergebiet oder als Nicht-Gletschergebiet definiert (vgl. Abb. 1). Jedes Nicht-Gletscher Höhenband beinhaltet sowohl ein Schneeschichtenmodell als auch ein Infiltrations- bzw. Oberflächenabflussmodell mit serieller Verknüpfung. In Abhängigkeit von Temperatur (T) und Niederschlag (P) simuliert das Schneeschichtenmodell die zeitliche Entwicklung des Schnees (Anhäufung und Schmelzen) und berechnet einen äquivalenten Niederschlag (P_{eq}), welcher wiederum als Eingangsgröße für das Infiltrations- bzw. Oberflächenabflussmodell dient. Darüber hinaus wird die potentielle Evapotranspiration (ETP)

berücksichtigt. Der resultierende Abfluss (Q_s) wird zum Ausfluss des jeweiligen EG transferiert. Jedes Gletscherhöhenband besteht aus einem 4-Speicher Modell. Ein Schneeschichtenmodell erzeugt einen äquivalenten Niederschlag (P_{eq}), welcher anschließend zu einem linearen Reservoir (R_N) und schließlich zu einem Einzugsgebietsausfluss (Q_{NGL}) transformiert wird. Das Gletschermodell erzeugt einen Gletscherabfluss nur in dem Fall, wenn das Schneeschichtenmodell gleich Null ist ($H_n = 0$). Der aus Gletscherschmelze resultierende Durchfluss (P_{eqGL}) wird in ein lineares Reservoir (R_{GL}) transformiert und der Durchfluss (Q_{GL}) schließlich zum Ausgang des EG geführt. Der Gesamtabfluss (Q_{tot}) aus dem EG wird dann aus der Summe der drei Einzelabflüsse gebildet.

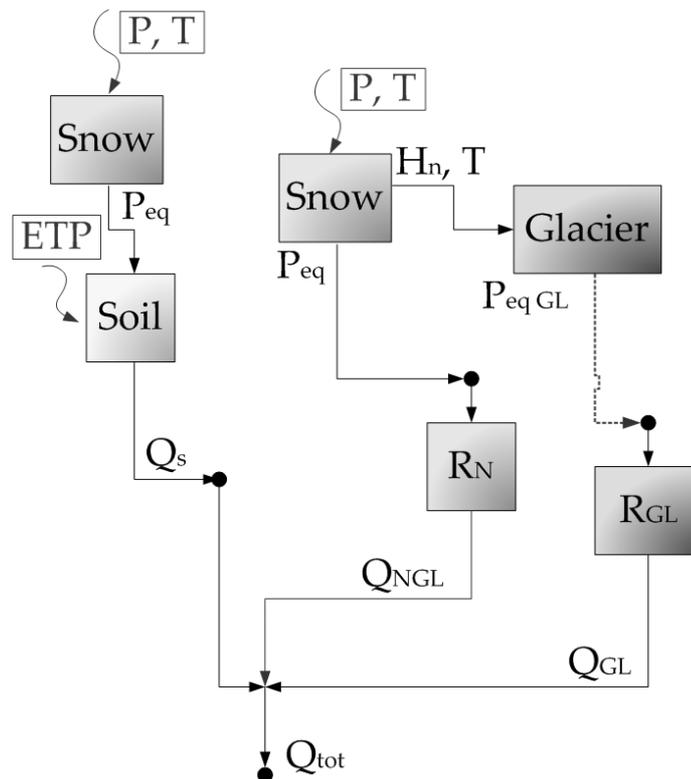


Abb. 1: Konzept des hydrologischen Modells. Beispiel eines Untereinzugsgebietes mit einem Nicht-Gletscher- und einem Gletscherhöhenband.

Das Schneeschichtmodell (snow pack) besteht aus zwei Speichern (Abb. 2). Die Eingangsgrößen des Modells bilden die Temperatur (T) und der Niederschlag (P). In einem ersten Schritt wird in Abhängigkeit der Temperatur der Niederschlag in einen festen (N) und einen flüssigen Niederschlag (P^*) aufgeteilt (Gln. 1 bis 3):

$$P^* = \alpha \cdot P \tag{1}$$

mit P^* = flüssiger Niederschlag in m/s, α = Unterscheidungs faktor und P = Niederschlag in m/s.

Weiterhin gilt:

$$N = (1 - \alpha) \cdot P \quad (2)$$

mit N = fester Niederschlag in mm/h.

$$\begin{cases} \alpha = 0 & \text{wenn } T < T_{cp1} \\ \alpha = (T - T_{cp1}) / (T_{cp2} - T_{cp1}) & \text{wenn } T_{cp1} < T < T_{cp2} \\ \alpha = 1 & \text{wenn } T > T_{cp2} \end{cases} \quad (3)$$

mit T = Temperatur in °C, T_{cp1} = untere kritische Flüssigniederschlagstemperatur in °C, T_{cp2} = obere kritische Flüssigniederschlagstemperatur.

Falls die beobachtete Temperatur geringer ist als T_{cp1} gibt es nur festen Niederschlag. Falls sie größer ist als T_{cp2} , gibt es nur flüssigen Niederschlag. Im Zwischenbereich können beide Niederschlagsformen auftreten. Der Festniederschlag (N) findet Eingang in das Schneeschichtmodell, dessen Inhalt in Abhängigkeit von Niederschlag, Schneeschmelze oder Frost variiert. Die Schneeschmelze wird wie folgt berechnet:

$$\begin{cases} M_N = A_n \cdot (1 + b_p \cdot P^*) \cdot (T - T_{cr}) & \text{wenn } T > T_{cr} \\ M_N = A_n \cdot (T - T_{cr}) & \text{wenn } T < T_{cr} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} dH_N / dt = N - M_N \\ M_N \leq H_N / dt \\ M_N \geq -W_N / dt \end{cases} \quad (5)$$

mit M_N = Schneeschmelze oder Frost in m/s, A_n = Tagesgradkoeffizient in m/s/°C, b_p = Koeffizient in s/m, T_{cr} = kritische Schneeschmelztemperatur in °C, H_N = Schneehöhe m, W_N = Wassergehalt in m und dt = Zeitschritt in s.

Der äquivalente Niederschlag wird vom Wasserreservoir produziert (Gln. 6 bis 8):

$$\theta = W_N / H_N \quad (6)$$

$$\begin{cases} P_{eq} = P^* + W_N / dt & \text{wenn } H_N = 0 \\ P_{eq} = 0 & \text{wenn } H_N > 0 \text{ and } \theta \leq \theta_{cr} \\ P_{eq} = \frac{1}{K_f} \cdot (\theta - \theta_{cr}) \cdot H_N & \text{wenn } H_N > 0 \text{ and } \theta > \theta_{cr} \end{cases} \quad (7)$$

$$dW_N / dt = P^* + M_N - P_{eq} \quad (8)$$

mit θ = relativer Wassergehalt im Schnee, θ_{cr} = kritischer relativer Wassergehalt im Schnee und K_f = Schmelzkoeffizient in s.

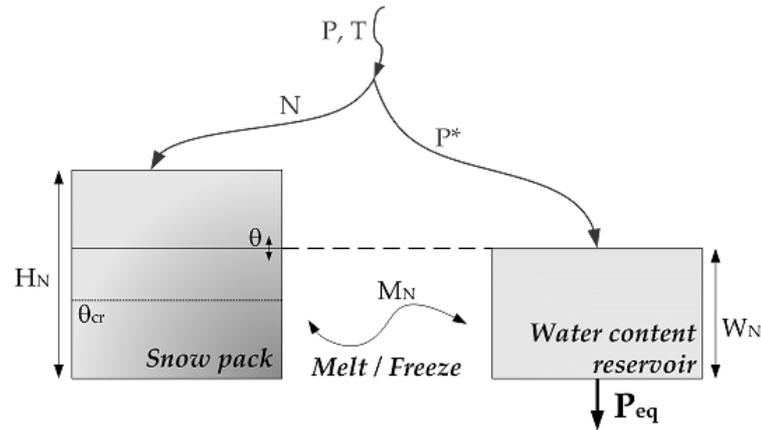


Abb. 2: Schneeschichtmodell mit seinen zwei Speichern.

Die Gletscherschmelze hängt sowohl von der Temperatur als auch davon ab, ob Schnee auf Eis liegt. Der gesamte Gletscherabfluss hängt zudem von Speichereffekten in den linearen Reservoirs R_N und R_G ab. Das lineare Schneeschmelzreservoir kann wie folgt beschrieben werden:

$$\frac{\partial H_{NGL}}{\partial t} = P_{eq} - K_N \cdot H_{NGL} \quad (9)$$

mit H_{NGL} = Niveau im linearen Schneereservoir in m, K_N = Koeffizient des linearen Schneereservoirs in 1/s.

Der Ausfluss Q_{NGL} aus dem linearen Schneespeicher ergibt sich zu:

$$Q_{NGL} = K_N \cdot H_{NGL} \quad (10)$$

Die Gletscherschmelze Q_{GL} wird mittels der Gln. 11 bis 13 definiert:

$$\begin{cases} P_{eqGL} = 0 & \text{wenn } T \leq T_{cr} \text{ or } H_N > 0 \\ P_{eqGL} = A_{GL} \cdot (T - T_{cr}) & \text{wenn } T > T_{cr} \text{ and } H_N = 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\frac{\partial H_{GL}}{\partial t} = P_{eqGL} - K_{GL} \cdot H_{GL} \quad (12)$$

$$Q_{GL} = K_{GL} \cdot H_{GL} \quad (13)$$

mit P_{eqGL} = Gletscherschmelze in m/s, A_{GL} = Tagesgradkoeffizient Gletscherschmelze in m/s/°C, H_{GL} = Niveau des linearen Gletscherreservoirs in m und K_{GL} = linearer Gletscherreservoirkoeffizient in 1/s.

Die Bodeninfiltration und der Oberflächenabfluss werden mittels zweier Speicher (Abb. 3) wie folgt modelliert:

$$\begin{cases} i_{inf} = P_{eq} \cdot (1 - h/h_{max}) & \text{wenn } h < h_{max} \\ i_{inf} = 0 & \text{wenn } h \geq h_{max} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} ETR = ETP \cdot (h/h_{\max})^{1/2} & \text{wenn } h < h_{\max} \\ ETR = ETP & \text{wenn } h \geq h_{\max} \end{cases} \quad (15)$$

$$Q_{\text{base}} = k \cdot h \cdot S \quad (16)$$

$$\partial h / \partial t = i_{\text{inf}} - ETR - Q_{\text{base}} / S \quad (17)$$

mit ETP = Evapotranspirationspotential in m/s, i_{inf} = Infiltrationsintensität in m/s, h = Niveau des Infiltrationsreservoirs in m, h_{\max} = Kapazität des Infiltrationsreservoirs in m, ETR = reale Evapotranspiration in m/s, Q_{base} = Basisabfluss in m³/s, k = Abgabekoeffizient in 1/s und S = Oberfläche in m².

Der Oberflächenabfluss, welcher aus dem überschüssigen äquivalenten Niederschlag resultiert, wird mittels eines nicht-linearen Speichertransfers ermittelt:

$$i_{\text{net}} = P_{\text{eq}} - i_{\text{inf}} \quad (18)$$

$$\begin{cases} \partial h_r / \partial t = i_{\text{net}} - i_r \\ h_r > 0 \end{cases} \quad (19)$$

$$i_r = K_s \cdot J_0 \cdot h_r^{5/3} \cdot B / S \quad (20)$$

$$Q_r = i_r \cdot S \quad (21)$$

mit i_{net} = Intensität des Oberflächenabflusses in m/s, h_r = Niveau des Oberflächenabflusses in m, i_r = Ausflussintensität des Oberflächenabflusses in m/s, K_s = Strickler Beiwert in m^{1/3}/s, J_0 = mittlere Hangneigung und B = Hangbreite in m.

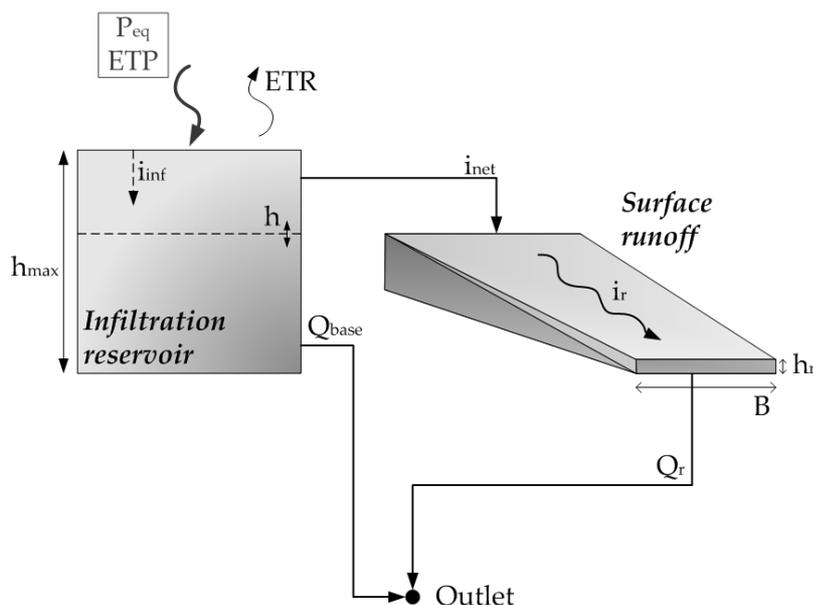


Abb. 3: Infiltrations- und Oberflächenabflussmodell.

3. Modellierung der Wasserkraftanlagen

Die Kraftwerke werden im hydrologischen Modell berücksichtigt. Die objektorientierte Programmierung in Routing System II (Dubois, 2005) ermöglicht eine automatische Verknüpfung der verschiedenen hydrologischen und hydraulischen Parameter. Das Modell für das Teileinzugsgebiet enthält die verschiedenen Höhenbänder. Die Wasserentnahmen durch die Speicherkraftwerke sind unterhalb des Teileinzugsgebietes implementiert und mit Gerinneabschnitten oder Gerinnevereinigungen verknüpft. Die Speicher, das Krafthaus oder die Entlastungsbauwerke werden ebenfalls modelliert (Abb. 4).

Zur Optimierung des präventiven Betriebes der Kraftwerke ist es erforderlich, verschiedene Betriebssystemata zu berechnen und zu bewerten. Ein numerisches Modell, welches für jeden einzelnen Zeitschritt alle hydrologischen Parameter berechnet, ist in diesem Zusammenhang ungeeignet, da es sehr lange Berechnungszeiten erforderlich macht. Aus diesem Grund ist ein vereinfachtes Modell entwickelt worden, welches den optimalen Betrieb der Speicherkraftwerke ermöglicht. Detaillierte Aussagen dazu finden sich in (Jordan et al., 2005b).

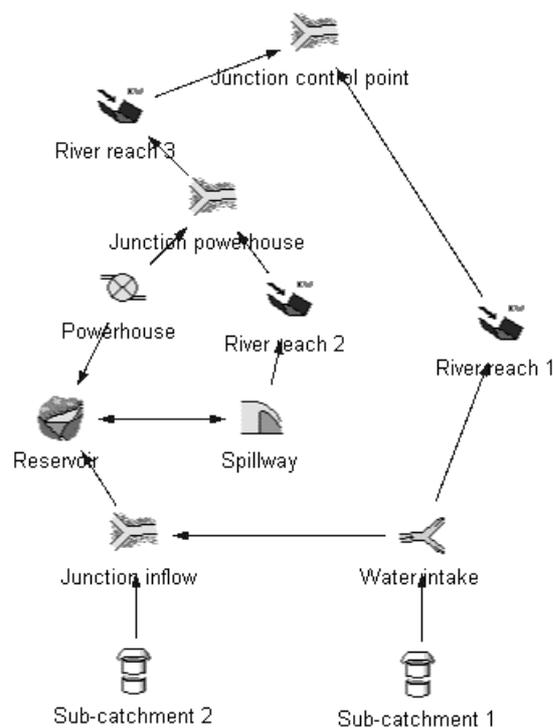


Abb. 4: Beispiel einer Einzugsgebietsmodellierung mit dem Programm Routing System II.

Das vereinfachte Modell verwendet vorhergesagte Speicherzuflüsse, gefasste Wassermengen und Hochwasserganglinien an zahlreichen Kontrollpunkten innerhalb des Flussgebietes. Der ideale Präventivbetrieb wird durch Optimierung des Dämpfungseffektes jedes einzelnen Speichers ermittelt. Der Einfluss der Kraftwerke auf die Reduktion des Hochwasserscheitels wird mittels Transferfunktionen errechnet. Hierzu werden Kostenfunktionen bzgl. potentieller Hochwasserschäden ermittelt. Das

Resultat dieser Berechnungen ergibt den optimalen Betriebsplan für die Turbinen und Entlastungsbauwerke. Der auf diese Weise ermittelte Betriebsplan wird abschließend zu Validierungszwecken in das hydraulisch-hydrologische Modell übertragen.

4. Modelleichung

Jedes Teileinzugsgebiet wird mittels mehrerer zu kalibrierender Parameter beschrieben. Die Kalibrierungsparameter für ein Gletscherhöhenband sind A_n , A_{GL} , K_N und K_{GL} (vgl. Gln. 1 - 13). Die anderen Parameter ($b_p = 0.0125$, $\theta_{cr} = 0.1$, $T_{cp1} = 0^\circ\text{C}$, $T_{cp2} = 0^\circ\text{C}$, $T_{cr} = 2^\circ\text{C}$) werden als Konstante betrachtet. Die Kalibrierungsparameter für ein Nicht-Gletscherhöhenband sind A_n , h_{max} , k und K_s . Besteht ein Teileinzugsgebiet aus mehreren Höhenbändern, so nimmt die Anzahl der zu eichenden Parameter erheblich zu. In diesem Fall werden für gleiche Höhenbänder eines Teileinzugsgebietes die gleichen Werte verwendet.

Der Kalibrierungsprozess folgt einfachen Regeln je nach Aufteilung und Beitrag der verschiedenen Parameter. In Abb. 5 ist zu sehen, wie verschiedene Prozesse zum Gesamtabfluss zu verschiedenen Zeitpunkten beitragen. Die Schneeschmelze erfolgt im Juni nach der Ansammlung von Wasser im Schneeschichtenmodell während der Wintermonate. Die Gletscherschmelze erfolgt im Juli, wenn kein Schnee mehr in den Höhenbändern vorhanden ist. Zur gleichen Zeit können starke Niederschläge über Oberflächenabfluss zu erheblichen Hochwassern führen. Der Basisabfluss wird nur durch Infiltration von Schmelzwasser oder flüssiger Niederschläge gebildet. Die Kalibrierung berücksichtigt diese hydrologischen Prozesse und ermöglicht eine Abgrenzung der unterschiedlichen Quellen.

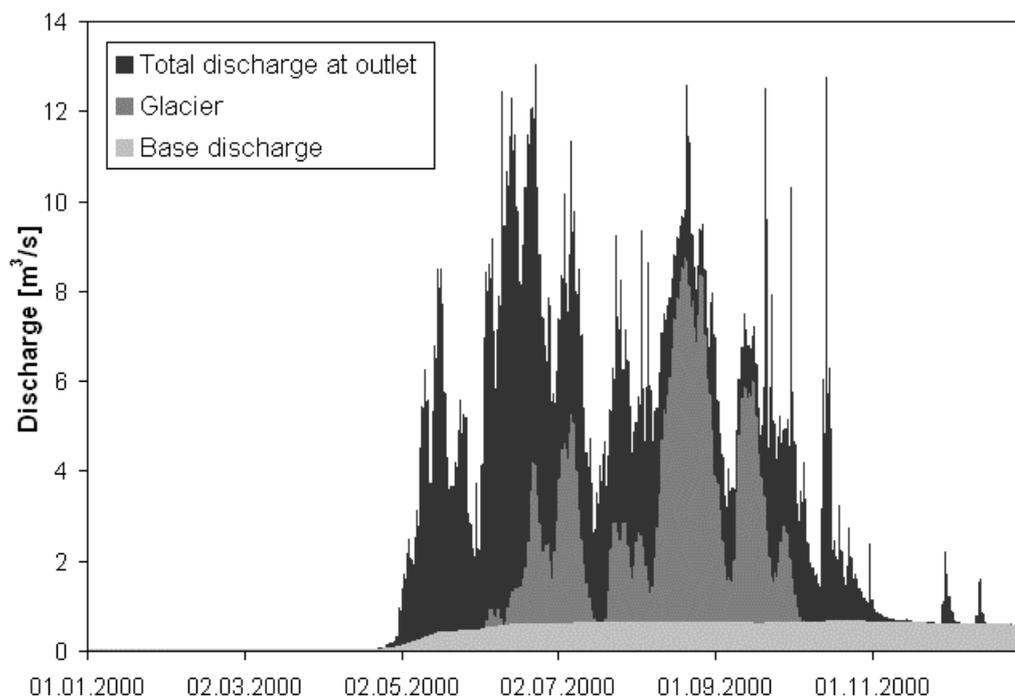


Abb. 5: Einzugsgebiet Gletsch. Beitrag der Gletscherhöhenbänder und der Infiltration (in grau) auf den Gesamtabfluss (in schwarz).

Der verbleibende Anteil setzt sich bis Juni aus Schneeschmelze, von Juli bis November aus Oberflächenabfluss zusammen. Die Reihenfolge der zu eichenden Parameter erfolgt dabei in Anlehnung an den hydrologischen Jahreskreislauf. Zur Güteanschätzung des Modell wird der Nash Indikator verwendet (Nash and Sutcliffe, 1970). Der Simulationszeitraum beginnt im Oktober. Auf diese Weise wird das Schneeschichtenmodell im Herbst und im Winter gefüllt. Zuerst wird der Schneetagesparameter A_n , welcher den Gesamtabfluss von Februar bis Juni beeinflusst, kalibriert. Für diesen Parameter wird ein optimaler Wert erhalten, da er mit keinem anderen Kalibrierungsparameter gekoppelt ist. Dieselbe Aussage kann für die folgenden Parameter getroffen werden: A_{GL} , K_{GL} und K_N . Anschließend werden die Infiltrationsparameter, welche die Trennung zwischen Basisabfluss und Oberflächenabfluss bestimmen, kalibriert. Zum Schluss wird der Stricklerbeiwert K_s geeicht, welcher nur im Hochwasserfall von Bedeutung ist. In Abb. 6 ist der Kalibrierungsprozess beispielhaft für das Teileinzugsgebiet Gletsch dargestellt. Die Schneeschmelze findet von Februar bis Anfang Juni statt und somit vor der ersten Gletscherschmelze, die Mitte Juli beginnt. Eine zweite und dritte Gletscherschmelzperiode findet bis Anfang Oktober statt (Jahr 2000). Das Oktoberhochwasser 2000 wird schließlich durch Oberflächenabfluss verursacht. Der Nash Indikator beträgt 0.87 und der Bias 0.98.

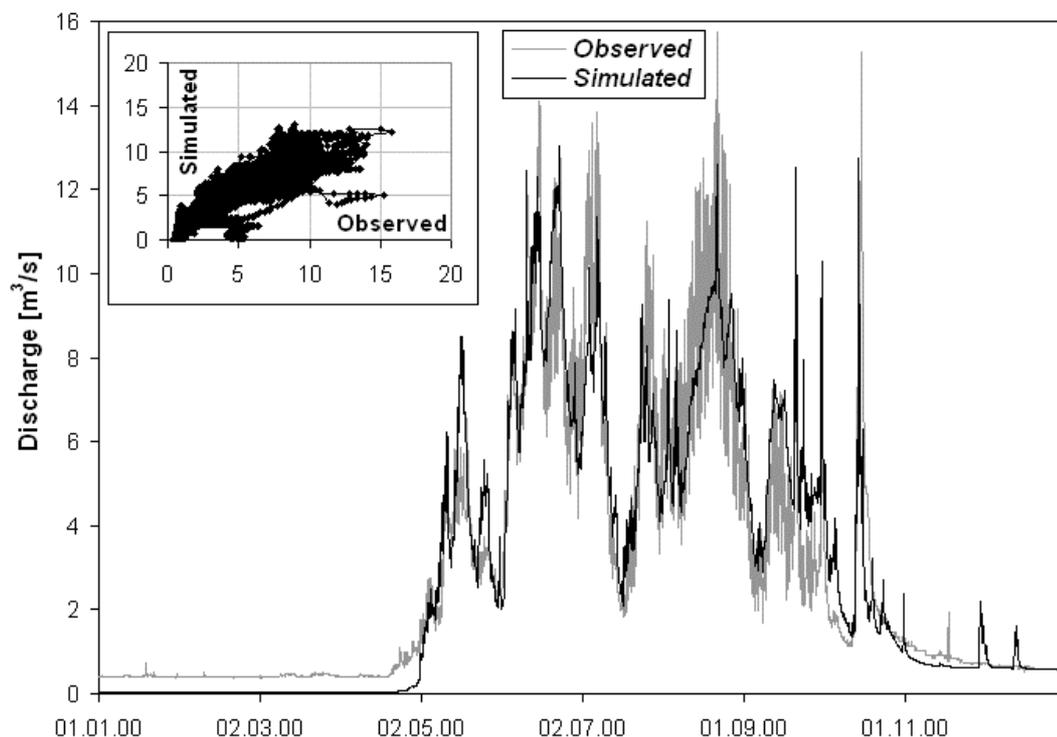


Abb. 6: Güte des Kalibrierungsprozesses für das Einzugsgebiet Gletsch. Simulationsperiode 01.10.2000 bis 31.12.2000, Nash=0.87, Bias=0.98.

5. Fallstudie Rhone oberhalb des Genfer Sees

Das Rhoneeinzugsgebiet oberhalb des Genfer Sees beinhaltet 10 größere Speicherkraftwerke (Abb. 7). Sie entwässern etwa 30% des gesamten Einzugsgebietes und haben folglich einen bedeutenden Einfluss auf das Abflussregime der Rhone und einiger Nebenflüsse. Durch Rückhalteeffekte der Speicher kann der Spitzenabfluss in der Rhone wesentlich beeinflusst werden.

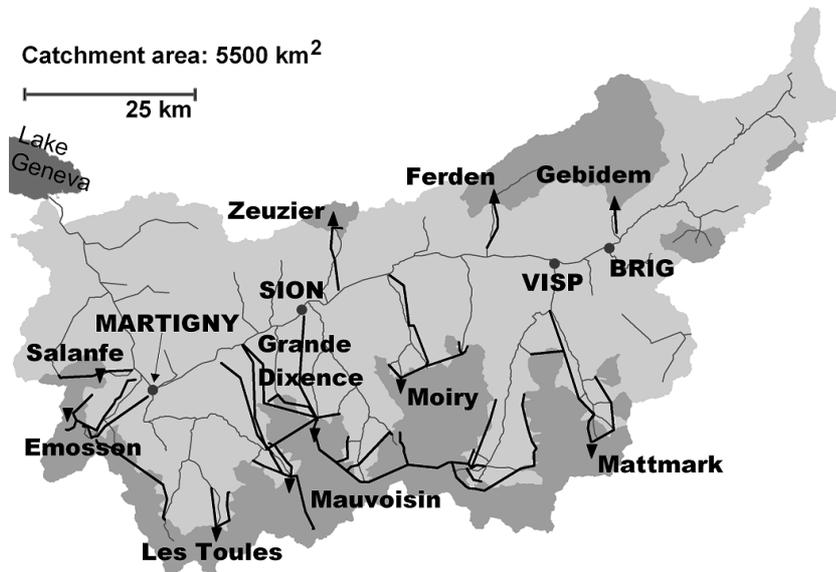


Abb. 7: Einzugsgebiet der Rhone oberhalb des Genfer Sees. Dunkelgrau: Durch Kraftwerke entwässerte Fläche; schwarze Dreiecke: Speicher; schwarze Linien: Druckstollen und -schächte; Punkte: Ortschaften.

Als Folge der oben genannten Aspekte bedarf es ausreichender Informationen bzgl. des Kraftwerkbetriebes. Insbesondere die Stauhöhen der Speicher, die Wasserabgabe am Krafthaus und das gespeicherte Zuflussvolumen sind von großer Bedeutung. Betriebsszenarien können allerdings auch ohne Messdaten simuliert werden.

Das hydrologische Modell besteht aus 239 Teileinzugsgebieten und 1050 Höhenbändern. Insgesamt sind 140 Flussabschnitte sowie 26 Speicher und 31 Pumpstationen und Krafthäuser im Modell implementiert. Die Modelleichung erfolgte unter Verwendung von Daten von 44 Messstationen im Zeitraum 01.10.1999 bis 31.12.2000. Hierbei wurden die am weitesten entfernt liegenden Teileinzugsgebiete zuerst kalibriert. Für jedes Teileinzugsgebiet unterhalb einer Messstation ist der Durchfluss der oberhalb liegenden Station verwendet worden. Die Güte des Modells ist ohne zu Hilfenahme der Eichdaten bestimmt worden. Eine Validierung der Kalibrationsparameter ist für den Zeitraum vom 01.10.1992 bis zum 31.12.1993 durchgeführt worden. Zusätzlich wurden stündliche Niederschlags- und Temperaturmessungen in den Eichprozess eingebunden. Die räumliche Niederschlagsverteilung wurde zudem gewichtet. Als Maß gilt hierbei das umgekehrt proportionale Quadrat des Abstandes der Station zum geometrischen Schwerpunkt des Teileinzugsgebietes. In der gleichen Weise wurde die Temperatur gewichtet. Hierbei wurde ein konstanter Gradient von $0.0054^{\circ}\text{C}/\text{m}$ angenommen.

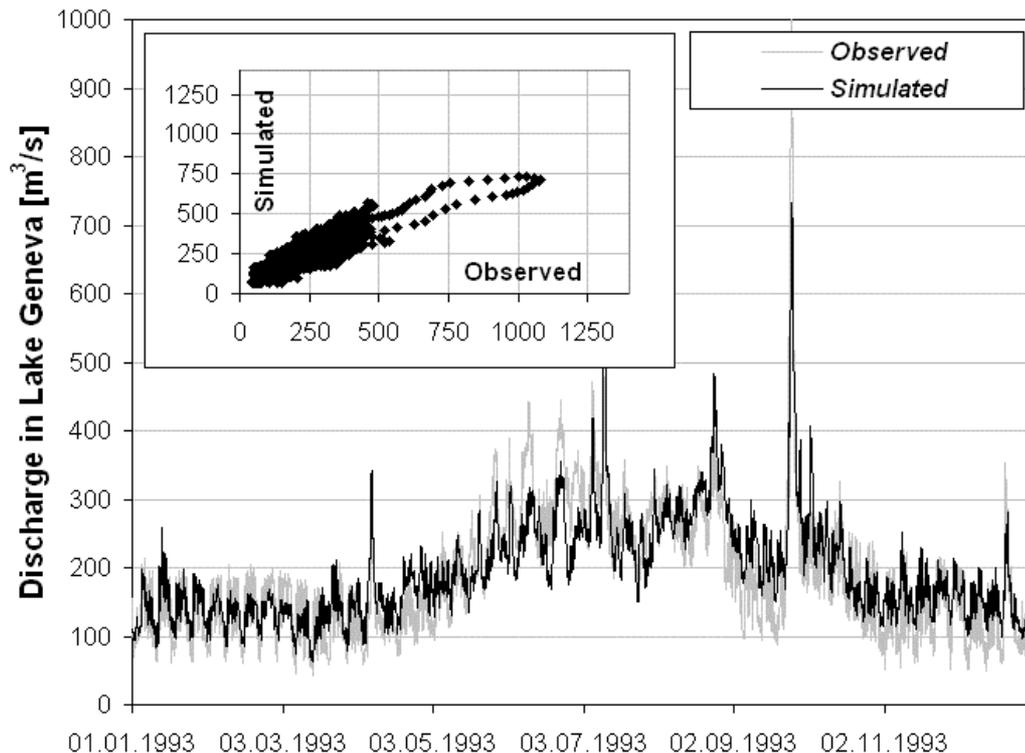


Abb. 8: Güte des Simulationsmodells am Ende des Einzugsgebietes (Mündung der Rhone in den Genfer See) für die Validierungsperiode. Nash=0.737, Bias=1.03.

Die Güte des Modells zeigt Abb. 8. Der Nash Indikator liegt bei 0.737 und der Bias bei 1.03. Die prognostizierten Abflüsse während der Schneeschmelze werden unterschätzt. Das gleiche gilt für den Spitzenabfluss im September 1993. Hier fehlen etwa 350 m³/s. Nichtsdestotrotz werden der hydrologische Jahreskreislauf und die Wasserabgaben der Kraftwerke korrekt wiedergegeben. Darüber hinaus wurde das Septemberhochwasser 1993 mit einer nur sehr geringen Phasenverschiebung modelliert.

Der Einsatz des kalibrierten Modells sieht anstelle hydrologisch-meteorologischer Beobachtungen den Gebrauch meteorologischer Vorhersagen zur operationellen Hochwasservorhersage vor. Folglich hängt die Vorhersagegüte des hydrologischen Modells maßgeblich von der Qualität der Wettervorhersage ab und wird womöglich geringfügig schlechtere Werte liefern.

6. Güte des präventiven Betriebs der Speicherkraftwerke in Abhängigkeit der Hochwasservorhersage

Die Hochwasservorhersage erlaubt die Abschätzung der hydrologischen Situation für die nächsten 72 Stunden. Im Falle eines prognostizierten Anspringens der Hochwasserentlastungsanlagen kann ein präventiver Turbinen- oder Wehrbetrieb die zu erwartenden Schäden erheblich reduzieren. Zu diesem Zweck ist ein regelgestütztes deterministisches Optimierungsmodell zur Entscheidungsunterstützung (DSS) entwickelt worden. Unter Einbeziehung der hydrologischen Vorhersage und des Betriebszustandes der Wasserkraftanlagen kann mit Hilfe dieses Modells ein optimaler Betriebsplan bestimmt werden (Jordan et al., 2005b).

Im Folgenden wird ein Anwendungsbeispiel für das Oktoberhochwasser 2000 gegeben. Hierbei wird eine nahezu perfekte Wettervorhersage angenommen. Dies bedeutet, dass anstelle vorhergesagter Wetterdaten beobachtete Niederschläge und Temperaturen als Eingangsdaten für das Modell verwendet werden. Die simulierte Hochwasservorhersage beginnt am 13. Oktober 2000 und endet am 15. Oktober 2000 um 23h00 (Abb. 9).

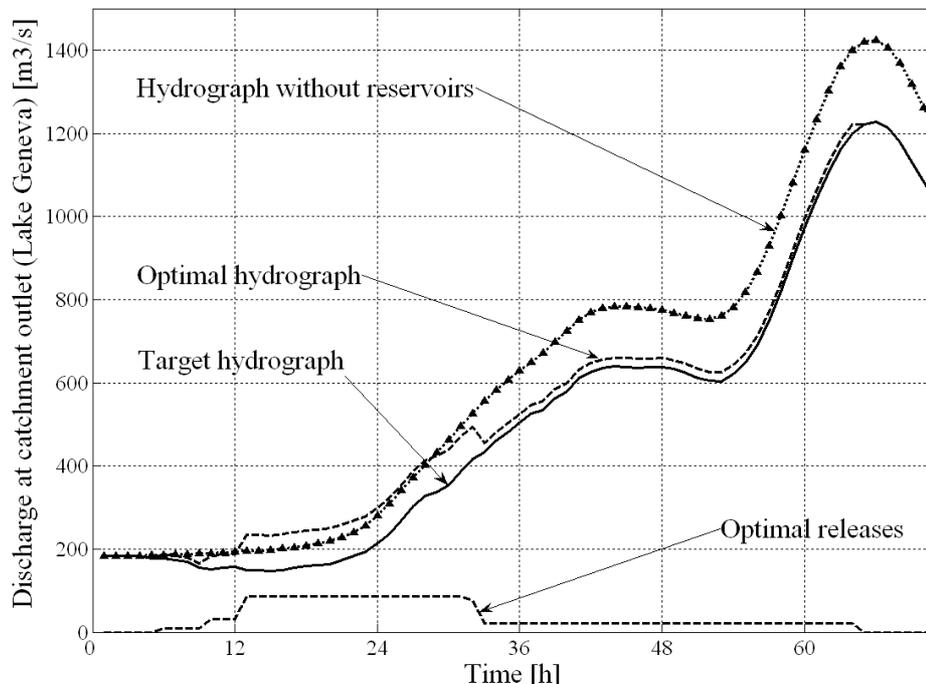


Abb. 9: Beispiel einer optimalen Betriebsstrategie basierend auf einer 72 Stunden Hochwasservorhersage für den 13. Oktober 2000.

Die hydrologischen Kalibrierungsparameter werden nicht verändert. Die Ausgangsbedingungen werden mit den vorherrschenden tatsächlichen Bedingungen zu Beginn des Hochwasserereignisses gleichgesetzt. Die Startbedingungen der Kraftwerke entsprechen ebenfalls dem tatsächlichen Betriebszustand. Der Spitzenabfluss in der Rhone ohne Speicherrückhalt beträgt $1423 \text{ m}^3/\text{s}$ und wird nach 65 Stunden erreicht. Werden die Speicherkraftwerke optimal betrieben und die Retentionswirkung der Speicher ausgenutzt, so kann der Spitzenabfluss auf $1227 \text{ m}^3/\text{s}$ reduziert werden. Hierzu sind lediglich vier Kraftwerke erforderlich, die das erforderliche Speichervolumen durch Wasserspiegelabsenkung bereitstellen und somit den maximalen Zufluss aufnehmen und speichern können. Gemäß der hydrologischen Vorhersage weisen die anderen sechs Kraftwerke eine ausreichende Speicherkapazität während des Ereignisses auf. Zur Bestimmung der Güte des simulierten und vorgeschlagenen Betriebsschemas ist eine Ziel-Ganglinie bestimmt worden. Im vorliegenden Fall wird davon ausgegangen, dass alle Kraftwerke genügend Speichervolumen besitzen, um das Hochwasserereignis aufnehmen zu können und dass kein Wasser während des Ereignisses abgegeben werden muss. Der Dämpfungseffekt ist in diesem Fall maximal und

die flussabwärts erhaltene Ganglinie weist ein Minimum auf. Wie in Abb. 9 ersichtlich ist, entspricht die simulierte Ganglinie sehr gut der Ziel-Ganglinie.

Die mit der hydrologischen Vorhersage verbundenen Ungenauigkeiten sind schwer zu quantifizieren. Die Modellungenauigkeit kann zwar erfasst werden, die Wettervorhersage ist aber mit keiner verlässlichen Wahrscheinlichkeit bzgl. der erforderlichen räumlichen und zeitlichen Auflösung gekoppelt. Die optimalen präventiven Wasserabgaben sind folglich eng an die Verlässlichkeit der hydrologischen Vorhersage geknüpft. Eine Abschätzung dieser Verlässlichkeit bzw. Variabilität würde eine bedeutende Information für den Entscheidungsträger darstellen. Aus diesem Grund werden zwei zusätzliche hydro-meteorologische Szenarien durchgespielt, welche als eine Art Sensitivitätsanalyse aufgefasst werden können. Ein Vergleich dieser beiden zusätzlichen Szenarien mit der bereits vorgeschlagenen Betriebsstrategie ermöglicht eine Einordnung und Bewertung des prognostizierten präventiven Betriebes bzgl. der Beobachteten hydrologischen Situation des Hochwasserereignisses.

Die untersuchten Szenarien werden im Folgenden beschrieben:

Gering: reduzierte hydrologische Vorhersage. Der Niederschlag wird um 20%, die Temperatur um 2 °C reduziert.

Mittel: deterministische hydrologische Vorhersage, Ganglinie ohne Speicher (Abb. 9).

Hoch: erhöhte hydrologische Vorhersage. Der Niederschlag wird um 20%, die Temperatur um 2 °C erhöht.

Real: beobachtetes Szenario in den unterschiedlichen Kontrollpunkten des Einzugsgebietes.

In Abb. 10 ist zu erkennen, dass die optimale Wasserabgabe für das Szenario Hoch relativ nahe bei der des Szenarios Real liegt. Mit pessimistischer werdenden Szenarios müssen die Abgabemengen erhöht werden. Reicht die Abgabe über die Turbinen nicht aus, so muss über die Hochwasserentlastungen oder die Grundablässe evakuiert werden. Für den Entscheidungsträger stellt sich nun die Frage, ob eine präventive Wasserabgabe notwendig ist oder nicht. Im Folgenden werden kurz einige Empfehlungen beispielhaft diskutiert.

Für alle skizzierten Szenarien müssen nur drei oder vier Kraftwerke ihre Turbinen oder die Entlastungsanlagen betreiben. Bei drei Kraftwerken wird eine präventive Wasserabgabe in allen Szenarien notwendig. Das hydrologische Modell sagt den Hochwasserscheitel nach 65 Stunden voraus. Damit der Abfluss in der Rhone zu diesem Zeitpunkt nicht weiter zunimmt, muss der Turbinenbetrieb einige Stunden vorher eingestellt werden. Dies hängt von der Entfernung zwischen Wasserabgabestelle und Kontrollpunkt ab. Das Optimierungsmodell berücksichtigt diesen zeitlichen Versatz und reduziert bzw. stoppt den Turbinenbetrieb rechtzeitig. In diesem Fall endet der Turbinenbetrieb spätestens nach 54 Stunden.

In Anlehnung an die unterschiedlichen Lösungsansätze können einige Entscheidungen mit einem geringen Fehlerrisiko getroffen werden. So werden neue Vorhersagen in das Modell eingearbeitet und beobachtete Abflüsse mit den Prognostizierten verglichen.

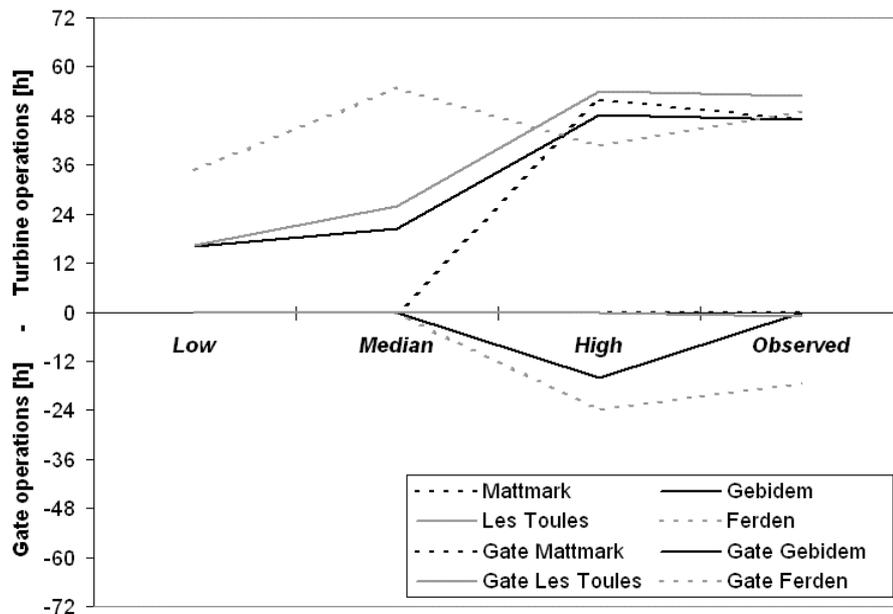


Abb. 10: Vergleich des erforderlichen präventiven Betriebes für die vier hydrologischen Szenarien (gegen oben: Turbinenbetrieb, gegen unten: Betrieb der Auslassorgane).

Für den Speicher Ferden ist in jedem Szenario von einer beträchtlichen präventiven Wasserabgabe auszugehen (Abb. 10). Darüber hinaus ist eine Steuerung des Wehres wahrscheinlich. Für die Speicher Gebidem und Les Toules muss ebenfalls von einem präventiven Turbinenbetrieb ausgegangen werden. Für den Mattmarkspeicher ist dies nur für das Szenario Hoch der Fall, eine Wehrsteuerung scheint nicht erforderlich zu sein.

Ausgehend von diesen Bemerkungen ist das folgende Betriebsschema denkbar: Die Speicher Ferden, Gebidem und Les Toules werden präventiv betrieben, mit dem Turbinenbetrieb des Speichers Mattmark wird zunächst noch abgewartet. Vorbereitende Maßnahmen zum Herunterfahren der Turbinen sind für alle Kraftwerke nach 54 Stunden einzuleiten. Der weitere Betrieb richtet sich nach der nächsten hydrologischen Vorhersage.

7. Schlussfolgerung und Ausblick

Es wurde ein Modell zur Hochwasservorhersage und zum Hochwassermanagement für die obere Rhone entwickelt. Das konzeptuelle hydrologische Modell beinhaltet eine hydrologische Wettervorhersage an zahlreichen Kontrollpunkten innerhalb des Einzugsgebietes. Diese deterministische Vorhersage basiert auf der Wettervorhersage des Schweizerischen Wetterdienstes. Die Wetterprognose dient als Input zur Bestimmung einer optimierten präventiven Speicherabsenkung durch Turbinen- oder Wehrbetrieb der im Einzugsgebiet vorhandenen Speicherkraftwerke. Darüber hinaus liefert das Modell den zu wählenden Bewirtschaftungsplan der Speicherkraftwerke sowie die hierdurch veränderten Ganglinien.

Die Eignung des hydrologischen Modells ist mittels kontinuierlicher Simulationen über Zeiträume von Jahren auf seine Güte getestet worden und erwies sich als sehr

robust. Dennoch ist die deterministische Optimierung des Turbinen- und Wehrbetriebes einigen Unsicherheiten unterworfen. Hierzu zählen z. B. unvorhergesehener Gering/Mittel/Hoch/Real-Wasserverlust aus den Speicherseen oder Schäden flussaufwärts durch unsachgemäßen Betrieb der Entlastungsorgane. Aus diesem Grund wird vor der Entscheidung über eine präventive Maßnahme zuerst eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Im Beitrag werden hydrologische Szenarien bzgl. des optimalen Wasserabgabezeitpunktes sowie der optimalen Wassermenge diskutiert und mögliche Entscheidungsoptionen besprochen.

In einem nächsten Schritt geht es um die Verbesserung der hydrologischen Vorhersage. Ein Filtermechanismus für das Echt-Zeit Update des hydrologischen Modells ist geplant, um die Prognoseunsicherheiten weiter zu reduzieren. Eine Quantifizierung der Unsicherheiten erlaubt die Generierung weiterer hydrologischer Szenarien, welche schließlich eine effiziente Entscheidungsgrundlage zum präventiven Betrieb darstellen werden.

8. Danksagung

Das Forschungsprojekt MINERVE wird vom Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG, jetzt Bundesamt für Umweltschutz, BAFU) und dem Kanton Wallis finanziell unterstützt. Die Niederschlags- und Temperaturdaten wurden unentgeltlich vom Schweizerischen Wetterdienst (Meteo Suisse) zur Verfügung gestellt. Die Übersetzung des englischen Beitrages erfolgte durch Burkhard Rosier, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH).

9. Literatur

Andrade-Leal, R. N., Bachhiesel, M., Drabek, U., Gutknecht, D., Haiden, T., Holzmann, H., Hebenstreit, K., Kirnbauer, R., Nachtnebel, H. P., & Precht, J. (2002) Hydrologische Vorhersagemodelle im operationellen Betrieb der Wasserkraftwirtschaft. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 9-10.

Barros, M. T., Tsai, F. T., Yang, S. L., Lopes, J. E., & Yeh, W. W. (2003) Optimization of large-scale hydropower system operations. Journal of Water Resources Planning and Management, 129(3), 178-188.

Boillat, J.-L. (2005) L'influence des retenues valaisannes sur les crues. Wasser Energie Luft, 11/12.

Bürgi, T. (2002) Wasserstands- und Abflussvorhersagen für den Rhein. Wasser Energie Luft, 7/8.

Dubois, J. (2005) Simulation des systèmes hydrauliques et hydrologiques complexes: Routing System II. Wasser Energie Luft, 11/12.

Hamdi, Y., Hingray, B., and Musy, A. (2005) Un modèle de prévision hydro-météorologique pour les crues du Rhône supérieur en Suisse. Wasser Energie Luft, 11/12.

- Homagk, P. & Ludwig, K. (1998) Operationeller Einsatz von Flussgebietsmodellen bei der Hochwasser-Vorhersage-Zentrale Baden-Württemberg. *Wasserwirtschaft*, 88(4), 160-167.
- Jasper, K., Gurtz, J., & Lang, H. (2002) Advanced flood forecasting in Alpine watersheds by coupling meteorological observations and forecasts with a distributed hydrological model. *Journal of Hydrology*, 267, 40-52.
- Jordan, F., Boillat, J.-L., Dubois, J. and Schleiss, A. (2005a) Real-time flood management by preventive operations on multiple alpine hydropower schemes. Proc., 31th IAHR Congress, Seoul, 3235-3245.
- Jordan, F., Boillat, J.-L., Dubois, J. and Schleiss, A. (2005b) A new model for real-time flood management by preventive operations on multiple hydropower schemes. Proc., Hydro - Policy into practice, Session 5, Hydropower & Dams, Villach.
- Koussis, A. D., Buzzi, A. & Malguzzi, P. (2003) Flood Forecasts for Urban Basin with Integrated Hydro-Meteorological Model. *Jour. of Hydrologic Engineering*, 8(1), 1-11.
- Kumar, N.D., Prasad, D. S. V. & Raju, S. K. (2001) Optimal Reservoir Operation Using Fuzzy Approach. Proc., Int. Conf. on Civil Engineering, 377-384.
- Labadie, J. W. (2004) Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-of-the-Art Review. *Journal of Water resources Planning and Management*, 130(2), 93-111.
- Nash, J.E. & Sutcliffe, J.V. (1970) River flow forecasting through conceptual models, part 1 - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290.
- Schäfli, B., Hingray, B., Niggli, M. and Musy, A. (2005) A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2: 73-117.
- Strafaci, A. M. (2001) Genetic Algorithms in Water Resources Engineering. *Current Methods*, 1(1), 119-123.
- Turcotte, R., Lacombe, P., Dimnik, C., & Villeneuve, J. P. (2004) Distributed hydrological forecast for the management of public dams in Quebec. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31(2), 308-320.

Anschrift des Verfassers:

Dipl.-Ing. Frédéric Jordan
Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne
Laboratory of Hydraulic Constructions
Station 18
CH-1015 Lausanne
Tel.: +41 (0)21 693 – 2366
Fax: +41 (0)21 693 – 2264
Email: fred.jordan@epfl.ch

HYDRIS - VORHERSAGEN AN DER SALZACH

Hans Wiesenegger

1. Hydrologische Charakteristik der Salzach

Das Bundesland Salzburg ist Quellgebiet einiger bedeutender österreichischer Flüsse wie zum Beispiel Enns, Mur und Salzach. Nahezu 75 % der Landesfläche entwässern zur Salzach, 13 % fließen zur Mur, 6 % zur Enns, 4 % zur Traun, 2% zum Inn nach Tirol sowie ca. 2 km² aus dem Lungau zur Drau.

Die Salzach ist mit einem Gesamteinzugsgebiet von 6728 km² der größte Fluss Salzburgs. Sie entspringt nördlich von Krimml in 2300 m Höhe am „Salzachgeier“, der zu den Kitzbühler Alpen bzw. zur Grauwackenzone gehört. Nach einer kurzen, wildbachartigen Strecke vom Ursprung bis Krimml folgt ihr Oberlauf einer glazial geprägten Längstalfurche in west-östlicher Richtung bis nach Schwarzach, schwenkt dann nach Norden und durchbricht bei den „Salzachöfen“ die Nördlichen Kalkhochalpen. Im Unterlauf durchfließt sie das „Salzburger Becken“, anschließend das Alpenvorland und mündet nach rund 226 km im „Becken von Überackern“ auf einer Seehöhe von 390 m in den Inn.

Hydrologisch gesehen ist die Salzach ein rasch fließender Gebirgsfluss mit Gletschereinfluss, ihre zahlreichen Zubringer aus den Hohen Tauern, „Tauernachen“ genannt, deren Teileinzugsgebiete durchwegs bis in die Gletscherregion des Alpenhauptkammes reichen, prägen sie maßgeblich. Am meisten Wasser führt die Salzach zwischen Mai und August, die Minima treten natürlicherweise meist im Jänner und Februar auf. Das Jahres-Mittelwasser (MQ) beträgt am Pegel Salzburg bei einem Einzugsgebiet von 4426 km² rund 178 m³/s, das Verhältnis MQ zu höchstem Hochwasser HHQ (2300 m³/s, Reihe 1951 bis 2005) liegt bei 1 : 13, während jenes von Niederwasser NNQ (12,5 m³/s) zu HHQ im gleichen Zeitraum 1 : 184 beträgt. Mehrere hochalpine Speicherkraftwerke an den Zubringern (Tauernachen) und Laufkraftwerke im Mittel- und Unterlauf beeinflussen jedoch den natürlichen Abfluss im Jahresverlauf.

Im Einzugsgebiet der Salzach sind aufgrund der orographischen Gegebenheiten, der Wetterlagen und der unterschiedlichen Überregnung des Einzugsgebietes vielfältige Hochwasserentwicklungen möglich. In den Sommermonaten Juli und August führen räumlich eng begrenzte Niederschläge (Gewitter) vor allem in den kleinen, meist sehr steilen Einzugsgebieten (Wildbäche) zu Hochwässern. Größere Hochwässer an der Salzach werden vor allem durch Nordweststaulagen mit verursacht und sind bisher meist im Zeitraum Juli bis September nach mehrtägiger (2 - 3 Tage) Überregnung des gesamten Salzacheinzugsgebietes aufgetreten.

Die Tauernachen, mit kurzen Reaktionszeiten bei starken Niederschlägen, bewirken sehr rasch ansteigende Abflüsse im Oberlauf der Salzach, die hier wie eine „Dachrinne“ wirkt. Tauogl und Alm, beide aus dem Gebiet der oft stark überregneten Osterhorngruppe sowie die Königseeache und vor allem die Lammer mit einem Einzugs-

gebiet von rund 400 km² liefern im Unterlauf nach dem Salzachdurchbruch beträchtliche Beiträge zur Hochwasserentwicklung. Flussab von Salzburg hat die Saalach, mit 1157 km² der größte Zubringer der Salzach, merklichen Anteil an der Hochwasserführung. Charakteristisch für den Verlauf von Salzachhochwässern sind der rasche Anstieg der Hochwasserwelle (Stadt Salzburg mit bis zu 30 – 50 cm pro Stunde am Pegel Salzburg) sowie die hohen Fließgeschwindigkeiten der Salzach mit bis zu 20 km/h.

2. Rechtlicher Rahmen und Aufgabenstellung

Laut § 7 Hydrographiegesetz (Bundesgesetzblatt Nr.58 /1979) bzw. § 59i. (1) Wasserrechtsgesetz 1959 (BGBL Nr. 82/2003 i.d.g.F.) *hat der Landeshauptmann von Salzburg, ohne dass daraus jemandem ein Recht erwächst, für die Verbreitung von hydrografischen Nachrichten insoweit zu sorgen, als dies für den Betrieb der Schifffahrt, die Wassernutzung, die Erfüllung internationaler Verpflichtungen und die Abwehr von Gefahren für Leben und Eigentum notwendig wird.*

Im Stadtgebiet von Salzburg uferd die Salzach in Teilbereichen bereits ab einem HQ30 aus, ab einem HQ60 (letztmalig 1959) kommt es zu größeren Überflutungen und bei HQ100 (1899 und 2002) sind weite Bereiche der Stadt betroffen, wobei zur Zeit lineare Verbauungsmaßnahmen zum Schutz der Stadt gegen ein HQ100 mit zusätzlichem Freibord von 50 cm gesetzt werden. Ein wesentlicher Teil des Hochwasser-Managements im Bereich der Stadt Salzburg ist daher die rechtzeitige Alarmierung der Bevölkerung. In der „hochwasserträchtigen“ Zeit Mai bis September bzw. Ende November bis Dezember ist beim Hydrographischen Dienst daher ein Bereitschaftsdienst zur ständigen Beobachtung der Hochwassersituation eingerichtet. Wenn bestimmte Meldegrenzen (kleiner HQ1), die im aktuellen Hochwasseralarmplan festgelegt werden, an Salzach und Saalach erreicht werden, nimmt der Hydrographische Dienst (HD) die Tätigkeit des amtlichen Hochwassernachrichten- und Warndienstes auf. Der verantwortliche Hydrologe erstellt laufend Abflussvorhersagen und informiert den diensthabenden Kollegen im Katastrophenschutz, Einsatzkräfte (Berufsfeuerwehr) und unmittelbar gefährdete Personen, die im Alarmplan des HD verzeichnet sind.

Die Betreiber der Kraftwerkskette „Mittlere Salzach“ (Austrian Hydro Power und Salzburg AG) sind mit wasserrechtlicher Bescheidaufgabe verpflichtet, Maßnahmen zum Hochwasser-Management so durchzuführen und zu koordinieren, dass keine Verschärfung des Hochwassers (durch etwaige ungünstige Überlagerungen) entlang der Salzach flussab der Kraftwerkskette eintritt. Zum Schutz der Unterlieger wurde dabei die zusätzliche Abgabe aus den Speicherräumen, die durch das Abstaun der Kraftwerkskette verursacht wird, auf maximal 100 m³/s begrenzt. Bei Überschreiten eines bestimmten Grenzwertes und anderer definierter Bedingungen erfolgt einvernehmlich (Hydrographischer Dienst, Salzburg AG und AHP) die Festlegung des Abstaubeginns der Kraftwerkskette „Mittlere Salzach“ in mehreren Schritten. Zur optimalen Steuerung der Kraftwerkskette im Hochwasserfall ist daher die Kenntnis des

zu erwartenden Zuflusses flussauf der Kraftwerkskette sowie die Kenntnis der Abflussentwicklung im Unterlauf und an den großen Zubringern erforderlich.

3. Hydrologisches Informationssystem HYDRIS I

Regelmäßig wiederkehrende größere Hochwässer, Veränderungen im Abflussregime der Salzach, welche die bisherigen Erfahrungswerte der Hydrologen in Frage stellten, höhere Ansprüche an den Hochwassernachrichtendienst sowie Sachverständigenvorschreibungen im wasserrechtlichen Bewilligungsverfahren für die Kraftwerkskette „Mittlere Salzach“ führten in den Jahren 1991 – 95 zur Entwicklung eines computer-gestützten Expertensystems HYDRIS (Hydrologisches Informations System zur Hochwasservorhersage in Salzburg) genannt (Wiesenegger, 1997; Wiesenegger und Kirchlechner, 1998). Unter Einbeziehung der praktischen Erfahrungen des Hydrographischen Dienstes und Austrian Hydro Power wurde von der Verbund Tochter Drau Consult (Bachhiesl, 1996; Kugi, 1990) in Zusammenarbeit mit dem Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft an der Technischen Universität Wien ein praxistaugliches Echtzeit-Vorhersagemodell auf Ereignis- und Flussgebietsbasis (Abbildung 2) konzipiert und im Herbst 1996 in Betrieb genommen (Gutknecht, 1994; Gutknecht und Sengschmitt, 1995; Schnatter, 1988).

3.1 Messnetz

Aktuelle Messwerte von

- 29 hydrometeorologischen Stationen (Niederschlag, Lufttemperatur)
- 19 Pegelmessstellen (Wasserstand, Durchfluss)
- 11 Kraftwerken (Ober- und Unterwasserstand, Durchfluss)

werden im 15 min Zyklus aus dem gesamten Salzacheinzugsgebiet über Fernwirk- bzw. Funkeinrichtungen zu einem zentralen Hydrologieserver übertragen, auf Plausibilität geprüft und in einer Datenbank abgelegt. Dort stehen sie als Eingangsgrößen für das Hochwasservorhersagemodell sowie zur aktuellen hydrologischen Beurteilung und weiteren Auswertungen mehreren Anwendern zur Verfügung. Die Lage der Messstellen ist Abbildung 1 dargestellt.

3.2 Datenübertragung und Datenbank

Die an den Messstationen beobachteten Daten werden durch unterschiedliche Übertragungseinrichtungen (Wähl- und Standleitungen, Lichtwellenleiter, Richtfunk, GSM) an die Prozessrechner im Leitsystem der Salzburg AG übermittelt. Dort werden die Daten kurzzeitig archiviert und über ein lokales Netzwerk an die zentrale Datenbank im Hydrologieserver übertragen wo sie in einer Oracle Datenbank für einen Zeitraum von max. 30 Tagen im Direktzugriff zur Verfügung stehen.

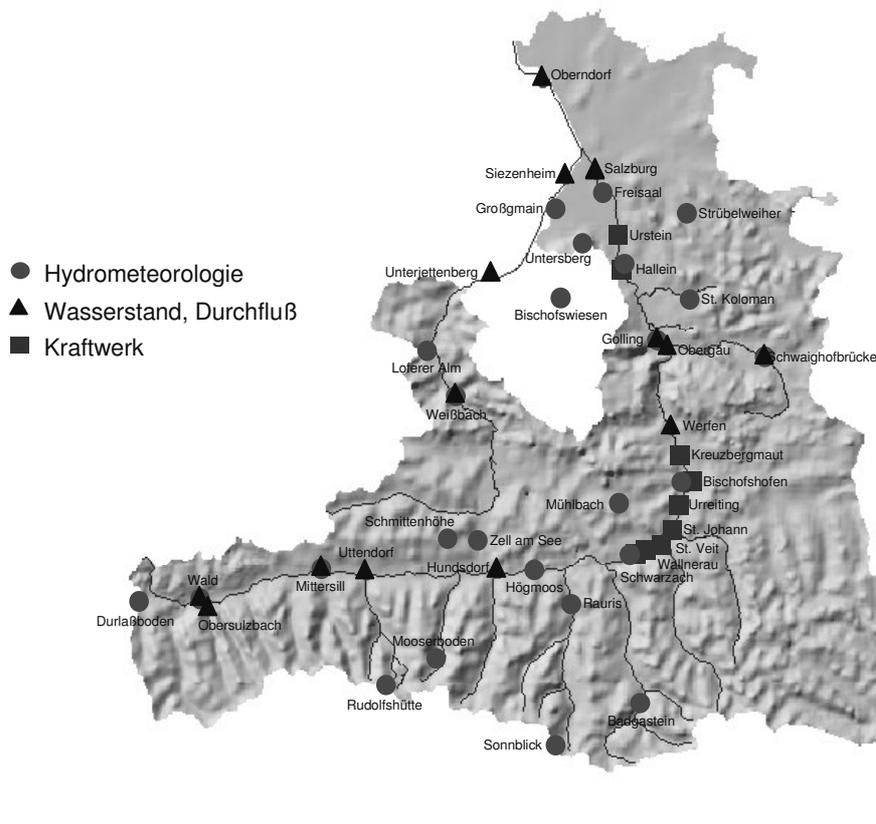


Abb. 1: Messnetz HYDRIS I.

3.3 HW Modell

Das HYDRIS I zugrunde liegende Modell ist als Flussgebietsmodell mit selbst lernender Parameternachführung und integrierten Kraftwerksmodell aufgebaut, in welchem die wesentlichen Phänomene im Einzugsgebiet durch entsprechende Bausteine modelliert werden. Je nach der herrschenden hydrologischen Situation werden die einzelnen Modellbausteine so kombiniert, dass eine dem natürlichen Geschehen adäquate Modellkonfiguration entsteht. Das Gesamtmodell ist eine Kombination der folgenden Modellbausteine

- Wellenablaufmodell
- Wellenablauf- mit Niederschlag- Abflussmodell
- Überlagerungsmodell
- Kraftwerksmodell

3.3.1 Wellenablaufmodell (WA)

Die WA-Modelle dienen der Beschreibung des Ablaufes und der damit verbundenen Verformung von Hochwasserwellen in einer Flussstrecke. Als Eingangsgrößen werden die Zuflussganglinien am Oberliegerpegel und als Kontrollgrößen jene am Unterliegerpegel des Flussabschnittes verwendet. Als Modellkonzeption wird das Speicherkaskadenmodell nach NASH verwendet. Bei sehr großen Hochwasserwellen, deren Abfluss ab einem gewissen Schwellenwert ausferrt, tritt eine zweistufige Modell-

konzeption in Funktion. Der im Flussschlauch ablaufende Abflussanteil wird mit den zuletzt geschätzten Parametern weitergerechnet, während der ausgeuferte Abfluss mit einem zweiten Kaskadenmodell berechnet wird, dessen Parameterkombination der stärkeren Dämpfung und vor allem der Verzögerung des Abflusses in den Vorländern Rechnung trägt. Die Volumskonstanz entlang der Fließstrecke wird durch Einführen einer geeigneten Volums- oder Durchflusskorrektur erreicht, wobei die Korrekturgröße, die wahlweise als multiplikativer Faktor oder als additive Größe gewählt werden kann, zu jedem Zeitschritt in Abstimmung auf die momentanen Verhältnisse neu geschätzt wird.

3.3.2 Wellenablauf- mit Niederschlag- Abflussmodell (WANA)

Der Modellbaustein verwendet Abflüsse am Oberliegerpegel und die Gebietsniederschläge im Zwischeneinzugsgebiet als Eingangsgrößen, und die Abflüsse am Unterliegerpegel als Kontrollgrößen. Die Modellkonzeption ist eine Kombination aus WA-Modell und NA-Modell. Der Niederschlagabfluss-Modellbaustein ist sehr vereinfacht, wobei für den Basisabfluss wahlweise ein linearer Anstieg oder ein Basis-UH-Modell gewählt werden kann.

3.3.3 Überlagerungsmodell

Die Überlagerungsmodelle werden eingesetzt, wenn zwei oder mehrere Zubringer bzw. die Abgaben von Kraftwerken als Eingangsgrößen miteinander den Abfluss an einer unterhalb des Zusammenflusses liegenden Pegelstelle als Ausgangs- oder Kontrollgröße ergeben. Wahlweise ist es aber auch möglich, einzelne oder alle Zubringer mit einem WA-Modell mit fixen Kaskadenparametern zu transformieren und additiv zu überlagern. In jedem Fall ist eine dynamische adaptive Korrektur mit einem Kalman-Filter-Algorithmus vorgesehen, der den berechneten Abfluss am Kontrollquerschnitt an die Beobachtung anpasst. Diese Anpassung kann wahlweise additiv oder multiplikativ erfolgen.

3.3.4 Kraftwerksmodell

Das Kraftwerksmodell wird eingesetzt, um die Wasserabgaben aus der Kraftwerkskette bei Schwellbetrieb bzw. bei Ab- und Aufstau zu berücksichtigen. Bei total gelegtem Stau in der Kraftwerkskette ist das Kraftwerksmodell nicht einsetzbar.

3.3.5 Gesamtmodell

Mit den oben beschriebenen Modellbausteinen, die je nach vorliegender Charakteristik des Flussgebietes und vorliegender Messstellenstruktur zusammengesetzt werden können, werden die Abflussvorgänge im Einzugsgebiet nachgebildet. Die nachstehende Systemübersicht in Abbildung 2 gibt einen Überblick über das derzeit zur Verfügung stehende Gesamtmodell.

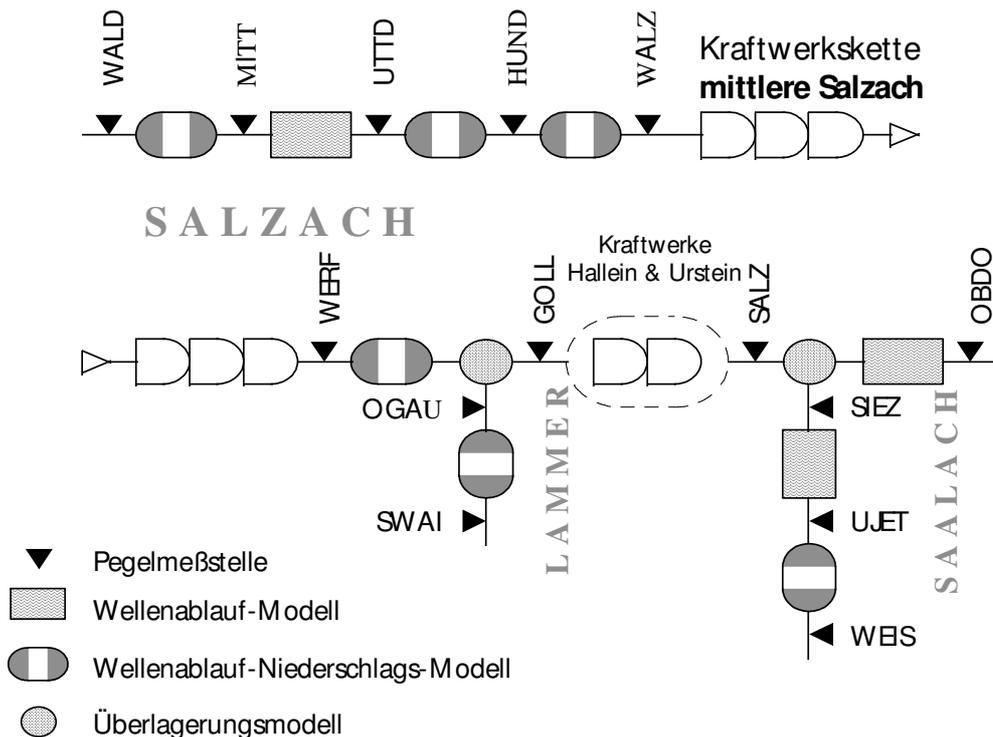


Abb. 2: Gesamtmodell Hydris I.

Das Gesamtmodell kann in verschiedenen Varianten ausgeführt werden, wobei die Auswahl der Varianten automatisch in Abhängigkeit von verschiedenen Schaltern erfolgt. Da Varianten nur unter bestimmten hydrologischen Bedingungen gute Ergebnisse liefern und bzw. sinnvoll sind, werden sie in Abhängigkeit von diversen Größen eingeschaltet. Mit den unterschiedlichen Varianten werden für ausgewählte Pegel an der Salzach und deren Zubringer kontinuierlich Prognosen berechnet. Die Ergebnisse der Prognoserechnungen werden für Abflüsse, die eine vereinbarte Grenze überschreiten, in der Datenbank abgelegt und können von den verschiedenen Anwendern visualisiert werden.

4. Erfahrungen bei der Hochwasservorhersage

Nach einigen kleineren Hochwässern (Juli 1997, Juli 1998, Mai 1999 und März 2002) erlebten HYDRIS und die für die Prognosen verantwortlichen Hydrologen beim „100 jährlichen Hochwasser“ vom 12.8.2002 die wirkliche Feuertaufe.

4.1 August-Hochwasser 2002

Das „100 jährliche Hochwasser 12.8.2002“ war, was seine Entstehungsgeschichte und den Verlauf sowie die Form der Hochwasserwelle (Abbildung 3) betrifft, ein außergewöhnliches und auch sehr seltenes Ereignis (je nach Flussabschnitt zwischen HQ10 und HQ100), das vor allem durch den raschen Ablauf (Anstieg und Rückgang) infolge stark gesättigter Böden verblüffte.

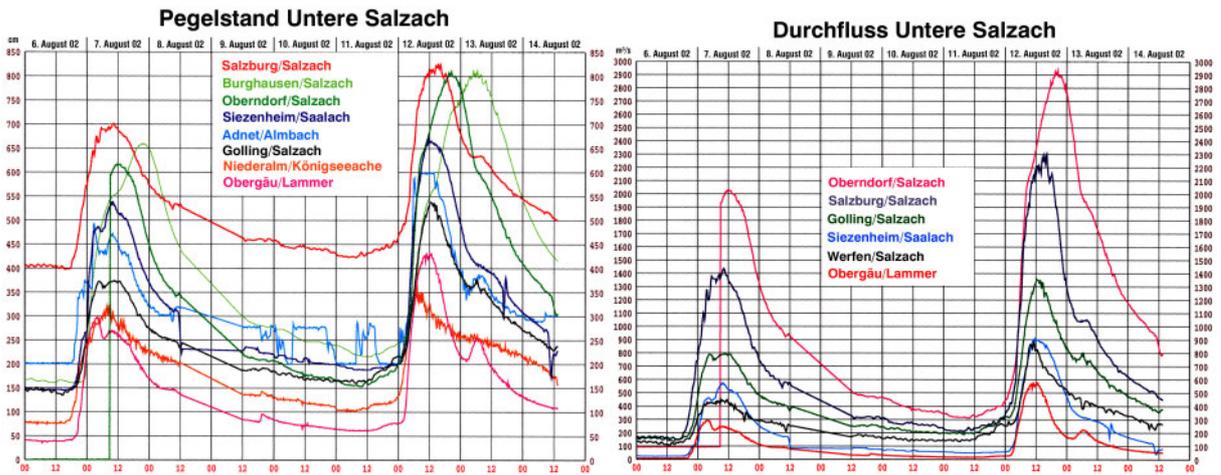


Abb. 3: Wasserstand und Durchfluss Untere Salzach im August 2002.

Am 11.8.2002 ließen die Niederschlagsmodelle der ZAMG intensive flächendeckende Niederschläge für den 12. August erwarten, der Hochwasserdienst des Landes war daher in erhöhter Bereitschaft und begann am Abend des 11.8 bzw. am 12.8. um 03:00 Uhr seinen Dienst. Die Hochwasserwarngrenze am Pegel Salzburg Salzach wurde jedoch wesentlich schneller als am Abend des 11.8 abgeschätzt erreicht und daher wurden bereits um 04:50 Uhr die Berufsfeuerwehr Salzburg und anschließend betroffene Anrainer laut Alarmplan benachrichtigt. Die ersten 3 – 4 Stundenprognosen, die auf ein großes Hochwasserereignis hindeuteten, divergierten sehr stark und mussten daher aufgrund der Erfahrung aus abgelaufenen Hochwasserereignissen entsprechend interpretiert werden (Abbildung 4).

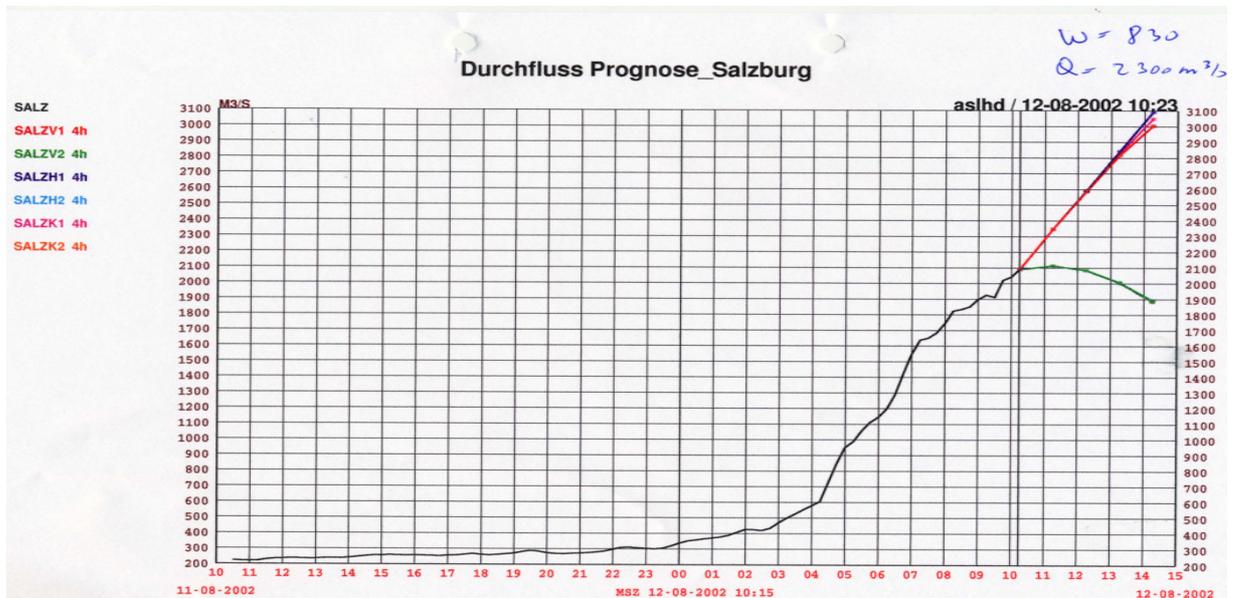


Abb. 4: Durchflussprognose am 12. August 2002.

Mit entsprechender Interpretation und hydrologischer Erfahrung konnte jedoch die Hochwasserspitze in Salzburg auf 3 % genau und der Zeitpunkt des Auftretens auf eine halbe Stunde genau vorhergesagt werden. Die Prognosen für Golling und Obern-

dorf waren ebenfalls sehr präzise. Bereits um 06:40 Uhr erfolgte die Benachrichtigung der Feuerwehr in Golling mit dem Hinweis, dass ein Ausufer der Salzach im Bereich der „Salzachsiedlung“ in den nächsten drei Stunden zu erwarten sein, was auch tatsächlich so eintrat.

Die Salzach Unterlieger (Gewässerbezirk Braunau) wurden bereits im Laufe des Vormittags informiert, dass mit einem größeren Ereignis und somit mit einem Überströmen der Salzachdämme im Bereich Ostermiething (Ettenau) am späteren Nachmittag zu rechnen sei. Lediglich in Burghausen – Ach (Oberösterreich) wurden zu niedrige Höchststände vorhergesagt.

Die Stadt Salzburg ist bei diesem Ereignis mit einem „blauen Auge“ davongekommen, im Bereich der Altstadt fehlten jedoch nur wenige Zentimeter zum Ausufer und bei einem um nur 50 cm höheren Wasserstand wären plötzlich ca. 8,7 km² Stadtgebiet überflutet gewesen. Rückmeldungen von betroffenen Anrainern bestätigten, dass es auch organisatorisch in der Warn- und Alarmkette Mängel gab. Speziell in der rechtzeitigen Verbreitung von Information während des Ereignisses lag eine Schwachstelle der Kommunikation. Die Warn-Information aus HYDRIS soll daher auch auf elektronischem Weg (Internet) der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden und so für die Experten mehr Freiraum zur Interpretation während des Ereignisses verfügbar sein.

Das Ereignis zeigte aber deutlich, wie wichtig die Interpretation computerunterstützter Vorhersagen durch erfahrene Hydrologen ist und wie notwendig von Meteorologen interpretierte Niederschlagsprognosen für die Güte der Abflussvorhersagen sind (Wiesenegger, 2003a; Wiesenegger, 2003b). Dazu bedarf es aber auch entsprechender personeller Ressourcen um den Warnbetrieb über längeren Zeitraum aufrecht zu erhalten zu können.

4.2 Juli-Hochwasser 2005

Ein ausgeprägtes Höhentief, das sich am 10.7.2005 von Südfrankreich über Norditalien bis nach Österreich erstreckte, verlagerte sein Zentrum nur langsam weiter nach Osten und führte zu intensiven flächenhaften Niederschlägen, die auch von Gewittern begleitet wurden. Im Oberpinzgau wurden in 72 Stunden im Bereich Wald bis Mittersill 50 – 160 Liter Niederschlag pro Quadratmeter gemessen, im Pongau (Mittlere Salzach) 45 – 80 Liter, während im Tennengau und Flachgau (Untere Salzach) 90 bis 145 l Regen pro Quadratmeter fielen. Als Vorberegnung wurden in der Woche zuvor an der oberen und mittleren Salzach 30 – 50 l/m², an der unteren Salzach 25 – 35 l/m² verzeichnet.

Die Schneefallgrenze lag während des Ereignisses im Mittel bei 2960 m und sank nie unter 2350 m. Aufgrund der hohen Temperaturen regnete es daher bis in große Höhen, dies bewirkte hohe Zuflüsse vor allem aus dem Bereich der Tauernachen.

In Mittersill stieg die Salzach ausgehend von einer leicht erhöhten Mittelwasserführung 20 Stunden teilweise sehr steil an und erreichte nach weiteren 16 Stunden ihren Höchststand am 12. Juli kurz nach Mitternacht. Der Spitzendurchfluss (incl.

Ausuferungen) betrug ca. 340 m³/s, dies entspricht einem ca. 80 – 100 jährlichen Hochwasserereignis (Abbildung 5).

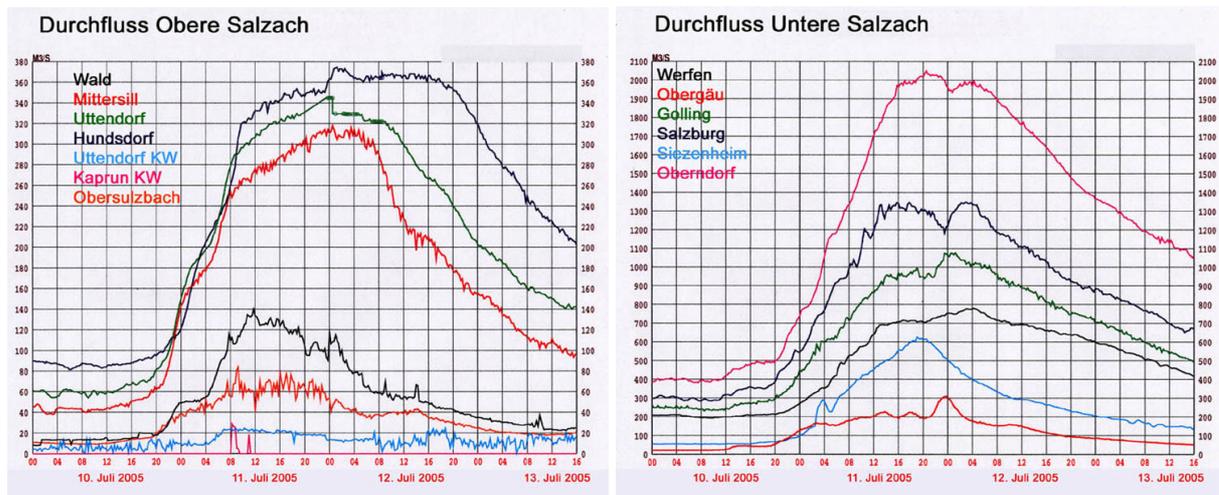


Abb. 5: Durchfluss Obere und Untere Salzach im Juli 2005.

An der unteren Salzach (Salzburg und Golling) war die Ausgangslage vergleichbar, der Anstieg bis zum ersten Maximum erfolgte jedoch rascher, die Jährlichkeiten waren jedoch deutlich geringer (HQ5 – HQ20). Heftige Regenfälle zwischen 20 und 23 Uhr im Bereich der mittleren Salzach sowie an der Lammer bewirkten eine zweite, größere Hochwasserspitze in Werfen, Golling und Salzburg. An den im Hochwasserfall wichtigen Salzachzubringern Lammer und Saalach wurde nur ein ca. fünfjähriges Hochwasser verzeichnet.

Der Hydrographische Dienst war seit Freitag 8. Juli aufgrund der Prognosen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik in Bereitschaft. Am 10.7.05 um 23 Uhr wurde mit Erreichen der Vorwarngrenze in Mittersill der Hochwassernachrichtendienst begonnen. Um 2 Uhr morgens wurden die Vorwarngrenzen am Pegel Salzburg und Golling erreicht und die Berufsfeuerwehr der Stadt Salzburg sowie andere unmittelbare betroffene Anrainer und Einsatzorganisationen laut Alarmplan benachrichtigt. Um 5 Uhr 50 wurden die ersten 3 – 4 Stunden Prognosen, die auf ein großes Hochwasserereignis im Bereich Mittersill hindeuteten, erstellt und der Katastrophenreferent der BH Zell am See verständigt. Der maximale Durchfluss wurde mit 310 m³/s (Pegelstand 495 – 500 cm) prognostiziert.

Besondere Schwierigkeiten bei der Vorhersage bereiteten die zahlreichen Dammbrüche entlang der Salzach im Bereich Wald bis Mittersill und die damit deutlich veränderten Wasserstandsganglinien, die manchmal keinen deutlichen und oft auch widersprüchlichen Trend zeigten.

Am Salzach Mittel- und Unterlauf waren die Hochwasservorhersagen einfacher zu erstellen, im Verlauf des Vormittags wurde die Feuerwehr Ostermiething, der Gewässerbezirk Braunau und die Wasserwehr der Gemeinde Ach informiert, dass ein Ausuferern der Salzach im Bereich Ostermiething, Ettenau und Burghausen-Ach möglich sei. Um 11 Uhr 40 erfolgte die Benachrichtigung der Feuerwehr in Golling,

dass mit einem prognostizierten Durchfluss von 1000 m³/s und Ausufern der Salzach um ca. 15 – 16 Uhr zu rechnen sei. Für den Nachmittag des 11. Juli wurde der maximale Pegelstand für Salzburg mit 700 cm vorhergesagt. Diese Prognosen stimmten in der Größenordnung (Abweichung 10 – 15 cm bzw. 50 – 80 m³/s) und Zeitpunkt recht gut. Für Überraschung sorgte nur der intensive Niederschlag im Lammergebiet in den Nachtstunden, der eine zweite, in Golling höhere Hochwasserspitze verursachte.

Das Ereignis zeigte deutlich die Grenzen des derzeit verwendeten Modells und insbesondere die Notwendigkeit der Einbindung von Niederschlagsprognosen in die Abflussvorhersagen auf. Aus dem Verlauf der Überregnung war auch ersichtlich, wie wichtig hochgelegene Niederschlagsstationen zur Erfassung der Niederschlagsverteilung sind.

Die Alarmkette funktionierte aufgrund der Erfahrungen mit dem Hochwasser 2002 bis auf Kleinigkeiten sehr gut, die Prognosen wurden stündlich per email verschickt.

5. Zukünftige Entwicklung – HYDRIS II

Das derzeitig verwendete Modell HYDRIS I, das sich beim Augusthochwasser 2002 und beim Juli Hochwasser 2005 bestens bewährt hat, weist jedoch, wie die Erfahrungen aus mittlerweile fast 10 Jahre Betrieb zeigen, auch Schwächen auf, die nur durch den Einsatz neuer, ergänzender oder modifizierter Modellansätze behoben werden können.

Ein wesentliches Problem stellen vor allem die derzeit relativ kurzen Vorhersagezeiten (3 – 4 Stunden) dar, die nur dem ca. 2 – fachen der Wellenlaufzeiten entsprechen und keine langfristigen Prognosen zur Abschätzung der Gesamtentwicklung eines Hochwasserereignisses ermöglichen.

Durch die Einbeziehung meteorologischer Prognosen (INCA Nowcasting Daten der ZAMG, ALADIN Short Range Forecasting Daten des Local Area Models (LAM) der ZAMG, LM Short Range Forecasting Daten des Local Area Models (LAM) des DWD und ECMWF Medium Range Forecasting Daten) soll die Berechnung von Abflussprognosen für unterschiedliche Zeiträume (max. 72 h) mit entsprechender Genauigkeit möglich werden. Dies ermöglicht die Abschätzung der Größenordnung (HQ Größe) bzw. Entwicklung eines sich anbahnenden Hochwassers schon 1 – 2 Tage im Voraus. Dadurch kann ein wesentlicher Zeitvorsprung für strategische Entscheidungen (erforderliche Bereitschaft und Alarmierung größerer Katastropheneinsatzkräfte, Stauraumlegungen etc.) im möglichen Katastrophenfall gewonnen werden.

Weiters werden derzeit in HYDRIS I wesentliche Teile des 6728 km² großen Salzach-Einzugsgebietes noch nicht durch Niederschlag-Abfluss-Modelle abgedeckt, manche Teilzuflüsse werden nur durch Volums-Korrekturfaktoren oder gar nicht berücksichtigt. Durch eine entsprechende Modellerweiterung soll daher in HYDRIS II das gesamte Salzach-Einzugsgebiet durch Niederschlag-Abflussmodelle erfasst werden und so der Wellenablauf bzw. die Entwicklung der Hochwasserwellen in der Salzach besser nachgebildet werden können.

Zusätzlich zu den 30 Niederschlags- und Lufttemperaturmessstellen, die derzeit schon im System HYDRIS I online verfügbar sind, sollen weitere 8 bereits bestehende hydro-meteorologische Stationen in die Datenfernübertragung angebunden werden. In Bereichen, die derzeit nur unzureichend abgedeckt sind (Großvenedigergebiet, Hagen- oder Tennengebirge) und auch nicht durch Wetterradardaten ausreichend abgedeckt werden können, werden neue, zusätzliche Stationen errichtet. Um das Niederschlagsmessnetz im bayrischen Teil des Saalach-Einzugsgebietes, sowie im Bereich der unteren Salzach zu verdichten, ist außerdem die Einbindung von Stationen aus dem Messnetz des bayerischen INN Prognosesystems geplant.

Das derzeit verwendete Prognosemodell reicht zudem nur bis zur Landesgrenze bzw. zum Salzachpegel Oberndorf soll aber bis zur Mündung der Salzach in den Inn bzw. bis zum Pegel Burghausen-Ach erweitert werden.

Neben den 19 Abflusspegeln, welche bereits im System HYDRIS I verwendet werden, sollen im System HYDRIS II weitere Salzach Zubringer (Fuscher Ache, Rauriser Ache, Großarler Ache, Almbach und Königseeache) berücksichtigt und auch an Saalach (Viehhofen) und Salzach (Vigaun) und Lammer (Voglau) weitere Pegel eingerichtet werden.

Der Einfluss des Kraftwerksbetriebs auf den Wellenablauf wird im Modell derzeit nur für die existierenden Kraftwerke an der mittleren Salzach (Wallnerau bis Kreuzbergmaut) berücksichtigt. Vom Modell wird dabei nur die bestehende Wehrbetriebsordnung (WBO) abgebildet, Abweichungen von der WBO können modelltechnisch derzeit nicht berücksichtigt werden. Eine Prognose-Korrektur erfolgt erst wieder beim Pegel Werfen. Zukünftig soll der Betrieb gemäß Wehrbetriebsordnung sowie der tatsächliche Betrieb der folgenden Kraftwerke im Modell berücksichtigt werden:

- Kraftwerksgruppe Kaprun und ÖBB Kraftwerke im Oberlauf
- Kraftwerkskette Mittlere Salzach inkl. Pfarrwerfen (Errichtung ab 2006)
- Kraftwerkskette Gamp, Hallein, Urstein
- Kraftwerke Bad Reichenhall und Rott an der Saalach

Das bisherige Modell, das „im Hintergrund“ ständig mitläuft, liefert nur ereignisbezogen bei Erreichen bestimmter Schwellenwerte (Grenze ca. HQ0,5) Prognoseergebnisse. Es erzeugt zwar kontinuierlich Prognosen, die Parameter wurden jedoch speziell für den Ablauf von Hochwasserwellen kalibriert. Die Rechenergebnisse für den Mittel- bzw. Niederwasserbereich werden daher derzeit nicht visualisiert. Für einige Aufgabenstellungen (Schifffahrtsbetrieb im Sommer, Kraftwerkskoordinierung, etc.) aber vor allem für die Einbindung in das HW Vorhersagesystem für den Inn sind jedoch tägliche Vorhersagen mit einem kontinuierlichen Modell erforderlich. HYDRIS II soll daher ein echtes kontinuierliches Modell-System werden, in welchem sowohl

- die Systemzustände (Schnee, Bodenfeuchte etc.) kontinuierlich weitergerechnet
- als auch die Prognosen kontinuierlich und für alle Abflusssituationen (NW, MW, HW) erstellt

werden können.

Im bestehenden Prognosesystem werden zwar im Zuge der Datenvorverarbeitung die Größen „Schmelzregen“ und „Schneefallgrenze“ berechnet. Das hydrologische/hydraulische Modell selbst weist aber keinen Modul zur kontinuierlichen Berechnung der Schneeakkumulation und Schneeschmelze auf. Der Einfluss der Schnee- und Gletscherschmelze ist aber insbesondere im Oberlauf der Salzach von Bedeutung (Hochwasser August 1987) und spiegelt sich auch in deutlich ausgeprägten Schmelzganglinien (z. B. Mittersill) wider. Die Einbindung eines geeigneten Schnee- und Gletscherschmelzmodells, das die spezifische Dynamik der Gletscherbäche und unvergletscherten Zubringer abbildet, kann eine deutliche Verbesserung der Vorhersagen bewirken.

Insgesamt sollen die bisher mit HYDRIS I gelösten Aufgaben

- Warnung vor Hochwasserereignissen im Einzugsgebiet der Salzach
- zuverlässige Hochwasservorhersagen als Entscheidungsgrundlage für koordinierte Hochwassermanagementmaßnahmen

durch den Einsatz eines neuen Hochwasservorhersagemodells, das dem Stand der Technik entspricht, von den verantwortlichen Hydrologen in Zukunft optimal erfüllt werden können.

6. Literatur

Bachhiesl, M. (1996) Entwicklung eines Hochwasservorhersagemodells für das Einzugsgebiet der Salzach. Beitrag XVIII Konferenz der Donauländer über hydrologische Vorhersagen, Graz 1996.

Gutknecht; D. (1994) HYFORS - Ein hydrologisches Vorhersage- und Simulationsmodell für Flussgebiete, Österreichische Ingenieur - und Architekten-Zeitschrift, 139 Jg., Heft 9/1994.

Gutknecht, D. und Sengschmitt, D. (1995) Mathematische Modelle offener Gerinne - Wehrbetrieb - Staulegung. Beitrag zum Seminar Konstruktiver Landschaftswasserbau, Band 17, Seiten 135-153, TU Wien.

Kugi, W. (1990) Erfahrungsbericht über den Einsatz des Zuflussvorhersagemodells an der Drau anhand praktischer Beispiele des Jahres 1989. Beitrag XV. Konferenz der Donauländer über hydrologische Vorhersagen, Varna 1990.

Schnatter, S. (1988) Dynamische Bayes'sche Modelle und ihre Anwendung zur hydrologischen Kurzfristvorhersage. 180 Seiten. Dissertation TU Wien 1988.

Wiesenegger, H (1997) Möglichkeiten der Hochwasservorhersage am Beispiel eines Hochwasserprognosemodells für die Salzach. Beitrag zur 2. ÖWAV Tagung Alpine Schutzwasserwirtschaft, Bad Hofgastein 1997.

Wiesenegger, H. und Kirchlechner, P. (1998) HYDRIS Hydrologisches Informationssystem zur Vorhersage von Hochwässern im Land Salzburg. Beitrag XIX. Konferenz der Donauländer über hydrologische Vorhersagen, Osijek 1998.

Wiesenegger, H. (2003a) Auguthochwasser 2002, Hydrologische Situation und Prognosen im Salzacheinzugsgebiet, ÖWAV Symposium Die Hochwasserkatastrophe 2002; Wien März 2003.

Wiesenegger, H. (2003b) The August 2002 flood in Salzburg / Austria – experience gained and lessons learned from the flood of the century; Nizza April 2003.

Anschrift des Verfassers:

Dipl.-Ing. Hans Wiesenegger
Land Salzburg, Hydrographischer Dienst
Michael-Pacher-Strasse 36, A-5020 Salzburg
Tel: +43 (0)662 8042 4318
Fax: +43 (0)662 8042-4199
Email: Hans.Wiesenegger@salzburg.gv.at
<http://www.salzburg.gv.at>

PROGNOSE UND HOCHWASSERWARNUNG – ERFAHRUNGEN AUS DER SICHT DES HZB

Reinhold Godina

1. Einleitung

Die Warnung vor einem Hochwasserereignis ist ein wesentlicher Bestandteil im Handlungskreislauf – Ereignis, Bewältigung, Wiederherstellung und Vorbeugung – des integrierten Hochwassermanagements. Nur eine zeitgerechte und räumlich zutreffende Prognose kann den Einsatz von Hilfskräften und den von technischen Hochwasserschutzeinrichtungen wirkungsvoll gestalten (BMLFUW, 2005). Jede Analyse großer Hochwasserereignisse hebt die Bedeutung der Hochwasserwarnung, als wesentliches Instrument zur Risiko- und Verhaltensvorsorge und Schadensminimierung hervor. Bereits im Juni 1899 wurde der Wasserstands- und Nachrichtendienst im österreichischen Donaueinzugsgebiet, mit der k.k. hydrographischen Landesabteilung in Wien als Zentralstelle, ins Leben gerufen (Lauda, 1900). Der Wasserstandsnachrichtendienst, also die Darstellung und Verbreitung historischer und aktueller Pegelstände, ist demnach seit mehr als 100 Jahren eine zentrale Aufgabe der Hydrographie in Österreich. Die mit dem hydrographischen Messnetz erhobenen Daten bilden die Grundlage des Nachrichtendienstes und sind neben anderen Eingangsdaten die Voraussetzung für die Erstellung von Prognosen und der daraus abgeleiteten Hochwasserwarnungen. Dies erklärt, dass die Entwicklung und der Betrieb von Hochwasserwarneinrichtungen eine traditionell von der Hydrographie in Österreich wahrgenommene Aufgabe ist.

Die Anforderungen an die Prognose haben sich im Laufe der Zeit verändert. War vor 100 Jahren eine ungefähre Prognose über das Maß der bevorstehenden Wasserstands- und Abnahmen an einem Pegel gefragt, so erfordert der integrative Hochwasserschutz der Gegenwart eine frühzeitige Prognose des Abflusses sowohl in der räumlichen als auch in der zeitlichen Skala.

2. Entwicklung der Hochwasserwarnsysteme in Österreich

Die Hochwasserereignisse der letzten 10 Jahre haben deutlich die Bedeutung der Warnung als Modul im Hochwassermanagement aufgezeigt und beschleunigten die Entwicklung der Prognosesysteme. Vor 2002 waren neben der Betriebsprognose der Austrian Hydro Power (AHP) im Wesentlichen nur zwei Systeme – das an der Donau und jenes an der Salzach – operativ im Einsatz, die von den zuständigen hydrographischen Landesdiensten betrieben wurden. Die Anforderung, für mobile schutzwasserbauliche Einrichtungen an der Donau exakte Prognosen zu liefern, veranlasste den Hydrographischen Dienst Niederösterreich die Wasserstandsvorhersage und die Abflussprognose der Donau von einem empirischen auf ein hydrologisch-hydrodynamisches Modell umzustellen. Gleichzeitig wurde ein Prognosemodell für den Kamp in Auftraggeberkooperation mit der EVN entwickelt und 2006 in Betrieb gestellt. Ebenfalls Anfang 2006 wurde das Mur/Mürz – Prognosesystem, sowie ein Warn-

system für alle größeren Gewässer in Kärnten als zentrale Elemente der Warnung bei den hydrographischen Diensten für die Steiermark und Kärnten integriert. Die Abbildung 1 zeigt, dass ein Modell für den Inn, den Lech und das Tiroler – Achengebiet in Entwicklung ist. In Salzburg und Oberösterreich werden die bestehenden Systeme für die Salzach und die Donau erneuert und erweitert. Für die Raab und Rabnitz ist eine Erweiterung des Mur/Mürzmodells im Rahmen einer Kooperation der Burgenländischen Landesregierung mit der Steiermark und Ungarn geplant. Diese Übersicht macht deutlich, dass das Personal der hydrographischen Dienste - das bei allen genannten Entwicklungen maßgeblich beteiligt ist - zukünftig vor eine Herausforderung gestellt wird, die nur mit einem entsprechenden Ressourceneinsatz zu bewältigen ist.

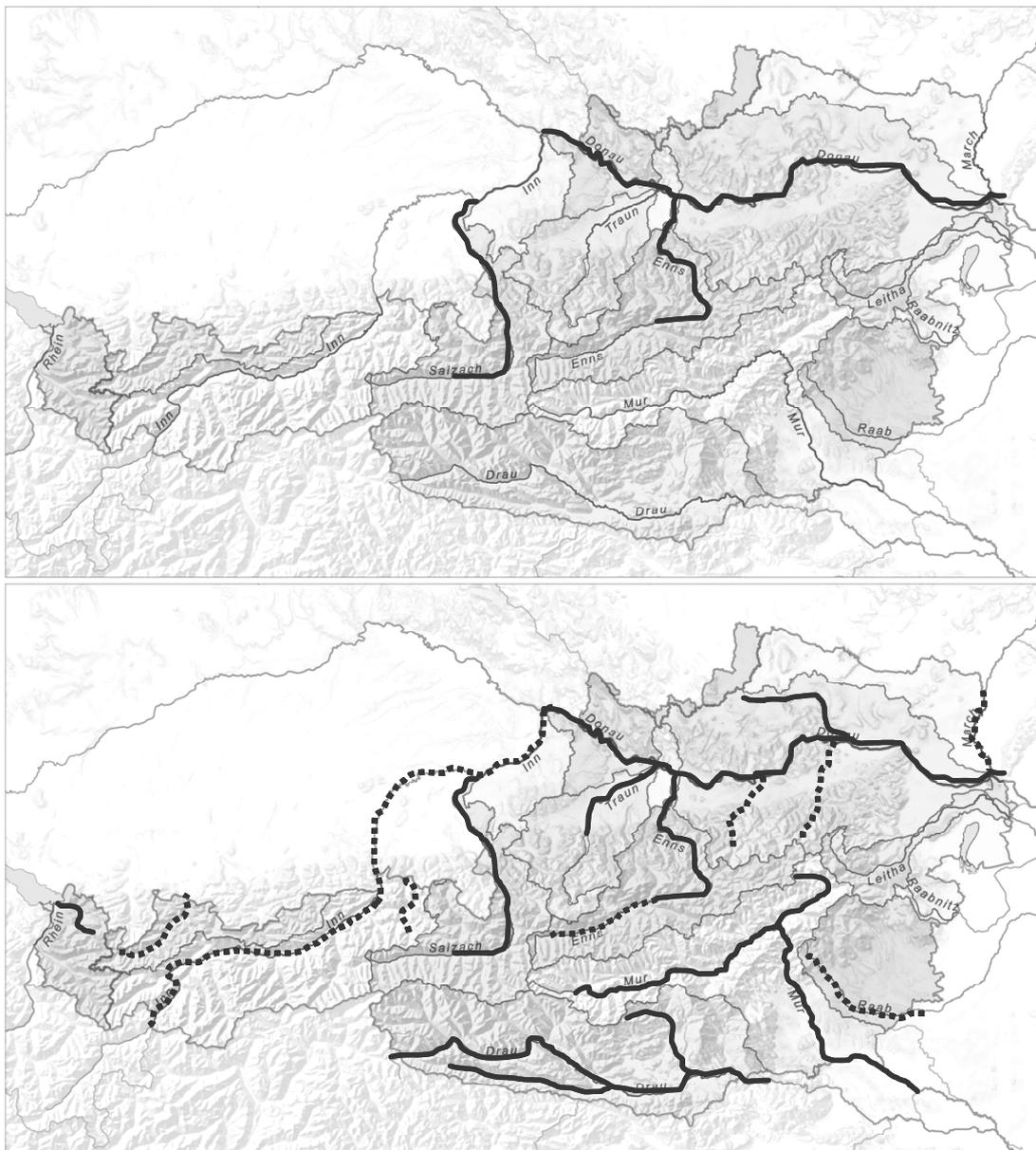


Abb. 1: Entwicklung der Prognosemodelle in Österreich (oben: vor 2002; unten: Stand 2006, strichliert: in Planung).

Ein effizientes Warnsystem umfasst neben dem hydrologischen Modell ein Management der dafür notwendigen Eingangsdaten, sowie eine möglichst automatische Visualisierung und Verteilung der Informationen im Fall einer prognostizierten Gefahr (Abbildung 2). Die hydrologische Modellierung hat sich in den vergangenen 10 Jahren enorm entwickelt. Die Möglichkeit zusätzlich zu den beobachteten Messstelleninformationen GIS-basierte Sekundärinformation als Input der Modellierung zu verwenden hat den Weg von rein empirischen Modellen hin zu kontinuierlichen Wasserbilanzmodellen ermöglicht. Damit erhöht sich auch die Komplexität der Modelle und parallel dazu die Anforderung an die Ausbildung und an das Verständnis der Anwender, die diese Modelle betreiben müssen.

Anders als z.B. in den skandinavischen Ländern Norwegen, Schweden und Finnland, wo auch die Modellentwicklung unmittelbar in den nationalen hydrographischen Diensten durchgeführt wird, erfolgt in Österreich die Entwicklung in Kooperation der hydrographischen Dienste mit Universitätsinstituten, Forschungszentren und Ingenieurbüros. Auch müssen die Niederschlagsprognosen, die einen zentralen Input der hydrologischen Modelle darstellen, zugekauft werden. Die hydrographischen Dienste sind dabei in Bezug auf das Projektmanagement – vom Auftrag zum funktionierenden Warnsystem – vor die Herausforderungen gestellt, mit mehreren unterschiedlichen Partnern Leistungen zu vereinbaren, deren Umfang und Schnittstellen zu anderen Partnern klar und unmissverständlich definiert werden müssen. Dies betrifft sowohl das Datenmanagement im Umfeld der jeweiligen internen IT – Organisationseinheiten, die Entwicklung und den Einsatz des hydrologischen Vorhersagemodells, als auch eine für alle Adressaten der Warnung verständliche Interpretation und Darstellung des Ergebnisses.

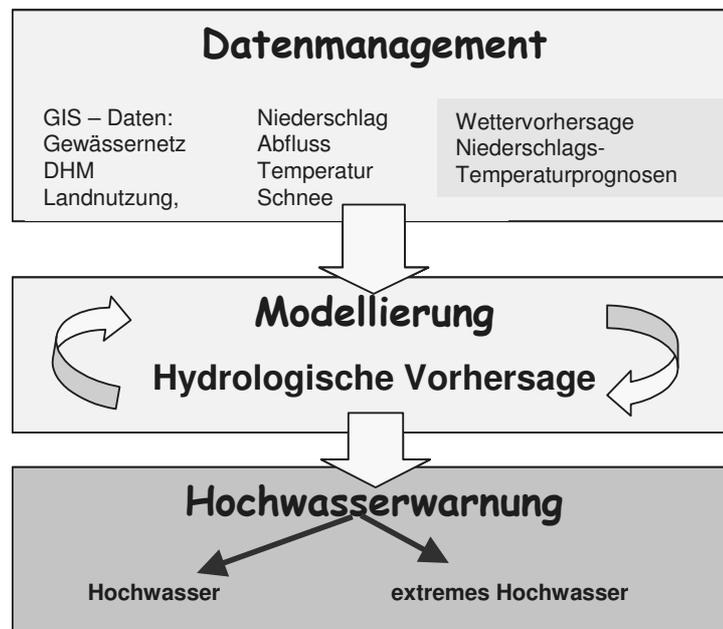


Abb. 2: Bausteine der Hochwasserwarnung.

Die Analyse historischer Hochwasserereignisse und die damit verbundene Anpassung der Modellparameter an das gewählte Prognosemodell ist ein wichtiger Teil der Entwicklung und mit einem Arbeitsaufwand verbunden, der oft unterschätzt und im Auftrag nicht eindeutig einem Partner zugeordnet wird. Historische Daten sind in unterschiedlichen Formaten vorliegend, für welche Schnittstellen und Datenkonvertierungen zu entwickeln sind. In vielen Fällen müssen sie überhaupt erst elektronisch erfasst werden, was ebenfalls einen großen Personaleinsatz erfordert, der eingeplant werden muss.

Ein weiterer wesentlicher Punkt der hydrologischen Vorhersage ist die Analyse und Evaluierung des Prognoseergebnisses. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse und deren Berücksichtigung in der Modellierung kann die Prognose zukünftiger Ereignisse verbessern. Die dazu notwendigen Ressourcen müssen ebenfalls bei der Planung des operationellen Betriebes vorgesehen werden.

Der Abfluss an fast alle größeren österreichischen Gewässer, für welche Prognosemodelle erstellt wurden bzw. entwickelt werden, ist mehr oder weniger durch den Betrieb von Wasserkraftanlagen beeinflusst. Das Ausmaß dieser Beeinflussung auf den Ablauf eines Hochwassers sowie dessen Berücksichtigung im hydrodynamischen Teil der Modelle ist für die Güte der Prognoseergebnisse von Bedeutung und setzt voraus, dass die Steuerung vor allem der Laufkraftwerke und die Abgabe der Speicher bei der Prognose zu berücksichtigen sind. Die dazu benötigten Daten und Informationen müssen bei der Analyse historischer Ereignisse berücksichtigt werden und im Prognosebetrieb als Input zur Verfügung stehen.

Der Aufbau eines funktionierenden Hochwasserwarnsystems erfordert daher die Zusammenarbeit vieler Beteiligter aus unterschiedlichen Fachrichtungen. Dazu gehören Meteorologen, Hydrologen, die Verantwortlichen der Schutzwasserwirtschaft, die Zuständigen in den Landeswarnzentralen als primäre Empfänger der Warnungen und die IT – Verantwortlichen, welche die technische Umsetzung und das Funktionieren des Systems gewährleisten müssen.

Da die Hochwasserereignisse der unmittelbaren Vergangenheit in ganz Europa große Schäden verursachten und die Auswirkungen des Klimawandels auf die Niederschlagsintensität eine Verschärfung der Hochwassergefahr erwarten lässt, wurde im Rahmen des 6. EU Forschungsrahmenprogramms die Entwicklung eines *European Flood Alert Systems* (EFAS) initiiert. Dieses Projekt wurde 2003, mit dem Ziel eine mittel- bis langfristige (bis zu 10 Tage) Prognose für verschiedene transnationale Einzugsgebiete zu erstellen, auf weitere 3 Jahre verlängert. Derzeit werden die Prognosen auf Basis eines kontinuierlichen, rasterorientierten, physikalischen Niederschlag-Abfluss Modells in einem operationellen Modus getestet und validiert. Das Projekt wurde in der Zwischenzeit abermals verlängert. Die Prognose soll in den kommenden drei Jahren mit Echtzeitdaten (near real time) der nationalen hydrographischen Dienste evaluiert und verbessert werden.

Prognosen bis zu 10 Tage im voraus sollen zusätzliche Informationen für die nationalen Hochwasserzentralen bereit stellen und so eine zeitgerechte Vorbereitung und

Inbetriebnahme von ereignisbasierten Modellen ermöglichen. Die Abteilung VII/3 – Wasserhaushalt (HZB) erhält diese ereignisorientierten Prognosen vom *Joint Research Center of the European Commission* in Ispra und leitet sie an die Hydrographischen Landesdienste weiter.

3. Die Hochwasserbereitschaft der Abteilung VII/3 – Wasserhaushalt (HZB)

Die Abteilung VII/3 – Wasserhaushalt (HZB) selbst betreibt kein Prognosemodell. Gemäß §59i Abs.1 lit.b des WRG hat der Landeshauptmann für die Verbreitung von hydrographischen Nachrichten insofern zu sorgen, als dies für die Abwehr von Gefahren für Leben und Eigentum notwendig wird. Die Verbreitung der hydrographischen Nachrichten – im Wesentlichen ist das der Wasserstand und der Abfluss an den Oberflächengewässern in Österreich sowie der Niederschlag – erfolgt über das Internet auf den Webseiten der jeweiligen Landesregierungen. Die Abteilung VII/3 – Wasserhaushalt (HZB) realisierte eine Übersicht der online-übertragenen Wasserstands-Messstellen von Österreich unter der Adresse <http://pegel-aktuell.lfrz.at>.

Das Hochwasserereignis 2002 war der Anlass, eine Hochwasserbereitschaft für den Ereignisfall einzurichten, die seither durch die Abteilung VII/3 – Wasserhaushalt wahrgenommen wird. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um eine permanente Beobachtung der aktuellen Niederschläge und der Niederschlagsprognosen. Auf Grund dieser Prognosen, die primär von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) auf Basis einer Kooperationsvereinbarung der Abteilung VII/3 zugänglich sind, wird bei einer entsprechenden Niederschlagswarnung mit dem jeweiligen hydrographischen Landesdienst Kontakt aufgenommen und die lokale Hochwassergefahr eingeschätzt. Wird auf Grund der erwarteten Niederschlagsintensität eine Gefahr bestätigt bzw. durch das hydrographische Prognosemodell beim Landesdienst errechnet, erfolgt eine Meldung an das Büro des Bundesministers. Kleinräumige konvektive Niederschläge und die davon ausgehenden Gefahr von lokalen Überflutungen und Murenereignissen sind davon ausgenommen.

Für den Ablauf des Informationsdienstes wurden folgende Regelungen getroffen. Der Anlassfall „Hochwasser“ ist gegeben:

- Bei Vorliegen von entsprechenden Wettervorhersagen, die durch Meldung der hydrographischen Landesdienste eingehen, oder die durch Informationen im Internet (ZAMG, DWD, andere Wetterseiten) identifiziert werden. Angestrebt ist eine Direktinformation des HZB durch die ZAMG.
- Wenn die Hochwasserbereitschaft in einem Bundesland angeordnet wird, ist das dem HZB sofort zu melden.
- Bei Überschreiten von kritischen Werten des Wasserstandes oder des Durchflusses hat ebenfalls eine sofortige Meldung durch den hydrographischen Landesdienst zu erfolgen.

Im Hochwasserfall hat der Dienst folgende Aufgaben wahrzunehmen:

- Die Wetterentwicklung und die hydrologische Situation in ganz Österreich sowie in den Zuflussgebieten nach Österreich sind per Internet bzw. durch telefonischen Kontakt mit den Landesdienststellen zu verfolgen.
- Im Anlassfall (nach Meldung vom HD per Fax, Telefonat, E-mail oder bei Vorliegen entsprechender online-Daten oder Vorhersagen) sind genauere Informationen einzuholen, diese sind zu sichten und zu werten. Weitere wichtige Informationsquellen sind meteorologisch und hydrologisch relevante Internetseiten wie z.B. die Internetseiten der hydrographischen Dienste, jener der Hochwasserzentralen in den Nachbarländern (z.B. HWND Bayern) und Internetseiten zur Meteorologie (z.B. ZAMG, ORF)
- Auf dieser Grundlage ist ein - wenn erforderlich auch mehrere - Lageberichte und ein zusammenfassender Bericht nach dem Ereignis zu verfassen.
- Berücksichtigung der im Ereignisfall eingehenden EFAS (*European Flood Alert System*) – Prognosen und deren Weiterleitung an die Hydrographischen Dienste.

4. Erfahrungen

Bei der Beurteilung der Hochwassergefahr und der Einschätzung der Hochwasserlage ist die Abteilung VII/3 – Wasserhaushalt vor allem auf die im Internet verfügbaren Daten angewiesen. Zur Einschätzung der zukünftigen Entwicklung bedeutet dies einen täglichen Blick auf die für die Landeswarnzentralen aufbereitete Internetinformation der ZAMG, die sich auf Österreich beschränkt. Ab der dort definierten Niederschlags - Gefahrenstufe 2 werden die im Internet für Mitteleuropa frei verfügbaren Wetter- und Niederschlagsprognosen angesehen und hinsichtlich ihrer hydrologischen Auswirkung bewertet. Im Zweifelsfall wird die Situation mit den betroffenen Bundesländern besprochen und weitere Informationen von den ZAMG-Regionalstellen eingeholt. Danach entscheidet die im HZB für die Beobachtung verantwortliche Person, ob ein erster Hochwasser-Lagebericht an den Minister gesandt wird. Die Warnung in den Ländern erfolgt entsprechend den dort definierten Informationsabläufen unabhängig von dieser Meldung.

Seit 2002 ereigneten sich in Österreich vor allem im August 2005, im März und im Juni 2006 Hochwasserereignisse, die großen Schaden verursacht haben. Obwohl auf dem Gebiet der Niederschlagsprognose seither beträchtliche Anstrengungen unternommen wurden, diese hinsichtlich der Intensität und der räumlichen Zuordnung präziser zu gestalten, gibt es hier noch einiges zu verbessern. Das Hochwasser 2005 in Vorarlberg und Tirol wurde dabei hinsichtlich der Niederschlagsintensität brauchbar, bezüglich der Lage jedoch - einen Tag vorher - viel weiter im Südosten Österreichs eingeschätzt.

Das Beispiel des Ereignisses im Juni 2006 mit großen Schäden im Waldviertel zeigt ebenfalls, dass 12 Stunden vor dem Ereignis die räumliche Zuordnung tendenziell besser war, als in einer weiteren Prognose 4 Stunden später. Entsprechend der ersten

Niederschlagsprognose am Vormittag des 29. Juni 2006 wurde von der Abteilung VII/3 – Wasserhaushalt folgender Situationsbericht erstellt:

Im Verlauf des heutigen Tages überquert ein Teiltief die Alpen. Dabei besteht die Gefahr großer Regenmengen in den Staulagen von Berchtesgaden über das Salzkammergut bis in die Niederösterreichischen Voralpen und die Obersteiermark, aber es können auch stärkere konvektive Zellen den Norden Österreichs (Lainsitz, Thaya, Kamp) betreffen. Am Abend und im Verlauf der kommenden Nacht werden nach derzeitigen Prognosen in den oben genannten Gebieten intensive Niederschläge bis über 100 l/m² erwartet.

Die Prognosen über die Niederschlagsmengen in den Teileinzugsgebieten sind aufgrund der speziellen Wetterlage hinsichtlich des örtlichen Auftretens mit großer Unsicherheit behaftet. Eine intensive Überregnung kann Einzugsgebiete bis zu 200 km² betreffen, sodass in Summe lokale Überflutungen auch an mittleren und größeren Gewässern (z. B. Saalach, Lammer, südliche Donauzubringer in Niederösterreich, Lainsitz, Thaya, Salza, obere Mürz) auftreten können. An der Donau wird maximal ein HQ1 erwartet. Am Freitag werden die Niederschläge nachlassen.

Auf Grund der vier Stunden später geänderten Niederschlagsprognose wurde einerseits der Schwerpunkt der Hochwassergefahr für Gebiete im Westen Österreichs angegeben und andererseits die Intensität für Niederösterreich reduziert. Dies veranlasste das HZB am Nachmittag des 29. Juni die Einschätzung des 1. Berichtes folgendermaßen zu ändern.

Die aktuellen Prognosen weisen auf eine Ausdehnung der intensiven Niederschläge in der kommenden Nacht nach Westen hin. Es können das Tiroler Unterland und das Zillertal mit ca. 50 mm Niederschlag (lokal sind auch größere Mengen möglich) betroffen sein. Für Salzburg, Oberösterreich und die Obersteiermark sind die Prognosen unverändert. Für das westliche Niederösterreich werden ca. 60 mm, für das östliche Niederösterreich ca. 20 mm und für das nördliche und mittlere Burgenland ca. 50 mm für die kommenden 24 Std. vorhergesagt.

Aufgrund der Prognosen haben die Hydrographischen Dienste Tirol und Burgenland Hochwasserbereitschaftsdienst gemeldet.

Am Morgen des 30. Juni 2006 wurde die Hochwasserbereitschaft im HZB mit dem in Abbildung 3 dargestellten Verlauf an der Messstelle Raabs/Thaya konfrontiert. Die nachträgliche Analyse ergab an zumindest 2 Messstellen im nördlichen Waldviertel eine Niederschlagssumme von ca. 200 mm für die Nacht vom 29./30. Juni 2006 und einen auf den ersten Blick unglaublichen Anstieg des Wasserstandes an der Thaya am Pegel Raabs (Abb. 3).

Die Erwartungen der Empfänger dieser Lageberichte gehen über die reine hydrologische Beurteilung hinaus. Verstärkt wird auch eine Aussage zum Schadensrisiko erwartet, was eine österreichweite Koppelung der prognostizierten Wasserstände und Abflüsse an einem Pegel mit einer Einschätzung der möglichen Überflutungsfläche und der damit zusammenhängenden Risikobereiche erfordert. Die Steuerung von

Wasserkraftanlagen, Speicher und Retentionsanlagen kann den Ablauf einer Hochwasserwelle entscheidend beeinflussen und muss bei der Risikobeurteilung ebenso berücksichtigt werden, wie der Zustand und das Funktionieren von technischen Hochwasserschutzeinrichtungen. Schwachstellen in diesen Systemen sind zu analysieren und durch Hinweise in den Informationsmedien - z.B. kritische Wasserstände - hervorzuheben.

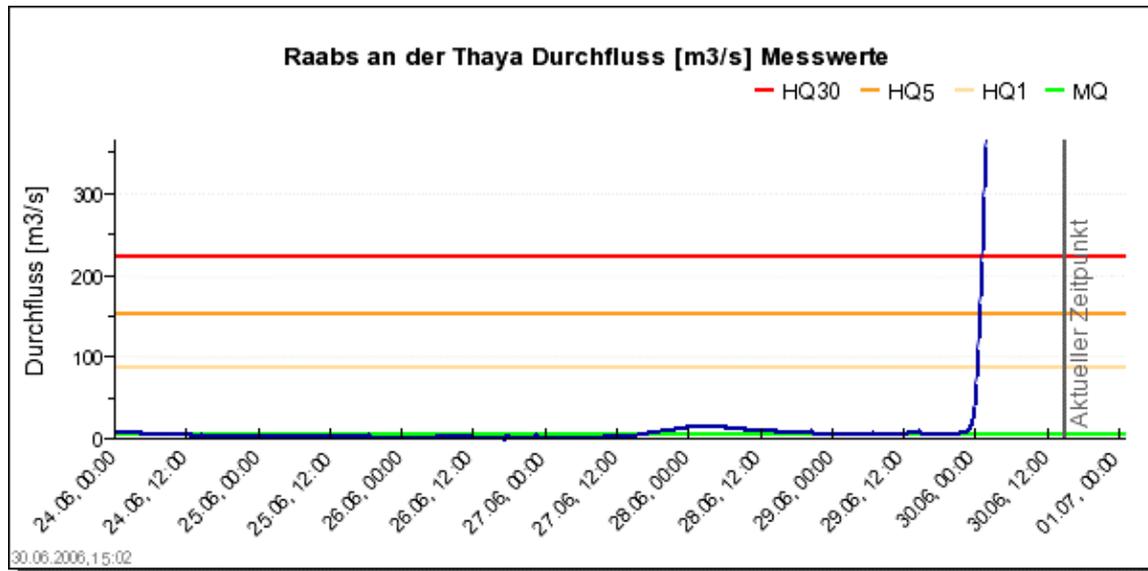


Abb. 3: Darstellung der Abflussganglinie Raabs/Thaya im Internet.
(Quelle:<http://www.noel.gv.at/SERVICE/WA/wa5/htm/wnd.htm>)

Jedes extreme Hochwasserereignis zeigt auch die Grenzen der hydrologischen Messstellen und der Datenübertragung auf. Sowohl das Hochwasser 2002 am Kamp, als auch jenes 2005 in Vorarlberg und Tirol hat einige gewässerkundliche Einrichtungen völlig zerstört und die Notwendigkeit einer bis in den Extrembereich ausfallssicheren Datenerfassung und -übertragung aufgezeigt. Die für die Prognose wichtigen Pegel werden seither wenn möglich mit redundanten Erfassungs- und Übertragungssystemen ausgestattet.

Um die Hochwasserinformation zukünftig effizienter zu gestalten ergibt sich für das HZB folgender Handlungsbedarf:

- Eine einheitliche Darstellung der aktuellen Pegelinformationen und der Prognoseergebnisse im Internet.
- Eine einheitliche Klassifikation der Warngrenzen bzw. der Einstufung der Hochwassergefahr in Form einer klaren Symbolik in der Darstellung und zusätzliche Angaben zum Schadensrisiko. Als gutes Beispiel und zur Orientierung wird hier die Webseite der Niederösterreichischen Landesregierung genannt.
- Die Darstellung der Online-Pegeldaten sollte auch im Hochwasserfall weitestgehend stabil und funktionsfähig sein.

- Eine aktive Information durch die ZAMG im Fall von prognostizierten Niederschlagswarnungen. Die Webseite der ZAMG - Internetwarnung sollte eine Österreich-Übersicht der Prognoseergebnisse enthalten.
- Ein Zugriff auf die Radarinformation der Austrocontrol wird angestrebt.

5. Literatur

Lauda E. (1900) Die Hochwasserkatastrophe des Jahres 1899 im österreichischen Donaugebiete, Beiträge zur Hydrographie Österreichs, IV. Heft, k.k. hydrographisches Central-Bureau, Wien.

BMLFUW (ed) (2005) Flood Risk – Analyse der Hochwasserereignisse vom August 2002, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft 2005.

Im Ereignisfall am häufigsten verwendete Internetseiten mit meteorologischer Zusatzinformation:

<http://pegel-aktuell.lfrz.at> mit den auf dieser Seite angegebenen Links auf die hydrographischen Dienste der Nachbarländer.

<http://www.zamg.ac.at> in jener nur den Landeswarnzentralen zugänglichen Warnversion.

<http://www.wetteronline.de/> mit den unter „Profikarten“ dargestellten meteorologischen Prognoseinformationen.

<http://www.wetterzentrale.de/> mit den Prognosekarten die auf Basis des amerikanischen GFS (Global Forecast System) erstellt wurden.

Anschrift des Verfassers:

MR Dipl.Ing. Reinhold Godina
Bundesministerium für Land-und Forstwirtschaft,
Umwelt und Wasserwirtschaft, Abteilung Wasserhaushalt
(Hydrographisches Zentralbüro)
Marxergasse 2, A-1030 Wien
Tel.: +43 (0)1 711 00 6942
Fax: +43 (0)1 711 00 6851
E-mail: reinhold.godina@lebensministerium.at

OPERATIONELLE VORHERSAGEN IN DER SCHWEIZ

Stephan Vogt

1. Einleitung

Im vorliegenden Beitrag soll auf die Erfahrungen im operationellen Vorhersagedienst für das Rheineinzugsgebiet der Schweiz eingegangen werden. Drei markante Ereignisse illustrieren dabei die Möglichkeiten und Grenzen von Abflussvorhersagen sowie die Anforderungen an den Vorhersagedienst:

- Das Hochwasser vom August 2005 hat in der Schweiz nach provisorischen Angaben direkte Schäden im Umfang von ca. 2.5 Mrd. Schweizer Franken (rund 1.7 Mrd. Euro) verursacht. Es ist damit das schadenreichste Ereignis seit Beginn der systematischen Aufzeichnungen im Jahre 1972. Das Unwetter war seit den Hochwasserereignissen von Auffahrt und Pfingsten 1999 die größte Bewährungsprobe für den Abflussvorhersagedienst des BAFU.
- Anfang März 2006 fielen im schweizerischen Mittelland verbreitet außerordentliche Schneemengen. Relativ bald wurde in den Medien die Möglichkeit eines Hochwasserereignisses diskutiert, und es wurden entsprechende Anfragen an den Vorhersagedienst herangetragen. Die Beurteilung der hydrologischen Situation gestaltete sich jedoch aufgrund von Problemen in der Temperaturvorhersage schwierig, das Abschmelzen der Schneedecke wurde nicht korrekt prognostiziert.
- Für den Abend des 06. Juli 2006 wurden im Zuge einer konvektiv geprägten Wetterlage für das Einzugsgebiet der Kleinen Emme sehr intensive Niederschläge vorhergesagt. Die Abflussvorhersage berechnete daraufhin für die Reuss bei Mellingen eine Hochwasserspitze in der Größenordnung des Ereignisses von August 2005. Durch die hohe Sensibilisierung ergriffen die kantonalen Krisenstäbe vorsorgliche Maßnahmen – letztendlich umsonst, da das Ereignis nicht eintraf und es sich um einen klassischen Fehlalarm gehandelt hat.

Ausgehend von diesen drei Fallbeispielen werden die Anforderungen an den operationellen Abflussvorhersagedienst diskutiert.

2. Vorhersagebetrieb und Kunden des BAFU

Seit Mitte der Achtzigerjahre erstellt die Abteilung Hydrologie des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) Abflussvorhersagen für das Einzugsgebiet des Rheins bis Rheinfelden.

Bei normaler Abflusssituation erstellt das BAFU werktags gegen 08:30 Uhr eine Vorhersage für insgesamt 10 Abflussmessstationen (Abbildung 1). Das Vorhersagebulletin wird täglich via Fax an die Kunden versendet, von sieben Stationen werden Bulletins auf dem Internet publiziert. Bei einer gemessenen bzw. prognostizierten Überschreitung von vereinbarten Schwellenwerten wird der Vorhersagerhythmus erhöht und der Betrieb auf das Wochenende sowie auf Feiertage ausgedehnt. Durch eine Vereinbarung mit dem Land Baden-Württemberg verpflichtet sich das BAFU, bei

einer Überschreitung von 3000 m³/s für den Pegel Rhein-Rheinfelden im Rahmen seiner Möglichkeiten einen 24 h-Betrieb mit einem 2-stündigen Vorhersageintervall zu betreiben. Ein permanenter 24 Stunden-Betrieb ist aufgrund der personellen Dotierung der Abflussvorhersage am BAFU nicht möglich. Zurzeit arbeiten 6 Personen mit ca. 200 Stellenprozenten im Vorhersagedienst. An Wochenenden und Feiertagen besteht ein Pikettdienst, nur für eine zeitlich begrenzte Zeit kann ein 24-Stunden-Betrieb etabliert werden.

Neben den Vorhersagezentren am Rhein in Karlsruhe und Mainz bedient das BAFU die Kantone Aargau, Bern, Thurgau, Zug und Zürich und private Unternehmungen, zum Beispiel Kraftwerksgesellschaften, mit Abflussvorhersagen. In der Zukunft wird angestrebt, die für die Regulierung der Alpenrandseen verantwortlichen Kantone mit Zuflussvorhersagen zu beliefern. Für den Bodensee wird zusammen mit der HVZ in Karlsruhe und der Abteilung Wasserwirtschaft des Landes Vorarlberg ein Vorhersagemodell für den Bodensee betrieben, in der Schweiz sind die Vorhersagen primär für die Anrainerkantone von Interesse.

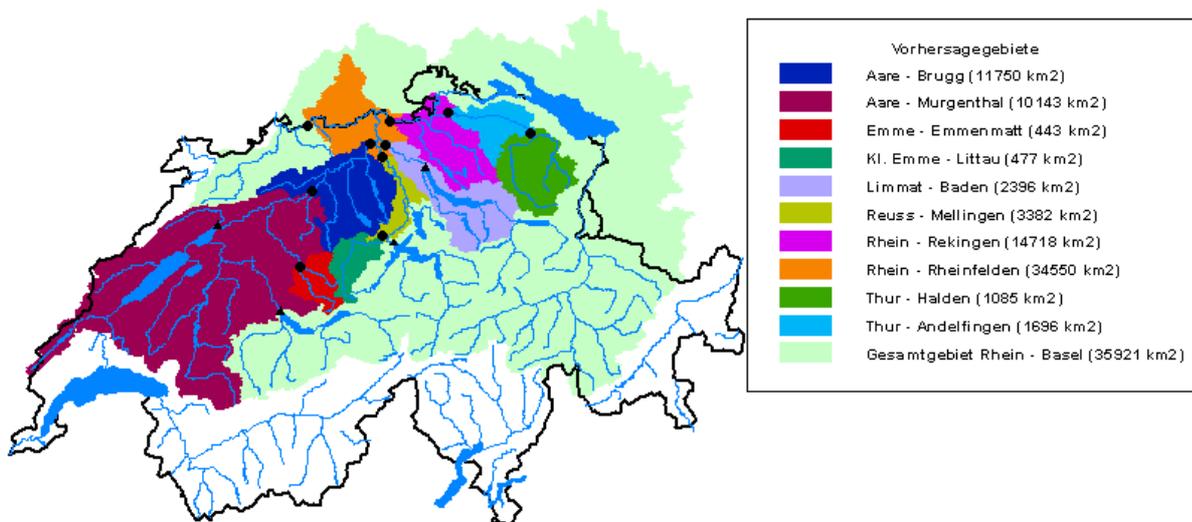


Abb. 1: Aktuelle Vorhersagegebiete. Die Gebietsflächen in der Legende beziehen sich jeweils auf das gesamte Einzugsgebiet bis zur entsprechenden Vorhersagestation (schwarze Punkte). Regulierte Seen sind am Auslass mit einem Dreieck markiert.

Da das BAFU zur Zeit nur für die größeren Flüsse des Rheineinzugsgebietes unterhalb der Alpenrandseen operationell Abflussvorhersagen erstellt, beanspruchen sowohl lokale Ereignisse (z.B. Unwetter 2002 im Appenzellerland und im Napfgebiet) wie auch Ereignisse in anderen Flussgebieten (Wallis 2000, Tessin & Graubünden 2002) den Vorhersagedienst nicht so stark.

Gerade diese Ereignisse, aber auch Hochwasserereignisse im Ausland (Elbe 2002) sowie die Diskussion um einen allfälligen Zusammenhang von Klimaänderung und Extremereignissen sensibilisierten Öffentlichkeit und Medien in den letzten Jahren zunehmend und führten vermehrt zu Medienanfragen an den Vorhersagedienst.

3. Vorhersagesystem am BAFU

Seit Ende 2000 verwendet das BAFU das Modell HBV3-ETHZ, welches in seinen Grundzügen dem bekannten HBV entspricht, aber in verschiedenen Bereichen angepasst wurde. Die beiden wichtigsten Änderungen betreffen die Verwendung der Kriging-Methode für die Interpolation der meteorologischen Daten sowie die Verwendung eines kombinierten Energiebilanz- und Temperatur-Index-Verfahrens im Schneeschmelzmodul.

Das Modell berücksichtigt das Rheineinzugsgebiet unterhalb der Alpenrandseen und ist in 40 Teilgebiete unterteilt. Der Eintrag aus den Alpenrandseen wird unter Berücksichtigung von gemessenen Abflusswerten, den Reguliervorschriften und den erwarteten Niederschlägen durch den Prognostiker abgeschätzt und ins System eingegeben.

Ins Modell fließen die Daten aus dem hydrometrischen Messnetz des BAFU sowie der automatischen Stationen des ANETZ von MeteoSchweiz ein. Damit wird das Modell bis zum Zeitpunkt t_0 nachgeführt, im Vorhersagebereich werden die meteorologischen Messdaten durch das numerische Wettermodell aLMo von MeteoSchweiz ersetzt. Dieses weist eine horizontale Auflösung von 7 km auf und wird zweimal täglich mit Startzeit 00 UTC und 12 UTC gerechnet. Die Modellläufe stehen jeweils um ca. 5 UTC und um 17 UTC auf dem FTP-Server des BAFU bereit. Der gesamte Datenfluss ist voll automatisiert und wird über ein Perl-Script gesteuert.

Seit einigen Jahren arbeitet das BAFU an der Einführung des neuen Vorhersagesystems Flood Early Warning System (FEWS), welches seit Juni 2005 parallel zum heute operationellen System HBV3-ETHZ betrieben wird und möglichst bald in den operationellen Betrieb übergeführt werden soll. FEWS ist eine umfangreiche Bedienungsfläche mit leistungsfähigen Tools zur Datenbearbeitung, -interpolation und -visualisierung, als hydrologisches Modell ist eine Weiterentwicklung des originalen HBV96 (Bergström et al.) implementiert.

Mit FEWS wird das gesamte Einzugsgebiet des Rheins bis Basel abgedeckt, wobei auch die deutschen und österreichischen Teile des Einzugsgebietes und insbesondere auch die Gebiete oberhalb der Alpenrandseen im System berücksichtigt sind. Mit der Unterteilung in mehr als 60 Teilgebiete wird versucht, die alpine Hydrologie in ihrer gesamten Komplexität zu erfassen. Eine besondere Herausforderung ist die anthropogene Beeinflussung des natürlichen Regimes durch die Regulierung der Alpenrandseen und Energieerzeugung in Pumpspeicherwerken. Zusammen mit der gegenüber dem Mittelland deutlich geringeren räumlichen Dichte der meteorologischen Messungen ergaben sich bereits bei der Kalibrierung des Modells große Probleme. Unter diesen Voraussetzungen ist denn auch das primäre Ziel für die alpinen Gebiete, Prognosen des mittleren täglichen Zuflusses für die Alpenrandseen erstellen zu können. Zentral bleibt jedoch der Einfluss der Niederschlagsvorhersage, welche gerade in alpinen Gebieten mit großen Problemen behaftet ist.

4. Hochwasser August 05

Im Gegensatz zum Ereignis von 1999, bei dem die Abflüsse und Pegelstände außerordentlich lange auf sehr hohem Niveau verharrten, war das Augusthochwasser 2005 durch einen sehr raschen Anstieg und einen schnellen Rückgang geprägt.

4.1 Niederschlagsgeschehen während des Ereignisses vom August 2005

Der August 2005 war bereits vor den Unwetterereignissen durch eine wechselhafte Witterung mit überdurchschnittlicher Niederschlagstätigkeit geprägt, sodass am Alpennordhang bereits in den ersten 20 Tagen die durchschnittlichen Monatsniederschlagsmengen erreicht bzw. überschritten wurden.

Ein Tief über Frankreich führte am 18. und 19. August zuerst aus Südwesten feuchte Luft heran und brachte vor allem in der Zentralschweiz flächig Niederschlagsmengen von 30 bis 50 mm. Mit der Verlagerung des Tiefs nach Oberitalien und weiter zu den Ostalpen änderte die Anströmungsrichtung am Nachmittag des 20. August auf Nordost und in der Folge fiel am Alpennordhang bei einer Schneefallgrenze von meist über 3000 m anhaltender und ergiebiger Niederschlag. Der Niederschlagsschwerpunkt verlagerte sich dabei langsam ostwärts. Während das Mittelland sowie der Übergang zu den Voralpen am 22. August langsam entlastet wurden, verstärkten sich die Niederschläge vom östlichen Berner Oberland über die Zentralschweiz bis zum Alpstein, zum Rätikon und zur Silvretta. Am 23. August fielen nur noch an der Grenze zwischen dem Kanton Graubünden und Österreich nennenswerte Niederschläge.

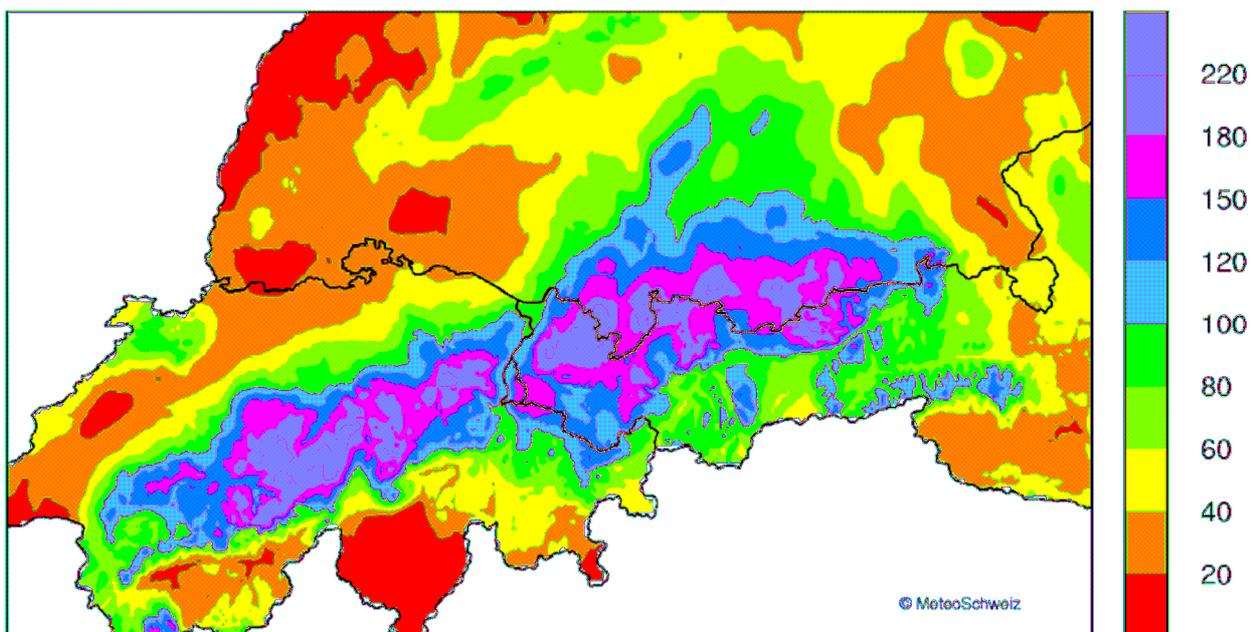


Abb. 2: 72-Stunden Niederschlagssumme vom Morgen des 21. bis zum Morgen des 24. August 2005. Aus: MeteoSchweiz – Arbeitsbericht Nr. 213 (in Vorbereitung).

Über 72 Stunden fielen vom 21. bis zum 23. August zum Teil extreme Niederschlagsmengen (Gadmen 320 mm, Rotschalp 283 mm, Weesen 277 mm und Amden 267 mm), vor allem im Berner Oberland und der Zentralschweiz wurden statistische Wiederkehrperioden von zum Teil weit über 100 Jahren ermittelt.

4.2 Abflussgeschehen während des Ereignisses vom August 2005

Abbildung 3 zeigt, dass die flächenmäßige Ausdehnung des Unwetters 2005 in der Schweiz fast deckungsgleich mit dem Rheineinzugsgebiet ist. Von den gut 200 Abflussmessstationen in diesem Gebiet registrierten 32 Wiederkehrperioden von mehr als 50 Jahren.

Kleinere unbeeinflusste Fliessgewässer reagierten mit nur kurzer Verzögerung auf den Niederschlag. So wurde am Abend des 21. August im Einzugsgebiet der Kleinen Emme eine erste außergewöhnliche Hochwasserspitze registriert, in der Nacht und am Morgen des 22. konzentrierte sich das Geschehen auf die Einzugsgebiete rund um den Napf sowie den Zugersee. Am Mittag und Abend des 22. wurden die Höchststände im Berner Oberland (Kander, Simme und Lüschine) erreicht. In der folgenden Nacht und am Morgen des 23. August wurden in den kleineren Flüssen des Reuss- und Linthgebietes sowie im Prättigau die Abflussspitzen erreicht.

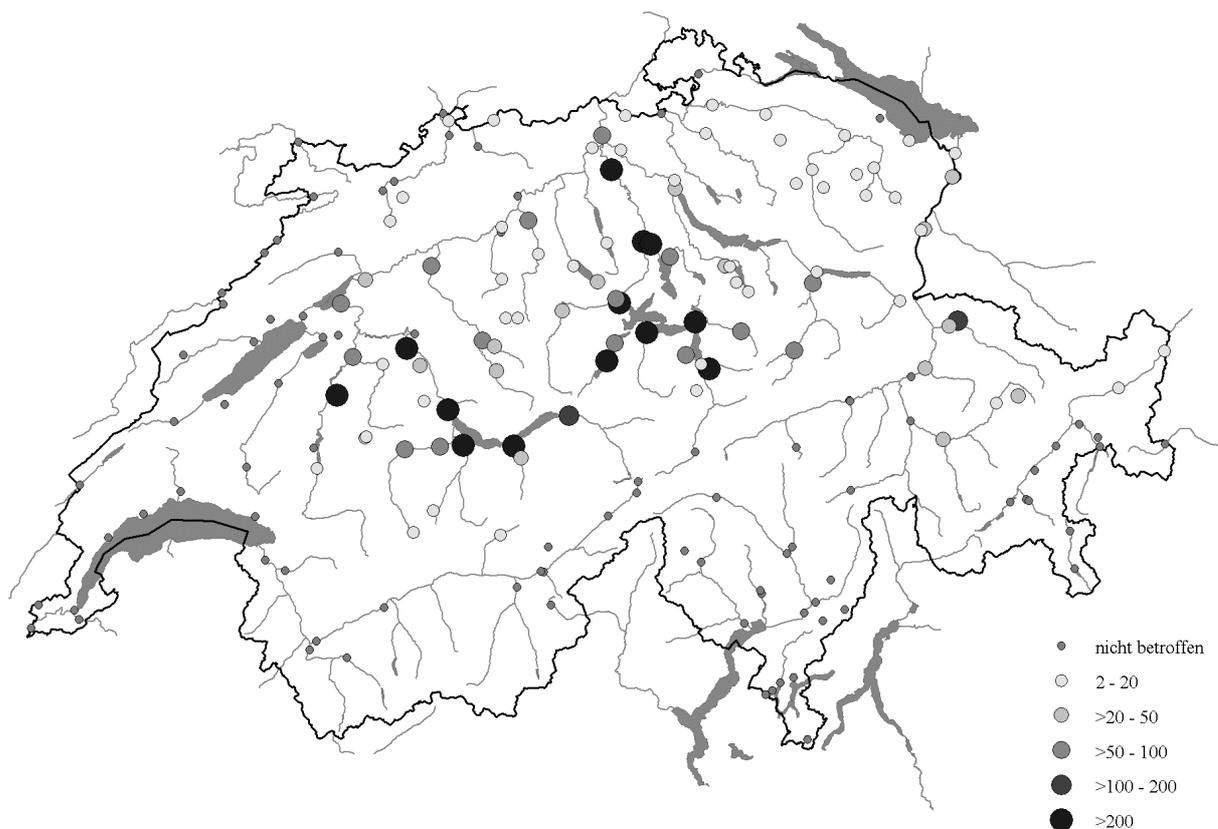


Abb. 3: Wiederkehrperiode der Abflussspitzen des Augusthochwasser 2005.

Die Reaktion der größeren Fließgewässer, und dabei besonders jene unterhalb der Alpenrandseen, war gegenüber den kleineren Fließgewässern verzögert und komplexer, wie die Beispiele von Aare und Reuss zeigen. Bei Bern wurde der Höchststand der Aare am Morgen des 23. durch die Überlagerung der Hochwasserspitzen aus den seitlichen Zubringern mit dem hohen Ausfluss aus dem Thunersee gemessen, direkt beim Ausfluss des Thunersee wurde das Maximum jedoch erst in der Nacht auf den 24. August registriert. Am Unterlauf der Reuss erreichte die Hochwasserwelle am Morgen und Nachmittag des 22. August ihr Maximum, währenddem der Ausfluss aus dem Vierwaldstättersee am Morgen des 24. August maximal war.

4.3 Vorhersagetätigkeit und eine kurze Beurteilung der Güte

Am Freitag, dem 19. August, wurde die letzte ordentliche Vorhersage vor dem Beginn des Ereignisses herausgegeben. Für alle sieben Vorhersagestationen wurde, ausgehend von mittleren Abflussverhältnissen, ein geringer Anstieg des Abflusses mit einer Spitze im für die Jahreszeit normalen Schwankungsbereich gerechnet. Dementsprechend wurde nur der normale Kundenkreis mit Vorhersagen beliefert.

Die lokal bereits recht intensiven Niederschläge waren für den Dienst habenden Prognostiker des Vorhersagedienstes Anlass, am Morgen des 20. August die außerordentliche Prognosetätigkeit aufzunehmen. Für verschiedene Einzugsgebiete wurden im aLMO Gebietsniederschläge von mehr als 100 mm in 72 h ausgewiesen, für die Limmat und die Reuss bis zum Vierwaldstättersee sogar mehr als 200 mm (Abbildung 4). Die Vorhersagen mit dem Modell HBV3-ETHZ zeigten vor allem für die Aare unterhalb der Einmündung der Emme auf noch unkritischem Niveau erhöhte Abflüsse, für den Rhein bei Rheinfelden wurde der 2. Grenzwert von 2200 m³/s überschritten, bei welchem ein erweiterter Kundenkreis informiert wird. Für die Reuss bei Mellingen wurde für den 21. August eine extrem hohe Abflussspitze in der Größenordnung eines 200-jährlichen Ereignisses berechnet. Die Vorhersagen wurden an den Kanton Aargau versendet. Für die Thur war eine Überschreitung der Warnschwelle auf unkritischem Niveau für den 3. Tag des Vorhersagezeitraumes prognostiziert und der Kanton Zürich wurde entsprechend informiert. Für den Kanton Bern werden für die Regulierung des Bielersees Vorhersagen für die Emme bei Emmenmatt erstellt, der Kanton wird bei einer Überschreitung des vergleichsweise niedrigen Schwellenwertes von 100 m³/s mit einem Bulletin beliefert, was hier der Fall war.

Zu diesem Zeitpunkt waren alle Kunden, welche Vorhersagen vom BAFU beziehen, mit einem Hochwasserbulletin für mindestens eine ihrer abonnierten Vorhersagestationen beliefert. Die Problematik bestand darin, dass gerade in kleineren Gebieten (Kleine Emme, Emme) zu diesem Zeitpunkt das Ausmaß und der Zeitpunkt des Eintreffens nicht abzuschätzen waren. Da die Spitzen zumeist für den 22. August vorhergesagt waren, wurde die nächste Vorhersage unter gleichzeitiger Verfolgung der meteorologischen und hydrologischen Situation auf den folgenden Tag festgesetzt.

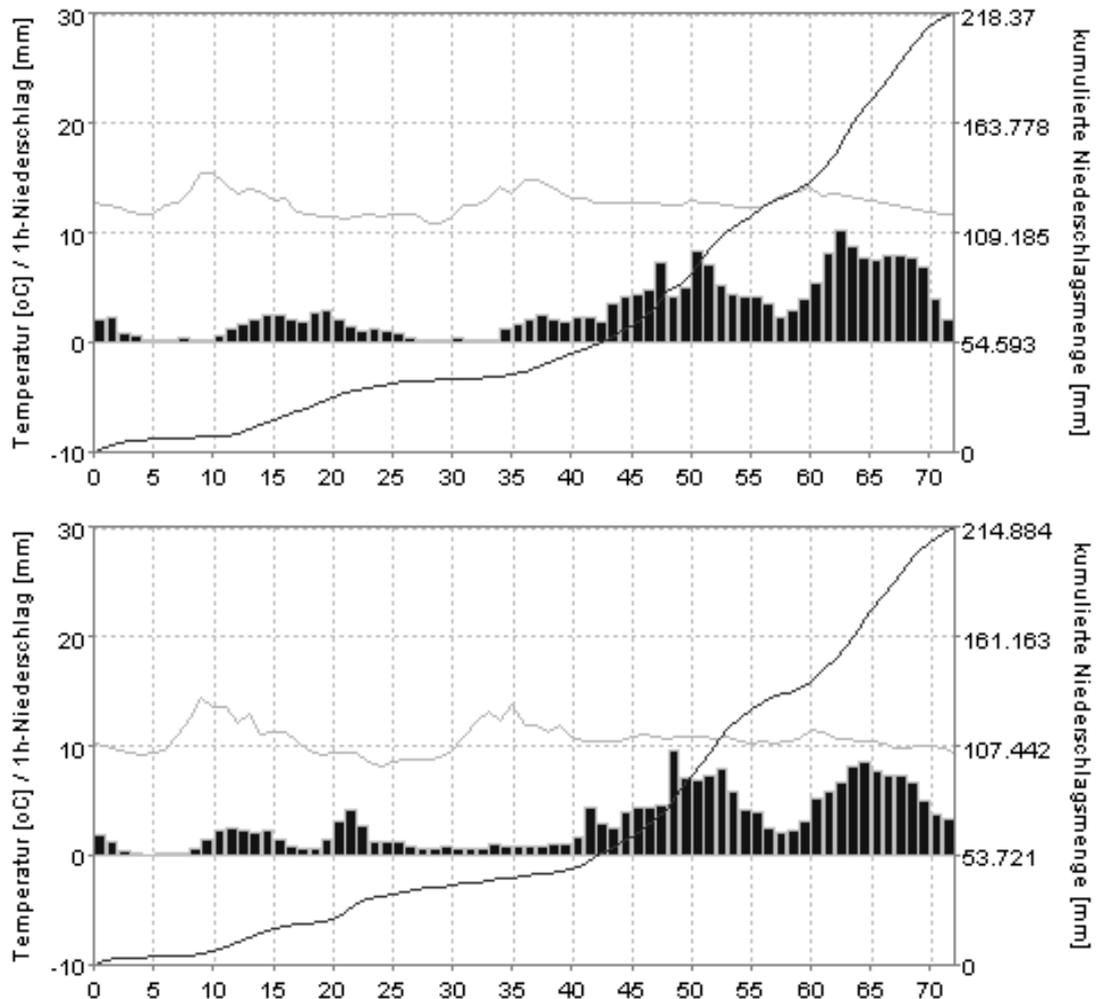


Abb. 4: aLMo-Lauf vom 19.08.2005 00 UTC, Aggregation des vorhergesagten Niederschlages für die Einzugsgebiete der Limmat bis Baden und der Reuss bis Luzern. Die Balken zeigen die Stundenniederschläge, die dunklen Linien die Summenkurven des Niederschlages und die helle Linie die Temperatur eines ausgewählten Gitterpunktes im Gebiet.

Nachdem die neuesten Modellunterlagen vorhanden waren, wurde am Morgen des 21. August eine weitere Vorhersage mit HBV3-ETHZ gerechnet. Das aLMo wies im Lauf vom 21.08.2005 00 UTC noch einmal höhere Niederschlagsmengen aus, für die Aare bis Thun und die Reuss bis Luzern wurde ein Gebietsniederschlag von deutlich über 300 mm/72h gerechnet, punktuell wurden bis 500 mm erwartet (Abbildung 5). Aus der Erfahrung im operationellen hydrologischen Vorhersagedienst ist die Überschätzung von Niederschlägen in aLMo bekannt. Auswertungen (z.B. Rossa et al.) zeigen, dass die Niederschläge am gesamten Alpennordrand, vor allem bei nördlicher Anströmung überschätzt werden. Weniger ausgeprägt ist dies bei konvektiven Wetterlagen. Der Dienst habende Prognostiker von MeteoSchweiz ging denn auch am Vormittag des 21. August nach dem Vergleich mit weiteren Modellen von einer massiven Überschätzung der im aLMo prognostizierten Niederschläge aus. In der Folge wurden die Abflussvorhersagebulletins mit dem Vermerk, dass die Modellniederschläge überschätzt seien, versehen.

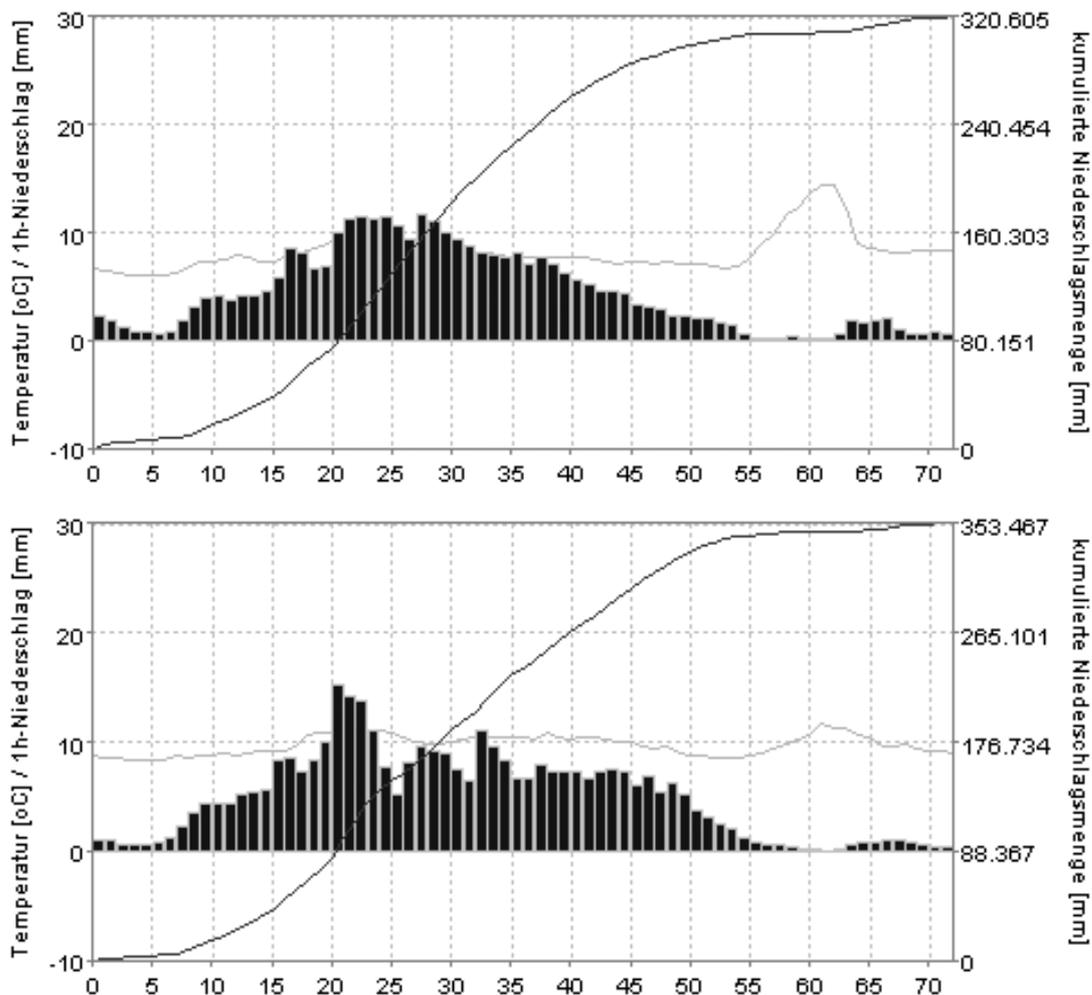


Abb. 5: aLMO-Lauf vom 21.08.2005 00 UTC, Aggregation des vorhergesagten Niederschlages für die Einzugsgebiete der Aare bis Thun und der Reuss bis Luzern. Die Balken zeigen die Stundenniederschläge, die dunklen Linien die Summenkurven des Niederschlages und die helle Linie die Temperatur eines ausgewählten Gitterpunktes im Gebiet.

Für die Thur bei Andelfingen wurde ein 200-jährliches Hochwasser vorhergesagt, in der Folge wurde auch für die flussabwärts liegende Vorhersagestation Rhein-Rekingen ein Bulletin versendet. Nur für die Stationen Murgenthal und Brugg an der Aare unterhalb des Bielersees wiesen die Modellrechnungen einen Anstieg des Abflusses auf unkritischem Niveau aus.

Am Abend des 21. August wurde die letzte Vorhersage vor dem Eintreten des Hauptereignisses erstellt. Zwar waren die Niederschlagssummen etwas geringer, dennoch wurde in Absprache mit MeteoSchweiz wiederum die erwartete Überschätzung der Modellniederschläge auf den Bulletins vermerkt. Die Abflussspitzen wurden, abgesehen von der Thur, für den 23. August erwartet, gegenüber den Vorläufen wurden tendenziell etwas niedrigere Spitzen gerechnet (Tabelle 1).

Aufgrund der zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Informationen wurde entschieden, die nächste Vorhersage am Morgen des 22. August zu erstellen. Folgende Überlegungen spielten eine Rolle:

- Die im aLMO prognostizierten Niederschläge wurden im aktuellen wie auch in den vorhergehenden Läufen durch die Meteorologen als massiv zu hoch eingeschätzt.
- Mit Ausnahme der Reuss waren die Abflussspitzen in allen Einzugsgebieten im Zeitraum zwischen Montagabend und Dienstagmorgen zu erwarten.
- Die Vorhersagen der Reuss werden wesentlich von den Vorhersagen der Kleinen Emme beeinflusst. Die Erfahrung aus früheren Ereignissen zeigte, dass in diesem Gebiet regelmäßig unrealistisch hohe Spitzen gerechnet werden.
- Die Etablierung eines 24 Stunden-Betriebes wurde sorgfältig abgewogen. Aufgrund der personellen Situation – von den 6 Mitgliedern des Vorhersagedienstes waren 2 Personen in den Ferien – und der vorliegenden Vorhersagen musste ein 24 Stunden-Betrieb am ehesten vom 22. auf den 23. August in Betracht gezogen werden.

Tab. 1: Vorhersagen von HBV3-ETHZ vom 21. August um 20 Uhr. Die beiden letzten Spalten zeigen die tatsächlich gemessenen Spitzenabflüssen und die zugehörige Wiederkehrperiode.

Station	Spitze vorhergesagt, Zeitpunkt	HQ _x	Bemerkung	Spitze gemessen (Stundenmittel), Zeitpunkt	HQ _x
Rhein – Rheinfelden	3116 m ³ /s t ₀ +24h	2 – 5		3464 m ³ /s t ₀ +15h	5 – 10
Rhein – Rekingen	1630 m ³ /s t ₀ +35h	20		1249 m ³ /s t ₀ +35h	2 – 5
Aare – Murgenthal	535 m ³ /s t ₀ +30h	< 2	Warngrenze nicht überschritten	937 m ³ /s t ₀ +17h	5 – 10
Aare – Brugg	583 m ³ /s t ₀ +24h	< 2	Warngrenze nicht überschritten	1057 m ³ /s t ₀ +21h	5 – 10
Emme - Emmenmatt	177 m ³ /s t ₀ +26h	< 2	Nicht öffentlich, nur Kt. Bern	490 m ³ /s t ₀ +5h	100
Reuss – Mellingen	800 m ³ /s t ₀ +16h	200		860 m ³ /s t ₀ +21h	> 200
Kleine Emme - Littau	506 m ³ /s t ₀ +12h	10 – 20	Nicht öffentlich, Plausibilisierung Mellingen	649 m ³ /s t ₀ +7h	> 200
Limmat – Baden	326 m ³ /s t ₀ +23h	< 2		510 m ³ /s t ₀ +5h	10 – 20
Thur – Andelfingen	1114 m ³ /s t ₀ +33h	100 – 200		720 m ³ /s t ₀ +33h	2 – 5
Thur – Halden	1102 m ³ /s t ₀ +28h	20 – 50	Nicht öffentlich, nur Kt. Thurgau	795 m ³ /s t ₀ +28h	5 – 10

In der Nacht zum 22. August stiegen die Abflüsse an der Kleinen Emme und an der Emme in kürzester Zeit auf sehr hohe Werte an, die Abflussvorhersagen waren auch für die Aare, den Vorfluter der Emme, überholt.

Ab dem frühen Morgen des 22. August wurden Vorhersagen im 2 Stunden-Rhythmus erstellt, welche die Entwicklung nun immer besser prognostizierten. Durch die zum Teil extremen Abflüsse und Wasserstände waren zwischenzeitlich mehr als 5% aller hydrometrischen Messstation ausgefallen und lieferten keine Daten. Darunter waren auch solche, welche in die hydrologischen Modelle eingehen und deshalb für den Vorhersagebetrieb von besonderer Wichtigkeit sind. Am Montagmorgen, dem 22. August, wurde das Vorhersagezentrum von der Nationalen Alarmzentrale NAZ kontaktiert, welche um eine Lageeinschätzung für die elektronische Lagedarstellung zuhanden von Kantons- und Bundesbehörden bat. Diese wurden in der Folge regelmäßig erstellt und der NAZ sowie zur internen Information zur Verfügung gestellt. Die Erstellung dieser Lagebeurteilungen war sehr zeitaufwändig, eine Lagebeurteilung bringt jedoch verschiedene Vorteile. Einerseits können darin Bewertungen der Modellergebnisse integriert werden und viele Anfragen können durch den Verweis auf die Lagebeurteilungen abgefangen und abgekürzt werden. Im Verlauf des Tages kamen vermehrt Anfragen von Behörden und Medien, welche eine Person aus dem Vorhersagedienst absorbierten.

Ab dem 23. August rückten vor allem die großen Seen ins Zentrum des Interesses, währenddem an den Fließgewässern, deren Abflussverhalten nicht durch Seen beeinflusst ist, eine Entspannung der Situation auftrat. Für den Bielersee und den Vierwaldstättersee wurden Einschätzungen über die weitere Entwicklung gewünscht. Im operationellen Modell HBV3-ETHZ sind diese beiden Gewässer nicht explizit berücksichtigt bzw. liegen außerhalb des Modellgebietes. FEWS war hier eine wertvolle Grundlage für entsprechende Abschätzungen.

4.4 Vorhersagegüte

Die Güte der Vorhersagen während des Augusthochwassers 2005 wurde bereits im letzten Abschnitt kurz angeschnitten und soll auch nicht das Kernthema der vorliegenden Arbeit sein. Dennoch sollen anhand der beiden folgenden Darstellungen einige Punkte erläutert werden.

Abbildung 6 zeigt die Vorhersagen für die Station Rhein – Rheinfelden. Im momentan operationellen System HBV3-ETHZ werden die Zuflüsse von ungefähr 40 hydrometrischen Stationen unterhalb der Alpenrandseen berücksichtigt. Die längsten Laufzeiten im vom Modell abgedeckten Gebiet betragen etwa 12 Stunden. 24 bis 36 Stunden vor dem Ereignis konnte der Zeitpunkt und die ungefähre Höhe der Abflussspitze vom Modell in Zufrieden stellender Genauigkeit erfasst werden. Die Geschwindigkeit des Anstieges wurde jedoch deutlich unterschätzt – gerade im Ereignisfall ist die Güte der Vorhersage des ansteigenden Astes von besonderer Wichtigkeit. Ab dem Vormittag des 22. Augustes, kurz bevor die Abflussspitze gemessen wurde, konnte der Verlauf wieder ziemlich gut vorhergesagt werden. An den oberhalb von Rheinfelden liegenden Vorhersagestationen ist die Güte des Modells geringer – bedingt durch die kleinere Gebietsgröße haben Reguliermaßnahmen bei den Seen einen vergleichsweise größeren Einfluss. Zudem nimmt die Vorhersagbarkeit des

Niederschlags mit abnehmender Gebietsgröße schnell ab, Fehler mitteln sich weniger aus.

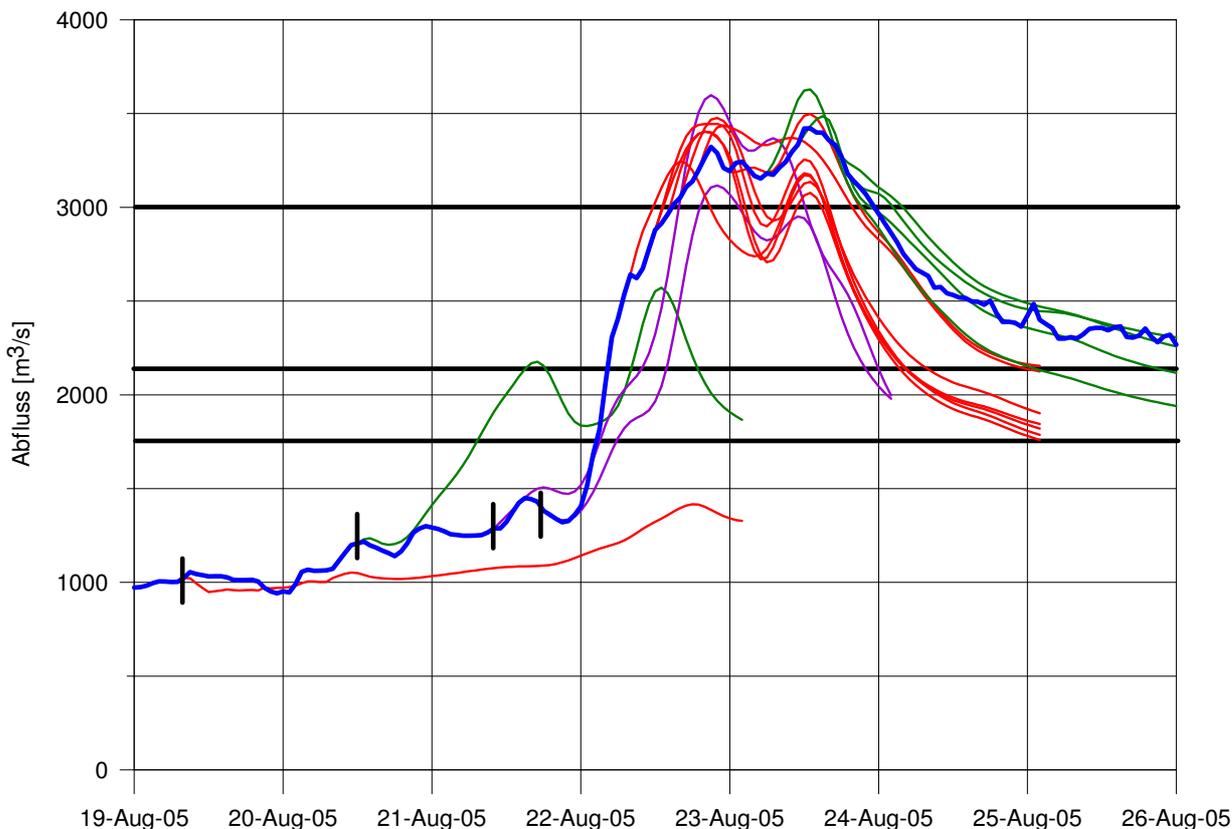


Abb. 6: Vergleich der Vorhersage- mit den gemessenen Abflusswerten für die Station Rhein-Rheinfelden vom 19. – 23. August 2005. Die blaue Linie zeigt den gemessenen Abfluss, die farbigen Linien die Vorhersage, wobei pro Tag jeweils eine Farbe gewählt wurde. Die fetten waagrechten Linien markieren die Vorhersage-Schwellenwerte.

Am Beispiel der kleinen Emme bei Littau soll ein Vergleich zwischen dem heute operationellen Vorhersagemodell HBV3-ETHZ und dem neuen Vorhersagesystem FEWS gezogen werden (Abbildung 7). Beide Modelle rechnen den Scheitelabfluss zu tief und den Zeitpunkt der Spitze zu spät, wobei FEWS eine deutlich bessere Performance zeigt. Neben der leicht unterschiedlichen Modellstruktur sowie unterschiedlichen Kalbrierungsperioden hat auch die andere Aggregation der vorhergesagten Niederschläge auf das Einzugsgebiet einen Einfluss auf die Güte. Tendenziell lässt sich für das Augusthochwasser 2005 beobachten, dass FEWS höhere Spitzenabflüsse berechnet als HBV3-ETHZ. In einigen Einzugsgebieten führt dies zu einer Verbesserung der Güte, in anderen allerdings zu einer massiven Überschätzung. Ein Teil dieses Verhaltens kann auf die Überschätzung der Niederschläge im aLMO zurückgeführt werden.

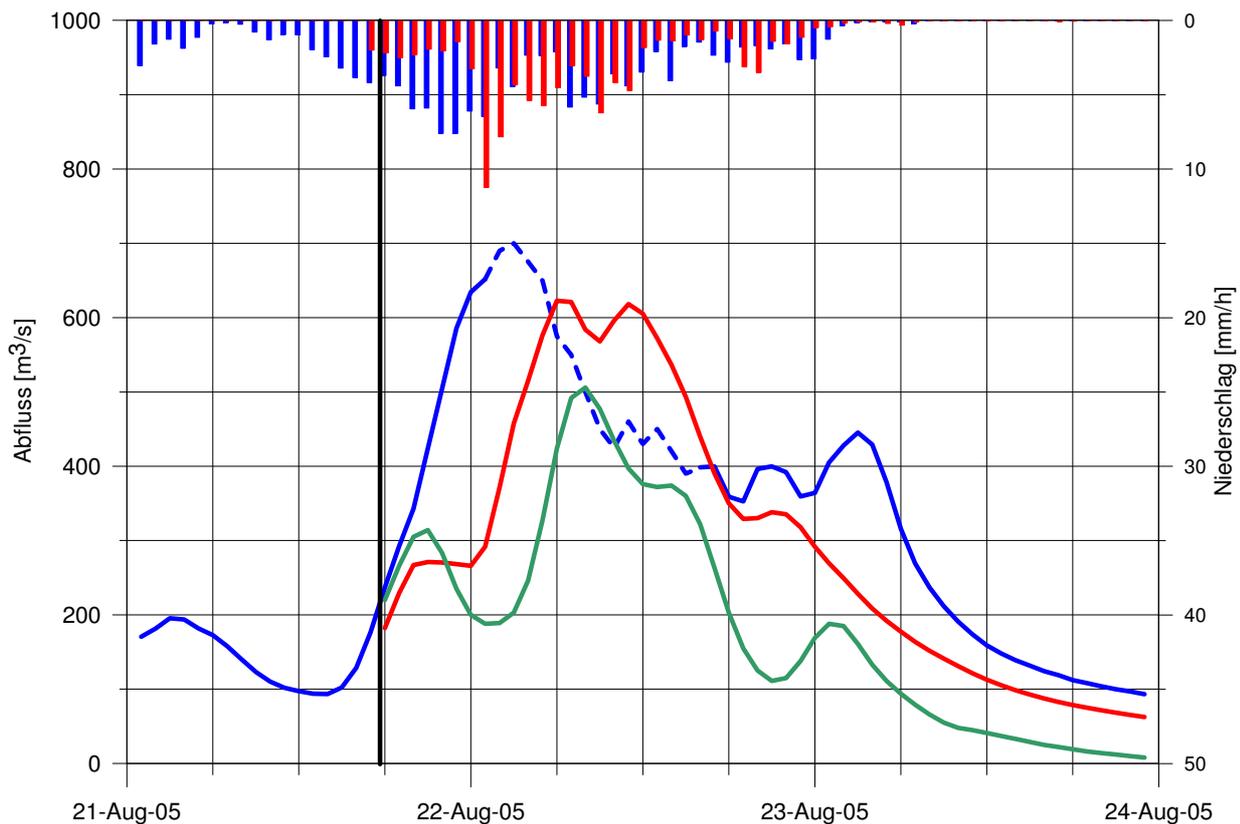


Abb. 7: Vergleich der Abflussvorhersage für die Station Kleine Emme – Littau vom 21.08.2005 17 Uhr mit den Vorhersagesystemen HBV3-ETHZ und FEWS. Die blaue Linie zeigt den gemessenen Abfluss, die grüne Linie die Vorhersage mit HBV3-ETHZ und die rote Linie die Vorhersage mit FEWS. Die blauen Balken zeigen den aufgrund von ANETZ-Messungen interpolierten Gebietsniederschlag, die roten Balken den Niederschlag des aLMo.

5. Hochwasser März 06

Vom 4. auf den 5. März 2006 fielen im Schweizerischen Mittelland östlich von Bern in 24 – 30 Stunden zwischen 40 und 60 cm Schnee. Zum Teil handelte es sich sowohl bezüglich Neuschneemenge als auch bezüglich Gesamtschneehöhe zu den höchsten Werten, welche seit dem Beginn flächendeckender Schneemessungen im Jahr 1931 registriert wurden. Der Schnee fiel in den Niederungen auf größtenteils aperen Boden, der jedoch durch die unterdurchschnittlichen Temperaturen der vorangehenden Monate gefroren bzw. durch das Abschmelzen in den ersten beiden Märztagen in der Auftauschicht gesättigt war. An den beiden Folgetagen brachte mäßig feuchte Polarluft aus Nordwesten nur noch wenig Schneefall. Frostige Temperaturen von bis zu -10°C am Morgen und ein Anstieg der Temperaturen bis auf maximal $+4^{\circ}\text{C}$ führten zu einer Setzung der Schneedecke, die Schmelze war jedoch von untergeordneter Bedeutung. Im Verlauf des 8. März wurden aus Westen vorübergehend feuchte und mildere Luftmassen herangeführt. Am Nachmittag und in der Nacht auf den 9. März fielen bis zu 40 mm Niederschlag, wobei die Schneefallgrenze auf 1100 – 1500 m anstieg. Aufhellungen am Nachmittag ließen die Temperaturen auf $8 - 12^{\circ}\text{C}$ ansteigen, bevor am Abend die Schneefallgrenze während erneut einsetzenden Schauern wieder bis in die Niederungen sank. Dieses außergewöhnliche Schneefallereignis fand auch in den Medien breiten Raum. Rasch wurde unter dem Eindruck des

Augusthochwassers 05 sowie der Hochwasserereignisse 1999 der Zusammenhang „Viel Schnee = Hochwassergefahr“ hergestellt, was zu vielen Medienanfragen an den Vorhersagedienst führte.

5.1 Vorhersagen

Bereits am Samstag, dem 4. März, am Tag des großen Schnees, wurde in den Wetterberichten erwähnt, dass nach einer Wetterberuhigung in der ersten Hälfte der Folgewoche nach Wochenmitte mit einer Erwärmung und einsetzenden Niederschlägen mit ansteigender Schneefallgrenze zu rechnen sei.

In den Abflussvorhersagen des BAFU zeitigte der Abfluss keine Reaktion auf die auch im aLMO prognostizierten Niederschläge. Am Anfang war nicht klar, ob im Modell die Retention in der Schneedecke wirksam war. Erst eine Analyse in FEWS zeigte, dass durch eine Unterschätzung der 2 Meter-Temperatur im aLMO der Niederschlag im Modell weiterhin als Schnee akkumuliert wurde (Abbildung 8).

Im Mittelland wurden an mehreren Fließgewässern Ereignisse mit einer Wiederkehrperiode von 2 – 10 Jahren registriert, die Abflussvorhersagen waren durchwegs zu tief.

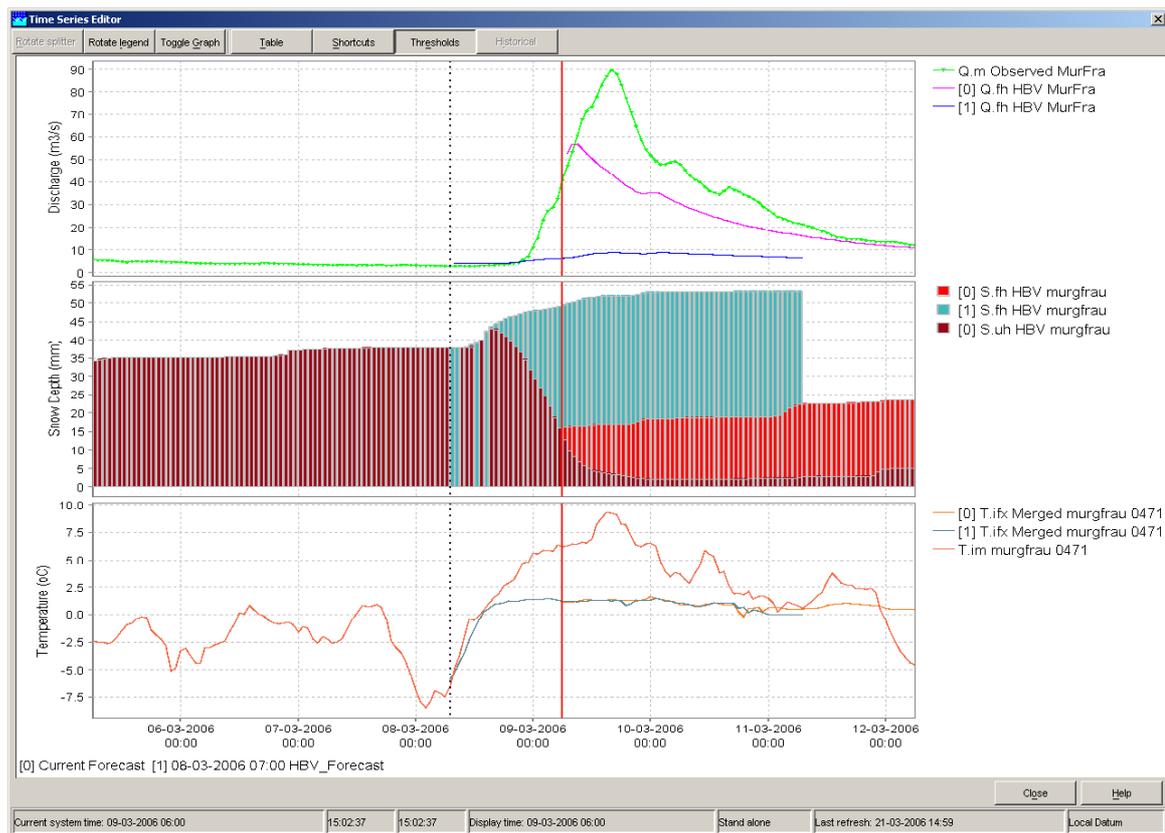


Abb. 8: Vorhersagen für die Murg bei Frauenfeld vom 08. und 09. März des neuen Vorhersagesystems FEWS. In der obersten Graphik ist in grün der gemessene Abfluss dargestellt, in blau und violett die Abflussvorhersagen. Die mittlere Graphik zeigt in braun das aufgrund der Messdaten nachmodellierte Gebietswasseräquivalent der Schneedecke, in grün und rot sind die vorhergesagten Werte gegeben. Die unterste Graphik zeigt in rot die interpolierte gemessene Temperatur für eine Gebietshöhe von 471 m, in blau und gelb sind die vorhergesagten Werte gegeben.

6. Fehllarm am 06. Juli 06 für die Reuss - Mellingen

6.1 Ausgangslage

Bei konvektiven Wetterlagen tritt regelmäßig das Phänomen auf, dass für das Einzugsgebiet der Kleinen Emme sowohl in HBV3-ETHZ als auch in FEWS sehr hohe Abflussspitzen gerechnet werden, welche jedoch regelmäßig nicht eintreffen. Vor allem im operationellen System HBV3-ETHZ erreichen diese Spitzen zum Teil Wiederkehrperioden von 50 Jahren und mehr, in FEWS sind diese Spitzen tendenziell etwas kleiner. Die Kleine Emme ist ein Einzugsgebiet mit nur unbedeutender anthropogener Beeinflussung. Da keine Seen im Einzugsgebiet liegen, findet auch keine natürliche Dämpfung von Hochwasserwellen statt. Bei Littau mündet die Kleine Emme in die Reuss, welche wenige Kilometer oberhalb den Vierwaldstättersee verlässt. Das BAFU erstellt für die Station Mellingen am Unterlauf der Reuss Vorhersagen, mit welchen ab einem etwa 2-jährlichen Hochwasser die Kantone Aargau, Zug und Zürich sowie das Kraftwerk Bremgarten beliefert werden. Prinzipiell setzt sich der Abfluss bei Mellingen aus dem Ausfluss des Vierwaldstättersees sowie dem Abfluss der Kleinen Emme zusammen, der Beitrag aus dem Zwischen-einzugsgebiet ist normalerweise von untergeordneter Bedeutung.

Das Vorhersage-Ereignis vom 06. Juli 2006 illustriert, wie schwierig die Niederschlagsvorhersage und somit auch die Abflussvorhersage bei konvektiven Wetterlagen ist. Es ist aber auch ein Beispiel dafür, dass die Kenntnis von Möglichkeiten und Grenzen der hydrologischen und meteorologischen Vorhersagen auf der Kundenseite sowie der Bedürfnisse und organisatorischen Abläufe beim Kunden auf der Seite des Vorhersagedienstes eminent wichtig sind. Nur der kontinuierliche Austausch dieser Rahmenbedingungen führt zu einem optimalen Nutzen von Abflussvorhersagen.

6.2 Vorhersage für den 06. Juli 2006

Der aLMO-Lauf vom 06.07.2006 00 UTC rechnete an den zentralen und östlichen Voralpen zwischen der Aare und der Thur flächig über 60 mm Niederschlag in 24 h, lokal wurden Signale bis 100 mm ausgewiesen. Im Einzugsgebiet der Kleinen Emme wurden dabei Intensitäten von bis zu 60 mm/3h gerechnet. Die Reaktion des Abflusses in FEWS war dementsprechend hoch, für den späten Abend wurde eine Abflussspitze von 350 m³/s im oberen Einzugsgebiet bis Werthenstein modelliert, was einer Wiederkehrperiode von zwischen 20 und 50 Jahren entspricht. An der Vorhersagestation Reuss-Mellingen wurden für den frühen Morgen des Folgetages 650 m³/s erwartet (entspricht etwa einem HQ20), bedingt durch eine andere Aggregation der prognostizierten Niederschläge in HBV3-ETHZ sogar 925 m³/s (entspricht einem Ereignis >>HQ200).

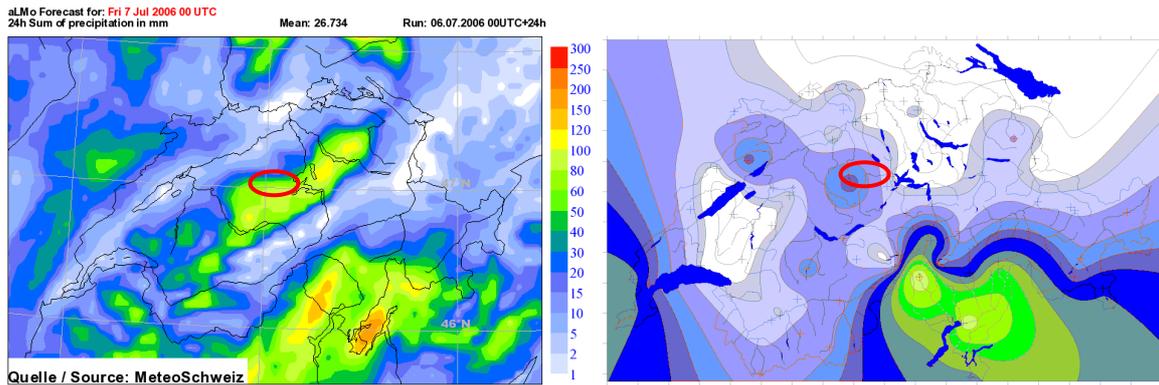


Abb. 9: Auf der linken Seite ist die 24-Stunden Niederschlagssumme im aLMO dargestellt und auf der rechten Seite die gemessene 24-Stunden Niederschläge [mm] auf der Basis der ANETZ-Stationen für den 06.07.2006. Die ungefähre Lage des Einzugsgebietes der Kleinen Emme ist jeweils durch eine rote Ellipse markiert.

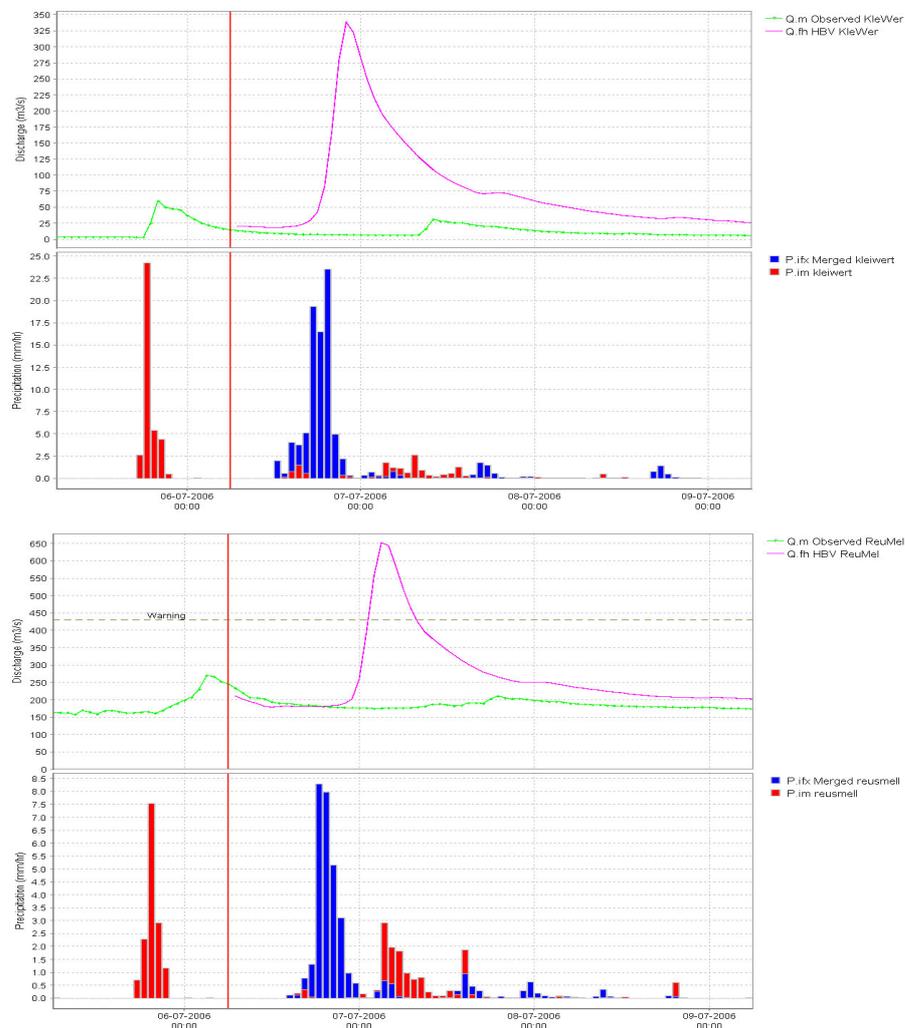


Abb. 10: FEWS-Vorhersage für die Kleine Emme-Werthenstein (oben) und die Reuss-Mellingen (unten). In der oberen Graphik sind jeweils in grün die gemessenen Abflusswerte und in violett die Vorhersage vom 06.07.2006 mit Startzeit um 06:00 dargestellt. Die untere Graphik zeigt jeweils die gemessenen und interpolierten Gebietsniederschläge in rot und die auf das Einzugsgebiet aggregierten vorhergesagten Niederschläge in blau.

Dieser sehr hohe Wert wurde intern diskutiert. Die Rücksprache mit dem Dienst habenden Prognostiker von MeteoSchweiz zeigte, dass die Niederschläge im Vergleich mit anderen Modellen voraussichtlich stark überschätzt sind. Auf den Bulletins, welche den Kantonen Aargau, Zug und Zürich zugestellt wurden, war die Unsicherheit der Vorhersage aufgrund der konvektiven Wetterlage erwähnt. Am Abend, nach dem Vorliegen der neuesten aLMO-Läufe, wurde eine neue Vorhersage erstellt. Der Hochwasserscheitel war in HBV3-ETHZ komplett weggerechnet, die Wetterentwicklung sowie der mit einiger Sicherheit zu erwartende weitere Verlauf ließ eine Entwarnung zu.

6.3 Kundenaktivitäten als Folge der Abflussvorhersage vom 06. Juli 2006, 08:30 Uhr

Das BAFU hat im Nachgang zu diesem Fehlalarm ein Feedback der betroffenen Kantone am Unterlauf der Reuss bezüglich der ausgelösten internen Abläufe eingeholt. Im Folgenden sind die getroffenen Reaktionen und Maßnahmen kurz zusammengefasst:

Die Vorhersage löste bei den zuständigen Stellen interne Diskussionen (Plausibilität der prognostizierten Niederschläge und Abflüsse, Möglichkeit von Ausuferungen, effektiv zu erwartender Abfluss, allfällige Abflachung der Hochwasserwelle etc.) aus. Lagebeurteilungen wurden vorgenommen und mit den anderen Anliegerkantonen des Unterlaufes der Reuss ausgetauscht. In mindestens einem Kanton wurde der Katastrophenstab aufgeboten und konstruktive Hochwasserschutzmassnahmen im Eilverfahren fertig gestellt. Das Abflussgeschehen der Reuss unterhalb des Vierwaldstättersees und in der Kleinen Emme wurde fortlaufend beobachtet.

Positiv wurde die Angabe der Unsicherheit der Vorhersage auf dem Bulletin beurteilt. Es wurde jedoch gewünscht, dass diese Angaben expliziter erfolgen. Ferner wurde das Bedürfnis nach einer häufigeren Aktualisierung der Abflussvorhersage unter Verwendung der neuesten numerischen Wettermodelle und eines verbesserten Sets von meteorologischen Daten geäußert. Gewünscht wird zudem die Kommunikation von meteorologischen und hydrologischen Messungen und Vorhersagen aus einer Hand.

7. Diskussion

Die drei Fallbeispiele zeigen verschiedene Probleme rund um die Erstellung, Kommunikation und Interpretation von operationellen Abflussvorhersagen auf:

Meteorologische Modelle:

- a) Eine häufigere Aktualisierung der Abflussvorhersagen macht nur unter bestimmten Umständen Sinn. Gerade im Fall des Fehlalarmes vom 06. Juli 2006 wäre durch weitere Aktualisierungen zwischen den Vorhersageterminen vom Morgen und vom Abend nur die bereits am Morgen erstellte Vorhersage reproduziert worden, da immer noch derselbe aLMO-Lauf von 00 UTC als Basis für die Abflussvorhersage zur Verfügung stand. Zwar kann ein immer längerer Zeitraum der Niederschlagsvorhersage durch gemessene Werte abgedeckt werden, wenn sich aber der Wetter-

verlauf in einer ersten Phase an die numerische Wettervorhersage hält, ändert sich an der Abflussvorhersage nichts. Eine Verbesserung wird mit der Einführung des neuen aLMO/2 Anfang 2008 erwartet. aLMO/2 weist eine horizontale Auflösung von 2.2 km auf, wird alle 3 Stunden gerechnet und deckt einen Prognosezeitraum von 18 Stunden ab.

- b) Die Verwendung eines einzelnen meteorologischen Modells birgt große Risiken, ein Ereignis entweder stark zu über- oder aber zu unterschätzen. Der Einsatz von Ensemblevorhersagen bietet sich an, entsprechende Forschungsarbeiten und Anwendungen sind vorhanden. Bereits einen Schritt weiter als in der Hydrologie ist man in der Meteorologie, hier gelangen solche Ensemble Prediction Systeme (EPS) bereits verbreitet im routinemäßigen Vorhersagebetrieb zum Einsatz. Eine Teilnahme beim Projekt MAP D-Phase und der Einsatz von COSMO-LEPS, dem Ensemble-Modell mit 10 km Auflösung von MeteoSchweiz, werden angestrebt. Bei der Verwendung eines EPS ist aber zu berücksichtigen, dass diese nur die intrinsische Unsicherheit eines Modells und nicht das gesamte mögliche Spektrum möglicher Wetterabläufe abdecken können. Das Ereignis von Anfang März 2006 hat gezeigt, dass neben dem Niederschlag auch die Temperatur von großer Wichtigkeit für die Abflussvorhersage ist. MeteoSchweiz arbeitet an der Lösung der Probleme bei der Diagnose der 2 Meter-Temperatur. Als kurzfristige Lösung für den kommenden Winter wird die Verwendung der 30 Meter-Temperatur des aLMO in Betracht gezogen. Diese überschätzt zwar die Nachttemperaturen, lässt bei Schneeschmelzsituationen jedoch deutliche Verbesserungen erwarten.

Hydrologische Modelle:

- c) FEWS bringt gegenüber HBV3-ETHZ wesentliche Fortschritte bezüglich Darstellung von Eingangsgrößen, Resultaten und Modellzuständen sowie die Möglichkeit der Beurteilung Situation in kleineren Einzugsgebieten und Seen. Die Problematik der Temperaturvorhersage beim Ereignis vom März 2006 wäre mit dem alten System sehr viel später erkannt worden. Beim Ereignis vom August 2005 wurden Einschätzungen zu Gebieten außerhalb des alten Vorhersagegebietes und zu Seen gewünscht. FEWS wird zwar noch nicht in einem operationellen Modus betrieben und letzte Kinderkrankheiten müssen noch eliminiert werden, das System bietet aber große Vorteile gegenüber dem alten System.
- d) Das Beispiel der Vorhersagen vom Abend des 21. Augustes, wo der rasche Anstieg in den Einzugsgebieten der Kleinen Emme und der Emme massiv unterschätzt wurde, zeigt die Grenzen der Vorhersagbarkeit von Hochwasserereignissen in kleinen Einzugsgebieten. Mit den heute vorliegenden Erkenntnissen hätte der 24 Stunden-Betrieb am Abend des 21. August aufgenommen werden müssen. Da jedoch bis zum nächsten Morgen kein neuer aLMO-Lauf zur Verfügung gestanden wäre, hätte die Qualität der Vorhersagen nur in den unterliegenden Gebieten, wo gemessene Abflüsse und Niederschläge in den oberen Teileinzugsgebieten maßgeblich zum Tragen kommen, verbessert werden können. In den beiden kleinen Einzugsgebieten der Emme bei Emmenmatt und der Kleinen Emme bei Littau ist jeweils nur eine oberhalb liegende Abflussmessstation im Modell

berücksichtigt ist. Zudem sind hier sehr kurze Laufzeiten charakteristisch, sodass gemessene Abflüsse nur für eine sehr kurze Dauer die Abflussvorhersage beeinflussen. Es sind zuwenig hydrologische und vor allem meteorologische Messdaten vorhanden, um einerseits ein solches Gebiet für die Modelle hinreichend gut zu kalibrieren und andererseits die aktuelle Situation genügend gut wiederzugeben. Ein Nowcasting, wie es aus dem Wettervorhersagedienst bekannt ist, kann in diesen Gebieten und in dieser Situation eine Verbesserung bringen. Ein solcher Dienst ist allerdings sehr personalintensiv, bedingt ausgezeichnete Gebietskenntnisse, welches nur geschultes Personal vor Ort haben kann, und entsprechend zugeschnittene Hilfsmittel (kalibrierte Radarniederschläge und –vorhersagen) sind unabdingbar.

Produkte / Kommunikation mit den Kunden:

- e) Die Kenntnis beim Kunden der Möglichkeiten und Grenzen von meteorologischen und hydrologischen Vorhersagemodellen ist wichtig für eine richtige Interpretation der Resultate.
- f) Für den Vorhersagedienst sind Kenntnisse über die Strukturen, Dispositive und Abläufe bei den Kunden wichtig, um Produkte und Kommunikation optimieren zu können. Im Nachgang zum Fehllarm vom 06. Juli 2006 wurde ein Erfahrungsaustausch mit den betroffenen Kantonen vereinbart.
- g) Anders als in der Meteorologie wird im hydrologischen Vorhersagedienst häufig direkter Modelloutput in Form von prognostizierten Abflussganglinien als Endprodukt an die Kundschaft weitergeleitet. Dies wird für größere Einzugsgebiete auch in Zukunft so bleiben, muss aber zumindest in kritischen Fällen um eine Modellinterpretation bzw. eine Lagebeurteilung ergänzt werden. Besonders in kleineren Einzugsgebieten und für Prognosekunden, welche mit Niederschlags-Abfluss-Modellierungen und –Vorhersagen weniger gut vertraut sind (Feuerwehren, lokale Einsatzbehörden) ist eine Hilfestellung für die Übertragung und konkrete Anwendung der Modellresultate auf die lokalen Verhältnisse unabdingbar. Aus Gründen des zeitlichen und personellen Aufwandes muss diese Interpretation allgemein gehalten und trotzdem gewinnbringend sein.
- h) Für kleine Einzugsgebiete ist eine vorhergesagte Ganglinie kein adäquates Endprodukt. Wohl sind Ganglinien für die interne Diskussion wichtig, gegenüber dem Kunden spiegeln sie jedoch eine Genauigkeit vor, welche mit den heute zur Verfügung stehenden Modellen nicht erreicht werden kann. Die Unsicherheit der Niederschlagsvorhersage wird umso größer, je kleiner das Vorhersagegebiet ist. Zum Teil wurde der Vorhersagedienst während des Ereignisses vom August 2005 auch um Einschätzungen für kleine Gebiete gebeten, welche nicht explizit im hydrologischen Modell aufgelöst sind. Hier müssen andere Wege gefunden werden, die Angabe einer Gefährdungsstufe analog zum Lawinenvorhersagedienst ist zu prüfen. Eine Problematik stellt sich im Skalenbereich, für welchen eine solche Gefährdungsstufe gültig sein soll.

- i) Der Wunsch nach der Quantifizierung und Kommunikation der Unsicherheit von Vorhersageresultaten ist abhängig von den Bedürfnissen und Vorkenntnissen der Kunden. Im Zusammenhang mit dem Fehllarm vom 06. Juli 2006 wird sie ausdrücklich gewünscht, hier bietet sich die Verwendung von Ensemblevorhersagen an. Dem gegenüber steht ein Beispiel vom Augusthochwasser des letzten Jahres: Der Pegel des Vierwaldstättersees bewegte sich noch ca. 10 - 15 cm unterhalb der Grenze, bei welcher sich die Verantwortlichen für die Evakuierung der Innenstadt von Luzern entschieden hätten. An den Vorhersagedienst wurde die Bitte um eine Vorhersage, ob der kritische Wasserstand überschritten wird, herangetragen - eine klassische Ja/Nein-Entscheidung...
- j) Für einen optimalen Nutzen der bereits erwähnten Ensemblevorhersagen sind weitere Anstrengungen auf allen Seiten notwendig: Von der Seite der Vorhersagedienste muss in die Aufbereitung und einfache Visualisierung der Modellresultate investiert werden, von der Seite der Kunden müssen Vorarbeiten zur Identifikation des tragbaren Risikos unternommen werden (Stichwort Cost-Loss-Analysis: Ab welcher Wahrscheinlichkeit des Eintreffens eines Ereignisses werden Massnahmen ergriffen?). Der Vorhersagedienst des BAFU strebt eine Teilnahme am Forschungsprojekt MAP D-Phase an, bei welchem diese Fragestellungen in einer Zusammenarbeit von Meteorologen, Hydrologen und End-Usern angegangen werden sollen.

8. Literatur

- Bundesamt für Umwelt (2006) Hochwasser 2006 – Ereignisanalyse (in Vorbereitung).
- MeteoSchweiz (2005) Witterungsbericht 2005, August.
- MeteoSchweiz (2006) Witterungsbericht 2006, März.
- MeteoSchweiz (2006) Witterungsbericht 2006, Juli.
- MeteoSchweiz (2006) aLMo/2: Next-Generation Model for the Alpine Region (<http://www.meteoschweiz.ch/web/en/research/projects/almo/almo-2.html>, 22.09.2006)
- MeteoSchweiz (2006) CN-MET (<http://www.meteoschweiz.ch/web/en/research/projects/cn-met.html>, 22.09.2006)
- MeteoSchweiz (2006) Starkniederschläge in der Schweiz im August 2005. Arbeitsberichte der MeteoSchweiz, 211.
- MeteoSchweiz (2006) Hochwasser August 2005 - Eine überregionale Niederschlags-Analyse. Arbeitsberichte der MeteoSchweiz, 213.
- Rossa A.M., Arpagaus M., Zala E. (2003) Weather Situation-Dependent Stratification of Precipitation and Upper-air Verification of the Alpine Model (aLMo). COSMO Newsletter DWD, Offenbach, Germany, 3, 123-138.

Anschrift des Verfassers:

dipl.Natw.ETH Stephan Vogt
Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Hydrologie
Papiermühlestrasse 172, 3063 Ittigen
Postadresse: 3003 Bern
Tel +41 31 322 90 91
Fax +41 31 324 76 81
stephan.vogt@bafu.admin.ch
www.umwelt-schweiz.ch

HOCHWASSERVORHERSAGEN IN SACHSEN

Petra Walther

1. Einleitung

Das Landeshochwasserzentrum in Sachsen ist neben der Gewässerkunde in Sachsen für die Überwachung der Wasserstände und Durchflüsse der Pegel des Landesmessnetzes sowie für die Übermittlung der Daten der Nachbarländer und -staaten zuständig. In diesem Zusammenhang werden Niederschlags- bzw. Tauwettervorhersagen des Deutschen Wetterdienstes hinsichtlich einer möglichen Hochwasserentstehung bewertet, um frühzeitig eine Hochwassergefahr zu erkennen und die Betroffenen sofort zu informieren. Während Hochwassersituationen werden vom Landeshochwasserzentrum u.a. Hochwasserwarnungen mit Angaben zum weiteren Hochwasserverlauf herausgegeben. Die Organisation des Hochwassernachrichtendienstes, die genutzten Vorhersagemodelle sowie die Erfahrungen beim Frühjahrshochwasser 2006 sollen im Folgenden vorgestellt werden.

2. Gebietsbeschreibung

Der Freistaat Sachsen ist mit einer Fläche von 18.415 km² das viertkleinste Bundesland der Bundesrepublik Deutschland und grenzt im Norden an Brandenburg, im Nordwesten an Sachsen-Anhalt, im Westen an Thüringen und im Südwesten an Bayern. Im Osten hat Sachsen eine gemeinsame Grenze mit der Republik Polen und im Süden mit der Tschechischen Republik. Das Territorium von Sachsen umfasst Tief-, Hügel- und Bergland. Die höchste Erhebung in Sachsen ist der Fichtelberg mit 1214 m über NN, die tiefsten Lagen mit ca. 74 m über NN befinden sich im Norden von Sachsen entlang der Elbe in unmittelbarer Nähe der Landesgrenze. Klimatisch herrschen sehr unterschiedliche Verhältnisse vor. Im Nordwesten reicht das hercynische Trockengebiet bis in den Leipziger Raum, im Tief- und Hügelland lassen Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse, aber auch hygische und thermische Kontinentalität ein West-Ost-Gefälle erkennen. Im Bergland wird die großklimatische Situation vom Montanklima bestimmt, wobei mit zunehmender Höhe die Niederschläge zunehmen. Dabei wirken hier insbesondere lokale Luv- und Lee-Effekte (Hempel und Schiemenz, 1986). Die Verteilung der Häufigkeit von Starkniederschlägen über 50 mm ist in der Abbildung 1 dargestellt (DWD, 2005).

Hydrographisch liegt Sachsen in den Einzugsgebieten der Oder und Elbe. Zum Ersteren gehört in Sachsen die Lausitzer Neiße, die auch die östliche Landesgrenze zur Republik Polen bildet. Ca. 5 % der Landesfläche entwässern zur Lausitzer Neiße. Die wichtigsten Fließgewässer im Einzugsgebiet der Elbe sind der Elbestrom, die Schwarze Elster, die Mulde, die Weiße Elster und die Spree. In Tabelle 1 sind von ausgewählten Pegeln der genannten Flusseinzugsgebiete die hydrologischen Hauptwerte dargestellt.

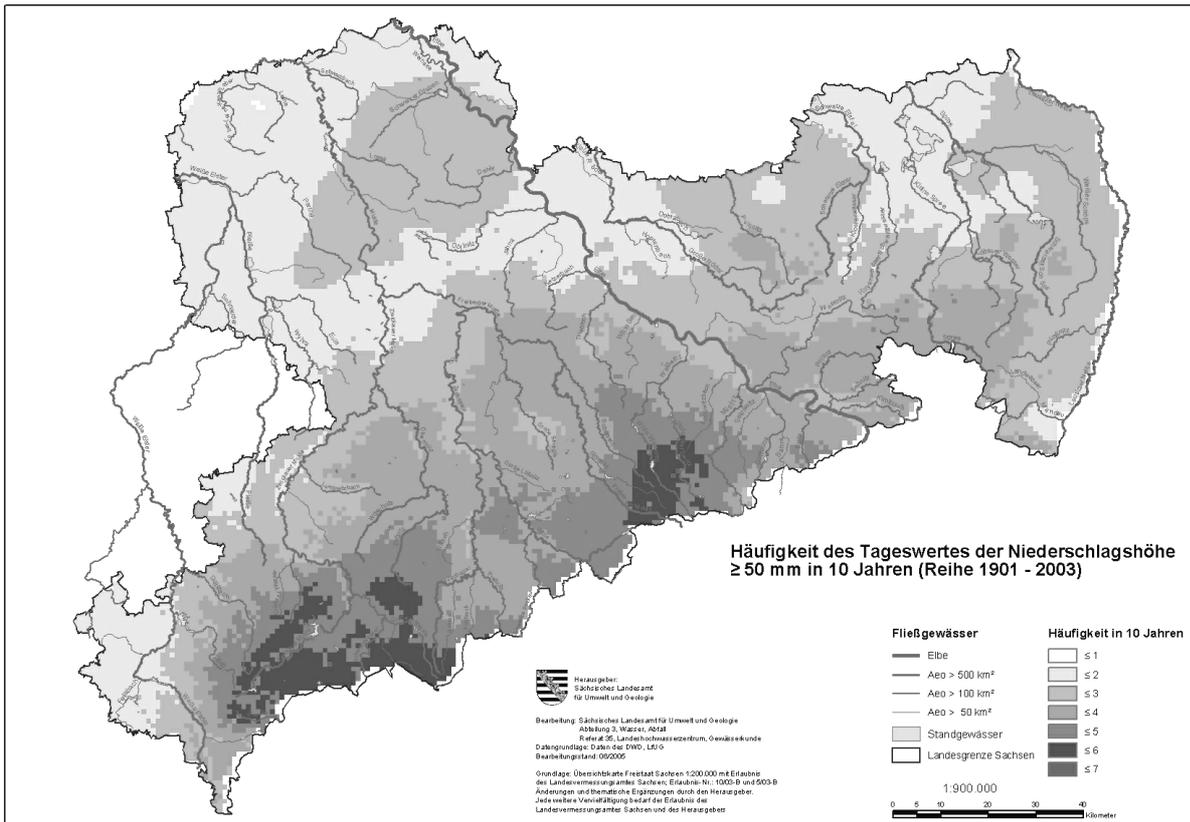


Abb. 1: Häufigkeit von Tagesniederschlagssumme = 50 mm in 10 Jahren (Reihe 1901 – 2003).

Tab. 1: Hauptwerte ausgewählter Pegel in Sachsen

Pegel	Gewässer	A _{E0} in km ²	Zeitbezug	NQ	MQ	MHQ	HHQ (Jahr)
				in m ³ /s			
Dresden	Elbe	53096	1931-2005	22,5	326	1460	5700 (1845)
Neuwiese	Schwarze Elster	669	1955-2005	0	2,91	20,6	41,3 (1987)
Bad Dübén	Vereinigte Mulde	6171	1961-2005	5,4	64,1	476	1760 (2002)
Kleindalzig	Weißer Elster	2891	1982-2005	2,88	16,2	91,8	202 (1981)
Spreewitz	Spree	2033	1965-2005	1,46	15,3	65,9	153 (1981)
Görlitz	Lausitzer Neiße	1621	1913-2005	1,25	17,3	176	743 (1981)

Die sächsischen Flüsse haben einen sehr unterschiedlichen Charakter. Zum einen haben die Elbzufüsse aus dem Osterzgebirge aber auch die obere Freiburger und Zwickauer Mulde und deren Zuflüsse aufgrund der starken Geländeneigung bis zum Mittellauf teilweise Wildbachcharakter mit zum Teil sehr hohen Fließgeschwindigkeiten bei Hochwasser. Die Reaktionszeiten bei Hochwasser sind entsprechend kurz. Aber auch die Oberläufe der Schwarzen Elster, Weißen Elster, Spree und Lausitzer Neiße können bei bestimmten meteorologischen Situationen sehr schnell Hochwasser führen und zur Überflutung von Bebauungen, Verkehrswegen und landwirtschaftliche Flächen führen. Teilweise sind die Fließgewässer durch Talsperren geschützt. Derzeit

werden von der Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen 87 Talsperrenkomplexe und Speicher mit einem Gesamtstauraum von ca. 580 Mio. m³ und einem Hochwasserrückhalteraum von 152 Mio. m³ bewirtschaftet. Die Einzugsgebiete im südöstlichen Teil und im südwestlichen Teil von Sachsen sind durch den Jahrhunderte langen Braunkohlebergbau geprägt. Um die Hochwassersituationen einzuschätzen und frühzeitig warnen zu können, gibt es 108 Hochwassermeldepegel. Insgesamt gehören 181 Pegel zum Basismessnetz von Sachsen, das in Abbildung 2 dargestellt ist. 155 Pegel sind mit Datenfernübertragung ausgerüstet.

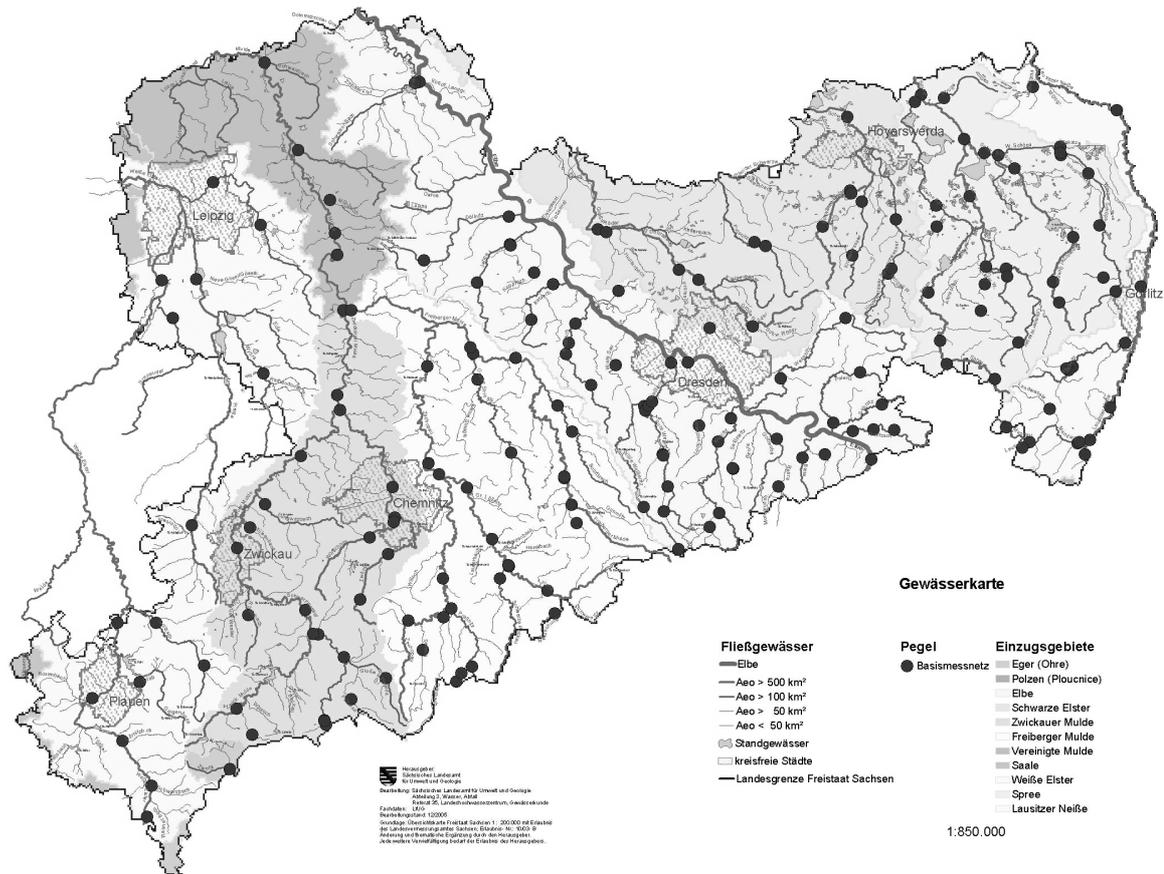


Abb. 2: Das Basispegelmessnetz des Freistaat Sachsen.

3. Kurzer historischer Abriss

An den sächsischen Flüssen gab es schon immer große und schadensreiche Hochwasser. Erste Aufzeichnungen von hohen Fluten der Elbe finden sich in Spanbergs Mansfelder Chronik für das Jahr 520, in der allgemein von großen Wassergüssen und darauf folgender Pest berichtet wurde (Fügner, 2004). Diese und andere Hinweise von vergangenen Hochwasserereignissen in Sachsen sind vor allem den Recherchen von Christian Gottlieb Pötzsch (1784; 1786; 1800) zu verdanken. Im kurfürstlichen Dienst am sächsischen Hof in Dresden ließ er Pegel zur Beobachtung des Wasserstandes der Elbe 1774 in Meißen und 1775 an der Strombrücke in Dresden errichten. Am 1. Januar 1776 wurde in Sachsen mit regelmäßigen Wasserstandsbeobachtungen der Elbe begonnen.

Die zahlreichen Hochwasserkatastrophen gaben aber auch Anstoß, die Hochwasserwarnung, -meldung und -bekämpfung in Sachsen zu organisieren. Bereits 1819 wurden in der „Sächsischen Elbstromufer- und Dammordnung“ Maßnahmen zur Bekämpfung von Hochwassergefahren festgelegt. Der Hochwassernachrichtendienst wurde 1883 in einer „Generalverordnung für Hochfluthen“ geregelt. Nach der Hochwasserflut von 1890 ist am 26. Januar 1891 im „Regulativ, den Nachrichten- und Signaldienst bei Eisgängen und Hochfluthen der Elbe betreffend“ die regelmäßige Benachrichtigung von Ortschaften mit Telegraph- und Fernsprechanlagen über das Verhalten des Elbestroms geregelt worden (Königliche Elbstromverwaltung, 1898). In den Jahren 1903/04 begann auf Grundlage der Hochwasserverordnung vom 03. Januar 1903 der Aufbau eines leistungsfähigen Hochwasserpegelnetzes mit 97 Pegeln (Fügner, 1995).

4. Das Kontroll-, Warn und Managementsystem des Landeshochwasserzentrums Sachsen

Der Hochwassernachrichten- und Alarmdienst dient der Warnung vor und der Information über Hochwassergefahren. Seine Aufgaben bestehen in der Gewinnung, Bewertung und Übermittlung von Daten, die Aufschluss über die Entstehung, den zeitlichen Verlauf und die räumliche Ausdehnung eines Hochwassers geben. Mit dem Hochwassernachrichten- und Alarmdienst werden Teilnehmer, Dritte und die Öffentlichkeit über Hochwassergefahren unterrichtet, damit frühzeitig und effektiv Abwehrmaßnahmen eingeleitet werden können. In der Abbildung 3 sind die neuen, seit 17.08.2004 gültigen Melde- und Informationswege der Hochwassernachrichten schematisch dargestellt.



Abb. 3: Melde- und Informationswege der Hochwassernachrichten im Freistaat Sachsen.

Hochwassernachrichten sind Hochwasserstandsmeldungen, Hochwassereilbenachrichtigungen und Hochwasserwarnungen. Hochwasserstandsmeldungen sind Informationen über den Wasserstand an in der Hochwassermeldeordnung festgelegten Pegeln (Hochwassermeldepegel), die bei Erreichen von bestimmten Wasserständen (Alarm- und Meldestufen) und Terminen i. d. R. per Telefax abgegeben werden. Die Hochwassereilbenachrichtigung ist eine unverzügliche Information per SMS über den Beginn des Hochwassernachrichten- und Alarmdienstes oder bei Überschreitung der Alarmstufe 3 in einem Flussgebiet, die mit der Pflicht zur Abgabe einer Empfangsbestätigung sowie gegebenenfalls einem Rückkopplungsmechanismus vom Landeshochwasserzentrum an die Gemeinde bzw. untere Wasserbehörde verbunden ist. Hochwasserwarnungen sind bewertete Informationen über eine Hochwassergefahr in einem Flussgebiet mit Angaben über Stand und voraussichtliche Entwicklung der meteorologischen und der hydrologischen Lage. Die Tabelle 2 enthält die Anzahl der Teilnehmer am Hochwassernachrichtendienst. Um die Vielzahl der einlaufenden Daten abzurufen und entgegenzunehmen, sie zu verteilen und zu veröffentlichen und für die Nutzung im Prognosesystem aufzubereiten, wurde für das Landeshochwasserzentrum ein web-basiertes Daten-, Prognose- und Informationsmanagementsystem aufgebaut. Mit dem System erfolgt u.a. die zentrale und redundante Speicherung aller Daten und Dokumente sowie bei Eintreten einer Hochwassersituation die automatische Alarmierung.

Tab. 2: Anzahl der Teilnehmer am Hochwassernachrichten- und Alarmdienst (Stand Februar 2006).

Hochwasser- nachricht		Flussgebiet							gesamt
		Elbestrom	Nebenflüsse der oberen Elbe	Schwarze Elster	Mulden	Weisse Elster Elster	Spree	Lausitzer Neiße	
Hochwasser- eilbenach- richtigung	insgesamt	77	178	88	450	126	87	59	1065
	davon Dritte	0	27	5	183	10	4	12	241
Hochwasser- standsmeldungen		62	113	52	183	77	59	33	579
Hochwasserwarnung		68	99	86	246	123	89	58	769

Vom Landeshochwasserzentrum werden die Hochwassernachrichten flussgebietsweise entsprechend den Zustellungsplänen der Hochwassermeldeordnung verteilt. In der Hochwassermeldeordnung sind für Hochwassermeldepegel vier Alarmstufenrichtwerte festgelegt. Die Richtwasserstände für die einzelnen Alarmstufen werden grundsätzlich so bestimmt, dass bei ihrem Erreichen am Hochwassermeldepegel für den zugehörigen Flussabschnitt bestimmte Gefahrensituationen kennzeichnend sind und insbesondere durch die Wasserwehren der Kommunen bestimmte Maßnahmen und Handlungen vorzunehmen sind.

Die Alarmstufe 1 bedeutet Meldebeginn. Es ist mit dem Beginn der Ausuferung der Gewässer zu rechnen. Die meteorologische und hydrologische Lage ist zu analysieren, um mögliche Entwicklungstendenzen einzuschätzen. Alarmierungsunterlagen, die Informations- und Meldewege und die technischen Einsatzbereitschaft sind zu überprüfen.

Der Kontrolldienst beginnt mit der Alarmstufe 2. Land- und forstwirtschaftliche Flächen, Grünflächen, Gärten und einzeln stehende Gebäude können überschwemmt sein. Es kann zu leichten Verkehrsbehinderungen auf Straßen kommen. Bei eingedeichten Gewässern reicht die Ausuferung bis an den Deichfuß. Es erfolgt die tägliche periodische Kontrolle der Gewässer, Hochwasserschutzanlagen und gefährdeten Bauwerke. Die Arbeitsbereitschaft und Überprüfung der Einsatzbereitschaft bei den Teilnehmern am Hochwassernachrichten- und Alarmdienst ist herzustellen. Die zuständigen Einsatzkräfte sind zu alarmieren und erste Hochwasserabwehrmaßnahmen und Beseitigung von Abflusshindernissen sind durchzuführen.

Alarmstufe 3 bedeutet Wachdienst. Steigen die Wasserstände in diesen Bereich, sind Teile zusammenhängender Bebauung oder überörtlicher Straßen und Schienenwege überschwemmt. Bei Volleichen ist der Wasserstand etwa in halber Deichhöhe, und es treten Vernässung von Polderflächen auf. Bei Alarmstufe 3 wird die aktive Hochwasserbekämpfung durch zuständigen Wachdienst auf den Deichen, vorbeugende Sicherungsmaßnahmen an Gefahrenstellen und Beseitigung örtlicher Gefährdungen und Schäden vorbereitet. Es werden Einsatzstäbe an Schwerpunkten der Hochwasserabwehr und spezielle Nachrichtenverbindungen eingerichtet. Die Auslagerung von Hochwasserschutzmaterialien an bekannte Gefahrenstellen ist einzuleiten.

Mit Erreichen der Alarmstufe 4 beginnt die Hochwasserabwehr. Es sind größere bebaute Gebiete überschwemmt und es besteht eine unmittelbare Gefährdung für Menschen und Tiere. Der Bemessungswasserstand bei Volleichen wird erreicht und es besteht eine unmittelbare Gefahr von Deichbrüchen. Bei Alarmstufe 4 erfolgt die aktive Bekämpfung bestehender Gefahren für das Leben und die Gesundheit.

5. Hochwasservorhersagesysteme in Sachsen

Für den Elbestrom, die Mulde, die Schwarze Elster, die Weiße Elster, die Spree und die Lausitzer Neiße gibt es im Landeshochwasserzentrum Hochwasservorhersagemodelle. Die Entwicklung dieser Modelle begann Anfang der 80er Jahre mit dem Hochwasservorhersagemodell für die Elbe. Das Elbe-Modell wurde 1982 als Großrechnerversion in der damaligen Wasserwirtschaftsdirektion Obere Elbe-Neiße eingeführt. Beginnend an den Pegeln Prag/Moldau und Brandys/Elbe arbeitet das Modell nach dem Translations-Diffusions-Ansatz, der den Wellenablauf als eine zeitliche und örtliche Verschiebung (Translation) der Welle vom Oberpegel zum Unterpegel bei gleichzeitiger Abflachung (Diffusion) beschreibt. Dieses Modell wurde 1992 in eine PC-Version umgesetzt. Nach dem Hochwasser 2002 mussten Modellanpassungen und eine Nacheichung vorgenommen werden (Polte, 2003). Voraussichtlich bis Ende 2006 ist die Implementierung des von der Bundesanstalt für

Gewässerkunde entwickelten hydrodynamischen Wasserstandsvorhersagesystem WAVOS im Landeshochwasserzentrum geplant.

Für die Schwarze Elster, Mulde, Weiße Elster, Spree und Lausitzer Neiße wurden in den letzten 15 Jahren konzeptionelle hydrologische Modelle aufgebaut, in denen wesentliche hydrologische Teilprozesse mit einfachen mathematischen Modellen in abstrahierter Form abgebildet werden. Für die Oberläufe wurden empirische Niederschlags-Abflussmodelle und für die Unterläufe Flusslaufmodelle erarbeitet. Letztere basieren wie das Elbmodell auf dem Translations-Diffusions-Ansatz oder auf der linearen Speicherkaskade. 2003/2004 wurde für das Flussgebiet der Weißen Elster ein neues Hochwasservorhersagemodell entwickelt. Ursprünglich existierten 3 konzeptionelle nicht miteinander gekoppelte Vorhersagemodelle. Für das Vorhersagemodell wurde das Modellkonzept KALYPSO-NA (BCE, 2004) genutzt. KALYPSO-NA basiert auf der Simulation der hydrologischen Teilprozesse als Speicherelemente, die über Wasserflüsse miteinander als Kaskade von Speichern gekoppelt sind. Die hydrologischen Prozesse werden durch mathematische Gleichungen beschrieben, die physikalisch begründet sind. Das Flusslaufmodell entspricht dem Prinzip der linearen Speicherkaskade. Auch für das Flussgebiet der Mulde ist die Anpassung des Modellsystems KALYPSO-NA vorgesehen. Die in Sachsen genutzten unterschiedlichen Modellsysteme zur Hochwasservorhersage sind nicht nur in der historischen Modellentwicklung zu sehen, sondern sie sind auch hydrologisch begründet. So werden auch in Zukunft Modellneuentwicklungen für kleine, schnell reagierende Einzugsgebiete vorwiegend auf robusten konzeptionellen Modellen aufbauen müssen, während in Systemen mit längeren Verweilzeiten je nach Datenlage eher physikalisch begründete Modellansätze zum Einsatz kommen werden. Neben der Entwicklung weiterer und der Überarbeitung und Ergänzung existierender Hochwasservorhersagemodelle wird ein Schwerpunkt die Vereinheitlichung der Benutzerführung unter der Oberfläche des Modellsystems KALYPSO-NA sein. Bisher erfolgte die Integrierung des Hochwasservorhersagemodells der Spree (WASY, 2001) in das System, die Integration des Modells der Schwarzen Elster wird Ende 2006 abgeschlossen sein (Abbildung 4).

Kurzfristiges Ziel ist die weitere Entwicklung und Einbeziehung der rasterbasierten Niederschlagsvorhersagen des aktuellen Lokalmodells (LME) und des Schneeabtaumodells (SNOW3) des Deutschen Wetterdienstes in den Hochwasservorhersagemodellen.

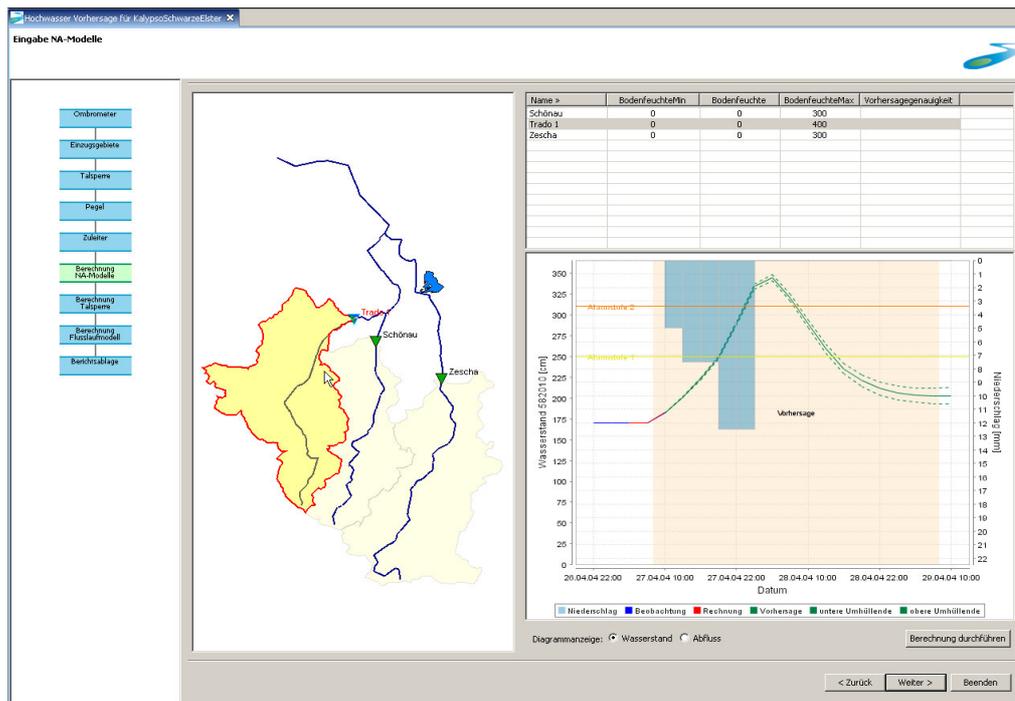


Abb. 4: Integriertes Hochwasservorhersagemodell der Schwarzen Elster in Oberfläche von KALYPSO-NA.

6. Frühjahrshochwasser 2006

Für das Landeshochwasserzentrum war das Frühjahrshochwasser 2006 seit dem Hochwasser im August 2002 der schwierigste Einsatz. Einmal war die Hochwasserperiode, die sich vom Februar bis Anfang April erstreckte, ausgesprochen lang. Zum anderen war sie durch unterschiedliche Phasen (Eisstau, Schneeschmelze, Regenniederschläge) charakterisiert. Erschwerend kam hinzu, dass sich fast flächendeckend in Sachsen Hochwassersituationen in diesem Zeitraum einstellten. In den sächsischen Einzugsgebieten der Nebenflüsse der oberen Elbe, der Schwarzen Elster, der Mulden, der Weißen Elster, der Spree und der Lausitzer Neiße waren es insgesamt vier Hochwasserphasen. Das Hochwasser von Anfang Februar war durch plötzliche Eisaufbrüche und Eisstaus hervorgerufen, die besonders in den Fließgewässern des Tief- und Hügellandes zu drastischen Wasserstandsanstiegen, mit örtlichen Ausuferungen und lokalen Gefährdungen führten (Abbildung 5).

Mitte Februar kam es im Zusammenhang mit wieder einsetzender, durch Regenniederschlag verstärkter Schneeschmelze erneut verbreitet in den Fließgewässern des Tief- und Hügellandes zu einer Hochwassersituation. Diese Situation wiederholte sich Anfang März. Ende März setzte in ganz Sachsen durchgreifendes Tauwetter bis in die oberen Lagen ein. Das Wasseräquivalent der Schneedecke lag zu diesem Zeitpunkt zwischen 30 mm (Einzugsgebiet der Schwarzen Elster) und 255 mm (Einzugsgebiet der Zwickauer Mulde) und war vergleichbar mit den Werten von 2005. Der Boden unter der Schneedecke war vielfach gefroren. Das hatte zur Folge, dass das Abtauen der Schneedecke einschließlich der nur mäßig gefallenen Niederschlägen in allen sächsischen Fließgewässern zu starken Anstiegen der Wasserführung vielfach bis in

den Bereich der Alarmstufe 3, vereinzelt bis in den Bereich der Alarmstufe 4 führten. In Abbildung 6 ist beispielhaft für das Flussgebiet der Schwarzen Elster der Hochwasserverlauf vom Februar bis April 2006 dargestellt.



Abb. 5: Deichöffnung am Deich der Schwarzen Elster ca. 350 m unterhalb der Brücke Tätzschwitz (Foto: SMUL, 2006).

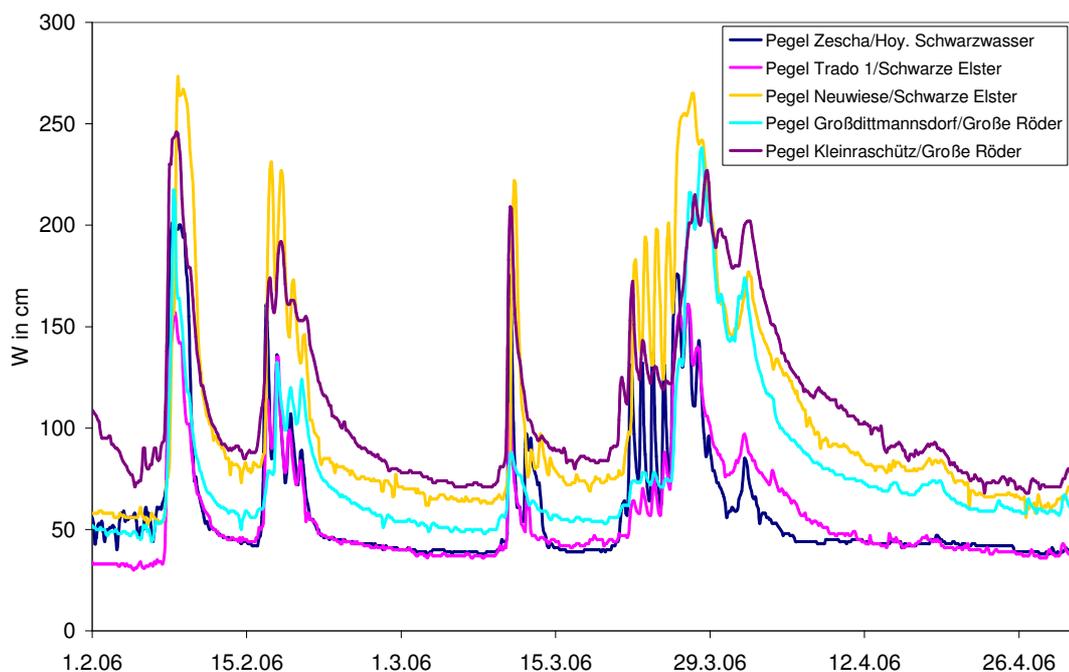


Abb. 6: Flussgebiet Schwarze Elster – Wasserstandsganglinien ausgewählter Pegel von Februar bis April 2006

Als Grundlage für die Vorhersage nutzte das Landeshochwasserzentrum vor allem Daten und Informationen des Deutschen Wetterdienstes, z.B. das Schneeschmelzmodell SNOW3, das für das Gebiet Sachsens im Jahr 2005 erarbeitet bzw. angepasst wurde, aber auch Informationen der Nachbarländer. Aber insbesondere der Hochwasserverlauf eisbedingter Hochwasser im Februar war schwer bis gar nicht abzuschätzen, da sich aufgrund plötzlicher örtlicher Eisversetzungen, Eisaufstauungen oder Eisaufbruch die Situation rasch änderte und die beobachteten Wasserstände an den Pegeln nicht immer die tatsächliche Gefährdung an anderen Gewässerabschnitten des Gewässers widerspiegelten.

Das Hochwasser im Elbestrom wurde Ende März durch heftige Schneeschmelze in Kombination mit intensivem Regen auf tschechischem Gebiet ausgelöst. Die Wasservorräte der Schneedecke im tschechischen Einzugsgebiet der Moldau näherten sich dabei den seit 1961 beobachteten höchsten Werten. Durch die Bewirtschaftung der Talsperren auf tschechischem Gebiet konnte der Verlauf des Hochwassers des Elbestroms in Sachsen günstig beeinflusst werden. Die Wasserstände an den sächsischen Elbpegel stiegen bis Anfang April in einen Bereich an, der im vorigen Jahrhundert letztmalig 1941 beobachtet worden ist. Die Hochwasserfülle war vergleichbar mit der Fülle des Hochwassers vom August 2002. In Abbildung 4 sind die vom Landeshochwasserzentrum für den Pegel Dresden herausgegebene 24-stündigen Hochwasservorhersagen und 48-stündigen Abschätzungen, jeweils für 7 Uhr, mit dem tatsächlichen Wasserstandsverlauf aufgezeichnet. Vergleichsweise wurden zusätzlich die Daten des Pegels Usti n.L./Labe dargestellt.

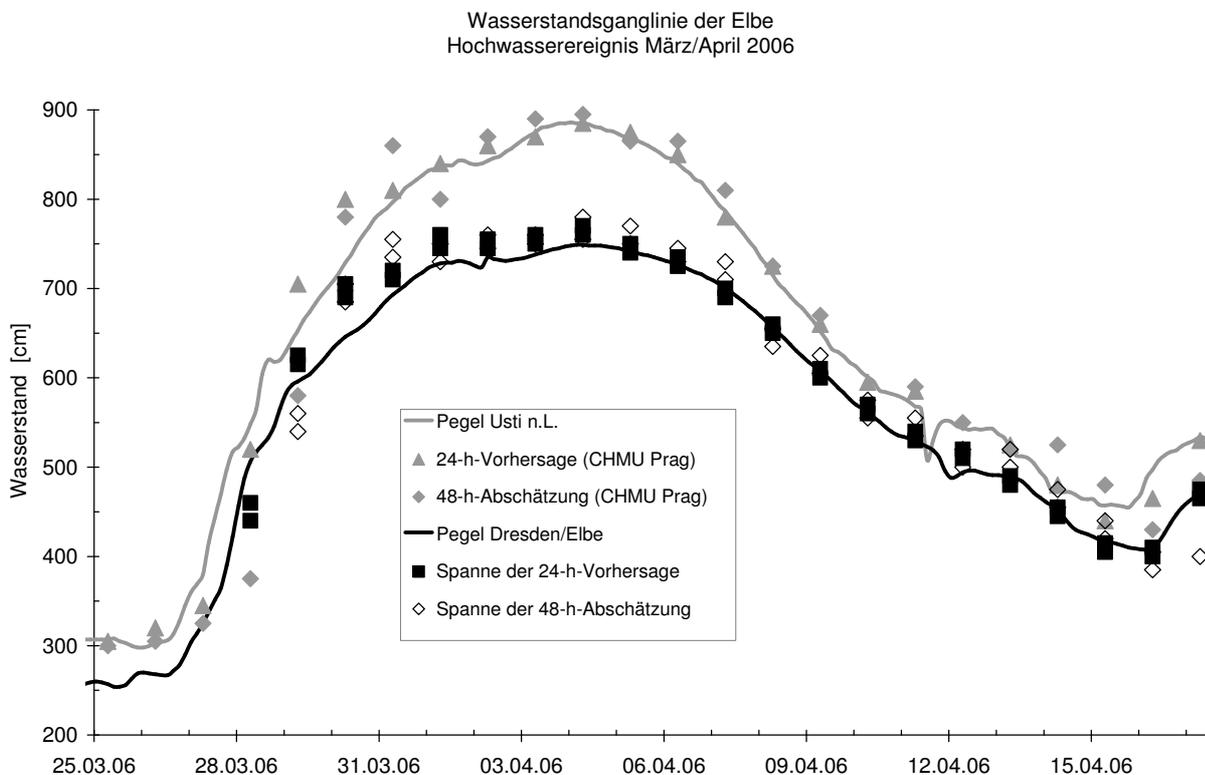


Abb. 7: Wasserstandsganglinie Pegel Dresden und Pegel Usti an der Elbe mit Vorhersage vom 25.03. bis zum 17.04.2006.

7. Resümee

Das Frühjahrshochwasser 2006 hat deutlich die Grenzen der Modelle bezüglich der Vorhersagegenauigkeit gezeigt. Die Qualität der Modellergebnisse war wesentlich von der Genauigkeit der Prognose der Niederschläge und des Abtauprozesses der Schneedecke abhängig. Problematisch war die Vorhersage beim Eishochwasser im Februar. Die Talsperrensteuerung im Hochwasserfall war vom Zufluss und der Gefährdungssituation unterhalb der Talsperren abhängig. Die Abgabemengen konnten teilweise nur für einen kurzen Zeitraum vorhergesagt werden.

Das nach dem Augusthochwasser 2002 konzipierte Hochwassernachrichten- und Alarmsystem (Hochwassereilbenachrichtigung, Hochwasserstandsmeldung und Hochwasserwarnung) hat sich grundsätzlich auch unter diesen extremen Bedingungen bewährt. Im Zeitraum des Frühjahrshochwassers wurden insgesamt 87017 Hochwassernachrichten verteilt (LFUG, 2006).

8. Literatur

Hempel, W. und Schiemenz, H. (1986) Naturschutzgebiete der Bezirke Leipzig, Karl-Marx-Stadt und Dresden, Urania-Verlag Leipzig, Jena, Berlin.

DWD - Deutscher Wetterdienst (2005) Extreme Niederschlagshöhen in Sachsen: Maximalwerte und Häufigkeiten hoher Tageswerte, Projekt MAXNIE/SN, Berlin 2005 (unveröffentlicht).

Fügner, D. (2004) Hochwasserkatastrophen in Sachsen – ein historischer Überblick, Mitteilungen des Landesvereins sächsischer Heimatschutz e. V., Dresden, Mitteilung 1/2004.

Pöttsch, C.G. (1784, 1786, 1800) Chronologische Geschichte der großen Wasserfluten des Elbestroms seit tausend und mehr Jahren, Bände I, II, III, Dresden.

Königliche Elbstromverwaltung (1898) Der Elbstrom, sein Stromgebiet und seine wichtigsten Nebenflüsse. Eine hydrographische, wasserwirtschaftliche und wasserrechtliche Darstellung, Berlin Königliche Elbstrombauverwaltung zu Magdeburg.

Fügner, D. (1995) Hochwasserkatastrophen in Sachsen, Dresden, Vortrag am 04.01.1995 (unveröffentlicht).

Polte, B. (2003) Kalibrierung der Parameter für das Hochwasservorhersagemodell Obere Elbe anhand der Hochwasserereignisse von 1988, 2002, 2003, Potsdam, November 2003 (unveröffentlicht).

BCE - Björnsen Beratenden Ingenieure (2004): Aufbau des Landeshochwasserzentrum Sachsen, Softwarelösung Prognosesystem, Erfurt (unveröffentlicht).

WASY Gesellschaft für wasserwirtschaftliche Planung und Systemforschung mbH, Niederlassung Dresden (2001) Hochwasservorhersagemodell der Spree, Dresden, 2001 (unveröffentlicht).

LFUG - Landesamt für Umwelt und Geologie (2006) Meteorologische und hydrologische Analyse des Frühjahrshochwasser 2006 in den sächsischen Fließgewässern, Dresden, Juli 2006.

Anschrift der Verfasserin:

Dipl.-Hydrologe Petra Walther
Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Referat 35
Zur Wetterwarte 11, D-01109 Dresden
Tel.: +49 (0)3518928408
Fax: +49 (0) 518928245
Email: petra.walther@lfug.smul.sachsen.de
<http://www.umwelt.sachsen.de/lfug>

HOCHWASSERVORHERSAGE AN DONAU UND INN IN BAYERN

Alfons Vogelbacher

1. Hochwasser an Donau und Inn

In den letzten zehn Jahren häufen sich extreme Hochwasser. Nach dem Oder-Hochwasser 1997, das in Bayern keine extremen Ausmaße erreichte, kam es im Mai 1999 in Südbayern zu einer Hochwasserkatastrophe. Die Schwerpunkte lagen an der Donau und den südlichen Zuflüssen Iller, Lech und Isar (LfW, 1999). Drei Jahre später wurden wiederum die Donau und die Zuflüsse Regen und Inn im August 2002 von extremen Regenfällen heimgesucht. Der Schwerpunkt lag weiter östlich und traf neben Bayern vor allem Österreich und das Elbegebiet in Tschechien und Deutschland (LfW, 2002). Schließlich kam es im August 2005 zu einem Hochwasser, das von den Schwerpunkten und vom Niederschlagsereignis mit dem Hochwasser vom Mai 1999 vergleichbar war (LfU, 2005; DWD, 2005). Die Aufzählung verdeutlicht, dass es in allen Flussgebieten Bayerns zu extremen Hochwasser und Hochwasserschäden kommen kann, die je nach hydrologischem Regime sowohl im Sommer wie im Winter auftreten können.

Ausgelöst durch das Pfingsthochwasser 1999 wurde ein Innovationsprogramm „Quantitative Hydrologie“ im Gewässerkundlichen Dienst Bayerns aufgelegt (Vogelbacher et al., 2002). Neben der Entwicklung von Vorhersagemodellen umfasste es den Aufbau eines neuen automatischen Online-Niederschlagsmessnetzes und die Optimierung des bestehenden Pegelnetzes. Es ist Teil des Aktionsprogramms 2020 zum nachhaltigen Hochwasserschutz in Bayern, in dem Investitionen zum vorbeugenden, technischen und weitergehenden Hochwasserschutz erfolgen (StmU). Im Rahmen dieses Entwicklungsvorhabens wurden für ganz Bayern Hochwasservorhersagemodelle entwickelt und zur Einsatzreife gebracht. Außerdem wurde die Informationsbereitstellung mit modernen Kommunikationsmitteln verbessert und die Zuverlässigkeit der Datenübermittlung und –bereitstellung im Hochwassernachrichtendienst erhöht.

2. Daten und Messnetze

Bayern hat mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD) eine Rahmenvereinbarung zum Aufbau eines gemeinsamen automatischen Niederschlagsmessnetzes abgeschlossen. Mittlerweile sind ca. 250 Stationen in Betrieb, davon 106 des Freistaates Bayern. Über die am Landesamt installierte Messnetzzentrale können neben den Messwerten auch technische und meteorologische Alarme empfangen werden. Mit zusätzlichen Niederschlagsstationen aus Fremdnetzen erhält der Hochwassernachrichtendienst mittlerweile von ca. 400 Stationen Niederschlagsdaten online.

Die räumliche Erfassung der Niederschläge kann durch die Wetterradarmessungen verbessert werden. Die Aneicherung der Radarsignale an die Messwerte der Bodenstationen ermöglicht eine räumlich hochaufgelöste Erfassung der Regenfälle.

Das Projekt RADOLAN (RADar OnLine ANeichung) wurde von der LAWA gefördert. Die ersten operationellen Produkte wurden 2005 herausgegeben (DWD, 2003b; Dietzer und Weigl, 2004; Weigl, 2000).

Schneehöhe, Wasseräquivalent der Schneedecke, Lufttemperatur und Wind sind neben dem Niederschlag die wichtigsten meteorologischen Parameter zur Schneeschmelzmodellierung innerhalb der Niederschlag-Abfluss-Modelle. Das Wasseräquivalent der Schneedecke wird bisher an ca. 30 Stationen in Bayern in ca. dreitägigem Abstand gemessen. Das Messnetz wird zur Zeit beträchtlich erweitert. Um das Niederschlagsangebot aus Schneeschmelze und Regen flächenhaft zu erfassen und vorherzusagen, wird auf die Berechnungen mit dem Schneeschmelzmodell SNOW3 des Deutschen Wetterdienstes zugegriffen (Blümel und Schneider, 2004).

Weitere Produkte der Wetterdienste folgen aus den Ergebnissen der numerischen Wettervorhersage. Für die Abflussvorhersage werden vorrangig die Niederschlagsvorhersagen aus dem LME-Modell und dem GME-Modell des DWD verwendet (DWD, 2003a). Das GME (Global-Modell Europa) überdeckt ganz Europa mit einem Gitter der Kantenlänge 40 km. Es wird täglich zu den Vorhersagezeiten 00 UTC, 12 UTC und 18 UTC mit Vorhersagezeiten von 7 Tagen gerechnet. Die Vorhersagen stehen circa 4 Stunden nach dem Vorhersagezeitpunkt zur Verfügung. Das LME (Lokal-Modell Europa) überdeckt ganz Europa mit einem quadratischen Gitter der Kantenlänge 7 km. Die mittlere Größe der Flächenelemente ist im LME also nur 49 km², während sie im GME 1300 km² beträgt. Deshalb kann das LME viele Details der Landschaft, die einen prägenden Einfluss auf das Wetter haben, explizit erfassen. Das Modell wird täglich zu den Vorhersagezeitpunkten 00 UTC, 12 UTC und 18 UTC mit Vorhersagezeiten von 78 Stunden bzw. 48 Stunden um 18 UTC gerechnet. Die Vorhersagen stehen ca. 6 Stunden nach dem Vorhersagezeitpunkt dem Hochwassernachrichtendienst zur Verfügung. Weitere Vorhersageprodukte, wie das amerikanische GFS (Global Forecast System) - Modell oder Vorhersageprodukte des ECWMF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) in Reading (England) werden zeitweise zum Vergleich mit herangezogen. In Südbayern stehen zusätzlich die Vorhersagen der ZAMG berechnet mit dem ALADIN-Modell zur Verfügung.

Die Weiterentwicklungen der Niederschlagsvorhersage beim DWD zielen u.a. auf eine räumliche Auflösung der Vorhersage in einem 3 km x 3 km - Raster und der Entwicklung und Einführung des Niederschlag-Nowcasting-Systems. Damit können - zeitnah auf dem beobachteten Wettergeschehen (einschl. Wetterradarmessungen) aufsetzend - verbesserte kurzfristige (ca. 2-4 Stunden) und häufigere Niederschlagsvorhersagen durchgeführt werden. Diese Arbeiten wurden im Projekt RADVOR-OP von der LAWA gefördert. Erste operationelle Produkte wurden 2005 herausgegeben (DWD, 2003b).

Die Schneeschmelzvorhersage erfolgt auf Basis des Modells SNOW-D und dessen Weiterentwicklung SNOW3 durch den DWD (Blümel und Schneider, 2004). Hierfür sind im Rahmen des Aufbaus des Ombrometermessnetzes zusätzliche Messungen der Schneehöhe und des Wassergehalts der Schneedecke vorgesehen. Das Modell liefert

das Niederschlagsdargebot und den Wassergehalt der Schneedecke mit einer räumlichen Auflösung von 1 km x 1 km.

Das Pegelmessnetz besteht aus ca. 600 Messstellen, wovon mittlerweile 560 Messstellen mit Datenfernübertragung ausgestattet sind. 320 Pegel werden im Hochwassernachrichtendienst als Meldepegel geführt. Die extremen Hochwasser im Mai 1999, im August 2002 und im Januar 2003 haben gezeigt, dass die Ausstattung und die Übertragungswege der Pegel nicht sicher genug war. Immer wieder traten Ausfälle der Messeinrichtungen und der Übertragungswege auf. Um die Datenversorgung zu sichern, wurden deswegen in Bayern mittlerweile ca. 200 Pegel mit redundanter Messwerterfassung und Übertragung ausgerüstet. Für die Übertragung wird alternativ das Festnetz oder Mobilfunk GPRS bzw. GSM eingesetzt. Bei den anderen Pegeln im Hochwassernachrichtendienst wird zumindest die Messwert-erfassung redundant ausgeführt.

Des Weiteren hat sich gezeigt, dass bei zahlreichen Messstellen der Messbereich nicht ausreicht, um die extremen Wasserstände zu erfassen. Diese Pegel müssen in den nächsten Jahren entsprechend durch bauliche Maßnahmen angepasst werden.

Da nicht der Wasserstand, sondern der Abfluss die zentrale Größe für die Vorhersage-Modelle ist, kommt der Abflussermittlung eine besondere Bedeutung zu. Bei nahezu allen Pegeln wird der Abfluss lediglich von Zeit zu Zeit bei möglichst auch extremen Wasserständen gemessen und daraus eine Wasserstands-Abfluss-Beziehung, die Abflusskurve, erstellt. Diese ist vor allem im Extrembereich oft zu wenig durch Messungen gesichert und meist ungenau. Auch auf diesem Gebiet werden in einem Pilotprojekt Alternativen und Verbesserungsmöglichkeiten gesucht (z.B. Ultraschall-messung, ADCP-Messung, Tracermessung, Radarmessung). Bis Ende 2007 sollen hydraulische Berechnungen an allen Messstellen durchgeführt werden, um die Abflusskurven vor allem im Extrapolationsbereich zu verbessern. Dennoch kann der Wasserstand nicht immer ohne weiteres vom vorhergesagten Abfluss abgeleitet werden, da er von Eis, Treibgut, Eintiefung bzw. Auflandung und anderen Umständen (Brückeneinsturz, Dammbbruch) beeinflusst sein kann.

Beim Hochwasser im August 2005 wurden unter anderen folgende Fehlerquellen beobachtet:

- Der Schwimmer der Wasserstands- Messeinrichtung erreichte die obere Grenze der Wasserstands- Messeinrichtung, wie am Pegel Kraiburg/ Inn.
- Während des Hochwassers kam es zu Veränderungen der Gewässersohle im Pegelbereich. Durch diese Veränderungen des Fließquerschnitts kann die bisherige Wasserstands- Abflussbeziehung nicht mehr verwendet werden, bzw. liefert falsche Abflusswerte wie z. B. an Pegeln der Oberläufe von Iller, Lech und Loisach.
- Beim redundant ausgestatteten Pegel Oberaudorf / Inn zeigten die zwei nur wenig auseinander liegenden Messeinrichtungen im Scheitelbereich einen Unterschied im Wasserstand von über einem Meter. Mögliche Ursachen sind ebenfalls Querschnittsveränderungen durch Geschiebetrieb.

Auch mit dem Ausfall einiger Pegel bei Übertragung oder Messung der Wasserstände ist bei extremem Hochwasser zu rechnen. Infolge der Verbesserungen im Pegelwesen, die nach den Erfahrungen des Hochwassers 1999 vorgenommen worden waren, kam es beim Hochwasser 2005 zu keinen Totalausfällen.

3. Datenfluss

Die Messdaten werden nach Abruf oder Empfang durch die Datenabrufrichter sofort vollautomatisch an einen zentralen Server weitergeleitet und dort in eine zentrale Datenbank importiert. Gleichzeitig werden auch andere Datenprotokolle eingelesen wie z.B. per E-Mail gesandte oder auf externen FTP-Servern bereitgestellte Daten der Nachbarländer und Wetterdienste. Bei Ausfällen der zentralen Master-Datenbank kann deren Funktionen von insgesamt vier weiteren Datenbanken übernommen werden, die an den einzelnen Vorhersagezentralen in München, Kempten, Weilheim und Hof untergebracht sind. Deren Datenbestand wird kontinuierlich über eine Replikation der Master-Datenbank mitgeführt.

Die Veröffentlichung aller hochwasserrelevanten Daten erfolgt im Internet unter der Adresse www.hnd.bayern.de. Zugriffsstatistiken während hochwassergefährdeter Perioden belegen die hohe Akzeptanz des Informationsweges Internet. Für die einzelnen Pegelmessstellen werden Ganglinien von Wasserstand und Abfluss mit wählbarem Zeitbezug, wichtige Stammdaten der Messstelle, Hochwassermarken mit Auswirkungen, gefährdeten Objekten und Maßnahmen in Abhängigkeit der Pegelstände, statistischen Kennzahlen und Jährlichkeiten, Gebietsdaten und Laufzeiten, Abflusstafel, Lagekarte mit Bild sowie falls für den Pegel vorhanden, die Jahrbuchseite dargestellt.

4. Vorhersagemodelle

Bis zum Jahre 2000 wurden im Hochwassernachrichtendienst nur empirische und empirisch-synoptische Verfahren eingesetzt. Die gebräuchlichsten Methoden waren Pegelbezugslinien für Wasserstände bzw. für Abflüsse (Schiller, 1984). Heute sind in Bayern nahezu flächendeckend Vorhersagemodelle aufgebaut worden (Daamen et al., 2004). Im Bereich des Inneinzugsgebietes wird eng mit Österreich kooperiert (Andrade et al., 2002). Für die Salzach erfolgen Vorhersagen in HYDRIS (Hydrologisches Informationssystem zur Hochwasservorhersage) bei der Salzburger Landesregierung (Land Salzburg; Wiesenegger, 2002).

4.1 Hydrodynamische Modelle

Für die Modellierung des Wellenablaufs an Main und Donau wird das hydrodynamische Modell WAVOS (Wilke und Rademacher, 2002) eingesetzt. Am Lech und am Inn wird mit dem hydrodynamischen Modell FLORIS-2000 der Fa. SCIETEC gerechnet.

Am Lech wurde mit dem hydrodynamischen Modell zusätzlich untersucht, welche Veränderung der Hochwasserwelle im Lechtal durch betriebliche Maßnahmen (z.B.

Vorabsenkung) am Forggensee und an den Staustufen möglich ist. Mit der Simulation der Bewirtschaftung der Staustufenkette wurden Betriebskonzepte für die Hochwasserbewirtschaftung unter Einbeziehung von Vorabsenkungen erarbeitet.

Für den operationellen Betrieb im Hochwasserfall wurde ein online-rechnendes Modell entwickelt. Durch die Einbindung der Daten aus den NA-Modellen werden mit einem gewissen zeitlichen Vorlauf die Wasserspiegellagen im Lech berechnet. Ein Optimierungsmodul, welches in das Modell implementiert wurde, liefert aufgrund von Zielvorgaben (Wasserstände, etc.) Parameter für die Betriebsführung an den Staustufen, mit denen diese Zielvorgaben erreicht oder bestmöglichst angenähert werden können.

Das hydrodynamische Modell für den Inn von Kufstein bis Passau wurde ebenfalls auf der Basis von Flux DSS/DESIGNER und FLORIS-2000 erstellt (Øverland und Barth, 2006). Es bildet alle Kraftwerke und alle Flussstrecken (Inn und Kraftwerkskanäle) ab. Für den Kraftwerksbetrieb wurden für alle Kraftwerke Standard-Betriebsvorschriften implementiert. Das Modell ist an Beobachtungsdaten kalibriert, wobei die Reibungsbeiwerte aufgrund von Sohlbewegungen (Eintiefungen) bei Hochwassern teilweise sehr hoch sind. Aus modelltechnischen Gründen wurden nach der Kalibrierung Abänderungen der Querprofilgeometrien durchgeführt (Sohlabsenkungen im Nahbereich von Kraftwerken, Implementierung hydraulischer Grenzen, Dammabsenkungen). Im Modell sind 46 Zubringerknoten angesetzt. Die Zuflüsse an diesen Knoten werden vom LARSIM-Modell „Inn“ geliefert.

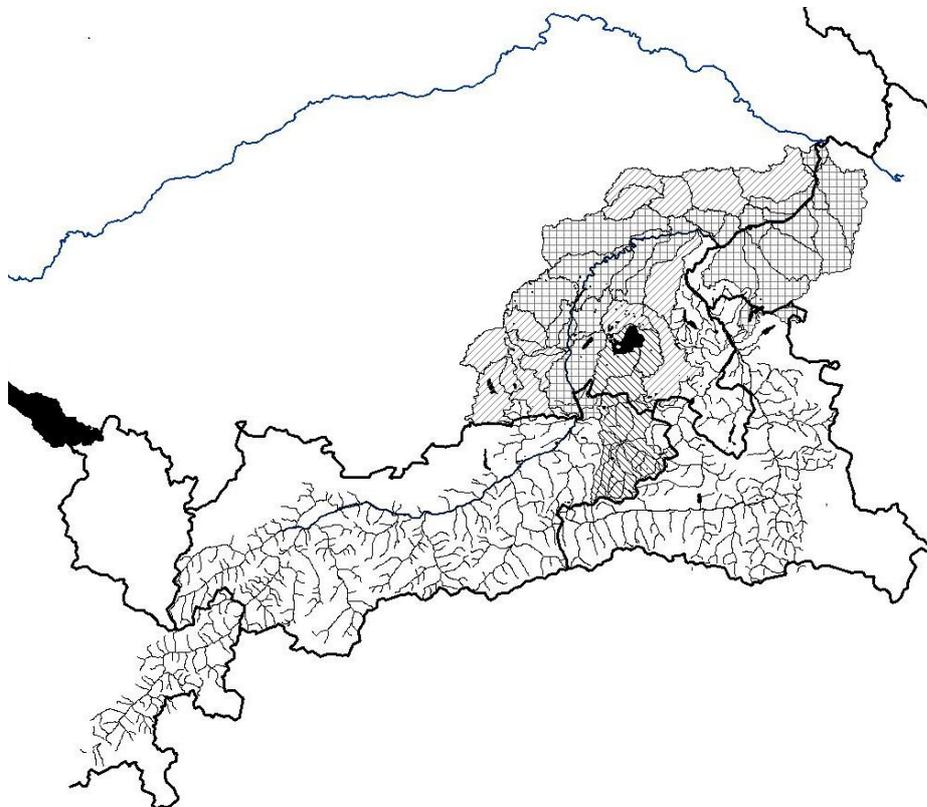


Abb. 1: Übersicht über die Flussgebietsmodelle im Inn-Einzugsgebiet. Für die schraffierten Flächen wurden in Bayern LARSIM-Modelle erstellt.

4.2 Niederschlag Abfluss-Modelle

An die hydrodynamischen Modelle angeschlossen sind Zuflussvorhersagen für die Nebenflüsse auf der Basis von Niederschlag-Abfluss-Modellen (N-A-Modelle). Als N-A-Modell wird vorwiegend das Flussgebietsmodell LARSIM eingesetzt (Bremicker, 2000; Homagk und Ludwig, 1998). An der Isar wurde das Modell bereits seit 1990 erfolgreich für die Speicherbewirtschaftung des Sylvensteinsees und die operationelle Vorhersage bis zum Pegel München genutzt (Overhoff und Winner, 2000).

Tab. 1: Übersicht über die Flussgebietsmodelle (LARSIM) im bayerischen Donauebiet.

Bezeichnung	Flussgebiete	Teilgebiete	Anschluss	Abschlusspegel
Donau bis Lech	Donau oberhalb Iller bis oberhalb Lech	11268 Raster	Donau bis Iller (Baden-Würt.)	Donauwörth/Donau
Lech	Lech	177 Teilgebiete		Augsburg / Lech
Altmuehl	Altmühl	2638 Raster		Beilngries / Altmühl
Naab	Naab	6362 Raster		Heitzenhofen/Naab
Regen	Regen	3091 Raster		Marienthal/Regen
Donau mit Paar	Donau ab Donauwörth bis Regensburg ohne Lech, Altmühl, Naab, Regen	7228 Raster	Donauwörth/Donau Augsburg/Lech Beilngries/Altmühl Heitzenhofen/Naab Marienthal/Regen	Regensburg Schwabelweis/Donau
Isar	Isar	1055 Teilgebiete		Plattling/Isar
Chiemsee	Chiemsee mit Tiroler Achen	7195 Teilgebiete		Seebruck/Alz (Ausfluss Chiemsee)
Traun	Alz ab Chiemsee	77 Teilgebiete	Seebruck/Alz	Burgkirchen/Alz Guffham/Alzkanal
Mangfall	Mangfall	97 Teilgebiete		Rosenheim/Mangfall
Rott	Rott	62 Teilgebiete		Ruhstorf/Rott
Inn	Inn ab Oberaudorf ohne Mangfall, Alz, Salzach, Rott	2682 Teilgebiete	Oberaudorf/Inn Rosenheim/Mangfall Burgkirchen/Alz Guffham/Alzkanal Burghausen/Salzach Ruhstorf/Rott	Passau Ingling KW/Inn
Donau ab Regensburg Isar	Donau ab Regensburg ohne Isar	7931 Raster	Plattling/Isar Passau Ingling KW/ Inn	Passau Ilzstadt/Donau

N-A-Modelle sind deterministische Modelle. Sie berechnen Abflüsse als Reaktion auf Niederschläge. Im einfachsten Fall wird ein abflusswirksamer Gebietsniederschlag als prozentualer Anteil am Gesamtniederschlag in Abhängigkeit der Vorfeuchte des Gebietes angenommen und über eine feste lineare Beziehung (Einheitsganglinie) zwischen Niederschlag und Abflussreaktion durch Superposition überlagert. Beim Flussgebietsmodell LARSIM gehen als Eingangsdaten stündliche Niederschlagsdaten, Abflussdaten, Niederschlagsvorhersagen, Schneeschmelzberechnungen und –vorhersagen in die Modellberechnung ein.

Die Gebietsdaten können auf Rasterbasis oder Teilgebietsbasis vorliegen. Jedes Teilgebiet oder Raster wird durch Lage- und Höheninformation, Vorfluterlänge und schematischem Querprofil mit Rauigkeiten beschrieben. Das Rastermodell Donau bis zur Lechmündung beruht z.B. auf einem 1 km x 1 km Raster mit 10.000 Modell-elementen und ca. 30 Pegeln. Das Gewässernetz wird aus dem Digitalen Höhenmodell automatisch erstellt und nach Kartengrundlagen ergänzt und korrigiert.

Die in jedem Teilgebiet oder Raster ablaufenden Prozesse werden durch eine Reihe hydrologischer Verfahren berechnet. Es wird unterschieden zwischen Teilgebieten und Gewässerteilstrecken. Für Teilgebiete werden die Belastungsbildung aus dem Niederschlag (zeitlich variabel), die abflusswirksame Belastung (zeitlich variabel) und die Translation/Retention im Teilgebiet berechnet.

Für Gewässerteilstrecken erfolgt eine Addition eventueller Teilgebietsabflussganglinien zu der Abflussganglinie aus der oberhalb gelegenen Gewässerteilstrecke und die Berechnung der Abflussverformung im Gerinne der Gewässerteilstrecke bis zur flussabwärts gelegenen Gewässerteilstrecke. Innerhalb der einzelnen Teilgebiete wird das Translations- und Retentionsverhalten sowie die Niederschlagsverteilung als homogen betrachtet.

Tab. 2: Für das LARSIM-Modell „Inn“ verwendete hydrologische Berechnungsverfahren (Øverland und Barth, 2006).

Modul	Berechnungsverfahren
Teilgebietsniederschlag	Modifiziertes Rasterpunktverfahren
Schneemodell	Schneeschemelze mit dem Verfahren nach Knauf, Schmelzsetzungsverfahren nach Bertle
Abflusswirksamer Niederschlag	Abflussbeiwert-Verfahren
Basisabfluss	Basisabflussspende
Abflussaufteilung Direktabfluss-Interflow	Interflow-Index-Rate
Abflusskonzentration in Teilgebieten	Modifiziertes Clark-Verfahren für Direktabfluss, Einzelinearspeicher für Interflow
Gerinneabfluss Zuflussgebiet > 20 km ²	Translations-Retentions-Verfahren
Gerinneabfluss Zuflussgebiet < 20 km ²	Konstante Translation

Die gebietsspezifische Eichung der Modellparameter der N-A-Modelle erfolgt anhand von ca. 3-5 historischen Hochwasserereignissen. Oft können die extremsten Ereignisse der Vergangenheit nicht genutzt werden, da die entsprechende Datendichte der Eingangsdaten nicht vorhanden ist. In vielen Fällen mussten z.B. Niederschlagsdaten durch Tageswerte, deren stündlicher Verlauf an benachbarte Niederschlagschreiberzeichnungen angepasst wurde, ergänzt werden.

5. Operationeller Betrieb

Die Vorhersageerstellung erfolgt flussgebietsbezogen durch 5 regional zuständige Hochwasservorhersagezentralen (HVZ), die an Wasserwirtschaftsämtern (WWA) bzw. dem Landesamt für Umwelt (LfU) angesiedelt sind.

Flussgebiet	Zentrale	Sitz
Main	HVZ Main	LfU (Dienststelle Hof)
Iller und Lech	HVZ Iller-Lech	WWA Kempten
Isar	HVZ Isar	WWA Weilheim
Donau	HVZ Donau	LfU (Dienstort München)
Inn	HVZ Inn	LfU (Dienstort München)

Die Berechnung der Vorhersagen erfolgt in einem bedienten Betrieb. Hierbei müssen zunächst die Zubringermodelle bis zu den Anschlusspegeln durchlaufen werden. Neben den Zuflussvorhersagen aus eigenen Modellen werden externe Vorhersagen von Baden-Württemberg für die Donau oberhalb der Illermündung, von Tirol für den Inn bei Kufstein und von Salzburg für die Salzach bei Burghausen benötigt. Sind diese Vorhersagen nicht zeitgerecht vorhanden, dann muss der Verlauf über die nächsten 48 Stunden geschätzt werden.



Abb. 2: Zuständigkeitsbereiche der Hochwasservorhersagezentralen.

Der Vorhersagezeitraum ist bei den N-A-Modellen lediglich durch den Zeitraum der Niederschlagsvorhersage beschränkt. In Anpassung an das LME-Modell des DWD werden zur Zeit standardmäßig 72-Stunden-Vorhersagen berechnet. Publiziert werden allerdings wesentlich kürzere Vorhersagen. Bei den hydrodynamischen Modellen wird zur Zeit über einen Vorhersagezeitraum von 48h-Stunden gerechnet.

Die erste Bewährungsprobe bei einem großen Hochwasser bestanden die Vorhersagezentralen Iller-Lech, Isar und Donau im August 2005.

6. Unsicherheit der Wasserstands- und Abflussvorhersage

Der Unsicherheitsbereich bzw. Ungenauigkeitsbereich der Vorhersagen wird mit wachsendem Vorhersagezeitraum größer. Die größte Genauigkeit erreichen Abflussvorhersagen, die aufgrund gemessener Abflüsse oder Wasserstände an Oberliegern innerhalb der Laufzeiten der Hochwasserwelle liegen. Deutlich größer wird die Ungenauigkeit, wenn die Vorhersage sich bei wachsendem Vorhersagezeitraum auf die gemessenen Niederschläge stützt und noch größer wird die Unsicherheit bei Einbeziehung der Niederschlagsvorhersagen. Die Übergänge hierbei müssen nicht kontinuierlich erfolgen, sondern können sich auch sprunghaft verändern.

Da Laufzeiten mit der Größe des Flussgebietes ebenfalls größer werden, können dort auch die genaueren Vorhersagen erzielt werden, während in den kleinen Einzugsgebieten brauchbare Vorhersagezeiten nur durch Einbeziehung der Niederschlagsvorhersagen zu erzielen sind und damit aber auch unsicher werden.

Eine der wichtigsten Aufgaben in nächster Zukunft wird sein, diese Unsicherheitsbereiche für die einzelnen Vorhersagepegel bei jeder Vorhersage zu bestimmen und mit anzugeben.

6.1 Niederschlagsvorhersagen

Bereits bei verschiedenen Vorhersagemodellen und Vorhersageläufen zu unterschiedlichen Vorhersagezeitpunkten gibt es meist große Unterschiede in den vorhergesagten Niederschlagsmengen.

Beispielsweise lieferte das LME - Modell für das Einzugsgebiet des Lechs bis Füssen (Forgensee) am Vormittag des 21.08.2005 für den Zeitraum bis zum Ende des Niederschlagsereignisses eine Niederschlagssumme von 215 mm, das GME- Modell 93 mm (beide DWD), das GFS- Modell 164 mm (Amerikanischer Wetterdienst). Gemessen wurden 169 mm. Am Morgen des 22.08.2005 lagen die vorhergesagten Niederschlagssummen bis zum Ende des Ereignisses zwischen 90 mm und 190 mm, gemessen wurden 160 mm.

Neben Fehlern der vorhergesagten Niederschlagsmengen führen auch Niederschläge, die in einem anderen Einzugsgebiet fallen als vorhergesagt, oder einige Stunden zu früh/zu spät vorhergesagt wurden, zu weiteren Fehlern bei der Modellierung der Abflussganglinien.

Entsprechend ist die Unsicherheit in der Abflussvorhersage bei kleineren Einzugsgebieten recht hoch. Dennoch bringen diese Vorhersagen eine deutliche Verbesserung bei der Abschätzung der zu erwartenden Abflüsse und Wasserstände. Durch die Einbeziehung von Ensemble-Vorhersagen wird künftig auch eine Aussage über den Unsicherheitsbereich möglich sein.

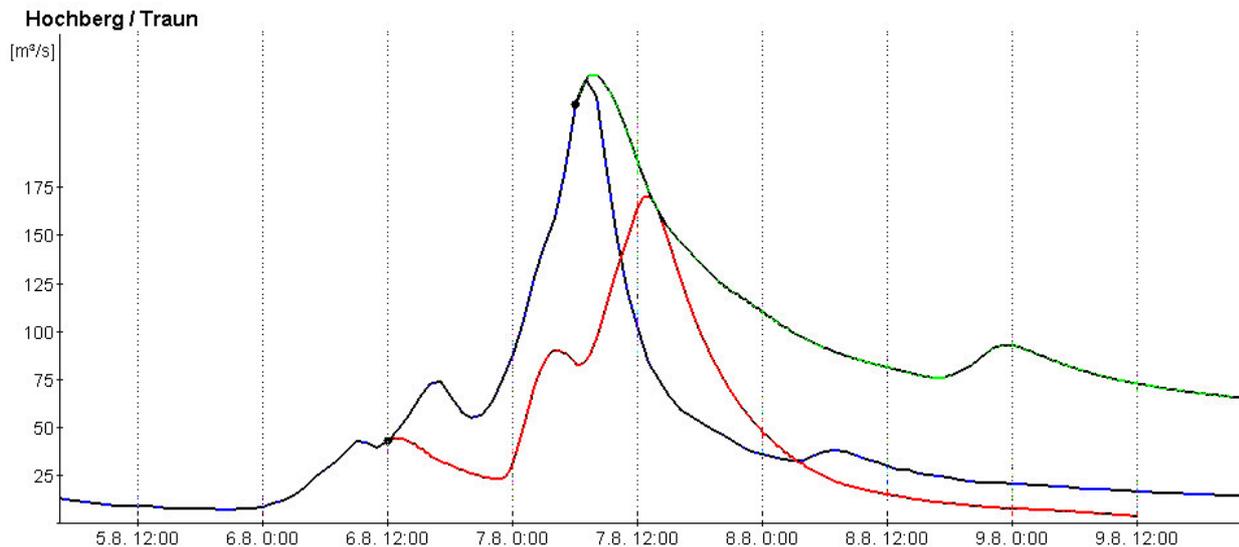


Abb. 3: Beispiel von Vorhersagen auf Basis der Niederschlagsvorhersagen für ein Einzugsgebiet von 270 km².

6.2 Wellenablauf

Liegt der Vorhersagezeitraum innerhalb der Wellenlaufzeiten, so ist zu erwarten, dass die Genauigkeit der Wasserstands- und Abflussvorhersagen deutlich besser ist. Dies ist zwar generell der Fall, es gibt aber auch innerhalb dieser kürzeren Vorhersagezeiträume bei Hochwasser teilweise sehr große Unsicherheiten.

Auffallend waren z.B. beim Hochwasser im August 2005 Abweichungen der Vorhersagen an der Donau. Dort kam es bei den Prognosen vor allem für die Pegel Donauwörth, Ingolstadt, Kelheim und Regensburg zu größeren Unter- wie Überschätzungen der Scheitelhöhen des Hochwassers und des zugehörigen Zeitpunkts. Die Unsicherheiten in den Prognosen entstanden u.a. infolge der Hochwasser-Ausleitungen in die Vorländer im Flussabschnitt Ulm bis Donauwörth und Lechmündung bis Neuburg. Es lagen zuwenig Informationen über die beabsichtigten bzw. vorgenommenen Ausleitungsmengen und Zeitpunkte vor und das Modell war zusätzlich nicht in der Lage die Auswirkungen von Ausleitungen auf die Hochwasserwelle richtig nachzubilden.

Für das Ereignis an Pfingsten 1999, bei dem ähnlich hohe Abflüsse auftraten und an dem das Modell unter anderem angeeicht wurde, konnten der Scheitel und das Volumen der Hochwasserganglinie am Pegel Ingolstadt vom Modell nachvollzogen werden. Es ist deshalb davon auszugehen, dass die Retentionseffekte auch bei vergleichbar hohen Ereignissen auf dieser Flussstrecke sehr unterschiedlich sein

können. Diese Unterschiede werden zurückgeführt auf unterschiedliche Steuerung der Stauanlage und auf unterschiedlichen Ausgangszustand der Retentionsräume, z.B. infolge teilweiser Vorfüllung durch vorangegangene Hochwasser und Wasserverluste durch Füllung des Grund- und Bodenwasserspeichers im Vorland.

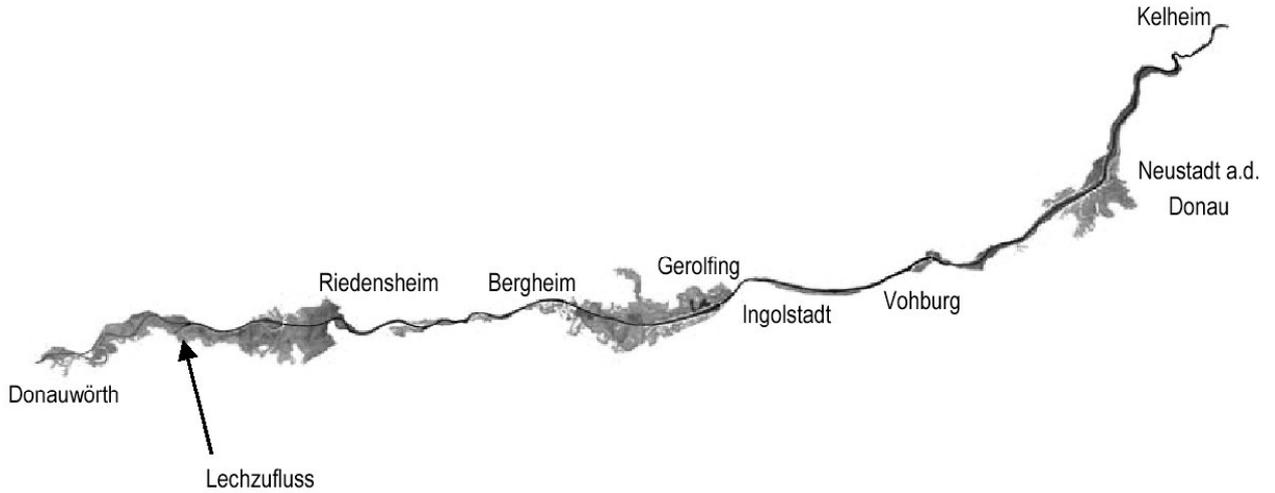


Abb. 4: Überschwemmungsgebiet Auguthochwasser 2005 (2d berechnet).

An der Donaustrecke unterhalb Regensburg bis oberhalb Passau lagen die Vorhersagen für den publizierten Vorhersagezeitraum von 24 Stunden in einem zu erwartenden Ungenauigkeitsbereich von wenigen Dezimetern im Wasserstand. Als Beispiel sind die Vorhersageergebnisse am Pegel Hofkirchen im August 2006 wiedergegeben, hier allerdings für einen Vorhersagezeitraum von 72 Stunden. Bei Vorhersagezeiträumen größer 24 Stunden treten deutlich höhere Abweichungen auf.

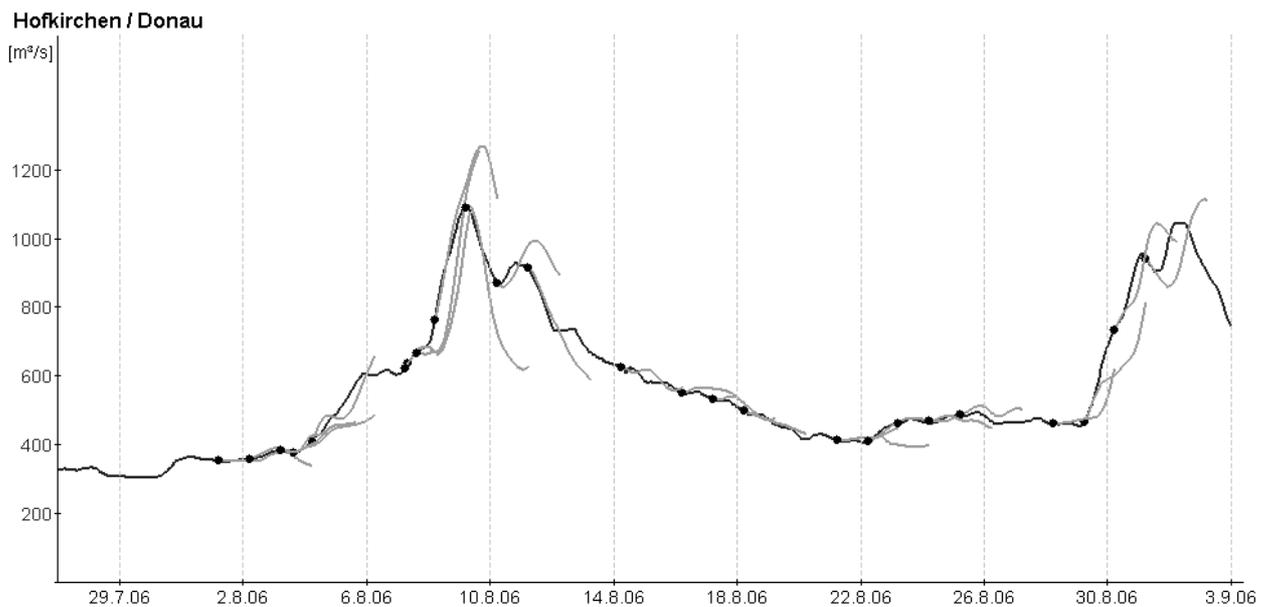


Abb. 5: 72-Stunden Vorhersagen am Pegel Hofkirchen/Donau.

Längere und genauere Vorhersagen für die Donau in Passau sind nur durch Verbesserungen der Vorhersagen am Inn möglich. Hier sind mit dem hydrodynamischen Modell verbesserte Vorhersagen zu erwarten. Als Beispiel sind die Vorhersagen im August 2006 wiedergegeben. Eine gute Übereinstimmung mit den Messungen ergibt sich für den Vorhersagezeitraum von 8 bis 12 Stunden. Darüber hinaus hängen die Ergebnisse von der Vorhersagegüte für die Anschlusspegel Burghausen/Salzach und Oberaudorf/Inn ab. Wie die Abb. 7 zeigt, liegen die Abweichungen bis zu einem Vorhersagezeitraum von ca. 15 Stunden zwischen +/- 20 Prozent.

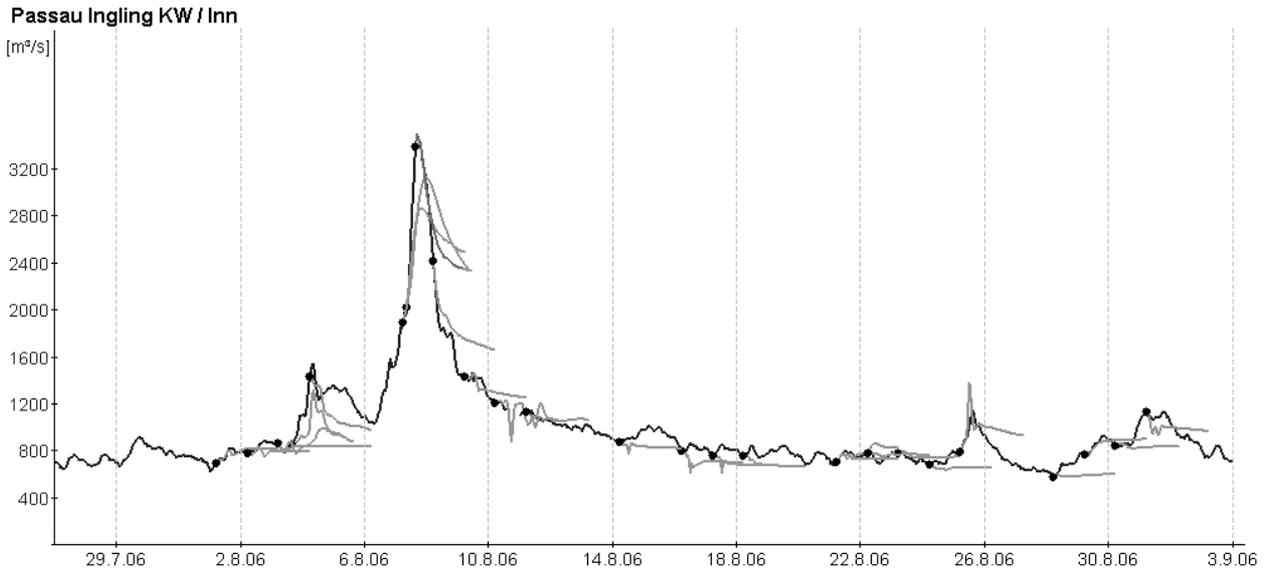


Abb. 6: 48-Stunden Vorhersagen am Pegel Passau Ingling im Vergleich zu den Messwerten.

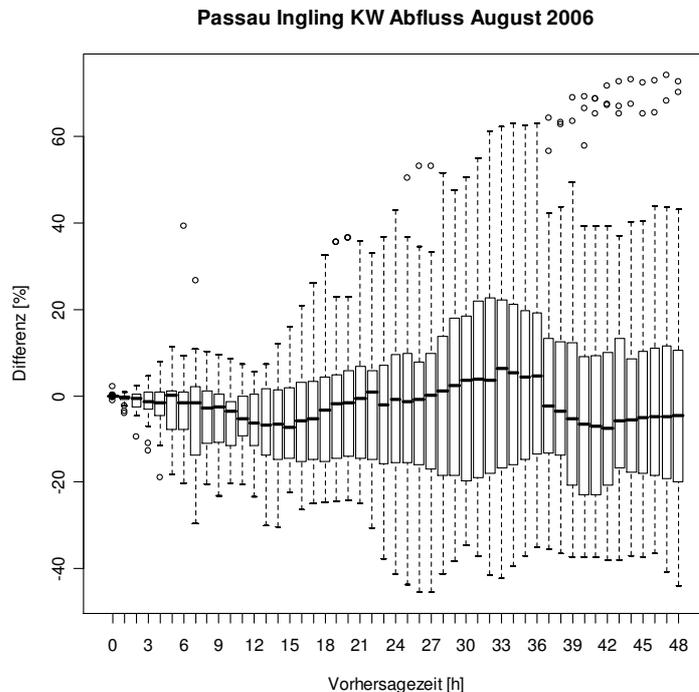


Abb. 7: Prozentuale Abweichung der Vorhersage in Abhängigkeit der Vorhersagezeit. Dargestellt ist der Median, 50%-Quantil, Spannweite und Ausreißer.

7. Weiteres Vorgehen

Da hinsichtlich der Niederschlagsvorhersage weiterhin mit größeren Ungenauigkeiten zu rechnen ist, sind in der Folge Verbesserungen dahingehend zu erzielen, dass die zu erwartende Ungenauigkeit quantifiziert und in den entsprechenden Abflussvorhersagen deutlich gemacht wird. Um den Umgang mit den Vorhersagen und deren Unsicherheit zu erleichtern, sind Angaben über den Vertrauensbereich der Vorhersagen erforderlich. Zur Zeit besteht hier noch ein Defizit, welches durch die Verwendung von Vorhersageensembles beseitigt werden kann.

Mit der Planung weiterer gesteuerter Flutpolder und zur Optimierung bestehender Retentionsmöglichkeiten vor allem an der Donau-Strecke zwischen Ulm und Kelheim (Göttle und Pharion, 2004) sind weitere Untersuchungen zur Wirksamkeit der Maßnahmen auch im Hinblick auf die Genauigkeitsgrenzen der Vorhersagen durchzuführen.

Die mächtigen Schotterkörper im südbayerischen Raum können zu speziellen Problemen bei der Hochwasservorhersage führen. Versickerungen im Schotterkörper der Vorländer oder Wechselwirkungen zwischen Hauptbett und Vorländern erfordern robuste Ansätze für komplexe hydraulische Fragestellungen, die noch entwickelt werden müssen. Die künftige Weiterentwicklung der Vorhersagesysteme wird entsprechend folgende Aufgaben beinhalten:

- Berücksichtigung der Unsicherheiten in der Niederschlagsvorhersage bei der Prognose von Abflüssen, Verwendung von Ensemblevorhersagen.
- Darstellung der Ungenauigkeiten in der Wasserstands- und Abflussprognose.
- Nacheichung der Modelle und qualitative Verbesserung und Weiterentwicklung der Modellgleichungen.
- Hydraulische Untersuchung der Staustufenkette an der Donau, insbesondere im Hinblick auf gesteuerten Rückhalt und Entwicklung von Steuerungsmodellen.
- Untersuchung und Modellierung von Wasserverlusten im Vorland und der Wechselwirkungen mit den Grundwasserbegleitsströmen.

8. Literatur und Internet

Andrade-Leal, R. N. u.a. (2002) Hydrologische Vorhersagemodelle im operationellen Betrieb der Wasserkraftwirtschaft. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Nr. 54/ 9-10.

LfW (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft) (1999) Hochwasser Mai 1999. <http://www.hnd.bayern.de/ereignisse/hw210599/Bericht-HW99.pdf>

LfW (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft) (2002) Hochwasser im August 2002. <http://www.hnd.bayern.de/ereignisse/ereignisse.htm>

LfU (Bayerisches Landesamt für Umwelt) (2005) Hochwasser im August 2005. <http://www.hnd.bayern.de/ereignisse/ereignisse.htm>

StmU (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz) Hochwasserschutz – Aktionsprogramm 2020.

<http://www.stmugv.bayern.de/de/wasser/speicher/strategie.htm>

Blümel, K. und Schneider, G. (2004) Bereitstellung von operativ nutzbaren Vorhersagedaten zur Schmelz- und Niederschlagswasserabgabe aus der Schneedecke, Abschlussbericht, Deutscher Wetterdienst, Geschäftsfeld Hydrometeorologie, Berlin-Buch, 158 p.

<http://www.dwd.de/de/wir/Geschaeftsfelder/Hydrometeorologie/Leistungen/Schneeschemelzvorhersage/Schneeschemelzvorhersage.htm>

Bremicker, M. (2000) Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele -. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 11, 119 S.

Daamen, K., Holle, F., Vogelbacher, A. (2004) Hochwasservorhersage in Bayern. In: Wasserstands- und Abflussvorhersagen in grenzüberschreitenden Flussgebieten. Bundesanstalt für Gewässerkunde, 6/2004 Veranstaltungen, Koblenz.

<http://www.bafg.de/servlet/is/5796/>

DWD - Deutscher Wetterdienst (2003a) Numerische Wettervorhersage.

<http://www.dwd.de/de/Funde/Analyse/Modellierung/Modellierung.htm>

DWD - Deutscher Wetterdienst (2003b) Projekt Radolan. http://www.dwd.de/de/wir/Geschaeftsfelder/Hydrometeorologie/a_href_pages/RADOLAN/index1.htm

DWD - Deutscher Wetterdienst (2005) Hydrometeorologische Aspekte des Hochwassers in Südbayern im August 2005.

<http://www.dwd.de/de/Funde/Klima/KLIS/prod/spezial/regen/Hochwasser-Bayern-2005.pdf>

Dietzer, B. und Weigl, E. (2004) Analysis of Precipitation on 12.08.2002 by means of Adjusted Quantitative Radar Precipitation Data.

http://www.dwd.de/de/wir/Geschaeftsfelder/Hydrometeorologie/a_href_pages/RADOLAN/radar-adjustment.pdf

Göttle, A. und Pharion, H. (2004) Flutpolder als Instrumente des modernen Hochwasserschutzes. Hochwasserschutz und Katastrophenmanagement 2, S. 48-52.

Homagk, P. und Ludwig, K. (1998) Operationeller Einsatz von Flussgebietsmodellen bei der Hochwasser-Vorhersage-Zentrale Baden-Württemberg. Wasserwirtschaft 88, H.4.

Land Salzburg; Hydrologisches Informationssystem zur Hochwasservorhersage HYDRIS: <http://www.salzburg.gv.at/themen/nuw/wasserwirtschaft/64-hydris.htm>

Overhoff, G. und Winner, E. (2000) Das Jahrhunderthochwasser im Griff. Wasser und Boden 52 (6), S. 49-54.

Øverland, H. und Barth, E. (2006) Hochwasservorhersagemodell für Flussgebiete des Inn. Unveröffentlichter Ergebnisbericht. LfU München.

Pellegrini, M., Reichel, G., Senfter, S. (2006) Bayerischer Inn – Entwicklung eines hydrodynamischen Modells. Unveröffentlichter Ergebnisbericht der Phase II des Projektes.

Schiller, H. (1984) Hochwasservorhersage. Informationsberichte des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft 1/84, München.

Vogelbacher, A., Daamen, K., Holle, F.-K., Cohen, I. (2002) Modellgestützte Hochwasservorhersage in Bayern. 21st Conference of the Danube Countries On the Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management, 2-6 September 2002, Bucharest, Romania

Weigl, E. (2000) Online-angeeichte Radarniederschlagsprodukte als zukünftige Komponente für die Hochwasservorhersage. XX. Konferenz der Donauländer über hydrologische Vorhersagen und hydrologisch-wasserwirtschaftliche Grundlagen, Bratislava.

http://www.dwd.de/de/wir/Geschaeftsfelder/Hydrometeorologie/a_href_pages/RADOLAN/Aneichung_Radardaten.pdf

Wiesenegger, H. (2002) Hochwassermanagement in Salzburg. Wiener Mitteilungen Band 164, S. 87-100, <http://www.hydro.tuwien.ac.at/index.php?id=2658>

Wilke, K. und Rademacher, S. (2002) Operationelle Wasserstands- und Durchflussvorhersagen im Rheingebiet. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Nr. 54/ 9-10.

Anschrift des Verfassers:

Dr. Alfons Vogelbacher
Bayerisches Landesamt für Umwelt
Ref. 88 Hochwassernachrichtenzentrale
Lazarettstraße 67, D-80636 München
Tel. +49 (0)89/9214-1575
Fax +49 (0)89/9214-1131
Email: Alfons.Vogelbacher@lfu.bayern.de

PRODUKTE DES DEUTSCHEN WETTERDIENSTES FÜR DIE HOCHWASSERVORHERSAGE

Gabriele Malitz

1. Einleitung

Das Spektrum der benötigten Basis- und Spezialleistungen, die vom Deutschen Wetterdienst (DWD) entsprechend dem DWD-Gesetz (vom 18. September 1998, zuletzt geändert durch Artikel 5 des Gesetzes zur Verbesserung des vorbeugenden Hochwasserschutzes vom 3. Mai 2005) für die wasserwirtschaftlichen Anwender erarbeitet werden, ist breit gefächert. Zum Anwenderkreis dieser Leistungen gehören insbesondere öffentliche Bedarfsträger, die auf der Grundlage von Projektverträgen, Rahmen- und Kooperationsvereinbarungen versorgt werden.

Die Anforderungen der wasserwirtschaftlichen Hauptnutzer meteorologischer Leistungen des DWD insgesamt - einschließlich hydrometeorologischer Spezialleistungen - sind hoch. Um sicherzustellen, dass die Nutzer auf anforderungsgerechte Leistungen zurückgreifen können, die zudem dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen, werden sowohl die Wettervorhersagemodelle als auch die hydrometeorologischen Modelle, Verfahren und anderen Spezialleistungen ständig weiterentwickelt. Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich in erster Linie auf das Instrumentarium des Deutschen Wetterdienstes für die Hochwasservorhersage.

2. Modelle des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zur Wettervorhersage

Der DWD verwendet verschiedene Modelle zur Wettervorhersage, vor allem das globale Modell GME und das darin eingebettete Lokalmmodell LM. Ausgehend von den zum Startzeitpunkt der Prognoserechnung gemessenen Wetterdaten, berechnet das GME weltweit den Wind, die Temperatur, die Feuchte, die Strahlung, den Druck und den Niederschlag für bis zu sieben Tage im Voraus mit einer - gemäß der derzeitigen Rechenleistung möglichen - Maschenweite von ca. 40 km. Um regional detaillierter zu simulieren, wurden Ausschnittmodelle wie das LM mit einer Maschenweite von 7 km entwickelt. Damit können auch kleinräumige Strukturen der Orographie und nicht-hydrostatische Prozesse simuliert werden. Diese sind besonders bei der Entstehung von Starkniederschlägen von Bedeutung. Zurzeit wird eine neue Version des LM erprobt - das LME. Es enthält eine verbesserte Modellphysik und deckt einen größeren Raum (Europa/Nordatlantik) als das bisherige LM ab. Zwar wird jede Wettervorhersage immer mit gewissen Unsicherheiten verbunden sein, da die komplexen Vorgänge in der Natur nie vollständig modellierbar sein werden. Dennoch wird ständig an der Verbesserung der Modelle gearbeitet. Neben der Weiterentwicklung der Computertechnik sind die Anstrengungen zurzeit in erster Linie auf eine höhere räumliche Auflösung, auf eine bessere Parametrisierung der subskaligen Prozesse und eine genauere Bestimmung der Anfangsbedingungen sowie eine stabile Verfügbarkeit optimaler Beobachtungsdaten gerichtet. Zusätzlich wird künftig das LMK mit einer Maschenweite von 2,8 km in der Modellkette eingesetzt. Außerdem eröffnet die

Ensembletechnik neue Möglichkeiten: Auf der Basis des Spektrums variierteter Anfangsbedingungen und der Ergebnisse unterschiedlicher Modelle kann die Zuverlässigkeit der Wettervorhersage ortsbezogen und quantitativ bestimmt werden. Der DWD kann dann sagen, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Starkregenereignis in einer bestimmten Region zu erwarten ist. Die neue Ensembletechnik wird gemeinsam von verschiedenen Wetterdiensten und dem Europäischen Zentrum für Mittelfristige Wettervorhersage (ECMWF) entwickelt.

Es bedarf noch einer Menge an Öffentlichkeitsarbeit, um den Umgang mit Angaben zur Niederschlagswahrscheinlichkeit zu propagieren. Bei den behördlichen Partnern des DWD sind hinsichtlich der Sensibilisierung für Wahrscheinlichkeitsaussagen bereits Fortschritte erzielt worden. In Vereinbarungen zwischen den Bundesländern und der Bundesbehörde DWD ist geregelt, dass detaillierte Hochwasservorhersagen und die entsprechenden amtlichen Hochwasserwarnungen von den Ländern - von den Wasserwirtschaftsämtern, von den Hochwasserwarnzentralen usw. - und nicht vom DWD herausgegeben werden. An der Nahtstelle von Meteorologie einerseits und Wasserwirtschaft andererseits beschränkt sich der DWD vereinbarungsgemäß auf die Warnung vor gefährlichen Wettererscheinungen, wie z. B. Starkregen. Der Deutsche Wetterdienst weist in seinen amtlichen Unwetterwarnungen selbstverständlich die breite Öffentlichkeit auf drohende Gefahren hin.

Der DWD verfügt über das dichteste meteorologische Beobachtungsnetz in Deutschland mit mehr als 3.000 Stationen. Von diesen liefern ca. 800 Stationen unmittelbar nach der Messung die Daten (Echtzeitdaten). Zusätzlich betreibt der DWD das deutsche Niederschlagsmessnetz mit 16 C-Band-Standorten, durch welche die Fläche Deutschlands fast vollständig abgedeckt wird. In qualitativen Radarbildern kann die Niederschlagshöhe nur in graduellen Stufen visualisiert werden. Für wasserwirtschaftliche Zwecke sind i. d. R. jedoch quantitative Niederschlagswerte erforderlich. In Kombination von Beobachtungsnetz und Radarverbund können stündliche Niederschlagshöhen quantitativ flächendeckend bestimmt werden. Das Verfahren RADOLAN (Radar-Online-Aneichung), mit dem quantitative Aussagen zum Starkniederschlag getroffen werden können, wurde vom DWD in Zusammenarbeit mit den wasserwirtschaftlichen Behörden der Bundesländer entwickelt. Darüber hinaus werden die qualitativen Radarbilder der mitteleuropäischen Staaten in ein grenzübergreifendes Kompositbild (CERAD, Central European Radar) umgesetzt.

Ein drittes Beobachtungssystem sind die Wettersatelliten der EUMETSAT, einer von den nationalen Wetterdiensten Europas gemeinsam betriebenen Institution. Die Wettersatelliten haben große Bedeutung bei der Beurteilung des jeweils aktuellen Wetters und bei der Initialisierung von Vorhersagemodellen. Es ist jedoch gegenwärtig noch nicht möglich, mittels Satelliten operationell nutzbare Niederschlagsdaten ausreichender Auflösung und Genauigkeit zu ermitteln.

Für die Entstehung und den Verlauf von Winter- und Frühjahrshochwasserereignissen ist das Zusammenwirken von Niederschlag und Schneedecke von besonderer Bedeutung. Die Treffsicherheit einer Hochwasservorhersage im Winterhalbjahr hängt daher entscheidend von der Qualität und der rechtzeitigen Verfügbarkeit des aktuellen und

vorhergesagten Niederschlagsdargebots (Summe der Schmelzwasserabgabe aus der Schneedecke plus Regen) ab. Als Anschlussmodell zum LME werden daher von den Hydrometeorologen des DWD die speziellen Analyse- und Vorhersagemodelle SNOW-D und SNOW3 betrieben.

3. Analyse stündlicher Niederschläge im Echtzeitbetrieb (RADOLAN)

Seit Juni 2005 liefert RADOLAN als Routineverfahren flächendeckende, räumlich und zeitlich hoch aufgelöste quantitative Niederschlagsdaten aus online angeeichten Radarmessungen im Echtzeitbetrieb für Deutschland. Im Vordergrund steht im Interesse des Katastrophenschutzes die schnelle und genaue Erfassung von Niederschlag in Flusseinzugsgebieten.

Mittels Radar werden nicht die Niederschläge direkt gemessen, sondern nur die von Regen und Schnee in höheren Schichten der Atmosphäre reflektierten Signale. Die quantitativen Niederschlagswerte sind das Ergebnis einer Synthese aus den beiden Datenquellen Radar- und Bodenmessnetz. Einerseits wird der "Precipitation Scan" des Radars mit seinen fünfminütigen Radarniederschlagsdaten im 125-km-Radius um den jeweiligen Standort genutzt. Andererseits wird der stündlich gemessene Niederschlagswert von derzeit mehr als 900 Stationen (einschließlich der Stationen des Verdichtungsmessnetzes der Bundesländer), die mit automatischen Niederschlagsmessgeräten (Ombrometern) ausgerüstet sind, herangezogen.

Für die erfolgreiche Online-Aneichung in ihrer heutigen Form bedarf es verschiedener Vorverarbeitungsschritte, die in den vergangenen Jahren im Offline-Verfahren entwickelt wurden. Das betrifft vor allem die orographische Abschattungskorrektur, die Verfeinerung der Z/R-Beziehungen, die Erstellung des quantitativen Komposits für Deutschland, die Unterdrückung von Cluttern (Falschechos), die Gradientenglättung und die Voraneichung. An einer Verbesserung dieser Verfahren wird ständig gearbeitet. In der Weiterentwicklung der Online-Aneichung wird nach wie vor der Kompensation radarseitiger Defizite (Clutterfilterung, Bright-Band, Niederschlagsdämpfung) große Aufmerksamkeit gewidmet.

Es hat sich gezeigt, dass die für wasserwirtschaftliche Anwendungen erforderliche Datenqualität nur für einen Radius von max. 100 km um einen Radarstandort und unter Verwendung von 40 bis 60 Aneichstationen in diesem Radius erreicht werden kann. Zurzeit gewährleisten die im DWD online verfügbaren Ombrometerdaten der Verdichtungsmessnetze der Bundesländer Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz diese Stationsdichte im Süden Deutschlands. Das Ombrometer-Verdichtungsmessnetz wird derzeit auf weitere Bundesländer ausgedehnt. Neben der technischen Erneuerung des Radarverbundes ist die Verlegung einzelner Radarstandorte geplant, um die Abdeckung der hydrologischen Einzugsgebiete Deutschlands zu optimieren. In diesem Zusammenhang wird auch an der Einbindung von Daten aus den Nachbarländern gearbeitet. Als erster Standort in einem Nachbarland wurde das Radar von Nancy (Frankreich) operationell in RADOLAN eingebunden.

4. Analyse und Vorhersage des Niederschlagsdargebots aus Regen und Schneeschmelze

Bereits seit einigen Jahren werden durch den Deutschen Wetterdienst (DWD) im Winter tägliche Analysen und Prognosen des Wasseräquivalents der Schneedecke und des Niederschlagsdargebots mit dem Modell SNOW-D bereitgestellt. Die erfolgreich praktizierte Kooperation zwischen den Hydrometeorologen des DWD und den Wasserwirtschaftsverwaltungen in einigen Bundesländern ermöglichte besonders in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte im Modellsystem SNOW. Gegenwärtig erfolgt die Ergebnisbereitstellung überwiegend mit dem neuen Modell SNOW3. Im Gegensatz zu SNOW-D kann SNOW3 alle sechs Stunden aktualisierte Werte berechnen. Der interne Rechenschritt beträgt eine Stunde (früher sechs Stunden). Das Rechengitter besteht aus Gitterpunkten mit ca. 1 km horizontalem Abstand. Der „Analysezeitraum“ beträgt 30 Stunden; der „Prognosemodus“ liefert Vorhersagen für die zukünftigen 72 Stunden.

Das Modell SNOW-D liefert eine Echtzeitvorhersage der Schneedeckenentwicklung und der Wasserabgabe aus der Schneedecke. Täglich werden rasterbezogene Analyse- und Vorhersagedaten des Wasseräquivalents der Schneedecke sowie des Niederschlagsdargebots aus Schneedecke und Regen berechnet. Die Schneedeckenentwicklung (Aufbau, Umwandlung, Abbau, Energieaustausch, Wasserbewegung in und Wasserabgabe aus der Schneedecke) ist eng an bestimmte meteorologische Bedingungen geknüpft und wird in speziellen Modulen mit der erforderlichen Modellphysik beschrieben. Der Modell-Input für SNOW-D (Tabelle 1) besteht aus den meteorologischen Daten der Wetterstationen des DWD, den Daten aus den online verfügbaren Niederschlagsmessnetzen sowie dem Output aus dem numerischen Wettervorhersagemodell des DWD (LME).

Als Modell-Output werden sowohl aktuelle Werte der Schneedeckenparameter Schneehöhe (in cm), Wasseräquivalent (in mm) und spezifisches Wasseräquivalent (in mm/cm) als auch Vorhersagewerte der Schneedeckenentwicklung (Wasseräquivalent und Niederschlagsdargebot (in mm) als Summe aus Schmelzwasserabgabe plus Regen für 72 Stunden) bereitgestellt. Die Ergebnisse sind abrufbar für eine Direkteingabe in hydrologische Modelle. Die Bereitstellung der Ergebnisse kann aber auch wahlweise in Kartendarstellung erfolgen, wobei die rasterbezogenen Daten flexibel zu beliebigen Flächenwerten (z. B. der Einzugsgebiete) verdichtet werden.

SNOW3 ist eine Weiterentwicklung des Schneemodells SNOW-D. Im Gegensatz zu SNOW-D liefert SNOW3 alle sechs Stunden aktualisierte Werte. Der interne Rechenzeitschritt beträgt eine Stunde (vormals sechs Stunden). Während SNOW-D Ergebnisse für die gesamte Bundesrepublik Deutschland errechnet, liefert SNOW3 Werte für das Beratungsgebiet im südlichen und südöstlichen Teil Deutschlands und im Gebiet Bregenzerrach (Österreich). Das Rechengitter umfasst gegenwärtig ca. 180.000 Gitterpunkte mit ca. 1 km horizontalem Abstand.

Tab. 1: Input-Daten für das Modell SNOW-D.

Teilprozess	Datenart	Element	zeitliche Auflösung
Analyse	SYNOP-Daten von ca. 145 Wetterstationen	Lufttemperatur	3-h-Werte
		Taupunkttemperatur	3-h-Werte
		Niederschlagshöhe	6-h-Werte
		Sonnenscheindauer	Tagessumme
		Schneehöhe	Tageswert
		spez. Wasseräquivalent	Mo., Mi., Fr.
Verifikation	NSD von zzt. ca. 400 Messstellen AMDA	Schneehöhe	Tageswert
		spez. Wasseräquivalent	Mo., Mi., Fr.
Vorhersage	LME-Output	Lufttemperatur in 2 m Höhe	6-h-Mittel
		Taupunkttemperatur in 2 m Höhe	6-h-Mittel
		Gesamt-Niederschlagshöhe (skaliger und konvektiver Regen und Schnee)	6-h-Summe
		Gesamt-Strahlungsbilanz (lang- und kurzwellig)	6-h-Summe
		Lufttemperatur der 850-hPa-Fläche	6-h-Mittel

Die stündlichen Werte von Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Strahlung und Niederschlag werden in SNOW3 mit Hilfe des Universal-Kriging-Verfahrens auf das Rengitter interpoliert (regionalisiert), so dass für jeden Gitterpunkt Eingangswerte für das Modell vorliegen. Dabei werden nicht nur Messwerte der Stationen des DWD benutzt, sondern auch Werte von verschiedenen, landeseigenen Verdichtungsnetzen. Aus diesen Werten wird dann mit Hilfe von Massen- und Energiebilanzgleichungen sowie Gleichungen der planetarischen Grenzschicht für jeden Gitterpunkt berechnet, wie sich das Wasseräquivalent des Schnees verändert und welche Wassermenge (Niederschlagsangebot) schließlich aus dem Schnee austritt. Messwerte der Schneedecke (Schneehöhe und Wasseräquivalent) liegen nur an drei Tagen in der Woche und für ausgewählte Stationen vor. Bei Vorhandensein von Schneemessungen können die vom Modell berechneten Werte verifiziert und ggf. nachgeführt werden.

In der Tabelle 2 werden die Leistungsparameter der Modelle SNOW-D und SNOW3 verglichen. Die im Modell SNOW3 benutzte Schneephysik und die Regionalisierungsverfahren sind gegenüber den Vorgängermodellen erheblich verbessert worden. Die Fortentwicklung des Modells als Anschlussmodell zum ebenfalls ständig verbesserten lokalen Wettervorhersagemodell des DWD, die Ausweitung des Beratungsgebietes und der Routinebetrieb in einer zentralen Rechnerumgebung sind vorgesehen, so dass bereits an "SNOW4" gearbeitet wird.

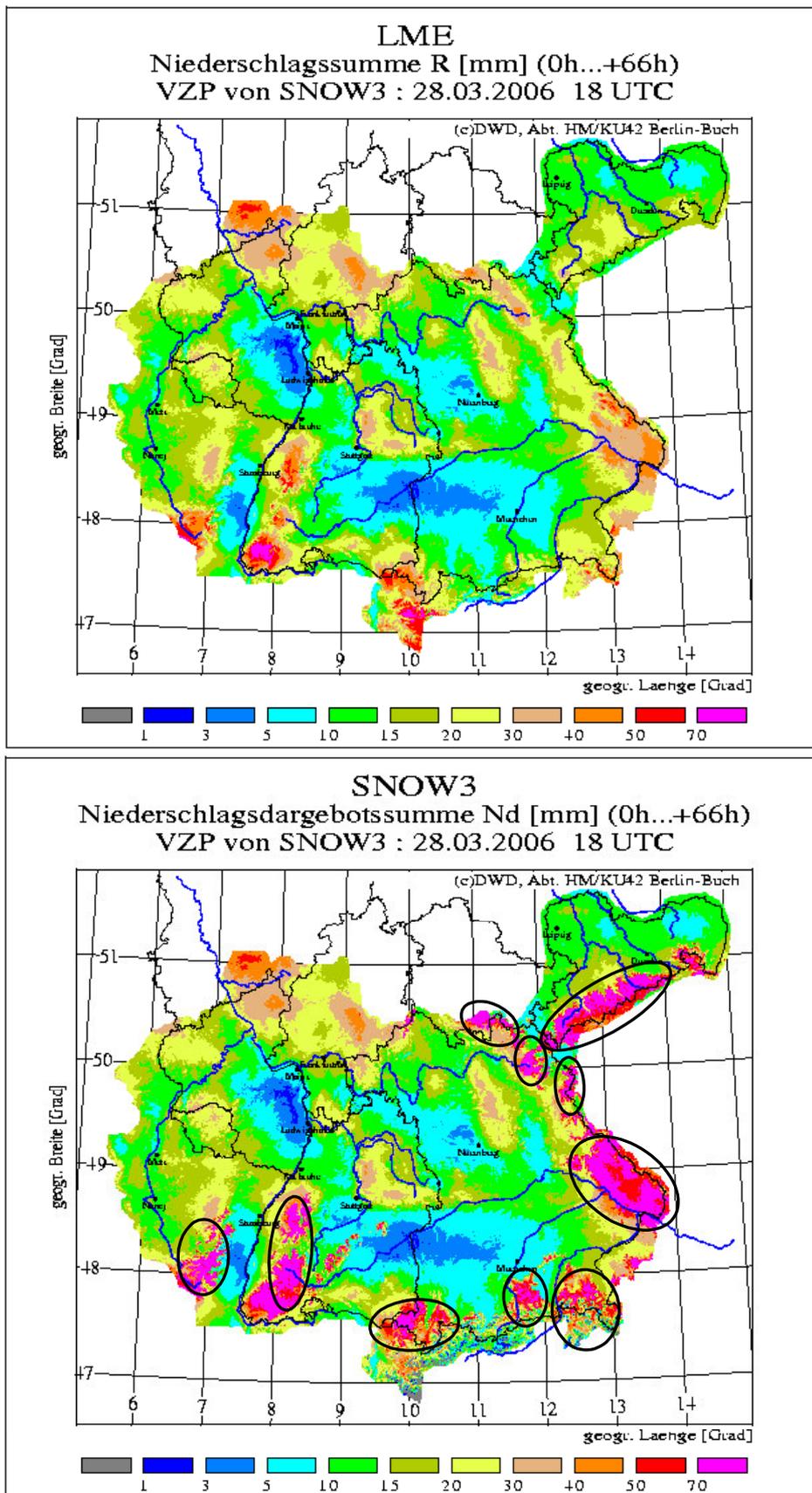


Abb. 1: Vergleich zwischen der Vorhersage des Niederschlags und des Niederschlagsdargebots zum selben Vorhersagezeitpunkt (VZP): In den mit Ellipsen markierten Gebieten übertrifft das SNOW3-Niederschlagsdargebot den LME-Niederschlag.

Tab. 2: Vergleich von SNOW-D mit SNOW3.

SNOW-D	SNOW3
6-h-Zeitschritte	1-h-Zeitschritte (d. h. 1-h-Auflösung aller Input- und Outputdaten sowie der Strahlungsflüsse)
längen- und breitenparalleles Raster (7 km)	Umstellung des Rasters von 7-km- auf 1-km-Auflösung
Nutzung von DWD-Daten	zusätzliches Einbeziehen von Daten aus regionalen Messnetzen, Erweiterung des Beratungsgebiets
24-h-Analyse	30-h-Analyse
1 Lauf pro Tag	4 Läufe pro Tag
Regionalisierung der Messwerte mit einfacher Höhenregression	Regionalisierung der Messwerte mittels Universal Kriging (optimale Interpolation) und nachgeschaltetem Indikator-Kriging
Massenbilanz mit Hilfe des Retentionskonzepts	oder mit dem universeller gültigen SNOW-COMPACTON-Verfahren von Bertle (mit neu integrierter Verdunstung)
ohne echte Schneealterung	verbesserte „reine“ Alterung des Schnees
ohne Nachführung der Retention	Nachführung der Retention
ohne Berechnung der Schneehöhe	Berechnung der Schneehöhe
einfaches Konzept für Temperatur-Schwellenwerte zur Bestimmung des Anteils von festem und flüssigem Niederschlag	Modifikation des Konzepts der Temperatur-Schwellenwerte unter Einbeziehung der atmosphärischen Stabilität
Globalstrahlung wird aus der Sonnenscheindauer geschätzt	Berücksichtigung der Beschattung durch Einführung einer vom Sonnenstand und der Bedeckung abhängigen effektiven Albedo
ohne Einbeziehung von Satellitendaten	Einbeziehung von Satellitendaten (Schnee-Wolken-Klassifikation) im gesamten SNOW3-Gebiet
ohne Einbeziehung von Radarniederschlagsdaten	Einbeziehung von Niederschlagsdaten aus angeeichten Radarmessungen zur Verbesserung und Verdichtung der Informationen über gefallenen Niederschlag
Korrektur des festen Niederschlags als Funktion allein der Intensität	verbesserte Korrektur des festen Niederschlags (zweidimensionales Kurvenfitting)
keine Berücksichtigung des Windes und der atmosphärischen Schichtung	volle Berücksichtigung des Windes und der atmosphärischen Schichtung bei der Berechnung der Wärme- und Wasserdampf Flüsse
ohne Einbeziehen von Landnutzungsdaten	Verwendung von Landnutzungsdaten (Berechnung der Rauigkeitslängen und der Interzeption von Laub- und Nadelwald)
benutzt 2-m-Werte der Temperatur und Feuchte sowie 10-m-Werte des Windes aus dem Lokalmmodell bei der Prognose	benutzt 33-m-Werte und interpoliert selbst (inkl. atmosphärischer Schichtung) auf 2-m-Werte
Schmelzwärmeberechnung sehr einfach	Schmelzwärmeberechnung aus der Schneeoberflächenenergiebilanz
die Schneeoberflächentemperatur bleibt bei kalten Verhältnissen unberücksichtigt	Schneeoberflächentemperatur wird immer berechnet
keine Berücksichtigung der Schneemitteltemperatur und kein Eis	Schneemitteltemperatur und Eis wird berechnet

5. Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der unterbrechungsfreien Wetterüberwachung, der Neugestaltung der Beobachtungsnetze, der erfolgreichen Weiterentwicklung der Modelle und des wetterbezogenen Warnmanagements des Deutschen Wetterdienstes kommen auch den wasserwirtschaftlichen Behörden der Bundesländer zugute. Deren Hochwasservorhersagezentralen werden sogar auf direktem Wege versorgt.

Künftig bietet der DWD ergänzende Vorhersageprodukte an, die Aussagen über die Eintrittswahrscheinlichkeit der Vorhersagen ermöglichen. Ob ein Extremereignis mit hoher Wahrscheinlichkeit eintreten wird, kann sich jedoch auch in Zukunft nicht langfristig vorhersagen lassen. Wenn eine in Bezug auf die Hochwasserentstehung brisante Großwetterlage prognostiziert wird, ist ein größeres Maß an Wachsamkeit geboten. Die erhöhte Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Stark- und Extremniederschlag, ggf. in Verbindung mit weiteren gefährlichen Wettererscheinungen, wird sich dann einige Tage im Voraus und etwas eher als bisher erkennen lassen. Eine räumlich-zeitliche Zuordnung von Extremen in einer solch hohen Detailliertheit, wie sie für hydrologische Vorhersagen und daraus resultierende wasserwirtschaftliche Entscheidungen wünschenswert wäre, können die Modelle bisher nicht liefern.

Anschrift der Verfasserin:

Gabriele Malitz
Deutscher Wetterdienst
Abteilung Hydrometeorologie, KU 41B
Lindenberger Weg 24, D-13125 Berlin-Buch
Tel.: +49 (0) 30 940094 25
Fax: +49 (0) 30 940094 66
E-Mail: gabriele.malitz@dwd.de
<http://www.dwd.de/hydrometeorologie>

NIEDERSCHLAGSPROGNOSEN MIT HOHER ZEITLICHER UND RÄUMLICHER AUFLÖSUNG: FORTSCHRITTE UND PROBLEME

Thomas Haiden

1. Einleitung

Die Hochwasserereignisse der letzten Jahre, wie z.B. das Augusthochwasser 2005 in Westösterreich, oder das Junihochwasser 2006 der Thaya in NÖ, verdeutlichen die Notwendigkeit effizienter Warn- und Prognosesysteme. Dabei gilt: je kleiner das betreffende Einzugsgebiet, desto stärker hängt die Qualität der hydrologischen Prognosen von jener der meteorologischen Prognosen ab. Durchfluss- und Wasserstandsprognosen für die Donau reagieren weniger empfindlich auf Fehler in der Niederschlagsvorhersage als dies bei kleineren Flüssen wie Thaya oder Kamp der Fall ist. Für die Donau in OÖ und NÖ und für den Kamp in NÖ sind gekoppelte hydrologisch-meteorologische Prognosesysteme seit Anfang 2006 in Betrieb. Der meteorologische Input für diese Systeme wird von dem eigens für diesen Zweck an der ZAMG entwickelten Modell INCA (Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis) geliefert. In Abschnitt 2 wird die Funktionsweise von INCA beschrieben. Welche Fortschritte dabei gegenüber bisher verwendeten Niederschlagsprognosen erzielt werden können, erläutert Abschnitt 3. Über die Probleme, die sich im Zuge der Entwicklung ergeben haben, und mögliche Strategien für weitere Verbesserungen gibt Abschnitt 4 Auskunft.

2. Niederschlagsprognose für Donau und Kamp

Die hydrologischen Modelle, die operationelle Durchflussprognosen für Donau und Kamp liefern, werden von der ZAMG mit meteorologischem Input beliefert, und zwar mit Niederschlags- und Temperaturprognosen des INCA-Systems. Das diesem System zugrundeliegende Konzept besteht in der Kombination aller verfügbaren meteorologischen Daten (Modellprognosen, Satellitendaten, Radardaten, Stationsdaten) zu einer Prognose, die hochfrequent (alle 15 Minuten) aktualisiert wird und hohe räumliche Auflösung besitzt (1 km). Es geht über frühere Systeme insofern hinaus, als die Niederschlagsprognose sich nicht nur auf die Ergebnisse meteorologischer Prognosemodelle stützt, sondern durch das Miteinbeziehen von aktuellen Radar- und Stationsdaten diese auch laufend korrigiert.

Die Niederschlagsprognose für Donau und Kamp kommt in folgender Weise zustande. Die Basis bilden Prognosen der numerischen Wettervorhersagemodelle ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) und ALADIN (Aire Limitee Adaptation Dynamique Developpement). Das ECMWF-Modell ist ein globales Wettermodell, das am europäischen Wetterzentrum in Reading (Großbritannien) betrieben wird. Es hat eine Auflösung von ca. 25 km und liefert zweimal täglich Prognosen (00-Uhr Lauf, 12-Uhr Lauf) bis zu +10 Tagen. Das ALADIN-Modell ist ein von mehreren europäischen Ländern gemeinsam entwickeltes Ausschnittsmodell mit einer Auflösung von etwa 10 km. Es wird an der ZAMG gerechnet und liefert

ebenfalls zwei Prognosen pro Tag (00-Uhr Lauf, 12-Uhr Lauf). Der Prognosehorizont beträgt 48 h.

In einem ersten Schritt werden die Niederschlagsprognosen von ECMWF und ALADIN mit jeweils geographisch variabler Gewichtung zu einer optimierten Prognose kombiniert. Es hat sich gezeigt, dass durch diese Modellkombination der mittlere Fehler der Niederschlagsprognosen gegenüber den Einzelmodellen um 20-30% reduziert werden kann. Durch diese Gewichtung werden wiederkehrende systematische Fehler, die in den beiden Modellen unterschiedlicher Natur sind, zu einem großen Teil eliminiert.

Da die Modelle jeweils nur zwei Prognosen pro Tag liefern, und mehrere Stunden für die eigentliche Modellintegration benötigt werden, kann eine Prognose von ECMWF oder ALADIN mehr als 12 Stunden alt sein. Konkret liegt z.B. um 15Z (=16 Uhr MEZ) als aktuellster Prognoselauf noch immer der 00Z-Lauf der letzten Nacht vor, d.h. die aktuelle Entwicklung des Niederschlagsgeschehens der letzten 15 h ist in der Prognose nicht berücksichtigt. Aus diesem Grund ist es nötig, die Modellprognosen mit zusätzlichen, aktuellen Daten zu kombinieren, um einen verbesserten Input für die hydrologische Vorhersage liefern zu können. Zu diesem Zweck wird aus Radar- und Stationsdaten alle 15 Minuten eine Analyse der aktuellen geographischen Niederschlagsverteilung berechnet.

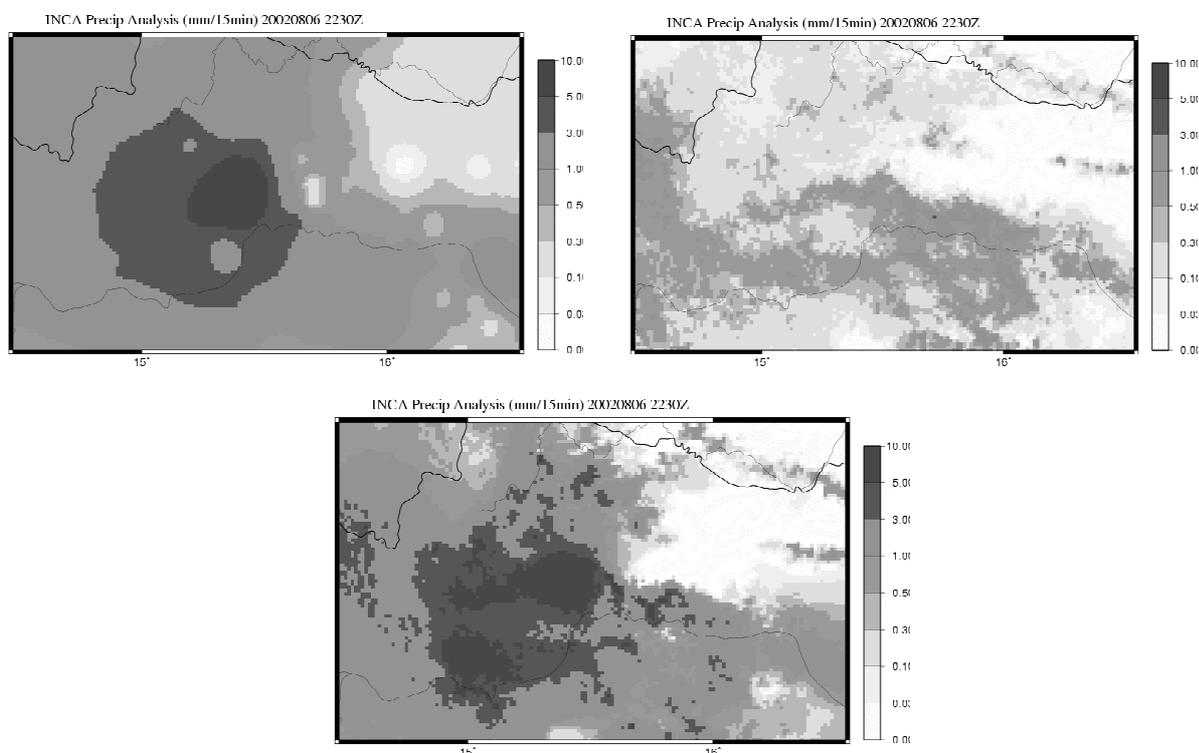


Abb. 1: Niederschlagsanalysen aus reiner Stationsinterpolation (links oben), Radardaten unkorrigiert (rechts oben), und die in INCA berechnete Synthese (unten) (Haiden et al., 2006). Beispiel vom Hochwasserereignis 2002 im Waldviertel.

Bei der Berechnung der Niederschlagsanalyse ist die Kombination von Radardaten mit Stationsdaten besonders wichtig, da beide Datensätze ihre spezifischen Stärken und Schwächen haben. Radardaten sind räumlich hochauflösend (~1 km), aber quantitativ unsicher. Stationsdaten weisen eine höhere quantitative Verlässlichkeit auf, erlauben aber nicht die räumliche Auflösung einzelner Niederschlagszellen. Der in INCA verwendete Algorithmus stützt sich mengenmäßig primär auf die Stationsdaten (die an den Stationen beobachteten Werte werden im wesentlichen reproduziert) und bei der Interpolation zwischen den Stationen auf die aus den Radardaten kommende räumliche Struktur (Abbildung 1).

Aus mehreren aufeinanderfolgenden 15-min Niederschlagsanalysen werden Verlagerungsvektoren berechnet, mit denen die Bewegung der Niederschlagsfelder in die unmittelbare Zukunft extrapoliert wird („Nowcast“). Diese einfache Extrapolationsmethode ist im Mittel für bis zu +4 h den Modellprognosen überlegen. Eine zeitlich abhängige Gewichtung (in den ersten 2 Stunden 100%, dann linear bis +6 h auf 0% abnehmend) kombiniert den Nowcast mit den Modellprognosen.

3. Fortschritte

Einer der wesentlichen Fortschritte in der Niederschlagsprognose für Donau und Kamp liegt in der automatisierten algorithmischen Kombination unterschiedlicher Datenquellen. Frühere Systeme beruhten auf der Prognose einzelner Wettermodelle (Haiden und Stadlbacher, 2002). Der jeweils diensthabende Meteorologe bildete die alleinige Schnitt- und Verknüpfungsstelle für die Synthese meteorologischer Prognoseunterlagen mit aktuellen Beobachtungen. Die Hauptaufgabe und –herausforderung der Meteorologen in einem Wetterdienst ist es nach wie vor, aus der Vielzahl prognostischer Unterlagen und aktueller Beobachtungen eine konsistente Prognose zu formulieren. Vom Menschen kann dies aufgrund zeitlicher Beschränkung jedoch quantitativ nur für ausgewählte Punkte (z.B. Landeshauptstädte) durchgeführt werden. Mit dem automatisierten INCA-System kann die Synthese auf einem Raster flächendeckend für ganz Österreich berechnet werden. Auch zeitlich kann durch die Automatisierung eine höhere Dichte erreicht werden. Während die Prognose des Meteorologen bestenfalls alle 2-3 Stunden aktualisiert wird, liefert INCA alle 15 Minuten eine neue Prognose.

Verbesserungen in der Qualität der Niederschlagsprognose, d.h. eine Reduktion des mittleren Prognosefehlers, konnten vor allem durch zwei Dinge erzielt werden. Erstens durch die Modellkombination (ECMWF, ALADIN), zweitens durch die Kombination von Nowcasting-Methoden mit den Ergebnissen herkömmlicher Modelle. Abbildung 2 zeigt ein Beispiel einer solchen kombinierten Prognose für das Hochwasserereignis 2002.

Abgesehen von der eigentlichen Prognose stellt die Tatsache, dass alle 15 Minuten flächendeckend für ganz Österreich eine hochaufgelöste Niederschlagsanalyse berechnet wird, eine entscheidende Neuerung dar. Selbst in kleinen Einzugsgebieten mit Laufzeiten von 1-2 Stunden hat Information über die aktuelle Niederschlags-

intensität (siehe Beispiel in Abbildung 3) einen prognostischen Wert. Ein Fortschritt ist auch die Kombination der Daten zweier Stationsnetze, nämlich des ZAMG-eigenen TAWES-Netzes (TAWES = Teilautomatische Wetterstation) und des Stationsnetzes der Landeshydrologie NÖ. Das TAWES-Netz umfasst ca. 140 Stationen in ganz Österreich, das Netz der Landeshydrologie NÖ etwa 40 Stationen mit digitaler Fernübertragung aktueller Werte. Welche Probleme bei der Erstellung der Niederschlagsanalysen auftreten, und wie unterschiedlich die Qualität der Analysen in verschiedenen Regionen ist, wird im nachfolgenden Abschnitt beschrieben.

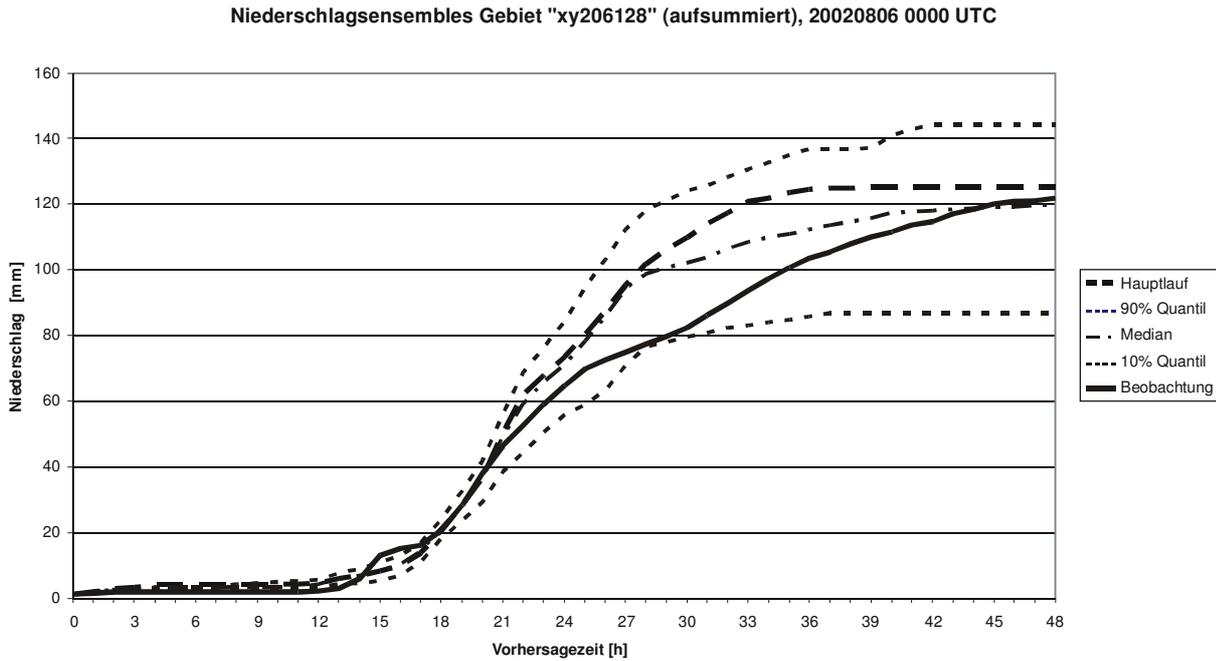


Abb. 2: Beispiel einer 48-h INCA Niederschlagsprognose, nachgerechnet für das Hochwasserereignis 2002 im Einzugsgebiet der Traun.

INCA RR Analyse (mm/15min) 20050523 1500Z

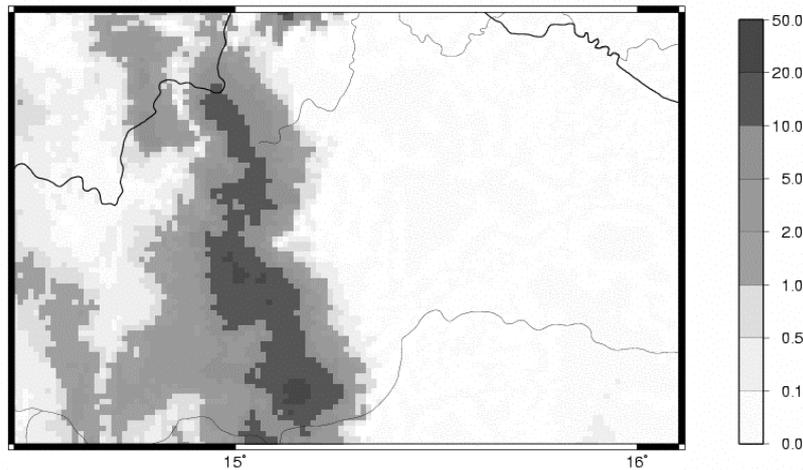


Abb. 3: Analyse einer Gewitterlinie im Mai 2005 mit heftigen konvektiven Niederschlägen im Bereich des westlichen Waldviertels. Die Niederschlagsintensität erreicht Werte von mehr als 20 mm /15min.

4. Probleme

Die Probleme, die in der Niederschlagsanalyse und –prognose auftreten sind vielfältig und werden durch die Verwendung der meteorologischen Daten in hydrologischen Modellen oft noch verdeutlicht. In einer Situation mit hoher Vorbefeuchtung des Einzugsgebiets kann ein Fehler von 20% in der Niederschlagsmenge (aus meteorologischer Sicht eine als ‚sehr gut‘ zu klassifizierende Prognose) zu einem Fehler von 50% in der Abflussspitze führen, was wiederum die effiziente Planung etwaiger Schutzmaßnahmen schwierig macht.

Schwierigkeiten ergeben sich bereits in der Niederschlagsanalyse, also der flächenhaften Ermittlung aktuell gefallener Niederschläge. Da die Stationsbeobachtungen als Punktwerte in der Regel nur für eine sehr kleine Fläche um die Station repräsentativ sind, ist dabei die Einbindung von Radardaten unerlässlich. Diese wiederum sind mit einer Reihe von Unsicherheiten und Fehlern behaftet, wie z.B. Abschattungseffekte durch Topographie oder vorgelagerte Niederschläge, oder Unsicherheiten durch unterschiedliche Reflektivität von festem und flüssigem Niederschlag. Die Umrechnung der gemessenen Größe Reflektivität auf eine Niederschlagsrate beruht auf der Annahme eines typischen, mittleren Tropfenspektrum. In Einzelfällen kann sich das Größenspektrum der Tropfen von diesem Mittel jedoch deutlich unterscheiden, sodass es zu Über- oder Unterschätzungen kommt.

Abschattung des Radarstrahls durch die Topographie ist vor allem in den Bundesländern Vorarlberg, Tirol und Salzburg ein Problem, beeinträchtigt aber grundsätzlich die Niederschlagsanalysen in den alpinen Regionen aller Bundesländer. Im Rahmen des INCA-Systems werden zusätzlich zu den Daten der österreichischen Radarstationen deutsche und schweizer Radardaten verwendet. Dadurch konnten die Analysen in Vorarlberg und Teilen Nordtirols verbessert werden. Ein Gebiet, das hydrometeorologisch große Bedeutung hat, aber durch Radardaten kaum erfasst wird, ist der Oberpinzgau bzw. die Hohen Tauern. Im INCA-System beruht die Analyse in diesen Gebieten dementsprechend primär auf den Messwerten der TAWES-Stationen.

Es wurde im Zuge der Entwicklungen auch getestet, ob die im sehr viel dichteren Messnetz der nicht online übertragenden Hydrostationen enthaltene klimatologische Information für eine verbesserte Interpolation verwendet werden kann. Dabei zeigte sich, dass für 24-h Niederschläge eine solche Verbesserung tatsächlich erzielt werden kann, dass sich bei 1-h Niederschlagsanalysen (umso mehr bei 15-min Analysen) jedoch kein signifikanter Vorteil mehr ergibt. In diesem Zeitscale sind die räumlichen Niederschlagsmuster offensichtlich zu variabel, und die topographisch-klimatologischen Strukturen treten im Vergleich zu anderen Effekten in den Hintergrund.

Zur Abschätzung des Niederschlagsverlaufs zwischen den Stationen muss also in erster Linie auf die Radardaten zurückgegriffen werden. Im INCA-System werden diese zunächst klimatologisch skaliert, und dann durch Vergleich mit aktuellen Messwerten an den Stationen noch einmal kalibriert, bevor sie in die Analyse eingehen. Verbesserungsmöglichkeiten gibt es hier noch eine ganze Reihe. Anstelle

der klimatologischen Skalierung sollte letztlich eine Niederschlagsart-bezogene treten, da besonders in den Übergangsjahreszeiten die Schneefallgrenze starken Schwankungen unterliegen kann, und auch zwischen flächigem und zellularem Niederschlag unterschieden werden sollte.

Was die Qualität der Niederschlagsanalyse betrifft, kann die aktuelle Situation in Österreich wie folgt zusammengefasst werden. In Niederösterreich, das bei dieser Problematik gewissermaßen eine Vorreiterrolle einnimmt, ist die Analyse am besten, vor allem deshalb, weil es hier gelungen ist, die Daten der Stationsnetze von ZAMG und Landeshydrologie zu kombinieren. Im Burgenland, in Oberösterreich, der Steiermark und Kärnten ist die Analyse problematischer, weil nur die TAWES-Daten zur Verfügung stehen, und einige Regionen dieser Bundesländer vom Radar nicht ausreichend eingesehen werden. In den Bundesländern Vorarlberg, Tirol und Salzburg ist die Situation absolut unbefriedigend, vor allem weil das Radar am Patscherkofel bei Innsbruck eine sehr eingeschränkte Sicht in die umliegenden Gebiete hat. In Vorarlberg konnte dieses Problem seit Beginn dieses Jahres durch Einbindung der Schweizer Radardaten etwas gemildert werden. Von großem Vorteil für die westlichen Bundesländer wäre die zusätzliche Einbindung aller verfügbaren digital fern-übertragenden Stationen des hydrologischen Messnetzes in das INCA-System.

Die Qualität der Niederschlagsprognosen für die jeweils nächsten Stunden (=Nowcast) hängt eng mit jener der Analysen zusammen. Die oben beschriebene unterschiedliche Qualität der Niederschlagsanalysen in den Bundesländern gilt demnach analog für Prognosen im Nowcastbereich. In Regionen, die vom Radar nicht oder schlecht eingesehen werden, reduziert sich die Niederschlagsanalyse auf eine Stationsinterpolation mit entsprechend ‚glatten‘ räumlichen Strukturen, aus denen keine verlässlichen Verlagerungsvektoren abgeleitet werden können.

Außerhalb des Nowcastbereichs, also für alle Prognosen jenseits von +6 h gilt, dass die Qualität der Vorhersage stark von der Art des Ereignisses (flächig, konvektiv) und von der topographischen Charakteristik des Gebiets (Flachland, Alpenrand, inneralpin) abhängt. Starkniederschlagsereignisse in den klassischen Staugebieten wie Salzkammergut, Bregenzerwald oder Karawanken werden im Mittel besser prognostiziert als solche, die im Flach- oder Hügelland auftreten. Aber auch in den Staugebieten muss mit Fehlern der Größenordnung 50% für die Gesamtniederschlagsmenge aus einem Ereignis gerechnet werden. Um die Unsicherheit im Einzelfall besser abschätzen zu können, werden Ensemble-Rechnungen durchgeführt, d.h. es wird nicht nur eine, sondern z.B. 50 Realisierungen möglicher Niederschlagsverteilungen gerechnet und dem hydrologischen Modell als Input zur Verfügung gestellt. Aus dem resultierenden Bündel hydrologischer Prognosen können Vertrauensbereiche des Durchflusses abgeleitet werden.

Das räumliche Auflösungsvermögen der Niederschlagsprognose geht mit zunehmender Prognosezeit sehr rasch verloren. Das INCA-System arbeitet technisch auf einem 1-km Raster, aber bereits in der Analyse liegt die räumliche Genauigkeit im besten Fall eher bei 2-3 km. Bei stark instationären Ereignissen (Gewitterzellen) kann sich die zeitliche Verzögerung zwischen dem Moment, in dem das Radar den

Niederschlag in der Atmosphäre erfasst und jenem, in dem der Niederschlag am Boden ankommt, als räumlicher Fehler auswirken. Im Nowcastbereich wächst die räumliche Unsicherheit schnell auf 5-10 km an und erreicht nach einigen Stunden jenes Ausmaß, welches für die Prognosen heutiger Wettermodelle charakteristisch ist. Dieses beträgt bei Vorhersagen für 1-2 Tage größenordnungsmäßig 50 km bei guten Prognosen, und 100-200 km in schlecht erfassten Situationen.

Abbildung 4 zeigt, wie der mittlere Fehler der Niederschlagsprognose mit abnehmender Gebietsgröße und kürzerem Zeitintervall zunimmt. So ist beispielsweise bei einer Gebietsgröße von 1000 km² und einer Aussage über 3-h Niederschlags-summen mit einem etwa doppelt so großen Fehler zu rechnen, als bei einer Gebietsgröße von 5000 km² und einer Aussage über 24-h Summen. Besonders bei Zeitintervallen unterhalb von 3 h nimmt der Fehler stark zu.

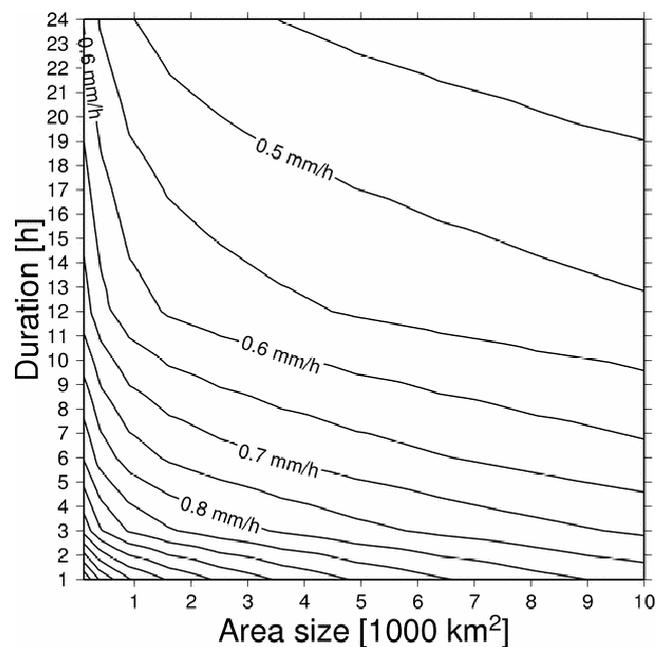


Abb. 4: Mittleres Fehlerverhalten der Niederschlagsprognose in Abhängigkeit von Gebietsgröße und Zeitintervall (Kann und Haiden, 2005).

Ein praktisches Problem, mit dem alle Anwender meteorologischer Prognosen zu kämpfen haben, ist deren nicht-konstante, stark wetterlagenabhängige Qualität. Auch wenn sich ein meteorologisches Prognosesystem nicht verändert, werden Niederschlagsereignisse im Laufe der Zeit mit sehr unterschiedlicher Güte prognostiziert werden, weil die Vorhersagbarkeit der Atmosphäre starken Schwankungen von Tag zu Tag unterliegt. Da an dieser Tatsache nichts zu ändern ist, ist die derzeit einzig mögliche Strategie zur Milderung des Problems die oben beschriebene Methode der Ensembleprognosen, die zumindest eine bessere Einschätzung der aktuellen Unsicherheit erlaubt.

5. Ausblick

Welche Verbesserungen sind in der quantitativen Niederschlagsprognose in den nächsten Jahren bzw. Jahrzehnten zu erwarten? Hier ist zunächst die kontinuierliche Weiterentwicklung der Wettervorhersagemodelle zu berücksichtigen. Die numerische Wetterprognose, die in ihrer heutigen Form ja erst in den 70er-Jahren des 20. Jahrhunderts begonnen hat, ist eine vergleichsweise junge wissenschaftliche Disziplin. Dementsprechend stehen noch eine Reihe von Möglichkeiten der Modellverbesserung offen, beispielsweise in der Formulierung der niederschlagsbildenden Prozesse, oder in der Verwendung von Radar- und Satellitendaten im Modell. Wenn der Trend der letzten beiden Jahrzehnte als Anhaltspunkt für die weitere Entwicklung genommen werden kann, ist mit einer Verbesserung in der Größenordnung von 1 Prognosetag / Dekade zu rechnen. Mit anderen Worten, eine 3-Tages Prognose hätte in 10 Jahren etwa die gleiche Qualität wie eine 2-Tages-Prognose heute.

Diese Aussage gilt zunächst nur für die Güte mit der die Strömung, d.h. die Wetterlage, prognostisch erfasst wird. Inwieweit sich die Verbesserungen in der quantitativen Niederschlagsprognose äußern werden, wird von Fortschritten in der Simulation konvektiver Niederschlägen abhängen. Gewitter- und Schauerzellen führen zu den größten Prognosefehlern beim Niederschlag. Selbst die Prognose für den gleichen Tag, also etwa die Vormittags-Prognose der nachmittäglichen Gewitter, ist mit großen Unsicherheiten bezüglich Ort, Auslösezeitpunkt und Intensität verbunden. Häufig ist eine Luftmasse von der Größe mehrerer Bundesländer ausreichend labil, die tatsächliche Entladung dieser Labilität durch Gewitter jedoch ausgesprochen kleinräumig. Diese Situation betrifft auf hydrologischer Seite vor allem kleine und kleinste Einzugsgebiete von der Größenordnung 1000 km² und weniger.

Seitens der Modellentwickler wird das Problem der Gewitterprognose vor allem in zwei Richtungen angegangen, erstens durch explizite, detailliertere Simulation einzelner Gewitterzellen, zweitens durch die Berücksichtigung von Radardaten in den Modellen. Beide Ansätze befinden sich allerdings noch im Experimentierstadium, und es wird noch 5-10 Jahre dauern, bis sich Verbesserungen in diesem Bereich auf die tägliche Wetterprognose auswirken werden.

Im Nowcastingbereich (Prognose für die nächsten 1-2 Stunden) versucht die ZAMG durch Weiterentwicklung des INCA-Systems Verbesserungen in der Prognose von Gewitterniederschlägen zu erzielen. Es wird an einem Algorithmus gearbeitet, der zusätzlich zur Verlagerung eine Abschätzung der Intensitätsänderung von Gewitterzellen liefert. Die erste Version des Algorithmus zeigt eine leichte Verbesserung (Haiden und Steinheimer, 2006), aber um eine signifikante Qualitätssteigerung zu erreichen, muss zunächst die Analyse des bodennahen Windfeldes verbessert werden. Die Windanalyse wird aus diesem Grund einer der Schwerpunkte der Entwicklungen an der ZAMG im Jahr 2007 sein.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass in den letzten Jahren in Österreich in der hochauflösenden Niederschlagsprognose wesentliche Schritte vorwärts gemacht wurden, sodass es mittlerweile sinnvoll ist, hydrologische Modelle mit prognostischem

meteorologischen Input zu betreiben. Gleichzeitig sind die Unsicherheiten der Prognosen noch immer groß und können nur schwer mit den steigenden Erwartungen der Anwender Schritt halten. Umso mehr ist die Meteorologie gefordert, vorhandene Verbesserungspotentiale zu nutzen und weitere Entwicklungen in der Niederschlagsprognose vorrangig voranzutreiben.

6. Literatur

Haiden, T., und K. Stadlbacher, 2002 Quantitative Prognose des Flächenniederschlags. Österr. Wasser- u. Abfallwirtschaft, 54, 135-141.

Haiden, T., und M. Steinheimer, 2006 Improved nowcasting of precipitation based on convective analysis fields. Adv. Geosci. (submitted)

Haiden, T., A. Kann, K. Stadlbacher, M. Steinheimer, und C. Wittmann, 2006 Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) - System overview. ZAMG report, 40p. http://www.zamg.ac.at/fix/INCA_system.doc

Kann, A., und T. Haiden, 2005 The August 2002 flood in Austria: sensitivity of precipitation forecast skill to area size and duration. Meteorol. Z., 14, 369-377.

Anschrift des Verfassers:

Dr. Thomas Haiden
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik
Hohe Warte 38, A-1190 Wien
Tel: +43-1-36026-2322
Fax: +43-1-36026-2320
Email: thomas.haiden@zamg.ac.at

SCHNEEINFORMATIONEN AUS FERNERKUNDUNGSDATEN FÜR DIE HOCHWASSERVORHERSAGE

Juraj Parajka, Günter Blöschl und Robert Kirnbauer

1. Einleitung

Schnee beeinflusst Hochwässer in Österreich durch zweierlei Mechanismen. Zum einen kann der geschmolzene Schnee direkt zum Abfluss beitragen. Während in den Alpen manche Hochwässer ausschließlich durch Schneeschmelze ausgelöst sind, wird im Osten Österreich Schneeschmelze vor allem in Kombination mit Regen auf eine existierende Schneedecke wirksam. Prozessanalysen von Hochwässern der letzten 30 Jahre in 490 Gebieten Österreichs zeigten, dass 3% der Jahreshochwässer ausschließlich durch Schneeschmelze ausgelöst wurden und 21% der Hochwässer auf Schnee-auf-Regen zurückzuführen sind (Merz, 2002). Zum anderen erhöht die Schneeschmelze in der Regel den Bodenfeuchtestatus im Gebiet sehr stark, da das Schmelzwasser über Wochen in geringen Mengen freigesetzt wird und die Verdunstung gering ist. Fällt dann Niederschlag auf größtenteils gesättigte Böden, sind die Abflussbeiwerte sehr hoch und ein weit größerer Anteil des Niederschlages kann zum Abfluss kommen, als wenn keine Schneeschmelze vorangegangen ist (Merz et al. 2006).

Bei modernen Hochwasservorhersagemodellen werden Schneeprozesse in der Regel durch eine numerische Simulation des Schneedeckenaufbaus und des Abschmelzens der Schneedecke beschrieben. Eingangsdaten sind der Niederschlag und die Lufttemperatur an einzelnen Stationen. Manchmal werden auch andere meteorologische Kenngrößen wie die Globalstrahlung verwendet. Der Vorteil solcher Simulationsrechnungen besteht darin, dass damit im Prinzip flächendeckend (und flächendetailliert) und für jeden Zeitpunkt Werte des Schneewasserwertes und der Schneeschmelze angegeben werden können. Allerdings ist die Genauigkeit derartiger Simulationsrechnungen gebunden an die Genauigkeit der Eingangsdaten und deren räumliche Repräsentativität. Niederschlagsdaten, insbesondere bei Schneefall, sind oft mit markanten Unsicherheiten behaftet (Sevruk, 2004) und die Niederschlagsverteilung kann räumlich sehr variabel sein. Die Lufttemperatur variiert im Raum meist weniger. Allerdings sind die Schneeprozesse sehr empfindlich auf auch kleine Änderungen der Lufttemperatur. Kleine Abweichungen in den Eingangsdaten der Lufttemperatur können zu großen Unterschieden in den Schneesimulationen führen.

Um die auf die Eingangsdaten zurückzuführende Unsicherheit zu reduzieren und die Schneeprozesse genauer zu erfassen, können Schneeinformationen bei der Hochwasservorhersage herangezogen werden. Dabei kommen zum einen Messungen des Schneewasserwertes in Form von Schneekursen zur Anwendung, die meist entlang einer Route im Gelände angelegt sind. Solche Schneekurse werden für die Abschätzung der Schneerücklage im Gebiet für Zuflussprognosen zu Alpinen Speichern verwendet. Bei der Hochwasserprognose sind die Einzugsgebiete meist

größer und die Schneevertelung ist oft räumlich derart variabel, dass solche Punktmessungen nur eine beschränkte Aussagekraft besitzen (Blöschl, 1999).

Eine Möglichkeit, auch räumlich repräsentative Schneeeinformationen zu erhalten, ist der Einsatz von Fernerkundungsdaten der Schneedecke. Die grundsätzliche Überlegung dabei ist, dass zur flächendeckenden Bestimmung der Schneedeckenverhältnisse auch flächendeckende Informationen verwendet werden sollen. Einem Vorschlag von Blöschl et al. (1991) folgend werden Fernerkundungsdaten deshalb in verschiedenen Ländern im Zusammenhang mit der numerischen Modellierung des Schneedeckenaufbaus und der Schneeschmelze eingesetzt (z. B. Wigmosta et al., 1994; Davis et al., 1995; Cline et al., 1998). Eine Möglichkeit besteht darin, die Daten terrestrisch aufzunehmen, die andere, auf Satellitendaten zurückzugreifen. Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick über vorhandene Fernerkundungsdaten, über Methoden, diese für die Hochwasservorhersage heranzuziehen und zeigt für einen bestimmten Satellitendatensatz (MODIS) die Möglichkeiten zur Verbesserung von Abflusssimulationen auf.

2. Terrestrische Fernerkundungsdaten

Terrestrische, also bodengestützte, Verfahren können sehr gut Schneebedeckungsmuster erfassen. Obwohl es sich dabei nur um binäre Information (schneebedeckt/aper) handelt, sind solche Daten für die Schneemodellierung sehr aussagekräftig. Photographien der Schneebedeckung werden seit langem für Forschungszwecke angewandt (Kirnbauer et al., 1991; Aschenwald, 2001). Digitale Photographie und neue Methoden der Datenfernübertragung machen die terrestrische Erfassung der Schneebedeckung auch für den operationellen Betrieb der Hochwasservorhersage interessant. Abbildung 1 zeigt eine typische Aufstellungsmöglichkeit, bei der eine digitale Kamera entsprechend eingehaust auf einem Messmast montiert wird. Aus den digitalen Aufnahmen kann dann durch Verschneidung eines photogrammetrischen Strahlenbündels (sog. Monoplotting) mit einem digitalen Geländemodelle eine koordinatenmäßige Auswertung der Schneebedeckung erfolgen (Waldhäusl et al., 1986).

Im Zuge des Kater II Projektes wurden derartige Kameras auf der Rax und am Hochschwab montiert. Dabei kam eine Digitalkamera mit 3,2 Megapixel, Microserver und ISDN Modem für die Fernwartung und Fernübertragung zur Anwendung. Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigen die Kamera auf der Edelbodenalm sowie eine mit dieser Kamera getätigte Aufnahme.

Die wichtigsten Faktoren bei der Auswahl des Kamerastandortes sind:

- Stromversorgung, insbesondere für die Heizung und Lüftung des Gehäuses, um ein Beschlagen der optische Systeme zu vermeiden:
- Aufnahmegeometrie, sodass der Schnitt zwischen photogrammetrischem Strahlenbündel und Geländeoberfläche nicht zu schleifend wird.

Im Falle der Edelbodenalm (Abb. 3) sind die Schneemuster im Vordergrund auswertbar, allerdings würde ein leichter Gegenhang die Genauigkeit erhöhen. Die großen Schneeflächen im Hintergrund sind ebenfalls auswertbar.

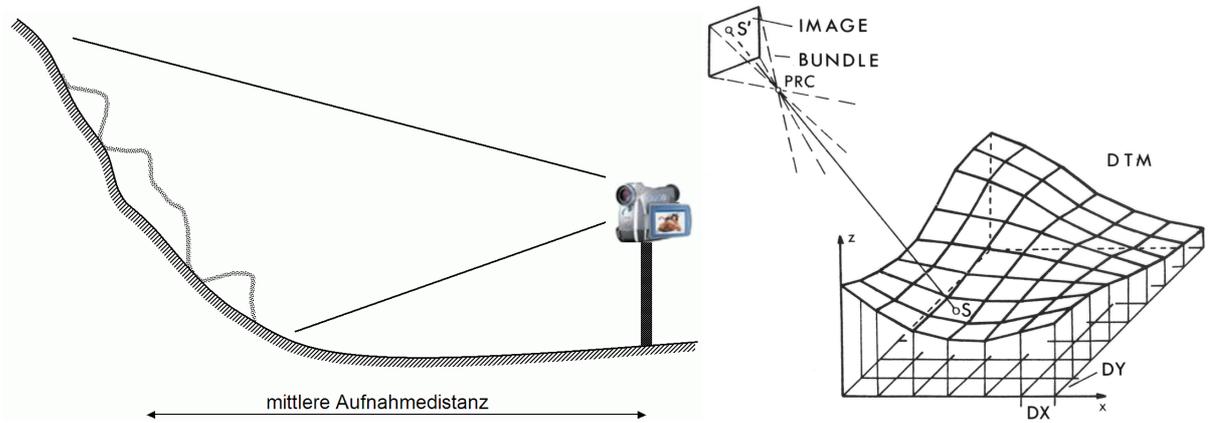


Abb. 1: Links: Aufstellung einer Standvideokamera am Gegenhang. Rechts: Auswertungen der schneebedeckten Fläche mittels Monoplotting (aus Waldhäusl et al., 1986).



Abb. 2: Standvideokamera Edelbodenalm.



Abb. 3: Aufnahme der Standvideokamera Edelbodenalm am 9. Mai 2005.

3. Satellitenprodukte der Schneebedeckung

Daten verschiedener Satellitensensoren werden seit Jahrzehnten zur Ermittlung von Schneekenngrößen verwendet (Goodison et al., 1987; Hall et al., 2005). International gesehen liegt der Schwerpunkt des Interesses oft auf großen Gebieten der Tundra. Für die operationelle Hochwasservorhersage in Österreich sind die meisten Satellitendaten hingegen wenig geeignet, da es meist um vergleichsweise kleine Gebiete geht, oft mit Baumvegetation und starkem Relief. Eine Ausnahme bildet die Bestimmung von Schneebedeckungsmustern, die in ähnlicher Weise wie die terrestrischen Muster für die Schneemodellierung sehr aussagekräftig sind. Bei der Auswahl der Sensoren für die operationelle Hochwasservorhersage ist auf die folgenden Aspekte zu achten:

- Räumliche und zeitliche Auflösung
- Genauigkeit
- Datenausfall
- Termingerechte Verfügbarkeit und
- Kosten

Unter diesen Gesichtspunkten kommen für österreichische Verhältnisse vor allem zwei Satellitensensoren im sichtbaren bzw. Infrarotbereich in Frage, das Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) und das Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) (Tabelle 1).

Eine Einschränkung bei der Verwendung von Satellitendaten in den sichtbaren bzw. infraroten Wellenlängen besteht darin, dass bei Bewölkung die Landoberfläche verdeckt ist, wodurch Schnee und aperer Boden nicht unterschieden werden kann. Deshalb wurden auch Mikrowellensensoren getestet, die durch Bewölkung hindurchsehen können. Aktive Mikrowellensensoren können grundsätzlich Information über feuchten Schnee liefern. Diese Sensoren sind allerdings stark von Vegetation und Geländerauhigkeit beeinflusst. Ein aktiver Mikrowellensensor ist beispielsweise der ASAR Sensor an Bord des ENVISAT. Passive Mikrowellen können grundsätzlich Information über den Schneewasserwert liefern. Allerdings sind die Pixel sehr groß und das Verfahren ist nur für geringmächtige Schneedecken geeignet. Passive Mikrowellensensoren sind beispielsweise die AMSR Sensoren an Bord von Terra und ADEOS II. Wegen dieser Probleme sind für die Hochwasservorhersage in Österreich die AVHRR und MODIS Sensoren gegenüber aktiven und passiven Mikrowellensensoren vorzuziehen.

Bevor die Satellitendaten für die Hochwasservorhersage verwendet werden können, sind zwei Bearbeitungsschritte notwendig. Zum einen sind die Bilder geometrisch in das geeignete Koordinatensystem zu transformieren. Zum anderen sind aus den Rohdaten mit Hilfe geeigneter Algorithmen, meist auf Basis eines Klassifizierungsansatzes, schneebedeckte und apere Flächen abzuleiten (siehe z.B. Foppa et al., 2004 bzw. Hall et al., 2001 für AVHRR bzw. MODIS). Mehrere Datenzentren in den USA verarbeiten die Rohdaten zu Schneebedeckungsprodukten: NSIDC (www.nsidc.org) erzeugt tägliche Schneebedeckungskarten sowie 8 Tageswerte auf Basis von MODIS für die ganze Welt, die frei auf dem Internet zugänglich sind. NOHRSC (www.nohrsc.noaa.gov) kombiniert zahlreiche Datensätze (einschließlich AVHRR) und Modelle, um verschiedene Schneeprodukte zu erzeugen. NESDIS (www.nesdis.noaa.gov) erzeugt Schneekarten für die nördliche Hemisphäre, die für Wetterprognosemodelle verwendet werden. NOHRSC und NESDIS Produkte sind jeweils am nächsten Tag über ftp erhältlich und grundsätzlich kostenpflichtig.

Tab. 1: Kenngrößen der AVHRR und MODIS Sensoren.

Sensor	AVHRR	MODIS
Satellit	verschiedene NOAA Satelliten	EOS Terra und Aqua
Beginn	je nach Sensor, z.B. AVHRR/3: 1998	2000
Räumliche Auflösung	ca. 1 km	ca. 0,5 km
Zeitliche Auflösung	1 – 10 Bilder pro Tag	1-2 Bilder pro Tag
Wellenlänge	Sichtbar – Infrarot	Sichtbar – Infrarot
Probleme	Wolken	Wolken
Termingerechte Verfügbarkeit	< 1 h, wenn registriert	ca. 2 Tage
Kosten	Auf Anfrage	keine
url	http://www.noaa.gov http://saturn.unibe.ch/rsbern/	http://www.nsidc.org

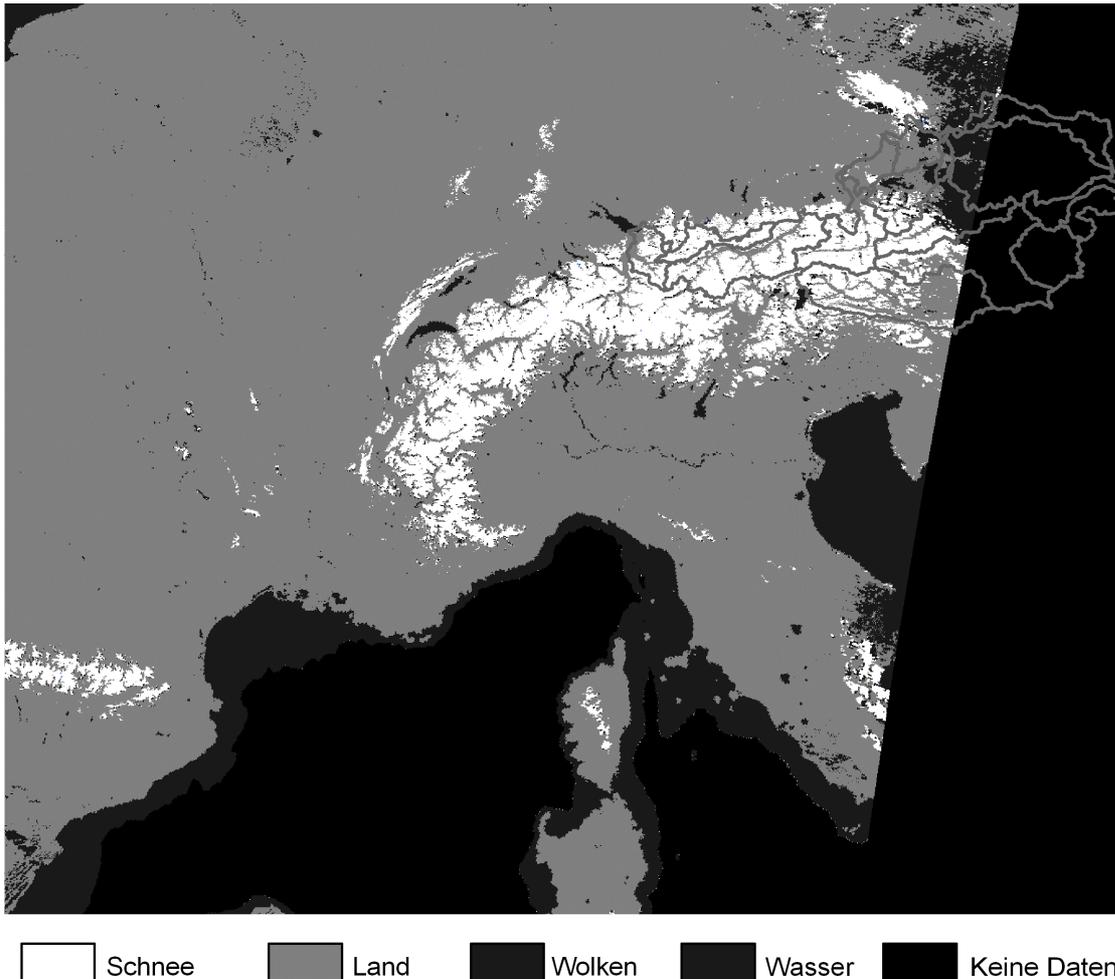


Abb. 4: MODIS Bild für den 19. März 2003, Ausschnitt h18v04.

Da MODIS für die Hochwasservorhersage in Österreich besonders von Interesse ist, wird hier die Verfügbarkeit und die Genauigkeit des NSIDC Produktes von MODIS für Österreich näher erläutert unter Verwendung der Auswertungen von Parajka und Blöschl (2006). Der MODIS Schneerkennungsalgorithmus des NSIDC Produktes basiert auf der Differenz zwischen den Helligkeiten im infraroten, sichtbaren und kurzwelligen Bereich (Hall et al., 2001). Dichter Wald erschwert die Schneerkennung, deshalb werden je nach Waldbedeckung unterschiedliche Parameter im Algorithmus verwendet. Wenn die Schneerkennung nicht eindeutig ist, werden Pixel als nicht identifiziert klassifiziert, obwohl das in der Regel nur eine sehr kleine Anzahl von Pixel betrifft. Die Auswertungen in Parajka und Blöschl (2006) verwenden tägliche Bilder aus dem Zeitraum 25. Feb. 2000 bis 31. Dez. 2005, die aus mehreren Überflügen am Nachmittag zusammengesetzt sind (Abb. 4). Die ursprünglich 16 Klassen wurden in vier Klassen (Schnee, Land, Wolken, andere) zusammengefasst. Da Wolken das Erkennen der Schneebedeckung verhindern, wurde die Bewölkung für Österreich speziell ausgewertet. Im Mittel über die Jahre 2000-2005 waren in Österreich 63% der Pixel durch Wolken verdeckt, 7% waren schneebedeckt und 29% waren aper. Abb. 5 zeigt ein Beispiel des zeitlichen Verlaufes. Wegen der häufigen Bewölkung ist zwar damit zu rechnen, dass nur an einem Drittel der Tage

Schneeinformationen zur Verfügung stehen, da die Bilder jedoch täglich mit einer guten Auflösung von 500 m vorliegen, können sie für die Hochwasservorhersage ein wertvolles Hilfsmittel sein.

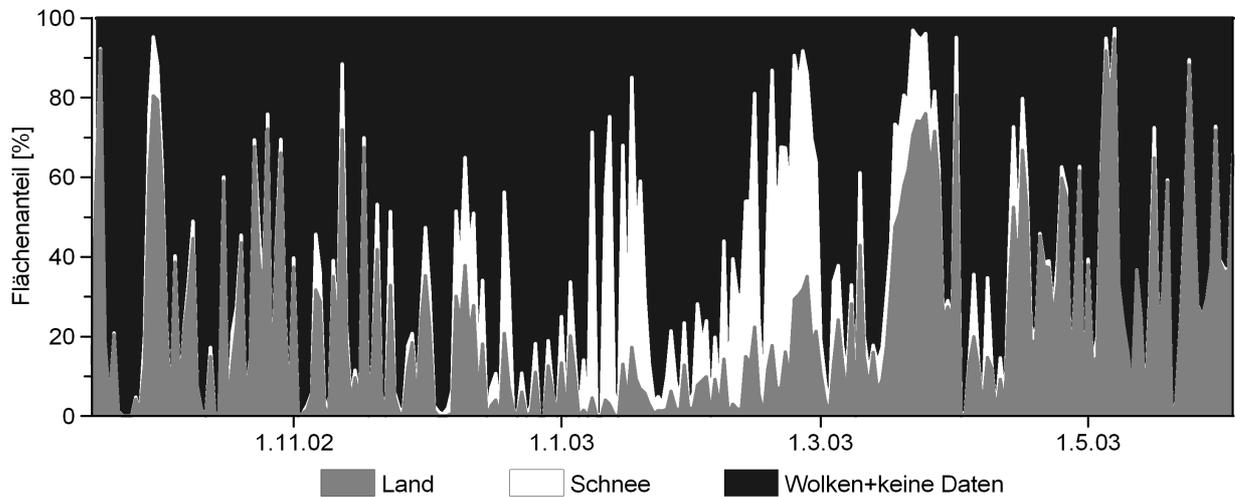


Abb. 5: Flächenanteile von Land, Schnee und Wolken in Österreich abgeleitet aus MODIS Daten für den Zeitraum Oktober 2002 – Juni 2003 (aus Parajka und Blöschl, 2006).

Um die Genauigkeit der MODIS Daten für die Pixel bzw. Termine ohne Wolken zu testen, wurden sie Bodenmessungen der Schneehöhe gegenübergestellt. Dafür wurden 754 Klimastationen mit täglichen Werten der Schneehöhe herangezogen. Von den insgesamt 77168 wolkenfreien Stationstagen, an denen an den Stationen Schneehöhen >0 gemessen wurden, wurden 84% von MODIS korrekt als Schnee klassifiziert und 16% wurden inkorrekt als kein Schnee klassifiziert. Von den insgesamt 447888 wolkenfreien Stationstagen, an denen an den Stationen Schneehöhen $= 0$ gemessen wurden, wurden 97 % vom MODIS korrekt als kein Schnee klassifiziert und nur 3% inkorrekt als Schnee klassifiziert. Das bedeutet, dass die Qualität der MODIS Daten ausgezeichnet ist. Abb. 6 zeigt die jahreszeitliche Verteilung der Klassifikationsfehler. Naturgemäß sind die Fehler im Sommer am kleinsten, da die Schneebedeckung gegen null geht (Abb. 7). Im November und Dezember sind die Fehler größer, da die Schneedecke kurzlebig ist. Ein Teil der Fehler hängt mit der Tageszeit der Messungen zusammen. Die Schneehöhen werden um 7 Uhr morgens gemessen, während die MODIS Überflüge am Nachmittag stattfinden. Auch die räumliche Variabilität der Schneedecke kann zu den Unsicherheiten beitragen. Ein sehr kleiner Teil der MODIS Fehler ist auf eine Missklassifikation von Wolken als Schnee zurückzuführen. Die Ähnlichkeit der Verteilungen der Über- und Unterschätzung deutet darauf hin, dass nicht mit systematischen Fehlern zu rechnen ist, mit Ausnahme des Monats Novembers, in dem die Überschätzungen deutlich häufiger sind. Deshalb, und wegen der betragsmäßig kleinen Fehler, haben die MODIS Daten sehr gute Voraussetzungen für die Verwendung bei der Hochwasservorhersage.

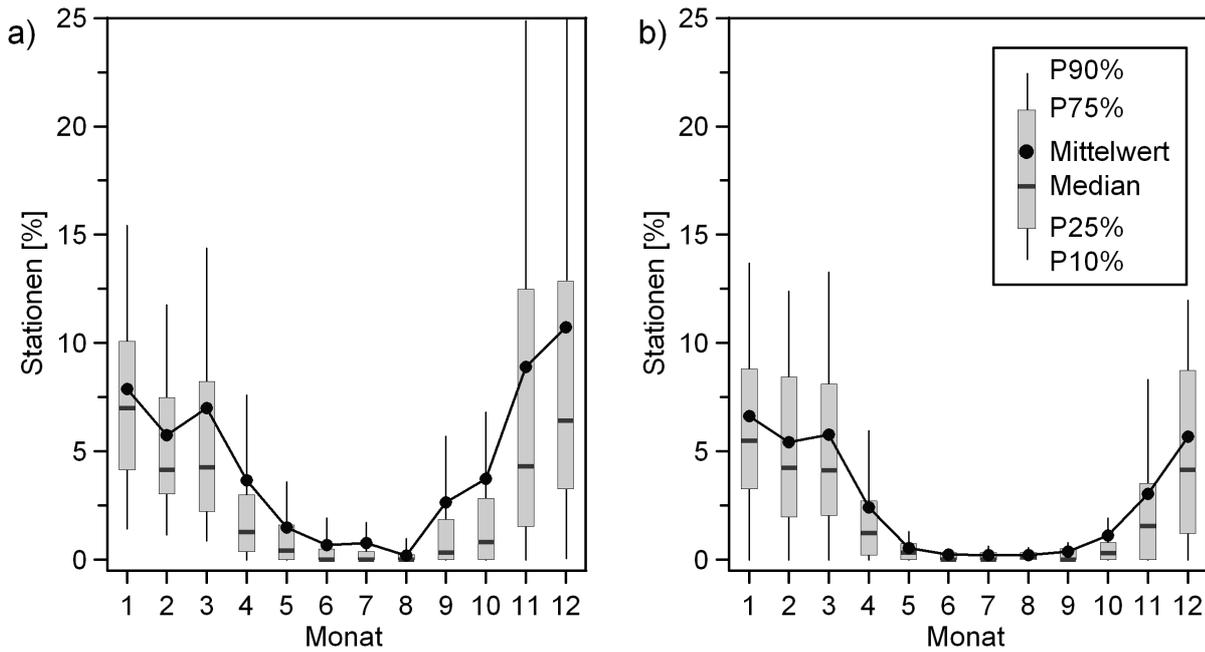


Abb. 6: Genauigkeit der MODIS Daten im Vergleich zu Tageswerten der Schneehöhe an 754 Stationen im Zeitraum 2000 -2005. Links: Prozentuale Überschätzung durch MODIS an wolkenfreien Tagen (MODIS klassifiziert Schnee, Bodenstation meldet keinen Schnee). Rechts: Entsprechende Unterschätzung durch MODIS. Die Prozentwerte beziehen sich auf die Anzahl der Stationen in Österreich, die Streubereiche beziehen sich auf die zeitliche Variabilität. Aus Parajka und Blöschl (2006).

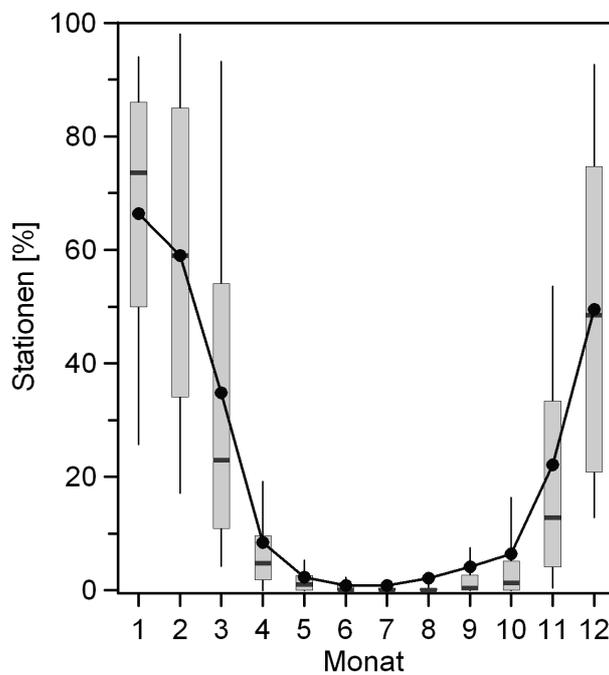


Abb. 7: Prozentuale Schneebedeckung an wolkenfreien Tagen im Zeitraum 2000–2005 abgeleitet aus den MODIS Daten wie in Abb. 6.

4. Integration von Schneeinformationen in hydrologische Modelle

Fernerkundungsdaten der Schneebedeckungsmuster – entweder aus terrestrischen oder satellitenbasierten Aufnahmen – können in die Hochwasservorhersagen mit Hilfe von Verfahren einbezogen werden, die als Datenassimilation (McLaughlin, 1995) bezeichnet werden. Drei grundsätzliche Vorgangsweisen sind dabei möglich:

(a) *Qualitativ*: Im ersten Fall werden die Daten qualitativ als Zusatzinformation bei der Erstellung von Prognosen verwendet. Es kommt dabei auf die persönliche Einschätzung und Erfahrung der Prognosebeauftragten an. Im Einzelfall wird dann eine Entscheidung über die Ausgabe einer Warnung getroffen, unter Abwägung verschiedenster Gesichtspunkte, auch solcher die sich nicht zahlenmäßig fassen lassen.

(b) *Off line – Eichung*: Im zweiten Fall werden die Schneebedeckungsdaten für die Eichung der Parameter der hydrologischen Modelle herangezogen, also im Zeitraum während der Modellerstellung. In manchen Fällen erfolgt die Eichung ausschließlich auf Basis von Schneebedeckungsmustern (Blöschl et al., 2002), in der Regel werden die Schneeinformationen zusätzlich zu den Abflussdaten verwendet. Die Verwendung von Schneeinformationen bei der Eichung von hydrologischen Modellen ist in der Hydrologie gut eingeführt, und ist besonders für flächendetaillierte Modelle zielführend (Blöschl, 2005; Watson et al., 2006). Das Einbeziehen der Schneeinformationen kann manuell erfolgen, wie etwa beim Kampmodell (Blöschl et al., 2006) oder auch automatisch (Parajka et al., 2005). Bei der automatischen Eichung von Modellparametern wird meist eine Zielfunktion aufgestellt, die darauf abzielt, dass sowohl die simulierten Abflüsse möglichst nahe den beobachteten Abflüssen liegen als auch die simulierten Schneemuster möglichst nahe den beobachteten liegen. Es handelt sich also um eine Optimierung unter Mehrfachzielsetzung.

(c) *On line – Nachführung*: Im dritten Fall werden durch Nachführen die Zustandsvariablen im Modell (z.B. Schneewasserwert) aktuell verändert. Die Idee ist dabei, dass über die Eichung hinausgehend, das Modell an die aktuelle Situation angepasst wird, um die Prognoseergebnisse zu verbessern. Zwei mathematische Methoden kommen dabei vor allem zur Anwendung. Bei der ersten Methode werden die Terminwerte der Schneebedeckung direkt für einen bestimmten Termin in das Modell eingesetzt und als Startwert für die weiteren Prognosen verwendet. Dies kann als Szenarien erfolgen, bei denen z.B. die Schneebedeckung um 10% erhöht wird. Diese Methode ist einfach und nachvollziehbar und besitzt den Vorteil, dass bei manuellen Szenarien die Einschätzung der Sachbearbeiter einfließen kann. Allerdings wird dabei angenommen, dass die Fernerkundungsdaten fehlerfrei sind. Udnæs und Alfnes (2005) und Alfnes et al. (2005) testen diese Methode, indem sie AVHRR, MODIS und ASAR Satellitendaten der Schneebedeckung in ein hydrologisches Modell assimilieren und die Auswirkung auf die Hochwasservorhersagen untersuchen. In einigen Fällen erzielen sie eine Verbesserung der Warnung. Sie weisen darauf hin, dass eine sorgfältige Vorgangsweise wichtig ist, um eine Verschlechterung der Prognosen zu vermeiden. Bei der zweiten Methode wird die Unsicherheit des Modells und der Fernerkundungsdaten explizit berücksichtigt, wobei dafür heute meist als Verfahren der Ensemble Kalman Filter (EnKF) zur Anwendung kommt. Komma und

Blöschl (2006) stellen dieses Verfahren im Zusammenhang mit der Assimilation von Abflussdaten vor. Es kann in ähnlicher Weise für Schneedaten verwendet werden. Andreadis und Lettenmaier (2006) assimilieren MODIS Daten in ein hydrologisches Modell mit Hilfe des Ensemble Kalman Filters. Clark et al. (2006) führen ebenfalls mit dem Ensemble Kalman Filter Vergleichsrechnungen durch, um den Wert des Assimilierens der schneebedeckten Fläche für hydrologische Simulationen zu bestimmen.

Bei allen drei Methoden kann das Einbeziehen von Schneeinformationen die Zuverlässigkeit der Vorhersagen erhöhen. Die Verbesserung der Prognosen hängt aber stark vom Einzelfall und der jeweiligen Datenqualität ab. Die Eichung mittels Schneemuster (Fall b) wird im folgenden an Hand zweier Beispiele verdeutlicht.

Das erste Beispiel ist ein Schnee- und Eisschmelzmodell, das im Zusammenhang mit dem Hochwasservorhersagemodell für den Inn erstellt wurde (Kirnbauer und Schönlaub, 2006). Es handelt sich dabei um ein Rastermodell (20 m Rasterweite) auf Basis der Energiebilanz. Schneeakkumulation und Schnee- und Eisschmelze werden für jedes Element in Stundenschritten simuliert. Meteorologische Eingangsdaten sind Lufttemperatur, Niederschlag, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung, die über das Gebiet interpoliert werden. Eine wichtige Eingangsgröße ist auch die Bewölkung, die aus dem Verhältnis zwischen gemessener und möglicher Globalstrahlung rückgerechnet wird. Für die Nacht müssen bestimmte Annahmen über die Bewölkung getroffen werden. Das Modell wurde an Hand von Daten für den Vernagtferner im Zeitraum 1999 – 2001 getestet. Um die Unsicherheiten bei der Parameterwahl zu reduzieren, wurden aus Photos abgeleitete Ausaperungsmuster mit der simulierten Lage der Schneegrenze verglichen. Einen derartigen Vergleich zeigt Abb. 8 für unterschiedliche Annahmen über die Bewölkung in der Nacht. Eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und beobachteten Schneemustern ist dann erzielt, wenn der Rand der simulierten Schneedecke (hellblaue Fläche) mit dem Rand der beobachteten Schneeflächen (rote Linie) übereinstimmen. Aus Abb. 8 ist zu erkennen, dass für diese Simulationsperiode eine Annahme der Bewölkung von 0.5 eine bessere Übereinstimmung erzielt. In ähnlicher Weise wurden andere Annahmen und Parameter des Modells getestet.

Das zweite Beispiel ist die österreichweite Integration von MODIS Schneebedeckungsmustern in die hydrologische Modellierung. Die Vorgangsweise ist analog Parajka et al. (2005) wobei jedoch als Schneeinformation MODIS Daten statt Bodenstationen verwendet werden. Das hydrologische Modell ist ein kontinuierliches Konzeptmodell ähnlich HBV auf Tagesbasis. Es besteht aus einem Schneemodul unter Verwendung des Gradtag-Konzeptes, einem Modul zur Berechnung der Bodenfeuchte und einem Abflussmodul. Die Einzugsgebiete wurden in Höhenstreifen zu je 200 m Seehöhe unterteilt. Für die Höhenstreifen innerhalb eines Pegelinzugsgebietes wurden unterschiedliche Eingangsdaten (Niederschlag, Lufttemperatur) aber die gleichen Modellparameter angesetzt. Die Modellparameter wurden durch Eichung bestimmt. Dafür wurde eine Zielfunktion angesetzt, die aus drei Komponenten besteht

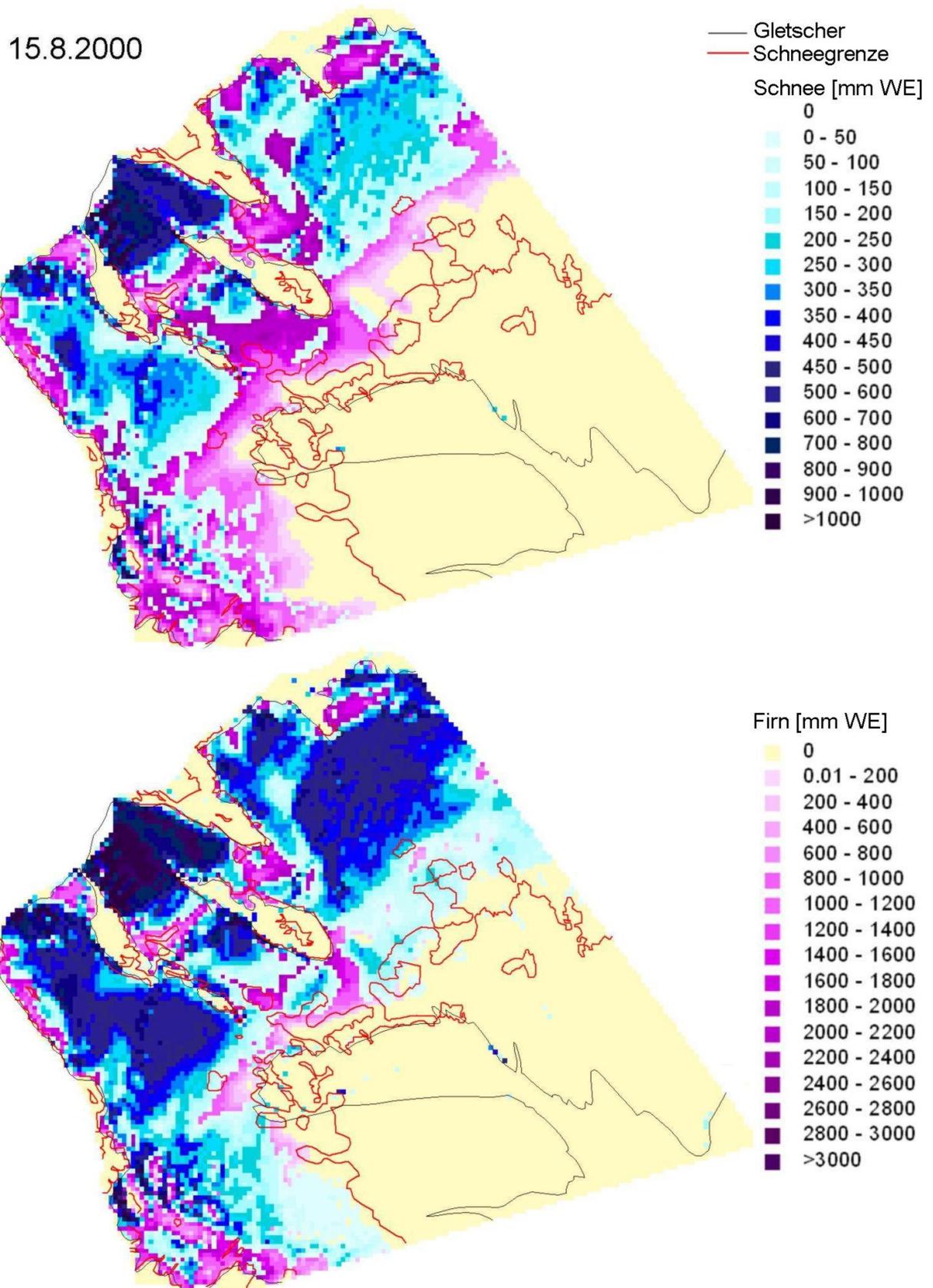


Abb. 8: Schneesimulation am Vernagtferner für den 15. August 2000 (Blaue Flächen). Schneegrenze aus den Photos (rote Linien). Oben: Die Bewölkung in der Nacht wurde während der gesamten Simulationsperiode gleich dem letzten Tageswert gesetzt. Unten: Die Bewölkung in der Nacht wurde auf 0.5 gesetzt. Aus Asztalos (2004).

– Abweichungen zwischen simulierter und beobachteter Abflussganglinie, Abweichungen zwischen simulierter Schneebedeckung und MODIS Schneebedeckung sowie Abweichungen von einer zuvor definierten a-priori Verteilung der Parameter. Diese Variante wird als 'Eichung mit MODIS' bezeichnet. Zum Vergleich wurde eine getrennte Eichung durchgeführt, wobei nur Abflussdaten herangezogen wurden (Variante 'Eichung ohne MODIS'). Abb. 9 zeigt die Schneebedeckungsmuster der beiden Varianten im Vergleich zu den MODIS Daten. Es ist deutlich zu erkennen, dass – wie zu erwarten – die Variante unter Verwendung der MODIS Daten die Schneebedeckung besser wiedergibt als die Alternativvariante.

Die beiden Eichungsvarianten wurden jeweils für 152 Einzugsgebiete mit Abflussdaten in Österreich für den Zeitraum 1. Nov. 1999 bis 31. Dez. 2003 durchgeführt. Zur Beurteilung der Simulationsgüte wurden zwei statistische Kenngrößen betrachtet. Die erste ist die Modelleffizienz des Abflusses nach Nash und Sutcliffe. Eine Modelleffizienz ME von 1 bedeutet eine perfekte Übereinstimmung der simulierten mit der beobachteten Abflussganglinie. Kleinere Werte bedeuten eine schlechtere Übereinstimmung. Die zweite Kenngröße ist ein Fehlermaß, das die mittlere Abweichung der Schneebedeckung der hydrologischen Simulation von der MODIS Schneebedeckung beschreibt. Ein Fehlermaß von 0 bedeutet eine perfekte Übereinstimmung, größere Werte bedeuten eine schlechtere Übereinstimmung. Die räumlichen Muster dieser beiden Kenngrößen sind in Abb. 10 dargestellt. Wenn die MODIS Schneedaten in die Eichung einbezogen werden, sinkt die Simulationsgüte des Abflusses im Mittel nur geringfügig, die Simulation der Schneeverhältnisse wird aber wesentlich verbessert.

Die Kenngrößen in Abb. 10 betreffen die mittlere Simulationsgüte des hydrologischen Modells. Im Einzelfall können die MODIS Daten einen davon abweichenden Effekt auf die Simulationen ausüben. Ein Beispiel ist in Abb. 11 dargestellt, das die Simulationen mit und ohne Verwendung von MODIS Daten für den Gschnitzbach bei Steinach am Brenner (111 km²) zeigt. Beim Ereignis im November 2002 wird die Abflusssimulation durch das Einbeziehen von MODIS deutlich verbessert (simulierter Scheitelabfluss von 27 m³/s statt 21 m³/s im Vergleich zu einer Beobachtung von 32 m³/s). Im Mai 2003 wird die Abflusssimulation ebenfalls verbessert wegen der genaueren Schneesimulation. Im Juni 2003 wird die Abflusssimulation hingegen etwas verschlechtert. Die Simulation der Schneehöhen der beiden Varianten sind deutlich unterschiedlich (Abb. 11 Mitte). Die Simulation der Schneebedeckung der Variante unter Verwendung von MODIS ist wesentlich besser (Abb. 11 unten). Dieses Beispiel zeigt, dass die Verwendung von Schneeinformationen differenziert zu sehen ist. Der wesentliche Vorteil des Einbeziehens der Schneeinformation ist, dass erwartet werden kann, dass das Modell ungewöhnliche Situationen besser erfasst als ein Modell, dem keine Schneedaten zur Verfügung stehen.

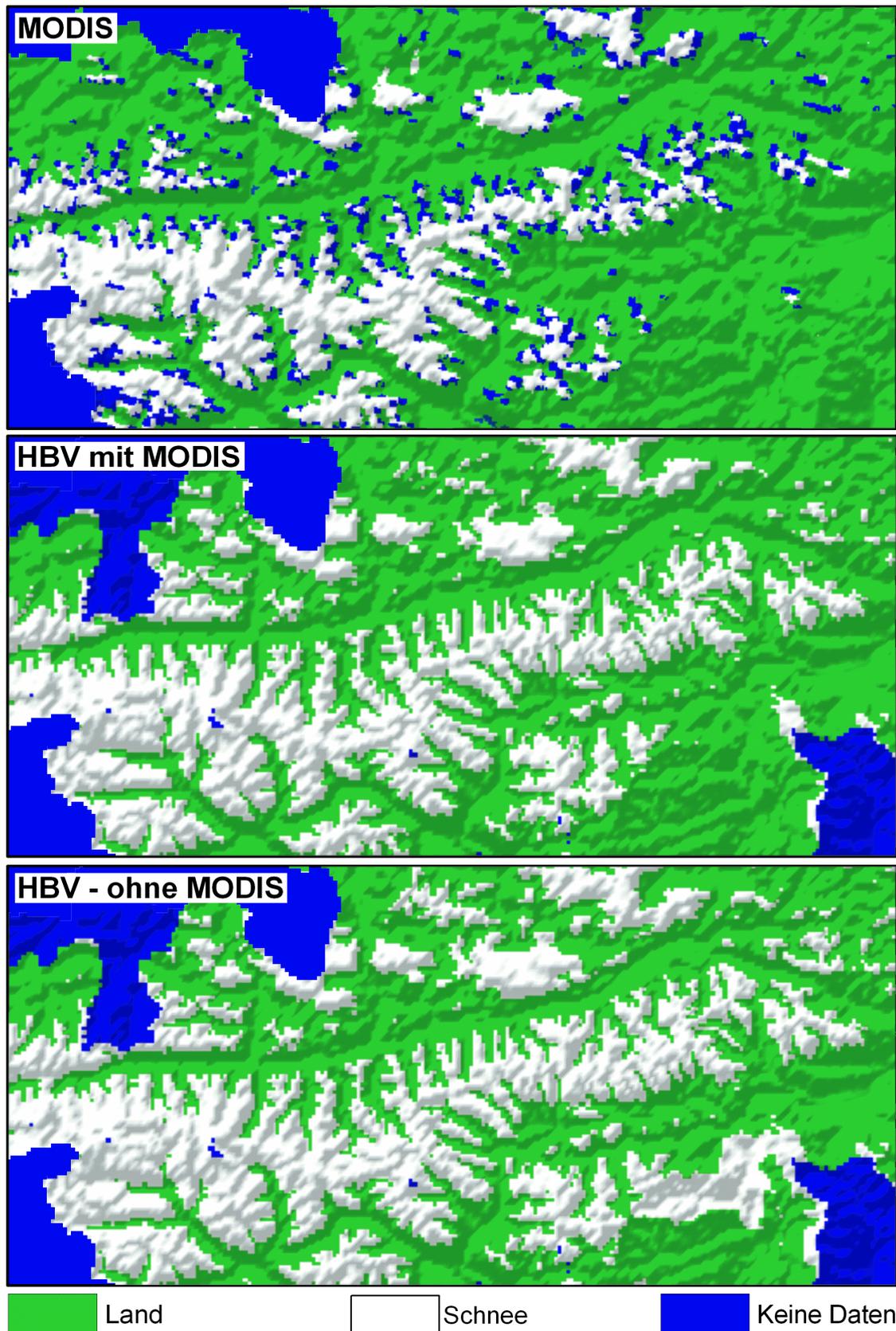


Abb. 9: Schneebedeckung am 2. Mai 2001. Oben: MODIS. Mitte: Simulation mit dem hydrologischen Modell (Eichung mit MODIS). Unten Simulation mit dem hydrologischen Modell (Eichung ohne MODIS). Hohe und Niedere Tauern sind im Zentrum des Bildes.

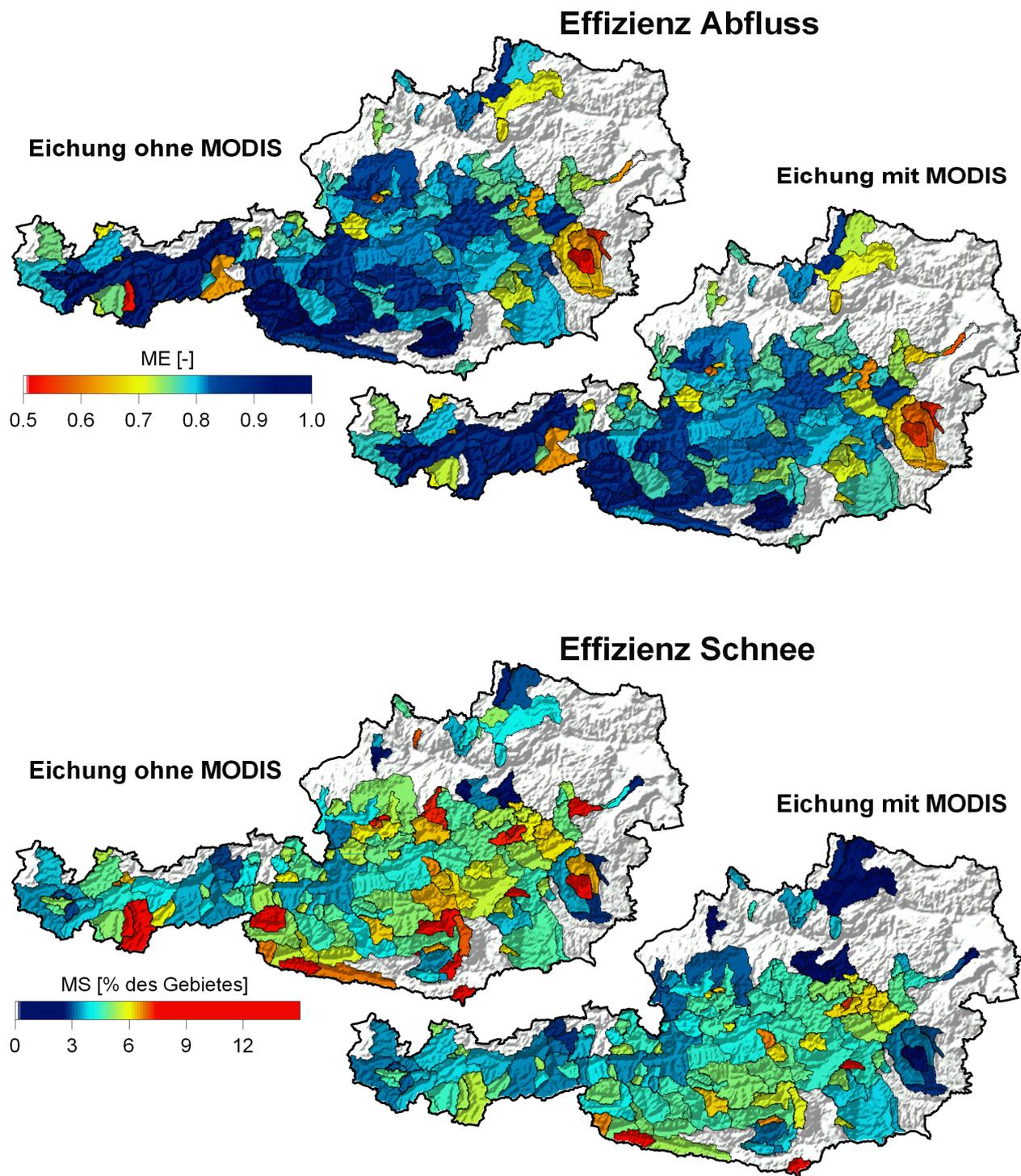


Abb. 10: Oben: Effizienz der Simulation von Tageswerten des Abflusses für die Varianten mit und ohne Verwendung von MODIS. Unten: Fehler der Schneesimulation mit und ohne Verwendung von MODIS. Zeitraum 2000-2003. Rot entspricht schlechten Simulationen, dunkelblau entspricht guten Simulationen.

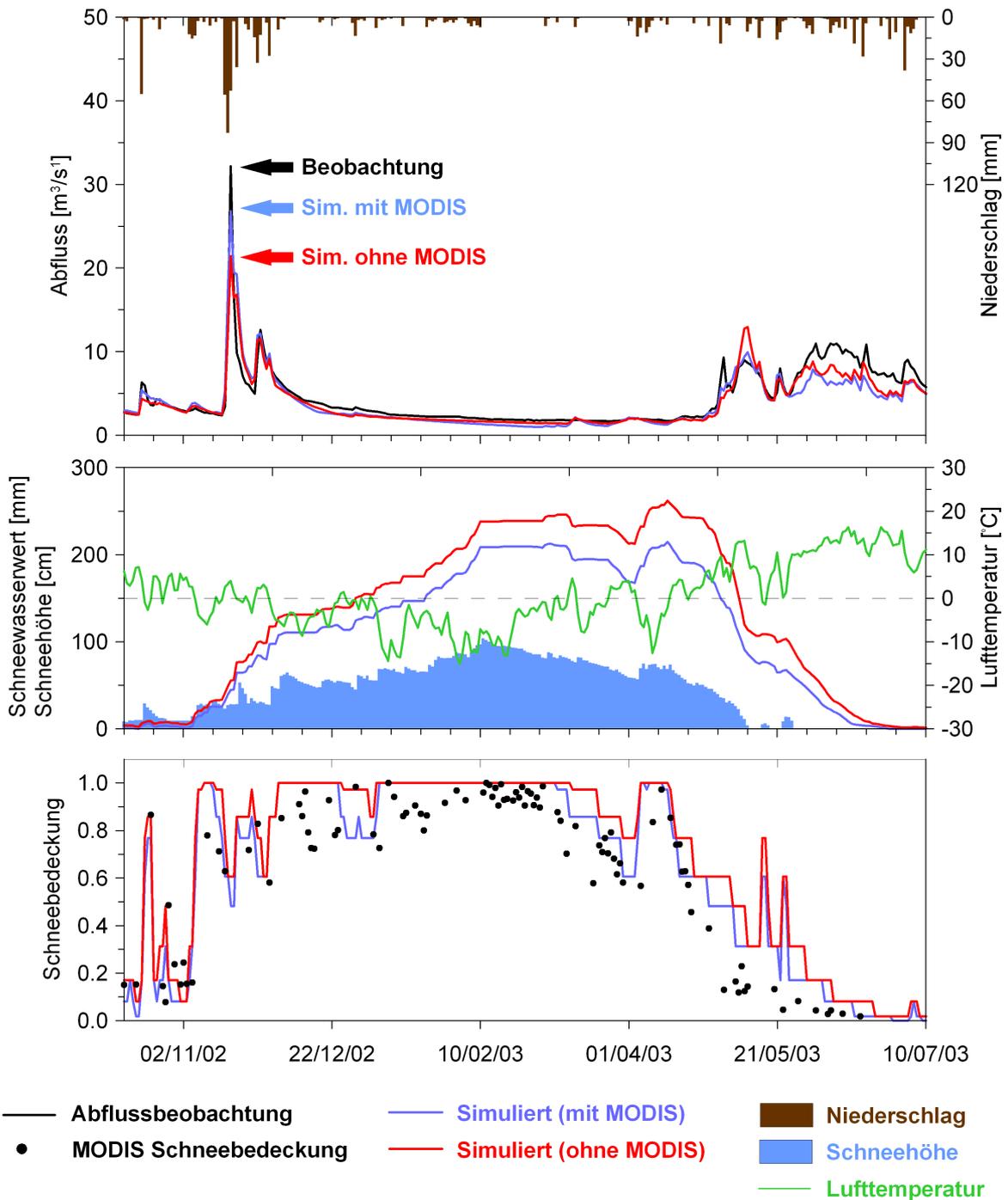


Abb. 11: Simulationen mit und ohne Verwendung von MODIS Daten für den Gschnitzbach bei Steinach am Brenner (111 km²).

5. Zusammenfassung

Die Simulation der Schneeprozesse als Teil von Hochwasservorhersagemodellen ist sehr empfindlich auf kleine Unterschiede in den Eingangsdaten (Niederschlag, Lufttemperatur). Um diese Unsicherheiten zu reduzieren und die Schneeprozesse genauer zu erfassen, können bei der Hochwasservorhersage Schneeeinformationen aus Fernerkundungsdaten herangezogen werden. Insbesondere sind dafür Muster der Schneebedeckung geeignet. Zum einen kommen zur Erfassung der Muster terrestrische Methoden in Frage, z.B. Aufstellen einer Videokamera im Einzugsgebiet,

Aufnahme und Fernübertragung der Schneemuster und anschließende Entzerrung mittels Monoplotting. Andererseits kommen Satellitendaten in Frage, insbesondere AVHRR und MODIS. Analysen der MODIS Daten zeigten, dass sie für die Hochwasservorhersage in Österreich gut geeignet sind, da sie mit Bodenbeobachtungen der Schneehöhe gut übereinstimmen. Die Schneebedeckungsmuster können in hydrologische Modelle auf dreierlei Weise integriert werden: qualitativ, im Zuge der Eichung der Modellparameter und zur Nachführung der Modelle im On-line Fall. An Hand von zwei Beispielen wird gezeigt, dass Schneemuster zum Eichen und Testen von hydrologischen Modellen sinnvoll eingesetzt werden können. Im ersten Beispiel werden aus Photos abgeleitete Schneemuster zum Testen eines Schnee- und Eisschmelzmodells im Zusammenhang mit der Hochwasservorhersage am Inn verwendet. Im zweiten Beispiel werden MODIS Daten in das hydrologische Modell für 152 Einzugsgebiete in Österreich integriert.

6. Danksagung

Die Auswertungen der MODIS Daten wurden im Rahmen des Projektes AWARE (No. SST4-CT-2004-012257) von der Europäischen Union gefördert. Daten wurden vom Hydrographischen Zentralbüro zur Verfügung gestellt. Die Arbeiten am Hochschwab und an der Rax erfolgten in Kooperation mit dem Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF) der TU Wien und den Wiener Wasserwerken (MA31). Die Entwicklung des Vorhersage für den Inn erfolgt in Kooperation mit dem alpS Zentrum für Naturgefahrenmanagement.

7. Literatur

Alfnes, E., E. Langsholt, T. Skaugen and H.- Ch. Udnæs (2005) Updating snow reservoir in hydrological models from satellite-observed snow covered areas. Norwegian Water Resources and Energy Directorate Report No. 4-2005. Erhältlich auf www.nve.no

Andreadis, K. M. and D. P. Lettenmaier (2006) Assimilating remotely sensed snow observations into a macroscale hydrology model. *Advances in Water Resources* 29, 872-886

Aschenwald, J., K. Leichter, E. Tasser and U. Tappeiner (2001) Spatio-temporal landscape analysis in mountainous terrain by means of small format photography: a methodological approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39, 885-893.

Asztalos, J. (2004) Ein Schnee- und Eisschmelzmodell für vergletscherte Einzugsgebiete, Diplomarbeit, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie. Technische Universität Wien.

Blöschl, G., Ch. Reszler und J. Komma (2006) Hochwasservorhersage für den Kamp. In: Hochwasservorhersage. Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 199. Technische Universität Wien, Seiten 39-54.

- Blöschl, G. (1999) Scaling issues in snow hydrology. *Hydrological Processes* 13, 2149-2175.
- Blöschl, G. (2005) Rainfall-runoff modelling of ungauged catchments. Article 133 in: *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, M. G. Anderson (Managing Editor), J. Wiley & Sons, Chichester, pp. 2061-2080.
- Blöschl, G., R. Kirnbauer and D. Gutknecht (1991) Distributed snowmelt simulations in an Alpine catchment. 1. Model evaluation on the basis of snow cover patterns. *Water Resources Research* 27, 3171-3179.
- Blöschl, G., R. Kirnbauer, J. Jansa, K. Kraus, G. Kuschnig, D. Gutknecht und Ch. Reszler (2002) Einsatz von Fernerkundungsmethoden zur Eichung und Verifikation eines flächendetaillierten Schneemodells. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 54, 1-16.
- Clark M.P., A.G. Slater, A.P. Barrett, L.E. Hay, G.J. McCabe, B.Rajagopalan and G.H. Leavesley (2006) Assimilation of snow covered area information into hydrologic and land-surface models. *Advances in Water Resources* 29, 1209-1221.
- Cline D. W., R. C. Bales and J. Dozier (1998) Estimating the spatial distribution of snow in mountain basins using remote sensing and energy balance modeling. *Water Resources Research* 34, 1275-1285.
- Davis, R. E., J. C. McKenzie and R. Jordan (1995) Distributed snow process modelling: an image processing approach, *Hydrological Processes* 9, 865-875.
- Foppa, N., S. Wunderle, A. Hauser, D. Oesch and F. Kuchen (2004): Operational sub-pixel snow mapping over the Alps with NOAA-AVHRR data. *Annals of Glaciology* 38, 245-252.
- Goodison, B.E., R. G. Barry and J. Dozier (Eds) (1987) Large Scale Effects of Seasonal Snow Cover. Proc. symposium Vancouver, August 1987. IAHS Press, Wallingford.
- Hall, D. K., G. A. Riggs, V. V. Salomonson, J. S. Barton, K. Casey, J. Y. L. Chien, N. E. DiGirolamo, A. G. Klein, H. W. Powell and A. B. Tait (2001) Algorithm theoretical basis document (ATBD) for the MODIS snow and sea ice-mapping algorithms, available at: <http://modis-snow-ice.gsfc.nasa.gov/atbd01.html>.
- Hall, D., R. Kelly, J. Foster und A. T. C. Chang (2005) Estimation of snow extent and snow properties. Article 55 in: *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, M. G. Anderson (Managing Editor), J. Wiley & Sons, Chichester, pp. 811-829.
- Kirnbauer, R., G. Blöschl, P. Waldhäusl and F. Hochstöger (1991) An analysis of snow cover patterns as derived from oblique aerial photographs. In: *Snow, Hydrology and Forests in High Alpine Areas*. IAHS Publ. no. 205, pp. 91-99.
- Kirnbauer, R. und H. Schönlaub (2006) Vorhersage für den Inn. In: *Hochwasservorhersage*. Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 199. Technische Universität Wien, Seiten 69-84.

Komma, J., Ch. Reszler und G. Blöschl (2006) Nachführung mittels Ensemble-Kalman-Filter. In: Hochwasservorhersage. Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 199. Technische Universität Wien, Seiten 243-258.

McLaughlin, D. (1995) Recent advances in hydrologic data assimilation. In U.S. National Report to the IUGG (1991-1994), Reviews of Geophysics, Supplement, 977-984.

Merz, R. (2002) Understanding and estimating flood probabilities at the regional scale. Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 181. Technische Universität Wien, 146 pp.

Merz, R., G. Blöschl und J. Parajka, D. (2006) Raum-zeitliche Variabilität von Ereignisabflussbeiwerten in Österreich, Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 50, 2-11.

Parajka J., R. Merz and G. Blöschl (2005) Regionale Wasserbilanzkomponenten für Österreich auf Tagesbasis. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 57, 43-56

Parajka, J. and G. Blöschl (2006) Validation of MODIS snow cover images over Austria. Hydrology and Earth Systems Sciences 10, 679–689.

Sevruk. B. (2004) Niederschlag als Wasserkreislauelement. Institut für Atmosphäre und Klima, ETH Zürich, 200 pp.

Udnæs H.-Ch. and E. Alfnes (2005) Real time demonstration of satellite-observed snow covered area in the HBV-model Spring 2004. Norwegian Water Resources and Energy Directorate Report No. 6-2005. Erhältlich auf www.nve.no

Waldhäusl, P., C. Enthofer and H. Kager, (1986) Bildauswertung durch Verschneiden des Strahlenbündels mit dem digitalen Höhenmodell, Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie 74, 155–166.

Watson, F. G.R. , W. B. Newman, J. C. Coughlan and R. A. Garrott (2006) Testing a distributed snowpack simulation model against spatial observations. Journal of Hydrology 328, 453-466.

Wigmosta, M., L.W. Vail and D. P. Lettenmaier (1994) A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. Water Resources Research 30, 1665-1679.

Anschrift der Verfasser:

Dr. Juraj Parajka
A.o.Univ.Prof. Dr. Günter Blöschl
Dr. Robert Kirnbauer
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/222, A-1040 Wien
Email: parajka@hydro.tuwien.ac.at

NACHFÜHRUNG BEI DER HOCHWASSERVORHERSAGE

Ulrike Drabek

1. Einleitung

Bei der off-line Simulation von Ganglinien mit Hilfe von hydrologischen Modellen können bei der Analyse oftmals Perioden, die gut wiedergegeben werden und solche, in denen die Simulation mit der Beobachtung nicht so gut übereinstimmt, unterschieden werden. Die Fehlerauswertung liefert mittlere Werte über den gesamten Zeitraum, kurze Phasen mit schlechter Übereinstimmung werden damit weitgehend unbedeutend.

Bei der Echtzeit-Vorhersage ist eine – auch nur kurze – schlecht modellierte Periode (z.B. systematischer Fehler, Anstieg einer Hochwasserwelle um einige Stunden zu spät) für den Anwender nicht akzeptabel. Die Echtzeit-Vorhersage von Durchflüssen erfordert daher oftmals eine Korrektur, eine Adjustierung, ein "updating" der Berechnung oder der Prognoseergebnisse bei bzw. nach jedem Berechnungszeitschritt. Zum Zeitpunkt der Prognoseerstellung werden neue Beobachtungswerte dazu verwendet, um Fehler im Ergebnis von vorherigen Berechnungen zu korrigieren bzw. die neue Vorhersage zu adaptieren.

Im Folgenden wird auf Fehlerquellen bei der Vorhersageerstellung, die unterschiedlichen Möglichkeiten für Nachführungsprozeduren und einzelne Fallbeispiele eingegangen.

2. Herkunft von Vorhersagefehlern

Die Fehler bei der Hochwasservorhersage stammen aus folgenden Quellen:

1. Durch die vereinfachende Modellstruktur bedingt entstehen Vorhersagefehler.

Eine der wichtigsten Aufgaben bei der Konzeption eines operationellen Vorhersagesystems ist das Abwägen zwischen Modellkomplexität und Abstraktion. Modelle, die im on-line Einsatz sind, sollten zur Optimierung der erforderlichen Daten und der benötigten Rechenzeit so komplex wie notwendig und so abstrakt und kompakt wie möglich sein. Selbst bei wohlüberlegter Modellstruktur und gut geeichten Parametern ist demzufolge keine vollkommene Wiedergabe der Beobachtung zu erwarten. Die Vereinfachung bei der Wahl der Modellstruktur sollte dahingehend gewählt werden, dass dominante Prozesse der Abflussentstehung abgebildet werden.

Beispiel: Ein teilvergletschertes Einzugsgebiet wird ohne entsprechenden Ansatz modelliert. Die Simulation der Schneeschmelze alleine wird die auftretenden Abflüsse nicht erklären können. Der Abflussbeiwert eines Gletschers und die daraus resultierenden Abflüsse sind für die Modellierung von Starkregenereignissen maßgeblich.

→ Sinnvoller als der Einsatz von Nachführungsroutinen ist als erster Schritt die bessere Vorarbeit bzw. Modelladaptierung insofern, dass dominante Prozesse abgebildet werden. Wenn eine Justierung der Modellstruktur nicht möglich ist, kann die geeignete Nachführungsroutine Vorhersageergebnisse verbessern.

2. Die nicht optimale Schätzung von Modellparametern ist Ursache für fehlerhafte Vorhersagen.

→ Oft waren bei der Modelleichung nicht ausreichend Daten vorhanden, wodurch eine nicht optimale Wahl der Modellparameter entstand. In diesem Fall sollte nach einiger Zeit eine Nacheichung mit verbesserter Datenbasis stattfinden.

→ Eine weitere mögliche Ursache für fehlerhafte Prognosen ist, dass sich das hydrologische Verhalten des Gebietes durch anthropogene Einflüsse verändert (Bachregulierungen, Kraftwerke, Rückhaltebecken, etc.), so dass eine Nacheichung mit neuen Beobachtungen, die die Veränderungen widerspiegeln, zu einer Optimierung der Modellparameter und damit einer Verbesserung der Vorhersagegüte führt.

3. Fehlerhafte Inputdaten führen zu fehlerhaften Vorhersagen. Die Inputdaten können entweder (a) Messwerte oder (b) selbst Ergebnisse eines Vorhersagemodells sein (z.B. meteorologische Inputdaten Niederschlag und Temperatur).

→ Diese Fehlerursache ist eine der beiden, bei der "bessere Vorarbeit" in der Modellerstellung nicht möglich ist, da die Qualität der Inputdaten nicht im Vorhinein beeinflusst werden kann. Unabhängig von der Nachführungsroutine muss im Vorfeld der Vorhersagenerstellung jedoch eine Datenprüfung und -korrektur stattfinden, so dass grob falsche bzw. fehlende Daten keinen Eingang in das hydrologische Modell finden. Das Ansetzen einer Nachführungsroutine kann die Vorhersageergebnisse verbessern.

4. Die Datenqualität der Inputdaten ist Grund für fehlerhafte Vorhersagen.

Neben den im vorigen Punkt genannten Datenfehlern gibt es eine weitere Fehlerquelle, die zu Abweichungen der Vorhersage von der Beobachtung führt. Die meteorologischen Daten Niederschlag und Temperatur werden als Punktmessungen erhoben und durch geeignete Verfahren zu Flächen- bzw. Rasterdaten verarbeitet, die als Eingangswerte in das Modell fließen. Speziell bei kleinräumigen Ereignissen kann es vorkommen, dass durch die Punktmessung zu niedrige oder zu hohe Gebietswerte berechnet werden und in Folge der berechnete/prognostizierte Abfluss fehlerhaft ist.

→ Es ist darauf zu achten, dass entsprechend der Größe und Charakteristik des Einzugsgebietes (Grad der Heterogenität) ausreichend meteorologische Messstellen mit fernübertragenen Werten vorhanden sind. Aktuelle Entwicklungen gehen dahin, dass zusätzlich zu Punktmessungen auch Radarmessungen in die Ermittlung der Gebiets- bzw. Rasterniederschläge einfließen, wobei diese Methode nicht uneingeschränkt einsetzbar ist (Haiden, 2006). Auch hier können

Nachführungsroutinen die Ergebnisse verbessern, sie können jedoch den Effekt von stark überhöhten bzw. viel zu geringen Niederschlagswerten (Messungen oder Prognosen) nicht ausgleichen.

5. Fehler, die im Zuge eines Ereignisses auftreten, das im Vergleich zu den bei der Eichung verwendeten Daten unterschiedliche Struktur aufweist (Xiong und O'Connor, 2002).

Beispiel: Der zur Eichung verwendete Datensatz umfasst nur Ereignisse bis zu einer bestimmten Größe/Jährlichkeit. Beim Auftreten eines größeren Ereignisses treten Prozesse in den Vordergrund, die im Modell nicht abgebildet werden, die sich aber im Vergleich zu den Fehlern unter Punkt 1 insofern unterscheiden, als man aufgrund des Eichdatensatzes nicht aus Beobachtungen ableiten konnte, wie sich das Gebiet in diesem Fall verhalten wird.

→ Anzustreben ist es, für die Aneichung eines Modells ausreichend Daten zur Verfügung zu haben, so dass möglichst alle Reaktionen des Einzugsgebietes abgedeckt sind. Sollte das nicht der Fall sein, kann auch hier eine geeignete Nachführungsroutine zur Verbesserung der Vorhersageergebnisse beitragen.

3. Möglichkeiten der Nachführung

Off-line Simulationen mit hydrologischen Modellen werden zumeist für Fallstudien, Untersuchungen einzelner Phänomene oder zur Darstellung von Szenarien (z.B. Klimawandel) herangezogen. Für die Simulation steht eine breite Palette an Messdaten zur Verfügung, die Daten werden im Vorfeld einer Prüfung unterzogen und die Aneichung des Modells erfolgt unter Rücksichtnahme auf den gesamten Eichdatensatz, der im Vorfeld so ausgewählt wird, dass möglichst alle Phänomene und Reaktionen des Einzugsgebiets erfasst werden. Wird bei einer Simulationsrechnung über einen kurzen Zeitraum eine schlechte Übereinstimmung mit den Beobachtungen erzielt, kann die nach den üblichen Maßzahlen (bias, R^2 oder Nash-Sutcliffe) ermittelte Güte trotzdem zufriedenstellend sein.

Bei on-line Vorhersagen sind zwar für die Eichung des Modells im Optimalfall ebenfalls geprüfte und ausreichend Daten vorhanden, im Echtzeitfall hat das Vorhersagesystem darüber hinaus auch mit Datenausfällen und nicht offensichtlichen Datenfehlern zu tun. Es ist aber wichtig, in allen Fällen gute Prognosen zu erstellen, da sonst die Aufgabe des Modells nicht erreicht wird. Der zum nächsten Berechnungszeitschritt einlangende neue Beobachtungswert enthält die aktuelle Information über den im Einzugsgebiet ablaufenden Prozess und bietet daher die Möglichkeit, die zuvor erstellten Vorhersagen mit dieser neuen Beobachtung zu vergleichen, den Prognosefehler zu ermitteln und die Vorhersagerechnung so zu adaptieren, dass das Modellergebnis besser an die Beobachtung angepasst wird – dabei handelt es sich um die Nachführung des Modells. Essenziell notwendig ist daher das Eintreffen einer neuen Beobachtung – ohne diese ist Nachführung nicht möglich.

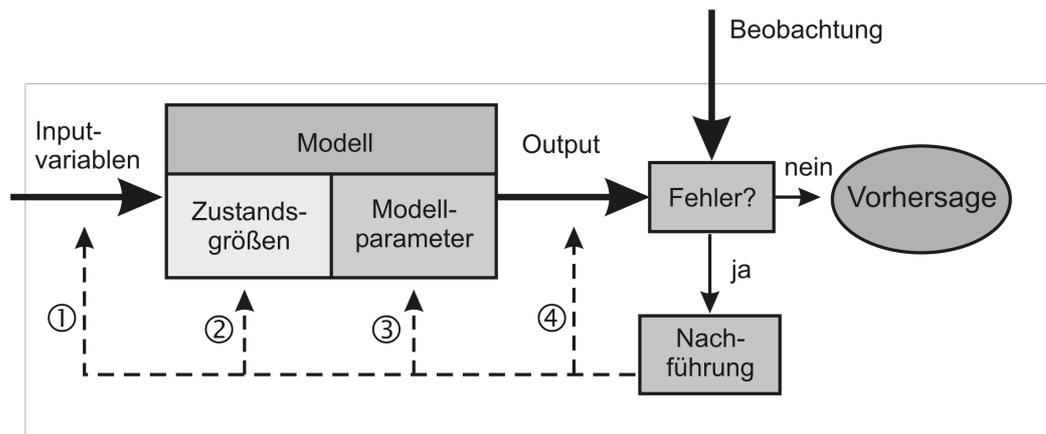


Abb. 1: Mögliche Ansätze für die Nachführung in hydrologischen Modellen (nach Reefsgard, 1997, modifiziert).

Nach Reefsgard (1997) können vier verschiedene Ansätze für die Korrektur definiert werden:

3.1 Update der Inputvariablen

Diese Art der Korrektur kann angewendet werden, wenn als Quelle für Vorhersagefehler die Inputdaten (zumeist Temperatur und Niederschlag) identifiziert werden können. Hierbei müssen die Inputdaten so lange verändert werden, bis die Modellergebnisse bestmöglich an die Beobachtungen angepasst sind. Wie in Abschnitt 2 erwähnt, ist der Input „Niederschlag“ niemals die „wahre“, im Einzugsgebiet tatsächlich aufgetretene Menge Regen oder Schnee, da er aus Punktmessungen und daraus ermittelten flächenhaften Daten (Gebietsmittel, Rasterwerte) hervorgeht. Es handelt sich also um die aus den Beobachtungen ermittelte, bestmögliche Annäherung an die Wirklichkeit. Eine Modifikation dieses, von vorne herein mit einer Unsicherheit behafteten Wertes täuscht eine Genauigkeit vor, die nicht gegeben ist und ist daher mit Vorsicht zu behandeln.

Die Änderung von Inputdaten geht bei Speichermodellen mit einer Änderung von Zustandsgrößen einher, kann also auch zur Nachführung von Zustandsgrößen herangezogen werden. Koma et al. (2006) stellen im Zuge dieser Tagung den Ensemble-Kalmanfilter vor, der dazu verwendet wird, um mit Hilfe von Niederschlagsensembles die Bodenfeuchte eines Modells nachzuführen, wodurch der Unsicherheit des Inputwertes „Niederschlag“ Rechnung getragen wird.

3.2 Update der Zustandsvariablen

Eine andere Möglichkeit ist es, Zustandsvariablen eines kontinuierlichen Modells – z.B. das Schnee-Wasser-Äquivalent (SWE) oder den Wassergehalt einzelner Speicher im Modell – zu adaptieren. Speziell die Beschreibung der Zustände Vorbefeuchtung und Mächtigkeit einer eventuellen Schneedecke sind wegen ihres großen Einflusses auf die Einzugsgebietsreaktion für die gute Modellierung des Abflussgeschehens essenziell. Für die Nachführung kommen zwei Möglichkeiten in Betracht:

- a) Die einfache Variante ist es, den modellierten Systemzustand zum aktuellen Berechnungszeitpunkt durch den entsprechenden beobachteten Wert zu ersetzen. Das erfordert allerdings aktuelle Messwerte, die für typische Zustandsvariablen kontinuierlicher Wasserhaushaltsmodelle wie z.B. "Wassergehalt einzelner Speicher" nicht einfach zu messen sind – Bodenfeuchtemessungen sind an einzelnen Punkten nicht repräsentativ für ein Einzugsgebiet. Diese Variante ist für on-line Systeme nicht geeignet und bei der off-line Simulation nur möglich, wenn die notwendigen Werte in ausreichender Dichte im Vorfeld ermittelt werden.
- b) Eine umfassendere Möglichkeit ist es, die Zustandsvariablen mittels Kalmanfilter zu aktualisieren. Für lineare Systeme ist diese Möglichkeit erprobt, für nichtlineare Systeme sind Modifikationen notwendig (erweiterter Kalmanfilter, Ensemble-Kalmanfilter), mit deren Hilfe näherungsweise gearbeitet werden kann. Auf den Kalmanfilter wird in Kapitel 4.1 eingegangen.

Zur Anwendung kann diese Art der Nachführung kommen, wenn einer Zustandsvariablen des Modells großer Einfluss auf die Reaktion des Einzugsgebietes zugeschrieben werden kann. Komma et al. (2006) stellen im Zuge dieser Tagung die Nachführung der Bodenfeuchte im Prognosemodell für den Kamp mittels Ensemble-Kalmanfilter vor. Die Bodenfeuchte ist verantwortlich für den Anteil des Niederschlags, der vom Boden aufgenommen werden kann und jenem Anteil, der rasch abflusswirksam wird und hat großen Einfluss auf das Ergebnis des Vorhersagemodells.

3.3 Update der Modellparameter

Die Anpassung von Modellparametern wird sowohl von Refsgaard (1997), als auch von Todini (2005) als problematisch angesehen. Refsgaard zitiert Kachroo (1992), der das Aktualisieren von Modellparametern als "on-line Kalibrierung" definiert, und speziell für komplexere Modelle als nicht gerechtfertigt ansieht, da zu viele Parameter im Spiel sind, um gleichzeitig adaptiert zu werden. Kachroo hält den Gedanken, dass sich Modellparameter über den kurzen Zeitraum der Vorhersageerstellung verändern, für nicht akzeptabel und erkennt keine Vorteile in der re-Kalibrierung der Parameter mit jedem Zeitschritt. Todini (2005) führt an, dass das Schätzen von Parametern oftmals zu höchst unstabilen Ergebnissen führt und lehnt dieses Verfahren daher im Gleichklang mit dem von ihm zitierten WMO-Bericht "Simulated real-time intercomparison of hydrological models" (1992) ab.

Dem ist entgegenzuhalten, dass vom Konzeptionellen her weder die Modellstruktur, noch die dem gewählten Modell zugeordneten Modellparameter (bzw. -werte) als die einzig mögliche Art der Nachbildung des Prozesses – in diesem Fall des in hohem Grade nicht-linearen Niederschlag-Abfluss-Prozesses – angesehen werden kann. Wird dieses Verhalten vom gewählten Modell nicht entsprechend wiedergegeben, ist es im konkreten Fall besser, die jeweiligen Parameter zu verändern, um eine gute Nachbildung des aktuellen Zustandes zu erreichen. Gute Erfahrungen mit der Anpassung von Modellparametern mittels eines Bayes'schen Systems und Kalman-

Filter wurden im Zuge von Vorhersagen für die Salzach (System HYDRIS für den Hydrographischen Dienst des Amtes der Salzburger Landesregierung, Tauernkraft (TKW) und Salzburg AG) bzw. für die Donau und die Drau (System HYSIM für AHP/Verbund) gemacht. Auf dieses System wird in Kapitel 4.1. eingegangen.

Das Verfahren ist in diesem Fall deswegen gut geeignet, weil das Modell keine Speicher verwendet, die über einen Bilanzierungszeitraum ausgeglichen sein sollten, sondern weil es sich bei der Beschreibung der Wellentransformation via Nash-Kaskade um ein Verfahren handelt, das gerade durch die Nachführung sehr schnell auf beobachtete Änderungen im Abflussgeschehen, die durch eine Änderung der Parameter für die Wellentransformation beschrieben werden können, reagieren kann. Den auftretenden Veränderungen zwischen Zufluss- und Abflussvolumen wird Rechnung getragen, indem in der Beobachtungsgleichung ein multiplikativer Volumskorrekturfaktor oder ein additives Korrekturglied eingeführt wird, die beide einer Nachführung unterworfen werden.

3.4 Update der Modellergebnisse – Outputkorrektur

Das Nachführen der Modellergebnisse ist das laut der WMO-Studie (1992) am weitesten verbreitete Verfahren. Das Nachschalten einer Outputkorrektur an den eigentlichen Rechenschritt eines Vorhersagemodells ist an keine Voraussetzungen gebunden. Die Outputkorrektur ist unabhängig vom Prognoseverfahren.

Bei der Outputkorrektur müssen zwei unterschiedliche Systeme der Vorhersagen-erstellung unterschieden werden:

3.4.1 Outputkorrektur einer einzelnen Vorhersage

Die Vorhersage ist das Ergebnis eines einzigen Modells/Modelllaufes. Hierbei werden die Beobachtungen des Abflusses mit den Vorhersagen aus dem Modell verglichen und versucht, die Fehler entweder mittels eines statistischen Ansatzes (z.B. ein ARMA-Modell) vorherzusagen, um die Prognosen zu verbessern (Todini, 2005). Es ist festzuhalten, dass die Fehlerprognose auf dem aktuellen Zustand des Einzugsgebietes beruht und daher mit zunehmender Vorhersagefrist an Genauigkeit verliert.

Ein Beispiel für diese Art der Korrektur wird in Kapitel 4.2.1. gegeben.

3.4.2 Kombination mehrerer Vorhersagen

Die Vorhersage ist die Kombination aus den Ergebnissen mehrerer Modelle unterschiedlichen Typs oder aus mehreren Modellläufen eines einzigen Modells mit unterschiedlicher Konfiguration bzw. Parametrierung (Ensembles).

Die Aufgabe bei diesem Ansatz besteht darin, ein geeignetes Verfahren zu finden, wie die einzelnen Modellergebnisse gewichtet werden, um durch deren Kombination eine korrigierte Vorhersage zu erhalten. Mögliche Kriterien für die Gewichtung werden in Kapitel 4.2.2. angeführt.

Es besteht dann die Möglichkeit, das Ergebnis einer Ensembleprognose einer Outputkorrektur wie unter 3.4.1. beschrieben, zu unterziehen.

4. Ansätze für die Nachführung – Beispiele der Anwendung

4.1 Der Kalmanfilter

Kalmanfilter sind dadurch gekennzeichnet, dass die den Prozess beschreibenden Größen x_k (Zustandsgrößen) ebenso wie die Beobachtungsgrößen y_k als Zufallsvariable betrachtet werden. Das heißt, dass durch die Beschreibung eines stochastischen Prozesses für jede Systemgröße eine Angabe über deren Wahrscheinlichkeit gemacht werden kann.

Jeder Kalmanfilter besteht aus einer Systemgleichung und einer Beobachtungsgleichung. Die Systemgleichung beschreibt die dynamische Veränderung der System- bzw. Zustandsgröße. Die Beobachtungsgleichung stellt die Verbindung zwischen der Systemgröße und den Beobachtungen her.

Die Systemgleichung lautet $x_k = \Phi(x_{k-1}, u_k + \varepsilon_k)$, wobei Φ das Modell darstellt, x_k die Zustandsgröße zum Zeitpunkt k (z.B. Wasserstand, Durchfluss), u_k Modell-eingangsgroßen (z.B. Niederschlag, Verdunstung) und ε_k ein stochastisches Element ist, das die Modellunsicherheit repräsentiert.

Es wird angenommen, dass Beobachtungen von z.B. Wasserstand oder Durchfluss an verschiedenen Stellen des modellierten Systems vorhanden sind. Daraus lässt sich die Beobachtungsgleichung formulieren: $z_k = C_k \cdot x_k + \eta_k$. C_k ist die Matrix, die die Beziehung zwischen Beobachtungen und Zustandsgrößen des Modells beschreibt, η_k ist ein zufälliger Fehler, der die Unsicherheit der Beobachtung darstellt.

Die Einschätzung der Zustandsgröße x_k erfolgt aufgrund der Beobachtungen y_{k-1} bis zum aktuellen Zeitpunkt $(k-1)$. Die Wahrscheinlichkeitsdichte $p(x_k|y^{k-1})$ wird als a-priori-Dichte bezeichnet. Nach Eintreffen der neu hinzukommenden Beobachtung y_k zum Zeitpunkt k kann eine neue Dichte ausgegeben werden, die a-posteriori-Dichte $p(x_k|y^k)$. Die Veränderung der Größe ergibt sich aus der dynamischen Struktur des betrachteten Prozesses, ausgedrückt z.B. über eine deterministische Formulierung des Hervorgehens von x_k aus den vorangegangenen Werten x_{k-1}, \dots und dem Einfluss der Beobachtungen y_k , die als Träger von Information gesehen werden können.

Die Dichtefunktion ist nach Einbeziehung der letzten, aktuellen Beobachtung (d.h. die a-posteriori-Dichte) proportional dem Produkt aus der a-priori-Dichte und der Likelihoodfunktion (=des Kalmangewichtes) der Beobachtung zum aktuellen Zeitpunkt. Die Likelihoodfunktion quantifiziert den Informationsgehalt der zur Verfügung stehenden neuen Daten. Treffen also im Verlauf der Zeit fortwährend (z.B. stündlich) neue Beobachtungen ein, lässt sich nach diesem Schema laufend die a-posteriori-Dichte neu ermitteln und die Zustandsgröße neu schätzen.

Unter der Voraussetzung, dass die beiden Dichtefunktionen normalverteilt sind, kann sowohl der Beobachtung y_k als auch der Zustandsgröße x_k eine stochastische "Störgröße" in Form einer Standardabweichung zugeordnet werden. Somit lassen sich sowohl die Unsicherheit der Beobachtung als auch die Unsicherheit der Modellierung der inneren Dynamik eines Prozesses und die Abhängigkeit der Zustandsgröße von

den Eingangsgrößen angeben. Ist also die aus der Beobachtung stammende Information aussagekräftig, so ist zu erwarten, dass die a-posteriori-Dichte geringe Varianz aufweist (siehe Abbildung 2).

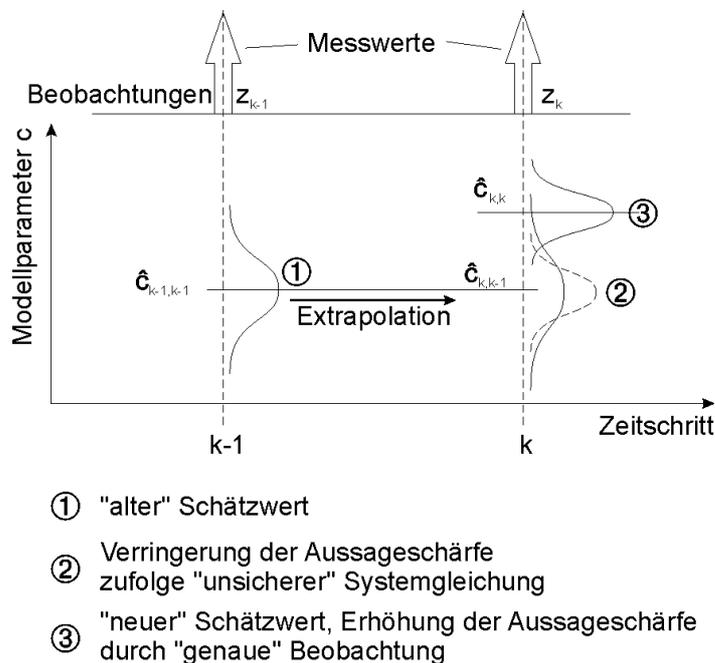


Abb. 2: Erhöhung der Aussageschärfe eines Parameters nach Schätzung mit Kalmanfilter durch eine genaue Beobachtung.

Im Kontext der Modellbildung für Vorhersagezwecke ergeben sich aus dem Kalman-Algorithmus folgende Vorteile (Gutknecht, 1994):

- Der Unsicherheit in der Echtzeitsituation kann Rechnung getragen werden.
- Die aktuellen Beobachtungen können zur "Nachführung" des Modells herangezogen werden, die Prozessparameter sind einem "Lernprozess" unterworfen.
- Die laufende Neuschätzung der Zustandsgrößen zu jedem Zeitpunkt liefert einen Einblick in die Eignung des Modells zur Beschreibung der gewählten Prozesse im Verlauf der Zeit.

Beispiel Vorhersagesystem HYSIM

Das Vorhersagesystem HYDRIS (Salzach) bzw. HYSIM (Drau und Donau) ist modular aufgebaut, wobei jeder der Module einen Prozess der Abflusststehung wiedergibt (Gutknecht, 1994; Gutknecht et al., 1990).

Im System HYDRIS/HYSIM kommt die Nachführung der Modellparameter in mehreren Modulen zum Tragen:

- Nachführung des Effektivregens im Modul *Niederschlag-Abfluss-Vorhersage*
 Die Abflussberechnung erfolgt mit dem Unit-Hydrograph- Verfahren, wobei die abflusswirksamen Anteile des Niederschlags (der Effektivregen) mittels eines dynamischen adaptiven Schätzalgorithmus berechnet werden. Beobach-

tungswert ist der Abfluss, die Systemgleichung beschreibt die Abflussentstehung aufgrund des Effektivregens und eines Abflussbeiwertmodells (Aufteilung in die Komponenten Direktabfluss, Basisabfluss und Anteil, der ins Grundwasser versickert). Die rekursive Schätzung des Effektivregens erfolgt zu jedem Berechnungszeitschritt aufgrund der zuletzt gemachten Beobachtung des Abflusses, wobei im Modell die $(r-1)$ zurückliegenden Effektivregenelemente als stochastische Größen behandelt werden, die einige Zeitschritte hindurch laufend zu aktualisieren sind.

Die Systemgleichung beschreibt also die Schätzung des Effektivregens über ein Abflussbeiwertmodell, die Beobachtungsgleichung setzt den beobachteten Abfluss in Beziehung zum Effektivregen.

- Nachführung der Nash-Kaskaden-Parameter und des Volumskorrekturfaktors im Modul *Wellenablauf*

Die Beschreibung des Wellenablaufes im Gerinne erfolgt über die Transformation der Welle mit einer Übertragungsfunktion in Form eines Speicherkaskadenmodells, der Nash-Kaskade, die über die Parameter Speicheranzahl n und Speicherkoeffizient K bzw. Wellenlaufzeit $t_l = n \cdot K$ beschrieben wird. Der Tatsache, dass sich die Verformung der Welle und deren Fortpflanzungsgeschwindigkeit mit unterschiedlichem Durchfluss verändern kann, wird dahingehend Rechnung getragen, dass die Parameter der Nash-Kaskade selbst bei jedem Zeitschritt einer Nachführung unterworfen werden, wobei gewählt werden kann, ob nur der Parameter Laufzeit t_l oder beide Parameter für die Nachführung freigegeben werden.

Fest verbunden mit dem Kaskadenmodell ist der im Anschluss an den mittels Kalmanfilter ermittelten Erwartungswertes für die Kaskadenparameter gewählte Korrekturansatz, der die Zunahme des Durchflusses zwischen zwei Systemknoten aufgrund diffuser Abflüsse aus dem Zwischengebiet beschreibt. Er beruht auf der Annahme, dass ein linearer Zusammenhang zwischen dem Abfluss aus dem Zwischengebiet q_k^S und dem transformierten Zufluss q_k^H besteht. Dieser Zunahme wird mit Hilfe einer multiplikativen oder additiven Volumskorrektur Rechnung getragen, der Volumskorrekturfaktor c_k wird im Lauf der Vorhersageberechnung in jedem Zeitpunkt nach Eintreffen der Abflussbeobachtung q_k^A beschrieben geschätzt.

4.2 Outputkorrektur

4.2.1 Fehlerprognose

Der einfachste Ansatz zur Fehlerprognose ist es, den zuletzt beobachteten Fehler (also die Differenz zwischen dem neuen beobachteten Wert $Q_{beob}(t)$ und dem zuletzt für diesen Zeitpunkt gemachten Vorhersagewert $Q_{sim}(t-1|t)$) auf die neue Prognose aufzuprägen (additive Korrektur) oder die neue Prognose mit dem Faktor $Q_{sim}(t-1|t)/Q_{beob}(t)$ zu multiplizieren (multiplikative Korrektur).

Besser geeignet, da nicht von einzelnen Ausreißern in Beobachtung oder Prognose stark beeinflusst, ist das Ansetzen eines Fehlermodells, das aus den Unterschieden zwischen Modell und Beobachtungen eines Beobachtungszeitraumes n (reichend von t_{0-n} bis t_0) eine Fehlerprognose berechnet und den aktuellen Vorhersagen aufprägt. Ein solches System wird in Madsen und Skotner (2005) vorgestellt.

Beispiel: Hochwasservorhersagesystem Donau

Als weiteres Beispiel wird hier die Fehlerprognose vorgestellt, wie sie im Zuflussganglinienmodul für das Hochwasservorhersagesystem Donau (Land OÖ, Land NÖ) und Kamp (Land NÖ, EVN) umgesetzt wurde (Blöschl et al., 2006).

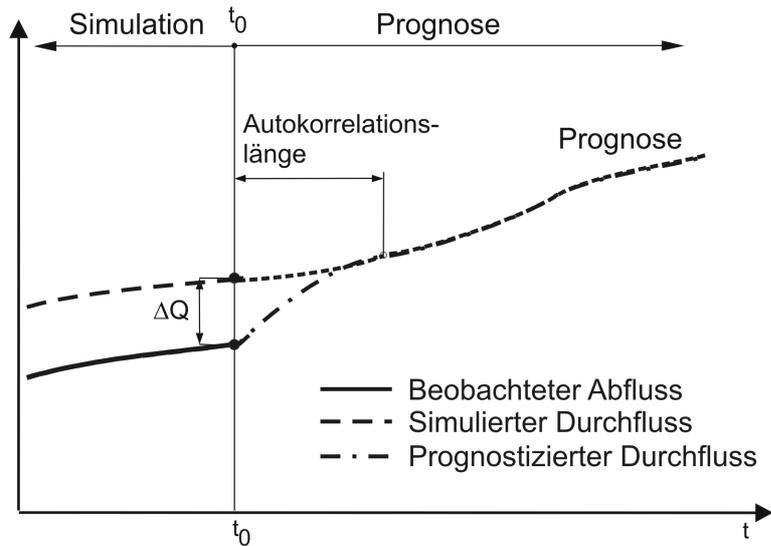


Abb. 3: Prinzip der Korrektur der Abflussprognosen mit einem autoregressiven Fehleransatz.

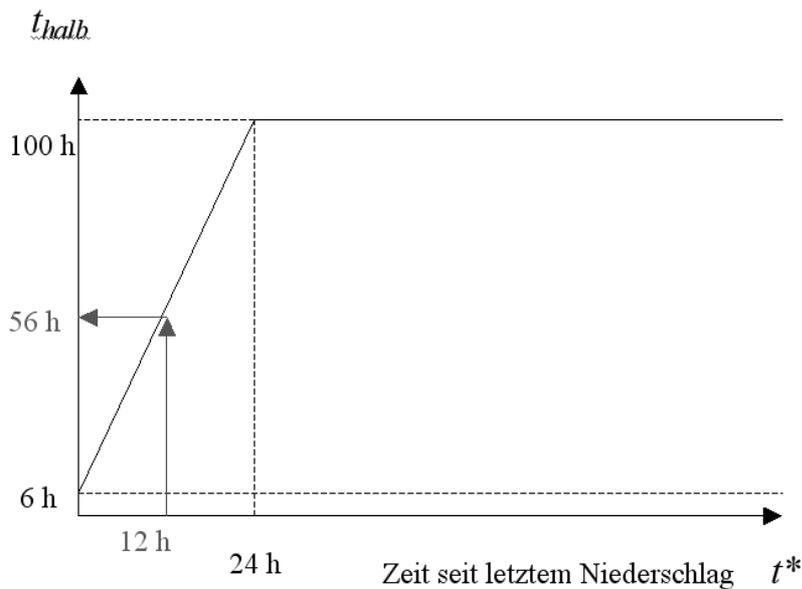


Abb. 4: Entwicklung der Halbwertszeit t_{halb} .

Das Fehlermodell beruht auf dem Prinzip der Autokorrelation (AR1-Modell). Der aktuelle Prognosefehler ist die Differenz zwischen aktueller Beobachtung und Prognose für diesen Zeitpunkt, berechnet zum vorigen Zeitpunkt $\varepsilon_Q(t_0) = Q_{beob}(t_0) - Q_{sim}(t_0-1 | t_0)$. Das Modell für den Fehler ist definiert als $\varepsilon_Q(t) = \varepsilon_Q(t_0) \cdot \alpha^t$, wobei $\varepsilon_Q(t)$ der zeitabhängige Prognosefehler und α^t der Autokorrelationskoeffizient für eine Zeitverschiebung $\Delta t = 1$ beschreibt. t ist die Anzahl der Zeitschritte (h) gerechnet vom Prognosezeitpunkt t_0 , der Autokorrelationskoeffizient α^t bestimmt die Länge des Einflussbereiches (Autokorrelationslänge) des Prognosefehlers zum Zeitpunkt t_0 . Jene Zeit, in welcher der Fehler $\varepsilon_Q(t)$ auf die Hälfte des Fehlers $\varepsilon_Q(t_0)$ zurückgeht, kann als Halbwertszeit t_{halb} bezeichnet werden. Der Autokorrelationskoeffizient lässt sich als Funktion dieser Halbwertszeit formulieren: $\alpha = 0.5^{1/t_{halb}}$. Durch die geeignete Wahl von α und t_{halb} kann der Dynamik der beobachteten Welle (viel Dynamik – kurze Halbwertszeit, wenig Dynamik – lange Halbwertszeit) Rechnung getragen werden (siehe dazu Abbildung 3: hier wird die Abhängigkeit der Halbwertszeit von der Zeit seit dem letzten Niederschlag angesetzt). Mit der Autokorrelationslänge wird die Gültigkeit der Korrektur – je nach Dynamik des Abflussgeschehens – beschränkt.

Diese Art der Korrektur ist gut geeignet, sofern ein phasenweise stabiler Amplitudenfehler in der Simulation vorliegt und das Modellergebnis mit der geglätteten Beobachtungsganglinie übereinstimmt.

4.2.2 Kombination von Modellen

Die Kombination von Vorhersagen unterschiedlicher Modellläufe (Ensembles) oder mehrerer Modelle kann nach unterschiedlichen Gesichtspunkten erfolgen, wie zum Beispiel:

- *Gewichtung nach Jahreszeit.* Je nach Jahreszeit dominieren unterschiedliche Prozesse das Abflussverhalten eines Einzugsgebietes. Bei Verwendung eines einzelnen Modells können unterschiedliche Parametersätze je nach Jahreszeit das Verhalten des Gebietes beschreiben. Bei Verwendung unterschiedlicher Modelltypen können die Ergebnisse je nach "Spezialisierung" eines einzelnen Modells für die dominanten Prozesse einer Jahreszeit gewichtet werden.
- *Gewichtung nach hydrologischer Situation.* Auch innerhalb einer Jahreszeit kann es je nach vorherrschender hydrologischer Situation zu unterschiedlichen dominanten Prozessen im Abflussverhalten kommen. Die Gewichtung einzelner Modellkonfigurationen bzw. Modelltypen erfolgt dann nach deren Fähigkeit, den dominanten Prozess abzubilden.

Ein Verfahren, hydrologische Situationen zu identifizieren, wurde von Blöschl und Merz (1999) entwickelt. Dabei wird aufgrund hydrologischer Kenngrößen (Messungen und Modellergebnisse: Temperatur, Niederschlag (Regen/Schneefall), SWE, Schmelze) und deren Veränderung innerhalb der letzten n Tage beurteilt, um welche hydrologische Situation es sich handelt.

- *Gewichtung nach Durchflussbereich.* Aus der Erfahrung mit den Modellen bzw. Modellläufen kann die Gewichtung je nach Durchflussbereich erfolgen.

- *Gewichtung unter Einbeziehung einer statistischen Analyse.*

Beispiel: SAMBA

In der vorliegenden Form stellt das von Andrade-Leal (2002) entwickelte System SAMBA die optimierte Vorhersage als eine über Wahrscheinlichkeitsmatrizen gewichtete Linearkombination der jeweils zur Verfügung stehenden Ergebnisse der Einzelmodelle dar. Die Definition der Matrizen stellt sich mathematisch gesehen als ein Optimierungsproblem über einen multidimensionalen Parameterraum dar. Hinzu kommt, dass sowohl die Eingangs- als auch die Kontrollwerte des bei der Entwicklung verwendeten Vorhersagesystems, nämlich Niederschläge, Temperaturen und Durchflüsse, mit unterschiedlichen Unschärfen behaftet sind. Daher ist die exakte mathematische Berechnung des Problems außerordentlich kompliziert. Mit SAMBA kann das beschriebene Problem durch eine Simulation vereinfacht gelöst werden.

Ein selbstkalibrierendes Fehlersystem nähert die optimierte Prognose an. Diese wird als eine mit Wahrscheinlichkeitsmatrizen gewichtete Linearkombination der zur Verfügung stehenden Modelle dargestellt. Zur Schätzung der Wahrscheinlichkeitsmatrizen dient ein Bewertungssystem, das durch eine statistische Auswertung der Genauigkeit der Vorhersagen der unterschiedlichen Modelle in der Vergangenheit aufgebaut wird, wobei die Fehler der einzelnen Modelle jeweils individuell über ein Optimalitätskriterium unterschiedlich bewertet werden können.

Als Optimalitätskriterien können derzeit unmittelbar a) der Absolutwert des Vorhersagefehlers oder b) dessen Quadrat konfiguriert werden. Programmintern sind weitere Module vorgesehen, mit deren Hilfe problemlos andere Optimalitätskriterien konfiguriert werden können wie z.B. Bewertung der Vorhersagefehler je nach dem Durchfluss am Vorhersagepegel, nach Über- oder Unterschätzung, nach energie-wirtschaftlicher Relevanz, nach Wasserstand (Ausuferung), etc.

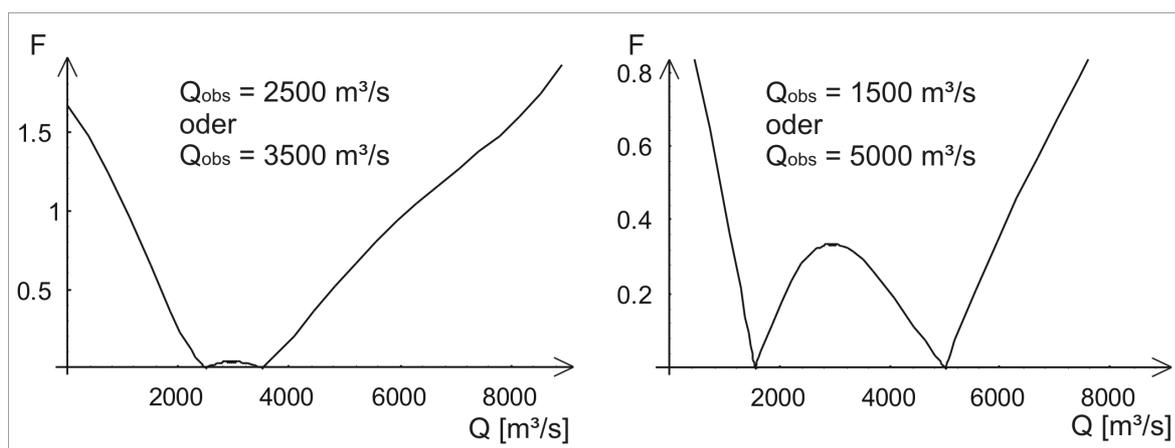


Abb. 5: Multiplikator F zur Fehlerbewertung in Hinblick auf die Energieerzeugung bei unterschiedlichen Betriebszuständen.

Das Verfahren wurde für das Vorhersagesystem HYSIM für die AHP entwickelt, wo energiewirtschaftliche Kriterien im Vordergrund stehen. In Abbildung 5 sind die

Verläufe der Multiplikatoren für die Fehlerbewertung als Funktion des Durchflusses unter Annahme von zwei verschiedenen Betriebszuständen (500 m³/s bzw. 3500 m³/s) dargestellt. Der Verlauf der Multiplikatoren steht in Zusammenhang mit dem Leistungsschlüssel eines Kraftwerkes, wonach bei zwei unterschiedlichen Durchflüssen (kleiner und größer als der Ausbaudurchfluss) dieselbe Wirkleistung generiert werden kann. In manchen Bereichen (z. B. Durchfluss, bei dem zufolge Hochwassers Wehre geöffnet werden) sind Vorhersagefehler von größerer Tragweite als in Bereichen rund um den Ausbaudurchfluss (hier bei ca. 3000 m³/s), wo eine Abweichung in der Durchflussvorhersage wenig Auswirkung auf die Leistungsvorhersage hat. Daher werden diese Fehler stärker gewichtet, um den Effekt in der Wahrscheinlichkeitsmatrix für die Überlagerung der einzelnen Modelle zu berücksichtigen. In ähnlicher Weise könnten auch Über- oder Unterschätzungen des tatsächlichen Durchflusses unterschiedlich gewichtet werden.

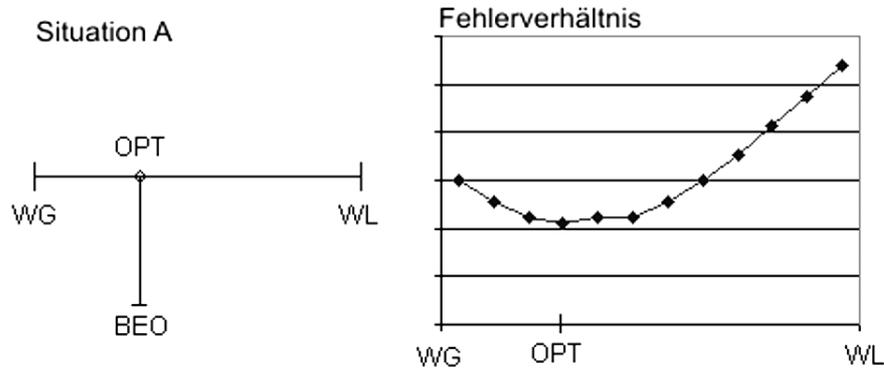


Abb. 6: Situation A mit dem zugehörigen Fehlerverhältnis (Bezeichnungen siehe Text).

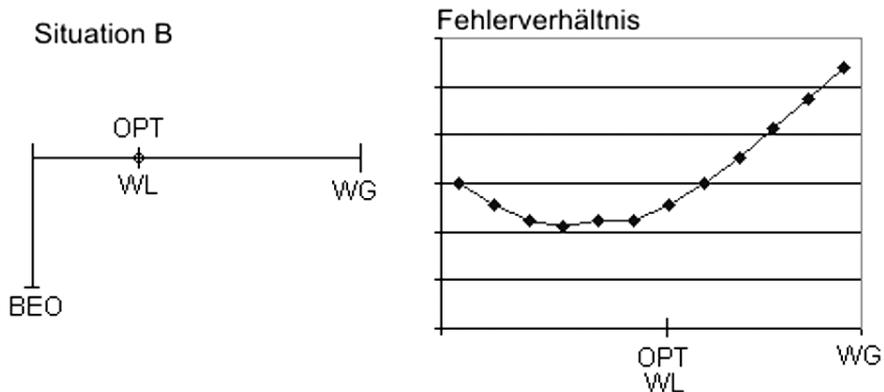


Abb. 7: Situation B mit dem zugehörigen Fehlerverhältnis (Bezeichnungen siehe Text).

Die Methode der Ermittlung der Gewichtungsmatrix lässt sich exemplarisch am Beispiel zweier Prognosevarianten eines Modells (WL (1) bzw. WG (2)) demonstrieren. In Situation A in Abbildung 6 liegt die optimale Linearkombination OPT der Ergebnisse von WL bzw. WG dort, wo die Orthogonale zur Verbindung von WL und WG durch den Beobachtungspunkt (bzw. -vektor) BEO geht (daher

Orthogonalisierungsverfahren). Im rechten Teil der Abbildung 6 sind die „Fehler“ (bzw. ihre Bewertung) über diskreten Werten des Gewichtungsfaktors von WG bzw. WL aufgetragen. Abbildung 7 zeigt das Modellverhalten für den Fall B, wenn weder WL noch WG ganz in die Nähe von BEO kommen. In diesem Fall wählt das Optimierungsmodell die Kombination, die dem Optimum „relativ“ am nächsten kommt, also das Modell WL allein.

In Abbildung 8 (links) wird die Fehlerkenngröße exemplarisch für zwei unterschiedliche Prognosefristen an einem Pegel über diskreten Gewichtungsfaktoren der Modelle WL bzw. WG aufgetragen. Der erste Punkt links bedeutet alleinige (100%) Verwendung von WL, der letzte rechts 100% WG, dazwischen wird mit Schritten von 0,1 diskretisiert. Abbildung 8 (rechts) zeigt den Wert der Wahrscheinlichkeitsmatrix (des Gewichtungsfaktors) für das Modell WG in Abhängigkeit von der Prognosefrist. Durch Auffinden des Minimums des Fehlers je nach Vorhersagefrist kann die Wahrscheinlichkeitsmatrix für jedes einzelne Modell ermittelt werden.

Durch die statistische Auswertung von Vorhersagefehlern kombiniert mit der Möglichkeit, die Fehler je nach Anwendung und Relevanz zu gewichten, steht mit SAMBA ein Verfahren zur Verfügung, das unterschiedlichen Bedürfnissen angepasst werden kann.

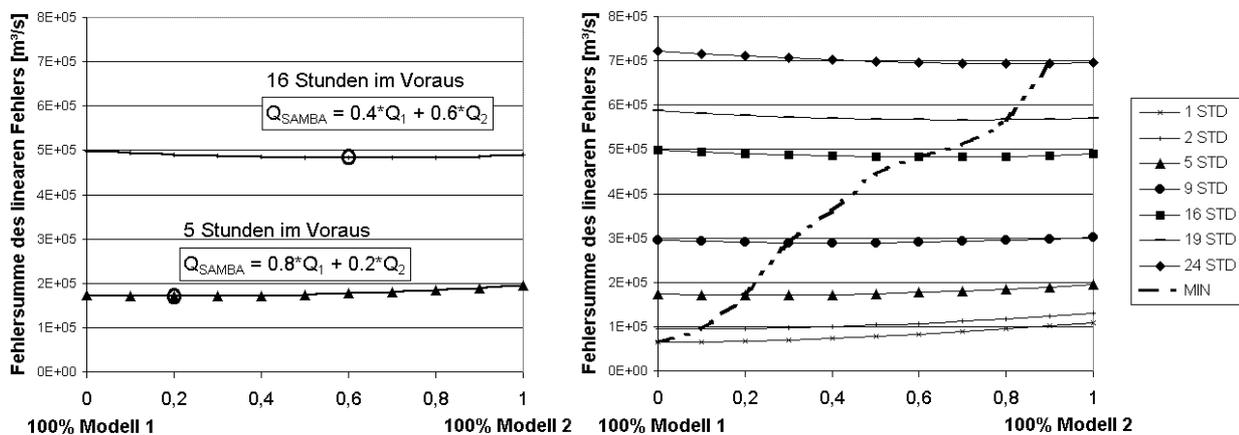


Abb. 8: links: Fehlerverhältnis der Modelle WL (1) und WG (2). Rechts: Veränderung der Wahrscheinlichkeitsmatrix für das Modell WG (2) in Abhängigkeit von der Prognosefrist

5. Literatur

Andrade-Leal, R.N., Drabek, U., Kirnbauer, R. (2002) SAMBA: Ein selbstkalibrierendes Fehler-System für die Ermittlung einer optimierten Prognoseganglinie und ihres Streubereiches. *Beitrag XXI Konferenz der Donauländer*, Bukarest, 2.-6. September 2002.

Blöschl, G. und Merz, R. (1999) Endbericht EPV-Zuflussvorhersage; Projektteil Räumliche Analyse der Durchflussentwicklung. Projektbericht. TU Wien. Institut f. Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft.

- Blöschl, G., Ch. Reszler und J. Komma (2006) Hochwasservorhersage für den Kamp. In: Hochwasservorhersage. Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 199, Technische Universität Wien, Seiten 39-54.
- Gutknecht, D. (1994) HYFORS - Ein hydrologisches Vorhersage- und Simulationsmodell für Flussgebiete. *ÖIAZ*, 139. Jg.(9):386–392.
- Gutknecht, D., Schnatter, S., Kirnbauer, R., Blöschl, G., Kölbl, CH. (1990) Zuflussprognose Obere Drau. Abschlußbericht über die Modellentwicklung. TU Wien. Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft.
- Haiden, T. (2006) Niederschlagsprognosen mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung: Fortschritte und Probleme. *Wiener Mitteilungen*, Band 199.
- Kachroo, R.K. (1992) River flow forecasting. part 1. A discussion of the principles. *Journal of Hydrology*, 133(1-2):1–15.
- Komma, J., Blöschl, G., Reszler, Ch. (2006) Nachführung mittels Ensemble-Kalman-Filter. In: Hochwasservorhersage. Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 199, Technische Universität Wien, Seiten 243-258.
- Madsen, H. and Skotner, C. (2005) Adaptive state updating in real-time river flow forecasting – a combined filtering and error forecasting procedure. *Journal of Hydrology*, 308:302-312.
- Refsgaard, J.Ch. (1997) Validation and Intercomparison of Different Updating Procedures for Real-Time Forecasting. *Nordic Hydrology*, 28:65–84.
- O’Connell, P.E. and E. Todini (1996) Modelling of rainfall, flow and mass transport in hydrological systems: an overview. *Journal of Hydrology*, 175:3–16.
- Todini, E. (2005) Rainfall-Runoff models for real time forecasting. In: *Encyclopedia of Hydrological Sciences* Volume 3, Part 11: Rainfall-runoff Modeling, Section 123:1869–1896. John Wiley and Sons.
- WMO - World Meteorological Organization (1992) Simulated real-time intercomparison of hydrological models. *Technical Report WMO-Publication Nr. 779*.
- Xiong, L. and K.M. O’Connor (2002) Comparison of four updating models for real-time river flow forecasting. *Hydrological Sciences*, 47(4):621–639.

Anschrift der Verfasserin:

Dipl.-Ing. Ulrike Drabek
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Abt. Ingenieurhydrologie.
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/222-2, A - 1040 Wien
Tel. +43 / (0)1 / 58801 - 22314
E-mail: drabek@hydro.tuwien.ac.at

NACHFÜHRUNG MITTELS ENSEMBLE-KALMAN-FILTER

Jürgen Komma, Günter Blöschl, Christian Reszler

1. Einleitung

Um im Vorhersagefall die best mögliche Genauigkeit der Hochwasserprognosen zu erreichen ist es sinnvoll, die aktuell verfügbaren Abflussmessungen zur Reduktion der hydrologischen Unsicherheiten zu verwenden. Dabei ist zu beachten, dass auch die Messungen der Wasserstände und deren Umrechnung in Durchflüsse nicht frei von Fehlern und Ungenauigkeiten sind. Die Zielsetzung, den Prognosefehler so klein als möglich zu halten, kann durch die Verbindung der Modellergebnisse mit den Messdaten unter Abwägung der jeweils eingetragenen Unsicherheiten erreicht werden. Die Grundidee besteht darin, durch die Kombination zweier jeweils unsicherer Größen die Gesamtunsicherheit zu reduzieren.

Ein Verfahren zur optimalen Zustandsschätzung unter Berücksichtigung der Modell- und Messungenauigkeiten, ist das Kalman-Filter (KF) (Kalman, 1960). Mit diesem rekursiven Algorithmus können die Zustandsgrößen dynamischer Modelle nachgeführt werden. Eine Voraussetzung für die Anwendung des Kalman Filters ist allerdings die Linearität des verwendeten Modells. Für nichtlineare dynamische Systeme muss eine Linearisierung der Modellgleichungen erfolgen, um das Kalman-Filter anwenden zu können (Extended Kalman-Filter EKF). Eine Alternative zum Extended Kalman-Filter ist der sogenannte Ensemble-Kalman-Filter (EnKF) (Evensen, 1994). Der Ensemble-Kalman-Filter ist auch in Verbindung mit nichtlinearen Systemen, wie die meisten Niederschlag-Abflussmodelle, anwendbar

Eine grundlegende Entscheidung bei der Anwendung von Nachführalgorithmen im Rahmen der operationellen Hochwasservorhersage ist die Wahl der Prozessgröße, welcher die Modellfehler zugeordnet werden. Neben der direkten Nachführung des Modelloutputs können auch die Modellparameter, die Modellzustandsgrößen oder der Modellinput nachgeführt werden (Drabek, 2006). Im vorliegenden Beitrag wird der EnKF für die Nachführung von Hochwasservorhersagen mittels kontinuierlicher Niederschlag-Abflussmodelle vorgestellt, wobei der Modellfehler dem Niederschlagsinput zugeordnet wird.

2. Kalman-Filter und Ensemble-Kalman-Filter

2.1 Mathematische Formulierung

Die Grundlage des Kalman-Filters ist die Beschreibung des Modells durch eine *Modellgleichung*:

$$x_k = \Phi(x_{k-1}, u_k) \quad (1)$$

in der $\Phi()$ das Modell darstellt, x_k die Schätzwerte des Abflusses zum Zeitpunkt k beschreibt und u_k Modelleingangsgrößen (z.B. Niederschlag, Verdunstung, ...) sind (Schilling, 1987). Die Modelleingangsgrößen werden als fehlerbehaftet angesetzt:

$$x_k = \Phi(x_{k-1}, u_k + \varepsilon_k) \quad (2)$$

wobei ε_k eine Zufallszahl ist und den Modellfehler mit einer Modellvarianz Q_k darstellt. In Gleichung 2 wird angenommen, dass die Unsicherheit aus den Modelleingangsgrößen stammt.

Es wird nun angenommen, dass Durchflussmessungen z_k an verschiedenen Stellen des Systems vorhanden sind. Daraus lässt sich die *Beobachtungsgleichung* formulieren:

$$z_k = C_k x_k + \eta_k \quad (3)$$

C_k ist die Matrix, die die Beziehung zwischen Beobachtungen und Zustandsgrößen des Modells beschreibt, η_k ist ein zufälliger Fehler (mit Beobachtungsvarianz R_k), der die Unsicherheit der Beobachtung darstellt.

Der aktualisierte Schätzwert des Abflusses (Schätzwert des Abflusses mit Nachführung – a posteriori Schätzwert) x_k^a wird im KF nun als lineare Kombination des Schätzwertes der Abflussvorhersage x_k^f und der Abflussmessung z_k angesetzt:

$$x_k^a = x_k^f + K_k (z_k - C_k x_k^f) \quad (4)$$

in der K_k , das Kalmangewicht, folgendermaßen ermittelt werden kann:

$$K_k = P_k^f C_k^T [C_k P_k^f C_k^T + R_k]^{-1} \quad (5)$$

In Gleichung 5 sind P_k^f die a priori Schätzvarianz und R_k die Beobachtungsvarianz. Die aktualisierte a posteriori Schätzvarianz ergibt sich zu

$$P_k^a = P_k^f - K_k C_k P_k^f \quad (6)$$

Beim Ensemble-Kalman-Filter werden die statistischen Eigenschaften des Schätzwertes des Abflusses durch ein Ensemble von möglichen Schätzwerten dargestellt. Dieses Ensemble von Abflussschätzwerten wird über die Modellgleichung 2 mit einem Ensemble von $u_{i,k}$ Modelleingangsgrößen ermittelt. Das resultierende Ensemble von Schätzwerten ist dann mit den entsprechenden Schätzvarianzen behaftet. In den folgenden Erläuterungen und Abbildungen wird dieses Ensemble von Modellrechnungen als Hauptrealisationen bezeichnet.

Der Algorithmus kann (nach Madsen und Cañizares, 1999) wie folgt zusammengefasst werden: Jedes Mitglied des Ensembles M von Schätzwerten wird in jedem Zeitschritt durch Vorwärtsrechnung mit der Modellgleichung und dem definierten Modellfehler bestimmt:

$$x_{i,k}^f = \Phi(x_{i,k-1}^a, u_k + \varepsilon_{i,k}), i = 1, 2, \dots, M \quad (7)$$

wobei der Modellfehler $\varepsilon_{i,k}$ zufällig aus einem vordefinierten Fehlermodell gezogen wird. Die a priori Schätzung des Abflusses wird als Mittelwert des Ensembles angesetzt:

$$x_k^f = \bar{x}_k^f = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_{i,k}^f \quad (8)$$

Die Matrix der Schätzvarianz kann aus dem Ensemble ermittelt werden:

$$P_k^f = S_k^f (S_k^f)^T, \quad s_{i,k}^f = \frac{1}{\sqrt{M-1}} (x_{i,k}^f - \bar{x}_k^f) \quad (9)$$

wobei $s_{i,k}^f$ die i -te Spalte der Matrix S_k^f ist. Als nächster Schritt wird ein Ensemble mit M Realisationen der Beobachtung generiert, aus dem ein zufälliger Wert gezogen wird:

$$z_{i,k} = z_k + \eta_{i,k}, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (10)$$

wobei z_k die aktuelle Beobachtung und $\eta_{i,k}$ der Beobachtungsfehler ist, der zufällig aus einer Normalverteilung gewählt wird, die als Mittelwert 0 und als vordefinierte Beobachtungsvarianz R_k hat.

Jedes Ensemblemitglied $x_{i,k}^f$ wird entsprechend Gleichung 4 aktualisiert. Basierend auf diesem aktualisierten Ensemble werden die a posteriori Schätzwerte x_k^a und die entsprechende a posteriori Schätzvarianz laut Gleichungen 8 und 9 ermittelt.

Den Vergleich der Rechenergebnisse für die Nachführung des Abflusses (Zustandsgröße) aus einem einfachen Linearspeicher mittels herkömmlichen Kalman-Filter und Ensemble-Kalman-Filter zeigt Abbildung 1. Das entsprechende Modell lautet $x_k = \xi \cdot x_{k-1}$ mit $\xi = 0.9$. Bei der Anwendung des Ensemble-Kalman-Filters wurden beim ersten Berechnungslauf 10 Ensemblerealisierungen und beim zweiten Berechnungslauf 100 Realisationen zur Beschreibung der statistischen Eigenschaften der Schätzwerte verwendet. Als Modellvarianz Q_k und Beobachtungsvarianz R_k wurde für dieses Beispiel jeweils ein Wert von $0.5 \text{ (m}^3/\text{s)}^2$ gewählt. Die Nachführung erfolgt anhand diskreter Abflussbeobachtungen, von denen zur Veranschaulichung der Methode angenommen wird, dass sie nicht für jeden Berechnungszeitschritt zur Verfügung stehen. Ausgehend von einer Schätzung von 1 m^3 für den Anfangswert des Abflusses mit einer Fehlervarianz von $2.5 \text{ (m}^3/\text{s)}^2$ wird nun für jeden Berechnungsschritt der KF bzw. EnKF Algorithmus angewendet. Die Schätzvarianz wächst durch den Eintrag zusätzlicher Modellunsicherheiten solange an, bis ein beobachteter Abflusswert vorhanden ist und durch die Korrektur mittels Kalman-Filter bzw. Ensemble-Kalman-Filter wieder verringert werden kann. Der zeitliche Verlauf der Schätzvarianz bildet bei Anwendung des Kalman-Filter eine Sägezahnkurve. Die Steilheit des Anstiegs der Schätzvarianz zwischen zwei Messwerten hängt davon ab,

wie groß die bei jedem Berechnungsschritt eingetragene Modellunsicherheit ist. Die eingetragene Unsicherheit wird durch die gewählte Modellvarianz bestimmt. Die Entwicklung der Schätzvarianzen beim Ensemble-Kalman-Filter hängt von der Anzahl der Ensemblerealisierungen ab. Mit einer Ensemblegröße von 10 Realisationen zeigen sich im Vergleich zum herkömmlichen Kalman-Filter deutliche Unterschiede in den Schätzvarianzen. Durch die Erhöhung der Ensemblegröße auf 100 Realisationen können die Unterschiede zwischen den Schätzvarianzen von KF und EnKF verringert werden. Mit steigender Anzahl an Realisationen können die statistischen Eigenschaften der Schätzvarianz besser angenähert werden. Der Verlauf der Zustandsgrößen im unteren Teil von Abbildung 1 zeigt, dass sich die Ergebnisse für die Nachführung mit Kalman-Filter und Ensemble-Kalman-Filter nur geringfügig voneinander unterscheiden. Abweichungen in der Schätzvarianz wirken sich dabei auf die Gewichtung zwischen Modellergebnis und Messung aus, allerdings nur in einem sehr geringen Maß. Dieses Beispiel zeigt, dass bereits mit einer Ensemblegröße $M = 10$ sehr genaue Ergebnisse der Schätzung der Zustandsgrößen erreicht werden können. Im hier gewählten Beispiel wurde ein lineares Modell angesetzt, damit ist ein Vergleich zwischen KF und EnKF möglich. Für nicht-lineare Niederschlag-Abflussmodelle, wie sie bei der Hochwasservorhersage eingesetzt werden, kann nur der EnKF verwendet werden.

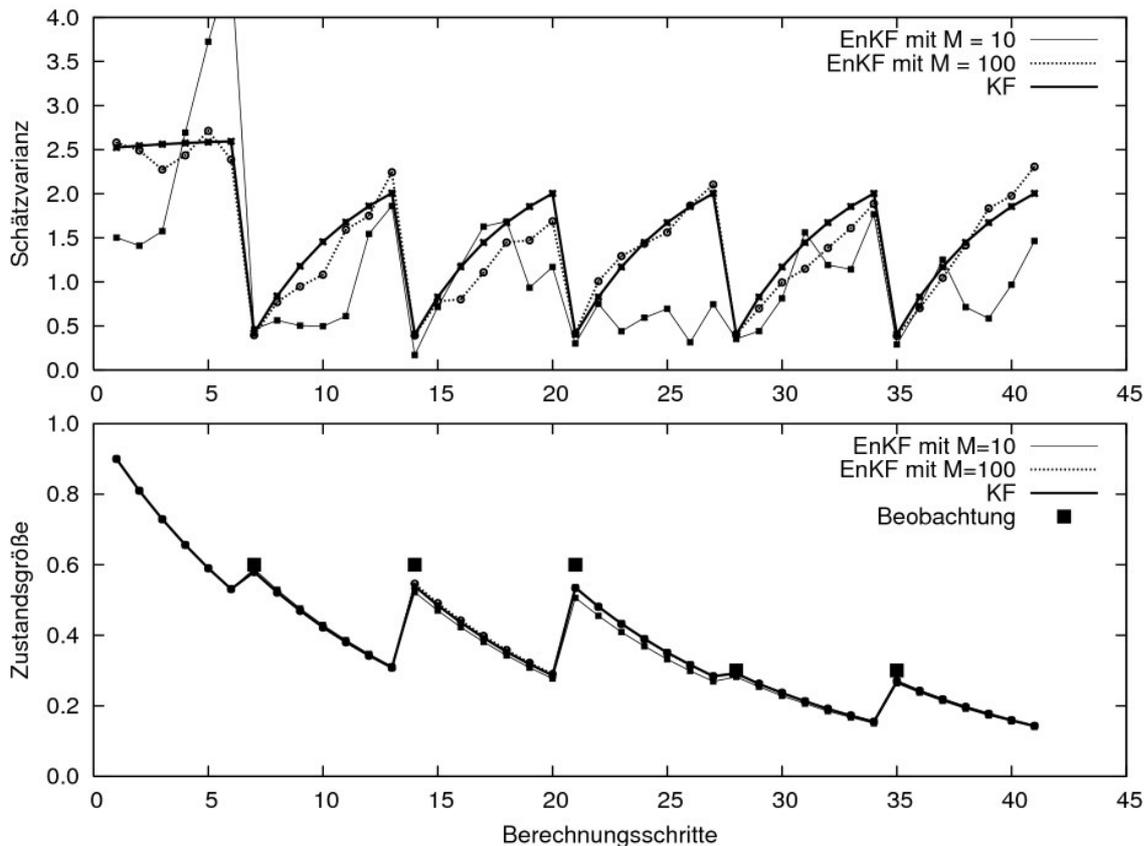


Abb. 1: Vergleich der Zustandsgrößen und der Schätzvarianzen für die Nachführung mit Kalman-Filter (KF) und Ensemble-Kalman-Filter (EnKF) am Beispiel eines Linearspeicheransatzes. M ist die Anzahl der Realisationen.

2.2 Ähnlichkeitsansatz

Zu den aktualisierten a posteriori Abflussschätzwerten sind keine korrespondierenden Modellzustände (Bodenfeuchte, Speicherfüllungen, etc.) vorhanden, da diese durch die Vorwärtsrechnung des Modells nur für die a priori Schätzwerte des Abflusses vorhanden sind. Die a posteriori Schätzung des Abflusses x_k^a entspricht der „besten Schätzung“ des aktuellen Abflusses unter Berücksichtigung der Modell- und Beobachtungsunsicherheit. Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll, x_k^a als Ausgangspunkt für die Abflussprognose zum aktuellen Zeitpunkt k zu verwenden. Dies setzt allerdings die Kenntnis der mit x_k^a korrespondierenden Systemzustände des hydrologischen Modells voraus. Darüber hinaus sind für die Anwendung des EnKF im folgenden Zeitschritt die passenden Systemzustände für jedes Ensemblemitglied $x_{i,k}^f$ erforderlich, da diese als Anfangsbedingungen für die neuerliche Vorwärtsrechnung des hydrologischen Modells zur Bestimmung der a priori Schätzwerte (Hauptrealisationen) für den Zeitschritt $k+1$ dienen.

Da es sich beim hydrologischen Abflussmodell um ein nicht-lineares, dynamisches System handelt, lassen sich die Systemzustände der einzelnen Modellkomponenten nicht aus den a posteriori Abflussschätzwerten $x_{i,k}^a$ rekursiv ermitteln. Als Näherungslösung wird nun ausgehend von jedem Modellzustand zum Zeitpunkt $k-1$ aller Ensemblemitglieder $x_{i,k}^f$ (Hauptrealisationen) neuerlich ein Ensemble von Vorwärtsrechnungen des hydrologischen Modells durch die Überlagerung des Niederschlags mit zufälligen Fehlern berechnet. Die Fehler werden aus einer Normalverteilung mit vorgegebener Varianz und einem vom zugehörigen Fehler $\varepsilon_{i,k}$ des Ensemblemitglieds $x_{i,k}^f$ abhängigen Mittelwert gezogen. Dieses Ensemble an Modellrechnungen wird in weiterer Folge als Nebenrealisationen bezeichnet. Bei einer hinreichend großen Anzahl von Ensemblemitgliedern der Nebenrealisationen wird eines davon in unmittelbarer Nähe des a posteriori Abflussschätzwertes $x_{i,k}^a$ liegen. Für dieses Ensemblemitglied sind dann durch die Vorwärtsrechnung des hydrologischen Modells alle erforderlichen Systemzustände bekannt. Für die Anwendung im Echtzeitbetrieb ist die Anzahl der Ensemble-Mitglieder durch den Rechenaufwand begrenzt. Vereinfachend werden nun dem a posteriori Schätzwert des Abflusses $x_{i,k}^a$ die Systemzustände jenes Ensemble-Mitglieds zugeordnet, das ihm am ähnlichsten ist. Diese Annäherung an die a posteriori Schätzwerte $x_{i,k}^a$ wird als „Ähnlichkeitsansatz“ bezeichnet.

In Abbildung 2 wird die Vorgangsweise für die Modellnachführung auf Basis des EnKF unter Verwendung des Ähnlichkeitsansatzes prinzipiell dargestellt. Dabei wird der aktuelle Zeitpunkt mit t_0 bezeichnet. Um die numerische Stabilität der Modellnachführung zu erhöhen, ist es sinnvoll, den zeitlichen Abstand zwischen den Nachführzeitpunkten (Update-Intervall) größer als die Zeitschrittlänge von 15 min zu wählen. Der Beginn des Update-Intervalls ist in Abbildung 2 mit t_0-t_{upd} bezeichnet. Die Dichtefunktion der a priori Schätzung ergibt sich durch die Vorwärtsrechnung der Hauptrealisationen bis zum Nachführzeitpunkt. Die nachgeführten Hauptrealisationen

entsprechen jenen Hilfsrealisationen, die zum Nachführzeitpunkt die geringste Differenz zu den a posteriori Schätzwerten (kleine, schwarze Punkte) des Durchflusses aufweisen, und werden als Ausgangspunkte für die Vorwärtsrechnung für den nächsten Updatelauf verwendet.

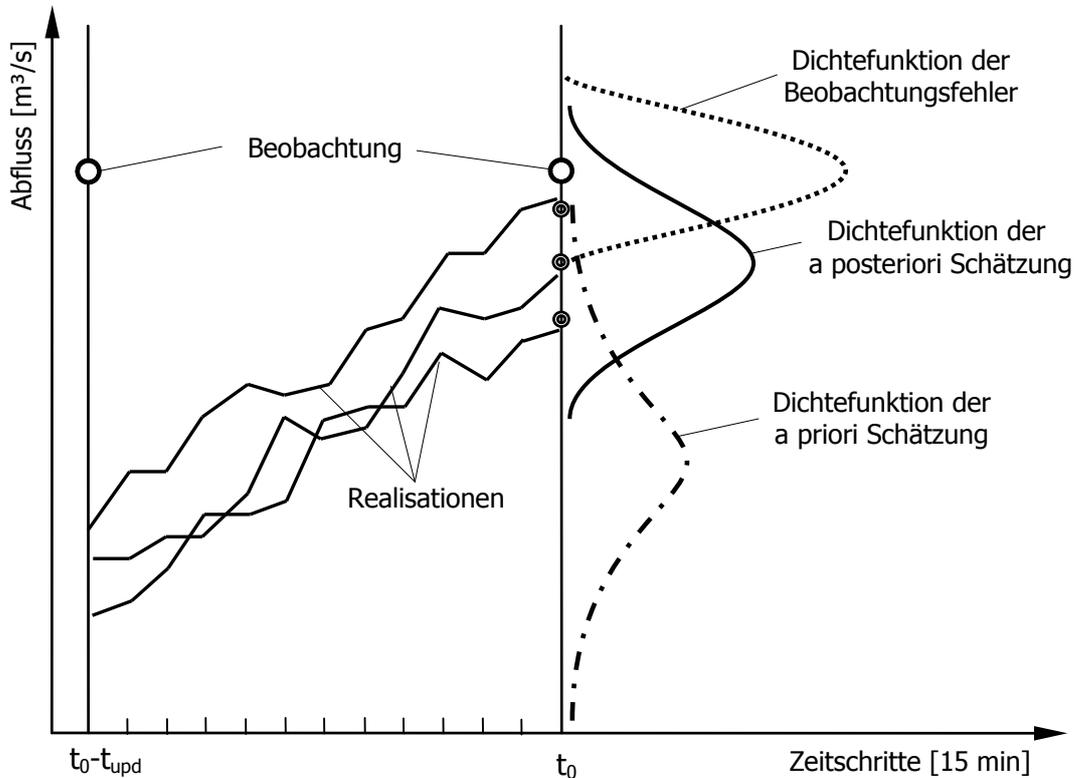


Abb. 2: Prinzipskizze für die Vorgangsweise bei der Anwendung des Ensemble-Kalman-Filters mit Ähnlichkeitsansatz.

2.3 Nachführung des Modellinputs zwischen den Hochwasserereignissen

Die Systemzustände (Bodenfeuchte, Speicherinhalte) des hydrologischen Modells vor Ereignisbeginn (Anfangsbedingungen) haben einen wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit der Abflussprognose. Weicht der simulierte Systemzustand zu Ereignisbeginn vom optimalen Zustand ab, so wirkt sich dieser Umstand negativ auf die Prognosegüte aus. Eine zu gering simulierte Bodenfeuchte führt zu einer Unterschätzung und eine zu hoch simulierte Bodenfeuchte zu einer Überschätzung der Hochwasserwelle. Die Hauptursache für die Abweichung der Zustandsgrößen vom optimalen Zustand liegt in der Unsicherheit von Niederschlag und Verdunstung in den Perioden zwischen den Hochwasserereignissen. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, besteht die Möglichkeit, den Modellinput (Niederschlag und Verdunstung) nachzuführen.

Die Wirkungsweise der Inputnachführung mittels EnKF für suboptimale Zustände der Bodenfeuchte vor Abflussereignissen ist in Abbildung 3 und 4 dargestellt. Um den Einfluss der Nachführung im Prognosefall zu beschreiben, wird der Nachführ-

algorithmus nur bis kurz vor den ersten Anstieg der Welle am 20. Oktober angewendet. Im weiteren Verlauf handelt es sich um Rechenergebnisse ohne Nachführung und auf Basis des beobachteten Gebietsniederschlags. Dies entspricht der Prognosesituation, jedoch unter der Annahme, dass die zukünftigen Niederschläge bekannt sind.

Abbildung 3 zeigt die Berechnungsergebnisse unter Verwendung der Inputnachführung im Vergleich mit der Simulation ohne Nachführung und der beobachteten Ganglinie am Pegel Zwettl/Kamp mit einem Startwert der Bodenfeuchte von 0%. Die Nachführung bewirkt einen deutlich schnelleren Anstieg der Bodenfeuchte am Beginn des Berechnungszeitraums als bei der Simulation ohne Nachführung. Neben der Bodenfeuchte werden durch die Inputnachführung auch die Speicherstände der übrigen Speicher beeinflusst, dadurch wird der nachgeführte Abfluss schon nach kurzer Zeit auf das Niveau der Beobachtung angehoben. Während die Abflussschwelle am 23. Oktober durch die Simulation ohne Nachführung unterschätzt wird, stimmen die Abflüsse für den Fall der nachgeführten Systemzustände sehr gut mit den beobachteten Werten überein.

Den Rechenergebnissen in Abbildung 4 liegt ein Startwert der Bodenfeuchte von 100% zu Grunde. Bei der Simulation ohne Nachführung zeigt sich nur ein sehr langsamer Rückgang der Bodenfeuchte während des gesamten Berechnungsintervalls. Die hohe Bodenfeuchte bewirkt in diesem Fall eine Überschätzung der Abflussschwelle. Die Reduktion der Bodenfeuchte durch die Inputnachführung bewirkt in weiterer Folge, dass auch in diesem Fall der beobachtete Abflussschwelle am 23. Oktober gut durch die Modellrechnung beschrieben wird.

In beiden Fällen wird durch die Anwendung der Inputnachführung der unzutreffend angenommene Gebietszustand zu Berechnungsbeginn korrigiert und ein geeigneter Gebietszustand zu Beginn des Ereignisses am 23. Oktober geschätzt.

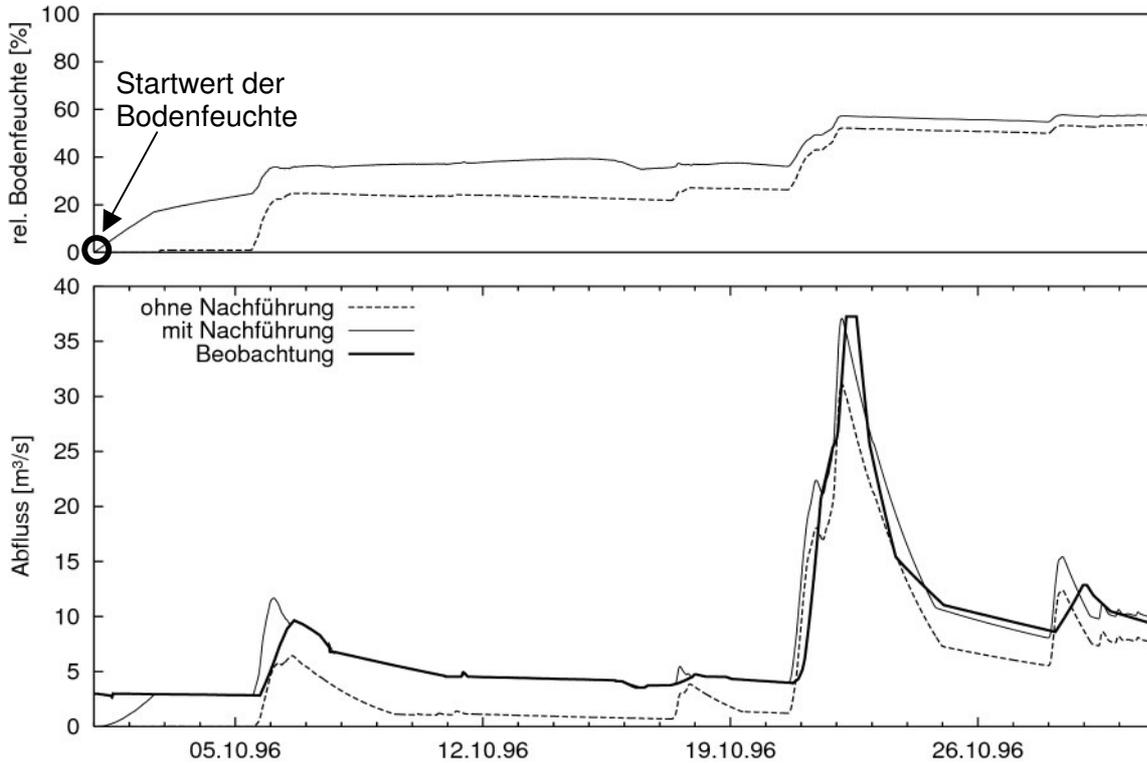


Abb. 3: Beispiel für die Wirkungsweise der Inputnachführung mit EnKF bei einer zu geringen Bodenfeuchte vor Ereignisbeginn für Oktober 1996 am Pegel Zwettl/Kamp

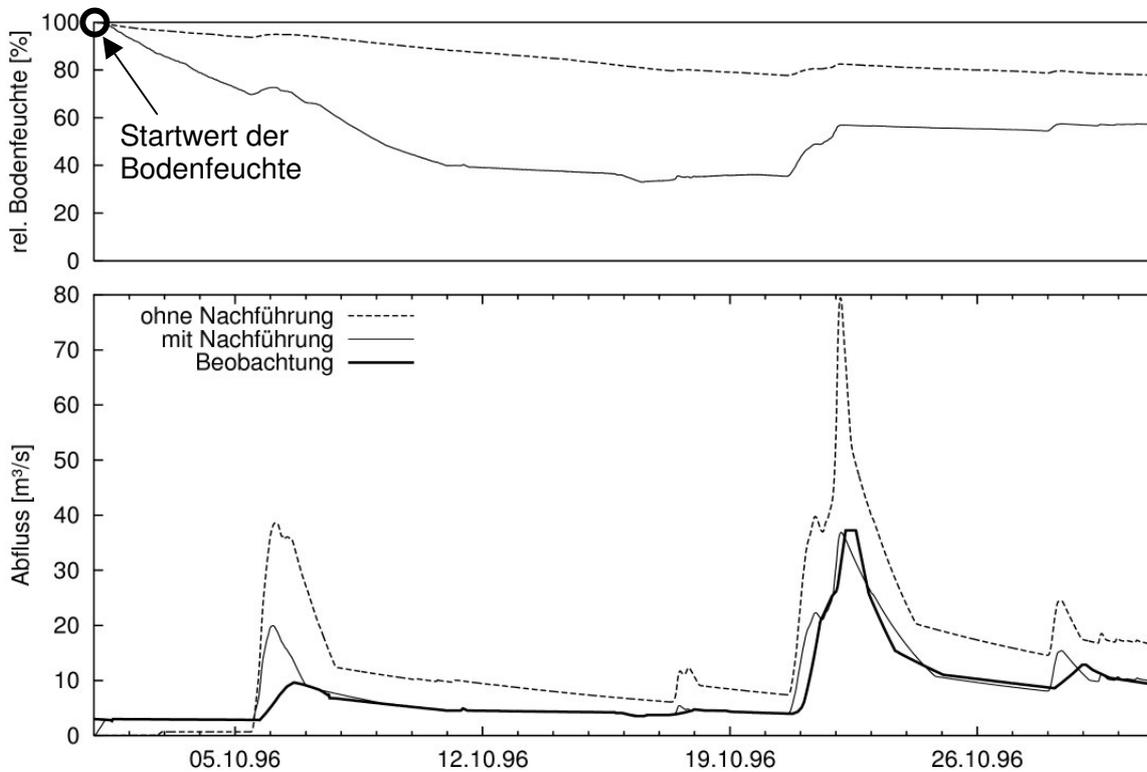


Abb. 4: Beispiel für die Wirkungsweise der Inputnachführung mit EnKF bei einer zu hohen Bodenfeuchte vor Ereignisbeginn für Oktober 1996 am Pegel Zwettl/Kamp.

3. Nachführung mittels EnKF im Kampmodell

Im operationellen Prognosemodell für den Kamp wurde die Inputnachführung mittels EnKF unter Verwendung des Ähnlichkeitsansatzes auf ein flächendetailliertes kontinuierliches Niederschlag-Abflussmodell angewendet. Detaillierte Angaben über die Entwicklung und Parameterisierung des Modells sind Reszler et al. (2006) zu entnehmen.

Zur optimalen Parameterisierung des EnKF wurden umfangreiche Testrechnungen durchgeführt. Auf Basis dieser Rechnungen werden die Modellvarianzen für die Hauptrealisation mit $0.005 \text{ [mm/15min]}^2$ gewählt. Dies entspricht einer Standardabweichung der aufgeprägten Modellfehler von ca. 0.07 mm/15min . Damit ergeben sich Modellfehler in der Größenordnung der Unsicherheiten bei der Messung von Niederschlägen bzw. der Einschätzung der Verdunstung. Die Größe der aufgeprägten Modellfehler reicht nicht aus, um eine exakte Nachführung der Ganglinien im Bereich von raschen Hochwasseranstiegen zu erreichen. Dies ist beabsichtigt. Die geringen Modellvarianzen bewirken eine Nachführung der Modellzustandsgrößen in den Zeitabschnitten zwischen den Hochwasserereignissen und verbessern somit die Anfangsbedingungen für das folgende Ereignis.

Die Beobachtungsunsicherheit wurde, wegen der mit steigendem Abfluss größer werdenden Messfehler des Abflusses, in Anlehnung an Gutknecht (1990) mit einer Varianz R_k von $0.0025 * Q^2$ berücksichtigt. Q ist der aktuelle beobachtete Abfluss. Die Standardabweichung des Beobachtungsfehlers entspricht somit mit 5% des gemessenen Abflusses den Messunsicherheiten (im günstigsten Fall).

Sowohl für die Modellfehler als auch für die Beobachtungsfehler kommt ein Fehlermodell ohne Autokorrelation zur Anwendung ("white noise"). Das bedeutet, dass die zufälligen Fehler statistisch unabhängig vom Fehler des vorangegangenen Zeitschritts sind.

Bei den Testrechnungen bewährte sich eine Anzahl von zehn Haupt- und zehn Nebenrealisationen als guter Kompromiss zwischen erforderlicher Rechenzeit und Güte der Nachführung. Eine weitere Erkenntnis aus den zahlreichen Simulationsläufen betrifft den zeitlichen Abstand zwischen den Nachführzeitpunkten (Update-Intervall). Dieser wirkt sich auf die numerische Stabilität der Ergebnisse der Modellnachführung aus. Auf Basis der Ergebnisse der Testrechnungen wird im Kamp-Modell ein Update-Intervall von drei Stunden verwendet.

Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse der Abflussberechnungen mit und ohne Nachführung für den Pegel Zwettl/Kamp vom 1. Mai bis zum 1. Oktober 2005. Für diesen Berechnungszeitraum liefert die Abflusssimulation ohne Nachführung durchwegs gute Ergebnisse. Durch die Anwendung der Inputnachführung werden die ohnedies guten Ergebnisse nur geringfügig verbessert. Dieser Fall stellt das angestrebte Optimum für die Hochwasservorhersage dar, da die Systemzustände über längere Zeit keine größeren Unsicherheiten aufweisen und somit eine gute Basis als Ausgangspunkt für die Abflussprognose darstellen. Die guten Simulationsergebnisse spiegeln sich auch im Verlauf der Fehlersummen wider (Abbildung 5 unten). Durch die geringfügige

Überschätzung der Abflüsse bis zum ersten Ereignis im Mai, ergibt sich ein leichter Anstieg der Fehlersumme. Durch die Überschätzung dieses Ereignisses kommt es zu einer leichten Vergrößerung der positiven Fehlersumme. Im weiteren Verlauf kommt es bis zu einem Doppelereignis im August zu keinem nennenswerten Fehlerzuwachs, obwohl in diesem Zeitraum ein Hochwasserereignis aufgetreten ist. Ab dem ersten Ereignis im August zeigt die simulierte Ganglinie geringfügig kleinere Abflüsse als die Beobachtete an. In diesem Beispiel ergeben Hochwasserprognosen mit und ohne Nachführung nahezu identische Prognosen.

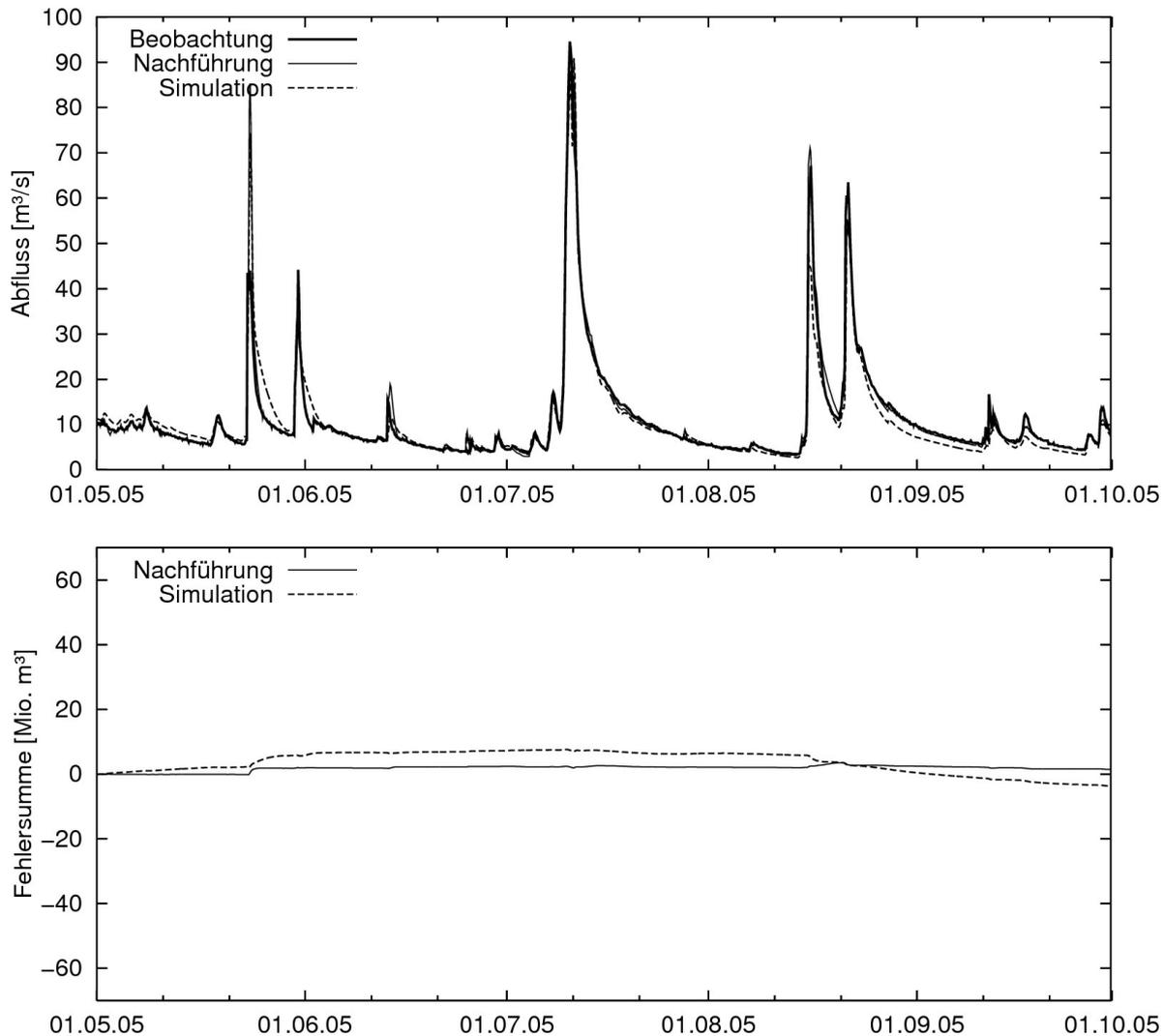


Abb. 5: Vergleich der Abflussberechnungen (Nachführung und nicht nachgeführte Simulation) mit der beobachteten Ganglinie und die resultierenden Fehlersummen für den Pegel Zwetl/Kamp im Zeitraum von Mai bis Oktober 2005.

Der Zeitabschnitt vom 1. Oktober 2005 bis zum 10. April 2006 in Abbildung 6 schließt an jenen vom 1. Beispiel (Abbildung 5) an. Während des gesamten Zeitraumes von 1. Oktober bis Ende Dezember sind die beobachteten Abflüsse etwas größer als die simulierte Ganglinie. Die leichte Abflussunterschätzung durch die Simulation kann auf Unsicherheiten im Niederschlag aber auch auf die Einschätzung der Verdunstung zurückzuführen sein. Von Jänner bis März 2006 erhöht sich die

Differenz zwischen beobachteter und simulierter Ganglinie, wodurch die Fehlersumme stärker negativ wird. Dies kann auf Unsicherheiten in der Schneeakkumulation und Schneeschmelze zurückzuführen sein. Die Auswirkung der Abflussunterschätzung in der Simulation ohne Nachführung ist eine Unterschätzung der Bodenfeuchte zu Beginn des Hochwassers Ende März 2006. Dies bewirkt wiederum eine Unterschätzung des Hochwasserereignisses. Die nachgeführte Abflussganglinie bis kurz vor dem Ereignis im März 2006 weist hingegen kaum Unterschiede zur beobachteten Ganglinie auf. Damit wird auch die Bodenfeuchte gegenüber der nicht nachgeführten Simulation erhöht und dadurch die Anfangsbedingungen für die Prognose des folgenden Hochwasserereignisses verbessert. Dieses Beispiel veranschaulicht den positiven Einfluss der Inputnachführung über den Zeitraum zwischen Ereignissen auf die Anfangsbedingungen für die Prognose des folgenden Hochwassers.

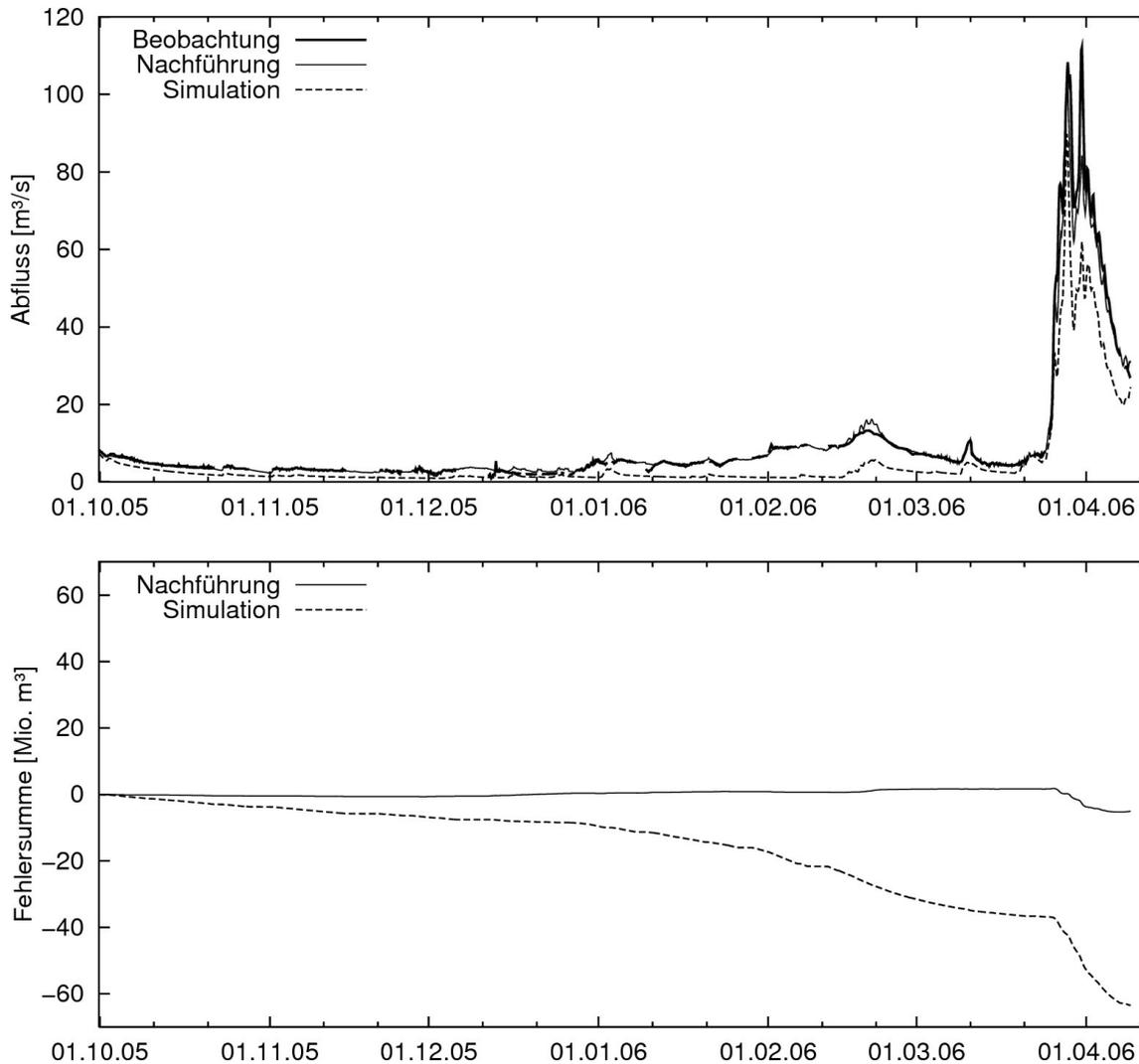


Abb. 6: Vergleich der Abflussberechnungen (nachgeführt und nicht nachgeführt) mit der beobachteten Ganglinie und die resultierenden Fehlersummen für den Pegel Zwettl/Kamp im Zeitraum von Oktober 2005 bis April 2006.

Ein Beispiel für die Auswirkung der nachgeführten Systemzustandsgrößen auf die prognostizierten Abflüsse für die Taffa zeigt Abbildung 7. Die Berechnung der dargestellten Vorhersagen erfolgte unter der Annahme, dass die zukünftigen Niederschläge bekannt sind. Die erste Vorhersage basiert auf der Verwendung der simulierten Anfangsbedingungen. Für die zweite Vorhersage wurden die nachgeführten Systemzustände als Ausgangspunkt für die Prognose verwendet. Während die Prognosen auf Basis der simulierten Anfangsbedingungen zu einer deutlichen Überschätzung der Abflüsse führen, stimmt die Vorhersage mit nachgeführten Anfangsbedingungen gut mit den beobachteten Abflüssen überein. Für dieses Beispiel bewirkt die Nachführung mittels EnKF eine klare Verbesserung der Prognosegüte.

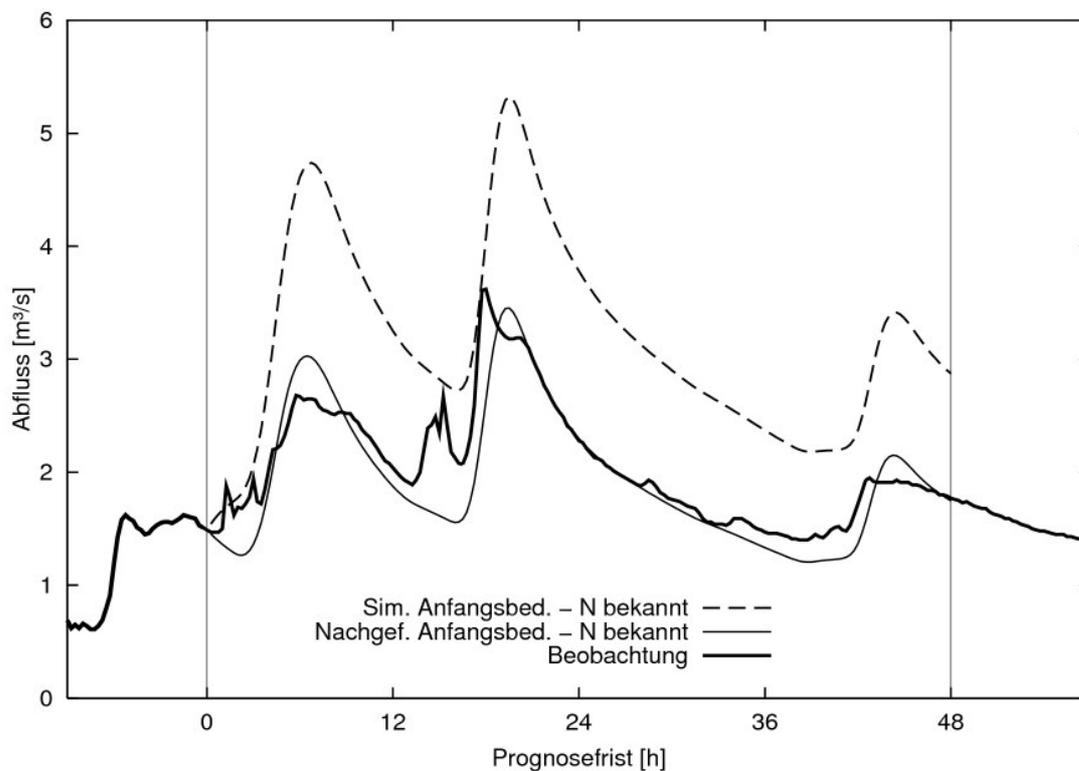


Abb. 7: Beispiel für die Auswirkung der Nachführung von Modellzustandsgrößen auf die Abflussprognose am Pegel Frauenhofen/Taffa (140 km²) für den 16. August 2005 um 6 Uhr.

Zur Beurteilung der Auswirkung der Inputnachführung mittels EnKF auf die Prognosegenauigkeit erfolgte eine statistische Fehlerauswertung für sechs Hochwasserereignisse (Tabelle 1) am Pegel Zwettl/Kamp.

Tab. 1: Auflistung der Abflussscheitel und der verschiedenen Berechnungszeiträume zur statistischen Fehlerauswertung für 6 Hochwasserereignisse am Pegel Zwettl/Kamp (622 km²)

	Aug. 02 /1	Aug. 02/2	Jul. 05	Aug. 05/1	Aug. 05/2	Mär. 06
Abflussscheitel [m ³ /s]	459	367	95	68	65	117
Beginn Ereignis	6. Aug. 0 Uhr	11. Aug. 0 Uhr	5. Jul. 0 Uhr	14. Aug. 0 Uhr	20. Aug. 0 Uhr	25. Mär. 0 Uhr
Ende Ereignis	10. Aug. 21 Uhr	15. Aug. 21 Uhr	15. Jul. 0 Uhr	19. Aug. 21 Uhr	26. Aug. 21 Uhr	5. Apr 12 Uhr
Beginn Anstieg	06. Aug. 12 Uhr	11. Aug. 12 Uhr	10. Jul. 12 Uhr	16. Aug. 0 Uhr	21. Aug. 12 Uhr	26. Mär. 6 Uhr
Ende Anstieg	08. Aug. 6 Uhr	13. Aug. 18 Uhr	11. Jul. 6 Uhr	17. Aug. 21 Uhr	22. Aug. 12 Uhr	2. April 3 Uhr

Dabei werden zwei unterschiedliche Rechenvarianten betrachtet. Bei der ersten Variante werden ohne Nachführung als Anfangsbedingung für die Abflussprognosen die simulierten Zustandsgrößen verwendet. Bei der zweiten Variante erfolgt die Berechnung der Abflussprognosen mit nachgeführten Anfangsbedingungen. In beiden Fällen basiert die Prognoserechnung auf der Verwendung von beobachteten Niederschlagsfeldern. Als Fehlermaß wird der mittlere absolute normierte Fehler *mnae* (Gleichung 11) in Prozent des beobachteten Abflusses verwendet.

$$mnae = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Q_i^* - Q_i|}{Q_i} \quad (11)$$

- mnae*..... mittlerer absoluter normierter Fehler
- Q_i^* Abflussvorhersage zum Zeitpunkt i
- Q_i beobachteter Abfluss zum Zeitpunkt i
- n*..... Anzahl der Wertepaare

Die Fehlerauswertung wird für die unterschiedlichen Prognosefristen und Simulationsvarianten mit der Anzahl *n* von Wertepaaren innerhalb des betrachteten Auswertungszeitraums durchgeführt. Als Auswertungszeitraum wird zum Einen die Dauer des gesamten Hochwasserereignisses (ansteigender und abfallender Ast der Welle) und zum Anderen nur der Bereich des Wellenanstieges bis kurz nach dem Scheitel festgelegt. Eine genaue Auflistung der verwendeten Auswertungszeiträume ist Tabelle 1 zu entnehmen.

Die Ergebnisse dieser statistischen Fehlerauswertung sind in Abbildung 8 dargestellt. Der waagrechte Verlauf der mittleren Prognosefehler bei Verwendung der simulierten Anfangsbedingungen ergibt sich aus der Unabhängigkeit der Abflusssimulation von

der Prognosefrist. Die mittleren Prognosefehler sind für die Wellenanstiege deutlich größer als für die gesamten Ereignisse. Dieser Unterschied ergibt sich dadurch, dass bei der Auswertung für die gesamten Ereignisse auch die Auslaufkurven nach dem Hochwasserscheitel, welche generell mit geringeren Unsicherheiten behaftet sind, berücksichtigt werden. Den Anstieg einer Hochwasserwelle korrekt vorherzusagen ist schwieriger. Durch die Verwendung der nachgeführten Anfangsbedingungen können die mittleren Prognosefehler für beide Auswertungszeiträume reduziert werden. Die Reduktion der mittleren Prognosefehler ist bei kurzen Prognosefristen größer. Die Verbesserung der Prognosegüte durch die Nachführung der Systemzustände bewirkt aber auch noch am Ende der Vorhersagefrist eine deutliche Verbesserung der Prognosegüte.

Die statistische Auswertung der sechs Hochwasserereignisse am Pegel Zwettl/Kamp zeigt, dass die Nachführung der Systemzustände zwischen den Hochwasserereignissen im Mittel zu einer wesentlichen Verbesserung der Prognosegüte während der gesamten Prognosefrist führt.

Hinsichtlich der Interpretation der Prognosefehler ist darauf hinzuweisen, dass die Auswertung hier nur für Hochwässer erfolgte. Fehlerauswertungen über einen längeren Zeitraum, der Nieder- und Mittelwasserverhältnisse einschließt, ergibt Fehler die nur einen Bruchteil der in Abbildung 8 dargestellten Fehler betragen.

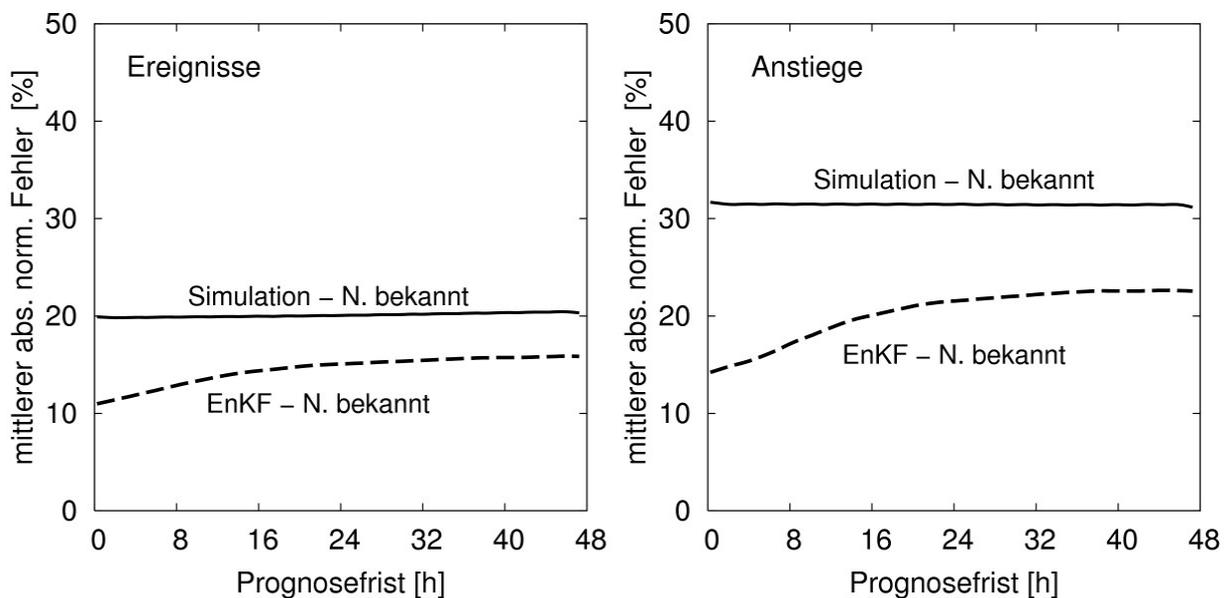


Abb. 8: Prognosefehler für sechs Hochwasserereignisse lt. Tab. 1 unter Annahme, dass der zukünftige Niederschlag bekannt ist. Die als Simulation bezeichnete Variante verwendet keine Nachführung. Die als EnKF bezeichnete Variante verwendet eine Nachführung der Anfangsbedingungen mittels Ensemble-Kalman-Filter.

4. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Methode der Inputnachführung mittels Ensemble-Kalman-Filter zur optimalen Schätzung der Systemzustände stellt eine Möglichkeit zur Verbesserung der Prognosegüte von operationellen Hochwasservorhersagen dar. Der Hauptvorteil des Ensemble-Kalman-Filters besteht darin, dass er auch für nicht-lineare Modelle, wie kontinuierliche Niederschlag-Abflussmodelle, anwendbar ist. Im vorliegenden Beitrag wird gezeigt, wie die Unsicherheiten von Niederschlag und Verdunstung in den Perioden zwischen den Abflussereignissen durch den Ensemble-Kalman-Filter reduziert werden können. Dadurch ist es möglich, genauere Anfangsbedingungen der Bodenfeuchte für die Hochwasservorhersage zu schätzen. Dies wiederum bewirkt eine Verbesserung der Prognosegüte, wie durch die Auswertung von sechs großen Hochwasserereignissen am Kamp gezeigt werden konnte. Es ist jedoch zu beachten, dass die Modellnachführung nicht als Ersatz für eine sorgfältige Entwicklung, Modellidentifikation und Eichung des Niederschlag-Abflussmodells dienen kann. Ein gutes Niederschlag-Abflussmodell ist Voraussetzung für einen sinnvollen Einsatz von Nachführalgorithmen. Eine zusätzliche Reduktion der Prognosefehler kann durch die Verwendung eines additiven Fehlermodells zur Outputkorrektur erreicht werden (Blöschl et al., 2006).

5. Literatur

- Blöschl, G., Ch. Reszler und J. Komma (2006) Hochwasservorhersage für den Kamp. Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 199. Technische Universität Wien, Seiten 39-54.
- Drabek, U. (2006) Nachführung bei der Hochwasservorhersage. In: Hochwasservorhersage. Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 199. Technische Universität Wien, Seiten 227-242.
- Evensen, G. (1994) Sequential data Assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. *Journal of Geophysical Research* 99 (C5), 10143–10162.
- Kalman, R.E. (1960) A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Journal of Basic Engineering* 82, 35–45.
- Madsen, H. und R. Cañizares (1999) Comparison of Extended and Ensemble Kalman Filter for data Assimilation in coastal area modelling. *Int. J. Numerical Methods Fluids*, 31, 961-981.
- Reszler, Ch., J. Komma, G. Blöschl und D. Gutknecht (2006) Identifikation von Modellparametern in detaillierten Modellen. In: Hochwasservorhersage. Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 199. Technische Universität Wien, Seiten 259-278.
- Schilling, W. (Hrsg.) (1987) Anwendungsmöglichkeiten des Kalman-Filters in der Wasserwirtschaft. DFG Mitteilung VII der Senatskommission für Wasserforschung, VCH Weinheim.

Anschrift der Verfasser:

Dipl.-Ing. Jürgen Komma
A.o.Univ.Prof. Dr. Günter Blöschl
Dipl.-Ing. Christian Reszler
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/222, A-1040 Wien
Email: komma@hydro.tuwien.ac.at

IDENTIFIKATION VON MODELLPARAMETERN IN DETAILLIERTEN MODELLEN

Christian Reszler, Jürgen Komma, Günter Blöschl, Dieter Gutknecht

1. Einleitung

Die Anwendung flächendetaillierter Niederschlag-Abflussmodelle für die Hochwasservorhersage bringt den Vorteil mit sich, die räumliche Differenzierung von Niederschlag, Abflussbildung und Abflusskonzentration berücksichtigen zu können. Diese Differenzierung lässt erwarten, dass unterschiedliche Abflusssituationen im Hochwasserfall an den Prognosepegeln genauer beschrieben werden können, als dies mit konventionellen Blockmodellen möglich ist.

Flächendetaillierte Niederschlag-Abflussmodelle benötigen eine Fülle von Eingangsdaten. Zahlreiche räumliche Daten stehen heute für die Modellierung zur Verfügung, wie etwa von Satellitendaten abgeleitete Landnutzungsdaten und genaue Digitale Geländemodelle. Software für die flächendetaillierte Modellierung ist zu verhältnismäßig günstigen Preisen oder als Shareware verfügbar (siehe Merz und Blöschl, 2002; Singh, 1995). Diese Entwicklungen machen die flächendetaillierte Niederschlag-Abfluss Modellierung zu einer attraktiven Methode für die Hochwasservorhersage.

Die Eichung der räumlich differenzierten Modellparameter an Abflussdaten ist allerdings wegen Problemen bei der Prozessidentifikation nicht eindeutig möglich (Isermann, 1974). Verschiedene Parameterkombinationen können zu sehr ähnlichen Abflussganglinien führen. Blöschl et al. (1991) schlugen deshalb vor, Zusatzinformation für die Eichung und Verifizierung flächendetaillierter Modelle zu verwenden. Insbesondere beobachtete räumliche Muster dynamischer hydrologischer Größen, wie Schneebedeckungsmuster oder Bodenfeuchtemuster, bieten sich dafür an. Musterinformationen wurden für die hydrologische Modellierung vor allem in Versuchseinzugsgebieten mit umfangreicher instrumenteller Ausstattung angewendet (Grayson and Blöschl, 2000; Grayson et al., 2002). Bei der operationellen Abflussvorhersage stehen meist weit weniger Informationen zu Verfügung als in Versuchseinzugsgebieten. Dennoch ist für eine zuverlässige Identifikation der Parameter und der Struktur flächendetaillierter Modelle das Heranziehen von Zusatzinformation unerlässlich.

Dieser Beitrag schlägt eine Methode vor, die Parameter und Struktur flächendetaillierter Abflussmodelle unter Verwendung unterschiedlicher Informationen, wie Geländedaten, Landbedeckung, Grundwasserdaten, Schneedaten, sowie qualitativen Informationen aus Begehungen, für ein konkretes Einzugsgebiet zu bestimmen. Das Ziel ist dabei, die Prozesse in jedem einzelnen Pixel möglichst wirklichkeitsnahe zu beschreiben, um eine größtmögliche Genauigkeit bei der Hochwasservorhersage bei unterschiedlichen Situationen zu erzielen. Die Methode wird an Hand der Abflussmodellierung für die Hochwasservorhersage am Kamp beschrieben.

2. Untersuchungsgebiet und Modellstruktur

2.1 Untersuchungsgebiet und Datenbasis

Das gesamte Kampeinzugsgebiet besitzt eine Fläche von 1550 km². Die westliche Hälfte des Gebietes entwässert in die Kraftwerkskette Kamp mit den Kraftwerken Ottenstein, Dobra und Thurnberg, die das Hochwasserregime beeinflusst. Die Seehöhe des Gebietes erstreckt sich von 300 m im Osten bis zu 1000 m im Westen. Typischerweise finden sich im Kampgebiet plateauartige Hochflächen- und Hügellandschaften, die durch Bäche und Rinnsale und den Kampfluss selbst teilweise tief eingeschnitten sind. Gänzlich unterschiedliche topographische Eigenschaften weist der östliche Teil des Einzugsgebietes auf. Hier erstreckt sich die Ebene des Horner Beckens.

Die mittleren Jahresniederschläge bewegen sich im östlichen Kampgebiet zwischen 500 und 800 mm und erreichen in den Gipfellen gegen Westen hin Werte um 1000 mm. Trotz relativ kalter Winter bleiben die Schneehöhen eher gering. Die Jahresabflusshöhe ist im Vergleich zum übrigen Österreich gering; sie beträgt in dieser Region im Mittel 200 bis 300 mm.

Das Untersuchungsgebiet liegt geologisch im Bereich der Böhmisches Masse mit den typischen Erscheinungsformen des Granit und Gneis. Vor allem im Westen ist der Granit teilweise stark verwittert und zerklüftet. Aus dem Verwitterungsmaterial des Granit entstanden weitgehend sandig, grusige Böden mit großer Speicherkapazität. In diesem Teil des Einzugsgebietes treten in höheren Lagen seichtere Böden auf, die mit Gebirgsböden vergleichbar sind (Podzole). Aufgrund der örtlich eingelagerten wasserstauenden Schichten (kaolinisiertes Material als Verwitterungsprodukt des Granit) finden sich in dieser Region trotz großflächiger Entwässerungsmaßnahmen im letzten Jahrhundert immer noch viele sumpfige, moorige Flächen (Anmoore, Hochmoore, Auböden). Im östlichen Einzugsgebiet dominieren Gneisarten, die weniger verwitterungsanfällig sind als der Granit. Die Böden besitzen einen hohen Lehmanteil, wodurch die Versickerungs- und Speicherkapazität deutlich geringer als im Westen ist. Die Kampregion wird heute hauptsächlich landwirtschaftlich (Acker- und Grasland) genutzt, und der Waldanteil ist hoch. Es herrscht Mischwald vor, wobei im Westen der Anteil der Nadelbäume größer ist als im Osten.

Für die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit standen Abflussdaten seit 1977 an den folgenden Pegeln zur Verfügung: Neustift/Kamp (77 km²), Zwettl/Kamp (622 km²), Zwettl/Zwettl (269 km²), Kaltenbrunn/Purzelkamp (34 km²), Rastenberg/Purzelkamp (95 km²), Frauenhofen/Taffa (140 km²) und Stiefern/Kamp (1493 km²) sowie Angaben über den Zufluss zum Speicher Ottenstein (889 km²). Niederschlagsdaten standen an 12 Stationen mit einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten und an 35 Stationen mit einer zeitlichen Auflösung von einem Tag zur Verfügung.

2.2 Modellstruktur

Das Abflussmodell KAMPUS ist eine Weiterentwicklung des HBV Modells (Bergström, 1976; Parajka et al, 2005ab). Die Abflussbildung am Hang wird auf Pixel-

basis berechnet, der Wellenablauf im Gerinne wird durch lineare Wellenablaufstrecken beschrieben. Der Vorteil dieses hybriden Ansatzes besteht darin, dass für die Berechnung der Abflussbildung flächendetaillierte Informationen (Niederschlag, Topographie, ..) genutzt werden können, der Wellenablauf hingegen durch wenige Kenngrößen beschrieben wird, die an den Pegeln geeicht werden können. Der vorliegende Artikel befasst sich schwerpunktmäßig mit der Abflussbildung und Abflusskonzentration auf der Pixelskala.

Als Rasterweite wird $1 \times 1 \text{ km}^2$ gewählt. Demnach wird das Gebiet durch 1550 Pixel abgedeckt. Der Aggregatzustand des Niederschlages wird durch eine Grenztemperatur bestimmt. Schneeschmelze wird durch den Gradtagfaktor GTF beschrieben (siehe Parajka et al. 2005a). Die Abflussbildung für jedes Pixel wird durch einen Bodenfeuchteansatz beschrieben. Die Bodenfeuchte ist definiert als Wassermenge in der obersten Bodenzone (Einheit Millimeter) und wird aus Niederschlag und Verdunstung bilanziert. Der zum Abfluss beitragende Teil von Regen und Schneeschmelze ist dann eine nichtlineare Funktion der Bodenfeuchte.

Die Abflusentstehung am Hang wird durch Linearspeicher beschrieben. Der zum Abfluss beitragende Teil des Niederschlages und der Schmelze fließt in den Speicher der oberen Bodenzone S_1 . Der Speicherinhalt entleert sich auf drei Wegen: mit einer konstanten Perkulationsrate in die untere Bodenzone bzw. das Grundwasser; proportional zum Speicherinhalt (Speicherkonstante) in den Abfluss (Q_1); und bei Überschreitung der Speicherfüllung mit einer schnellen Speicherkonstante in den Abfluss (Q_0). Die untere Bodenzone S_2 entleert sich mit einer langsameren Speicherkonstante in den Abfluss (Q_2).

In der vorliegenden Untersuchung wird in Schritt 4 (Feinabstimmung der Modellstruktur) festgestellt, dass die sonst für Varianten des HBV übliche Modellstruktur (Parajka et al., 2005a) für das Kampgebiet geändert werden muss. Erstens wird ein langsamer Grundwasserspeicher S_3 eingeführt (Abfluss Q_3). Die Speisung dieses Speichers erfolgt über einen prozentualen Anteil an der Perkulationsrate. Zweitens wird gezeigt, dass es sinnvoll ist, die Speicherkonstanten des obersten und mittleren Speichers als Funktion der Bodenfeuchte anzusetzen. Drittens wird festgestellt, dass für das Kampgebiet eine Bypass-Komponente notwendig ist, die die Matrix der obersten Bodenzone umgeht und einen Teil des Niederschlages direkt in die untere Bodenzone leitet. Viertens wird die Perkulationsrate zwischen dem oberen und den unteren Speichern von der relativen Bodenfeuchte abhängig gemacht, um die in den Abflussdaten sichtbaren Nichtlinearitäten zu berücksichtigen.

Insgesamt liegen für jedes Pixel 20 Parameter vor. Es sind also insgesamt 31000 Parameterwerte für die Abflussbildung und Abflusskonzentration auf der Pixelskala festzulegen.

Der Abfluss aus einem Pixel ergibt sich aus den vier Abflussanteilen Q_0 , Q_1 , Q_2 und Q_3 , welche näherungsweise als Abflusskomponenten interpretiert werden können. Q_0 ist der schnellste Abflussanteil und steht für den Oberflächenabfluss. Q_1 ist ein

mittlerer Abflussanteil und steht für den Interflow. Q_2 ist der langsame Abflussanteil aus den unteren Bodenschichten. Q_3 ist die langsame Grundwasserkomponente.

Die Transformation des Pixelabflusses zum Gebietsauslass (Abflusskonzentration auf der Gebietskala) und der Wellenablauf zwischen den Teileinzugsgebieten wird mittels einer im Zustandsraum formulierten nichtlinearen Nash-Kaskade beschrieben (Kalinin und Miljukov, 1958). Der Kraftwerksbetrieb der Staukette wird durch Steuerungsregeln beschrieben, die das Verhalten des Betriebsführers (z.B. Öffnen der Hochwasserentlastung) als Funktion der Zustandsgrößen der Speicher und der Abflussprognose emuliert (Reszler et al., 2006).

2.3 Aufbereitung der Eingangsdaten

Der vorliegende Beitrag verwendet ausschließlich beobachtete Niederschläge und Lufttemperaturen, keine Prognosen. Die 15 Minuten Werte des Niederschlages für jedes Pixel werden durch Interpolation der Stationsniederschläge mit der Methode der inversen Abstandsquadrate bestimmt. Für jeden Tag werden vorerst die Tageswerte aller Stationen interpoliert. Dann werden für jedes 15 Minuten Zeitintervall die Werte der 15 Minuten Stationen interpoliert. Für diese wird die Tagessumme gebildet und jeder 15 Minuten Pixelwert wird mit dem Verhältnis der interpolierten Tageswerte zu den Tagessummen skaliert. Dadurch ist es möglich, das dichtere Stationsnetz der Tageswertstationen auch für die Interpolation der 15 Minuten Niederschläge heranzuziehen.

Für die Bestimmung der Rasterwerte der Lufttemperatur wird vorerst eine Regression zwischen Lufttemperatur und Seehöhe durchgeführt. Die Differenzen zwischen den Regressionswerten an den Stationen und den Messwerten an den Stationen werden räumlich interpoliert. Die potentielle Verdunstung wird mittels des modifizierten Blaney-Criddle Verfahrens in Abhängigkeit von der Lufttemperatur berechnet (DVWK, 1996; Parajka et al., 2005ab).

3. Vorgeschlagene Vorgangsweise

Die vorgeschlagene Vorgangsweise zur Bestimmung der Parameter und Struktur flächendetaillierter Abflussmodelle besteht aus fünf Schritten:

1. Setzen von a priori Parameterwerten
2. Feinabstimmung der räumlichen Muster durch spektrale Entmischung
3. Parametereichung (Feinabstimmung)
4. Feinabstimmung der Modellstruktur
5. Plausibilitätskontrolle der simulierten räumlichen Muster

In jedem Schritt werden unterschiedliche Informationen herangezogen, um entweder die Modellparameter oder die Modellstruktur näher dem beobachteten Gebietsverhalten zu bringen. Es handelt sich also um eine inkrementelle, iterative Vorgangsweise.

Schritt 1: Setzen von a priori Parameterwerte

Ausgangspunkt der Bestimmung der Parameter für die einzelnen Elemente des flächendetaillierten Abflussmodells ist das Hydrotopkonzept (Flügel, 1995), das seinen Ursprung in den Hydrological Response Units (Leavesley, 1973) besitzt. In diesem Konzept wird das Gebiet in Landschaftseinheiten (d.h. Hydrotope) unterteilt, für die ein jeweils ähnliches hydrologisches Verhalten zu erwarten ist. Die Anwendung des Konzeptes besteht aus zwei Teilen: (a) Definition der Lage der Hydrotope und (b) Festlegung der Modellparameter für jedes Hydrotop. Die Definition der Lage der Hydrotope erfolgt meist durch Verschneiden von Informationen wie Hangneigung, Bodentextur und Landnutzung mit Hilfe Geographischer Informationssysteme (GIS). Ein Hydrotop ist dann durch eine bestimmte Kombination von Hangneigung, Bodentextur und Landnutzung charakterisiert. Die Festlegung der Parameterwerte für jede Landschaftseinheit erfolgt meist auf Basis von tabellierten Werten bzw. empirischen Formeln aus der Literatur (Blöschl, 2005).

Schritt 1 des vorgeschlagenen Verfahrens folgt vorerst dieser Vorgangsweise. Allerdings werden die Hydrotope nicht automatisch auf Basis von GIS Funktionalität und Zuordnungstabellen, sondern manuell festgelegt. Auch die Modellparameter werden für jedes Hydrotop in jedem der Teilgebiete manuell festgelegt. Beides erfolgt auf Basis von:

- Voranalysen der beobachteten Abflussganglinien und der Grundwasserganglinien;
- Feldbegehungen in Teilen des Einzugsgebietes und Gesprächen mit Ortskundigen;
- Digitalen Karten des Geländes, Landnutzung, Böden, Geologie;
- Parameterwerte in der Literatur (z.B. Reihan and Kovalenko, 2001).

Die Modellelemente sind im vorliegenden Fall Pixel. Die hier gewählten Hydrotope sind: Bebaute Flächen; Gräben; Hügelland; Hochflächen; Sättigungsflächen; Grundwasserleiter; Seeflächen. Die Unterteilung in diese Hydrotope orientiert sich an den zu erwartenden hydrologischen Reaktionen in diesen Teilbereichen. Diese Hydrotope sind nicht ausschließlich auf Basis der Oberflächeneigenschaften – wie sonst üblich – gewählt, sondern schließen den Untergrund ein. Neben der Landnutzung werden die geomorphologische Situation, Bodentyp, und Hydrogeologie herangezogen. Durch die manuelle, nicht formalisierte, Zuordnung kann die aus Feldbegehungen gewonnene Experteneinschätzung eingebracht werden. Im folgenden werden die Umsetzung des Konzeptes und die damit verbundene Argumentation am Beispiel des Kampgebietes beschrieben:

Bebaute Flächen: Dabei handelt es sich um großteils versiegelte Flächen. Sie besitzen ein sehr geringes Speichervermögen (nur Muldenrückhalt). Der Niederschlag kommt fast zur Gänze zum Abfluss. Nur ein geringer Anteil des gefallenen Niederschlags versickert in tiefere Bodenschichten. Der Hauptanteil des Abflusses findet an der Oberfläche statt.

Gräben: In diesen Pixeln finden sich großteils Gräben mit steilen Flanken und geringer Bodenmächtigkeit. Wegen der Steilheit ist zu erwarten, dass die Abflussbildung mit einer nur kleinen Verzögerung erfolgt. In den westlichen Teilgebieten der Kampregion ist, ebenfalls wegen der Steilheit und der geringen Bodenmächtigkeit, anzunehmen, dass der Interflow gering ist und es rasch zum Oberflächenfließen kommt. In den Mulden und Tälern sowie entlang der Gerinne ist der Lehm- und Gleyanteil höher (Fink et al., 1989), daher ist wenig Tiefenversickerung und eher oberflächlicher oder oberflächennaher Abfluss zu erwarten. Die geomorphologische Situation ergibt, dass die meisten Gräben hydraulisch gut an das Gewässernetz angeschlossen sind. In den östlichen Teilgebieten der Kampregion ist der Anteil an lehmigen Böden größer als im Westen. Die Fließwege sind in Osten kürzer, teilweise sind die Gerinne begradigt. Dies lässt eine kürzere Abflussreaktion bzw. kleinere Speicherkonstanten erwarten als im Westen.

Hügelland: Aus dem detaillierten digitalen Geländemodell ist abzulesen, dass die Landschaftsform im Südwesten der Kampregion kleinskalig, größtenteils hügelig und wellig ist mit kleinen Gräben. Dies dient zur räumlichen Festlegung der Pixel zum Hydrotop Hügelland. In den westlichen Teilgebieten der Kampregion sind die Böden das sandig, grusige Verwitterungsprodukt des Weinsberger Granits (Abbildung 1). Die Böden sind hoch durchlässig, wodurch hohe Anfangsverluste bei einem Ereignis zu erwarten sind. Die großen beim Extremhochwassers im August 2002 aus den Abflussdaten abgeleiteten Anfangsverluste unterstützen diese Annahme (Gutknecht et al., 2002). Der tiefere Untergrund besteht aus zerklüftetem Granit, was auf hohe Perkolationsraten hindeutet. Die große Speicherkapazität des Bodens in Verbindung mit der hügeligen Topographie lässt erwarten, dass die rasche Abflusskomponente erst nach einem hohen Schwellenwert auftritt. In den östlichen Teilgebieten der Kampregion ist mit einer geringeren Speicherfähigkeit der Böden zu rechnen, da der Anteil an lehmigen Böden größer ist als im Westen. Zudem ist der Gneisuntergrund im Osten weniger zerklüftet als der Granit im Westen.

Hochflächen: Die Lage der den Hochflächen zuzuordnenden Pixel wird sowohl aus der Befahrung als auch aus der im digitalen Geländemodell ersichtlichen Landschaftsform abgeleitet. Die Hochflächen bestehen aus meist ebenen Flächen, vor allem Feldern, die nicht direkt an das Gewässernetz angeschlossen sind. In den westlichen Teilgebieten der Kampregion besteht die Geologie der Hochflächen vorwiegend aus Glimmergneis, der weniger verwitterungsanfällig als der Granit ist. Die Böden sind Braunerde mit mittleren Durchlässigkeitseigenschaften. Bei der Begehung fiel auf, dass nach der Schneeschmelze auf den Feldern der Hochflächen großflächig Wasser stand. Dies weist auf wasserstauende Schichten relativ knapp unter der Oberfläche hin. Wegen des schlechten Anschlusses an das Gewässernetz sind hingegen hohe Speicherkoeffizienten zu erwarten. Die großen Speicherkoeffizienten sind auch aus den beobachteten Abflussganglinien der Schneeschmelzereignisse abzulesen, bei denen diese Flächen sehr stark zum Abfluss beitragen. In den östlichen Teilgebieten der Kampregion deuten Abflussganglinienanalysen darauf hin, dass aus den Hochflächen ein sehr geringer Abflussbeitrag kommt. Die Versickerung ist hier größer.

Sättigungsflächen: Entlang der Gerinne an der Zwettl im Nordwesten des Gebietes und auf kurzen Strecken am Kamp sind vernässte Flächen zu finden (Abbildung 2). Es handelt sich dabei um vergleyte Böden, Auböden und Anmoore (Fink et al., 1989), die ständig gesättigt sind. Diese Bodeneigenschaften deuten auf eine hohe Abflussbereitschaft und sehr rasche Abflussreaktion hin.

Grundwasserleiter: Ein spezielles Hydrotop wird notwendig, wenn sich im Untergrund ein Porengrundwasserleiter befindet. Auch hier wird die Modellidentifikation auf die verschiedenartigen je spezifisch wirksamen Merkmale abgestimmt. In diesem Fall wird vor allem die Dynamik von beobachteten Grundwasserganglinien herangezogen. Im Kampgebiet befindet sich im Osten das Horner Becken, das von einem Porengrundwasserleiter durchströmt wird. Dieser Grundwasserleiter biegt nach Süden ab und exfiltriert über eine große Strecke in den Unterlauf des Kamp. Der in diesem Bereich fallende Niederschlag kommt nicht während eines Ereignisses zum Abfluss sondern trägt zur Grundwasserneubildung und damit, in Abhängigkeit vom Grundwasserstand, zur Niederwasseraufhöhung bei. Die Abflusskonzentration läuft im Untergrund ab, weshalb die Wahl der Speicherkonstanten in den unteren Bodenschichten von Bedeutung ist. Zur Bestimmung der Parameter der Grundwasserspeicher im Modell werden die Grundwasserganglinien der Messstellen im Gebiet ausgewertet.

Seeflächen: Einige wenige Pixel liegen auf den Speicherseen im Kamptal (in Summe ca. 6km²). Für diese Pixel wird der Niederschlag als unmittelbar zum Abfluss kommend angesehen.

Aus dieser Einschätzung werden die Modellparameter gewählt. Das Ergebnis des ersten Schrittes ist eine vorläufige Zuordnung jedes Pixels zu einem Hydrotop sowie vorläufige Modellparameter für jedes Pixel.



Abb. 1: Böden bei Schönbach (Gebiet Kleiner Kamp).



Abb. 2: Sättigungs- und Ausuferungsflächen am Kamp bei Ritterkamp.

Schritt 2: Feinabstimmung der räumlichen Muster durch spektrale Entmischung

Im zweiten Schritt werden mit den zuvor bestimmten Modellparametern Abflusssimulationen durchgeführt und mit den beobachteten Abflussganglinien verglichen. Da die Modellparameter in Schritt 1 nicht an den Abflussdaten geeicht werden, sind Abweichungen zwischen simulierten und beobachteten Abflussganglinien zu erwarten. Im Folgenden wird angenommen, dass die Differenzen zwischen Beobachtung und Simulation vor allem auf die relativen Flächenanteile der Hydrotope in jedem Einzugsgebiet zurückzuführen sind. Um eine Übereinstimmung zwischen Beobachtung und Simulation zu erzielen, werden nun einzelne Pixel einem anderen Hydrotop zugeordnet bis die gewünschten Flächenanteile erreicht sind. Der gewünschte Flächenanteil wird mittels einer Vorgangsweise bestimmt, die in Analogie zur Methode der spektralen Entmischung gewählt wurde. Die Methode der spektralen Entmischung ist der Fernerkundung entlehnt. Die Reflexionswerte einzelner Pixel werden dort als Mischsignale verstanden, die sich aus den spektralen Informationen der im Mischpixel vorkommenden Oberflächen-Materialien zusammensetzen. Mittels spektraler Entmischung können die Flächenanteile der Oberflächen-Materialien in jedem Pixel rückgerechnet werden (z.B. Vikhamar and Solberg, 2003).

In der vorliegenden Arbeit besitzen die verschiedenen Hydrotope eine stark unterschiedliche Abflussdynamik. Versiegelte Flächen reagieren sehr rasch. Die Hochflächen reagieren sehr gedämpft, da sie hydrologisch nicht direkt an die Gewässer angeschlossen sind. Die anderen Hydrotope liegen in der Art der Abflussreaktion dazwischen. Die Reaktion auf unterschiedlich große Niederschläge ist auch unterschiedlich. Die versiegelten Flächen reagieren schon bei kleinen Niederschlägen deutlich, die Hochflächen erst bei größeren Niederschlägen. Das Hügelland zeichnet sich durch besonders große Anfangsverluste aus. Durch die geeignete Wahl des jedem Hydrotop zuzuordnenden Flächenanteils kann die Charakteristik der beobachteten Abflussganglinien angenähert werden. Die Sättigungsflächen besitzen nur einen sehr kleinen Flächenanteil. Die Grundwasserflächen beeinflussen vor allem das saisonale Abflussregime, aber kaum die Ereignisse. Deshalb werden diese beiden Hydrotope aus der spektralen Entmischung ausgeklammert.

Da die spektrale Entmischung auf Basis von Einzelereignissen nicht eindeutig lösbar ist, werden unterschiedliche Ereignistypen herangezogen: lange (synoptische) Ereignisse; kurze Ereignisse konvektiven Ursprungs; und Ereignisse, bei denen Schneeschmelze eine wesentliche Rolle spielt. Für jedes dieser Ereignisse soll Übereinstimmung im Charakter der Abflussreaktion erzielt werden. Die Idee ist dabei, dass bei diesen sich unterscheidenden Ereignissen auch die Hydrotope eine anders gewichtete Rolle spielen. Im Kampeinzugsgebiet sind die hydrologischen Unterschiede dieser Ereignistypen markant. Die langen synoptischen Ereignisse erzeugen die größten Hochwässer und es ist zu erwarten, dass bei diesem Ereignistyp das Hügelland wesentlich zum Direktabfluss beiträgt. Die Flächenanteile sind groß, aber erst bei den langen Niederschlägen werden die Anfangsverluste überwunden. Bei den kurzen konvektiven Ereignissen werden vor allem die schnell reagierenden und gut angeschlossenen Flächen (Gräben, versiegelte Flächen) abflusswirksam. Frühjahrs-

ereignisse treten meist bei großer Vorbefeuchtung auf, die auf vorhergehende Schneeschmelze zurückzuführen ist. Wegen der hohen Vorbefeuchtung ist der Anteil des unterirdischen Abflusses größer als im Sommer und vor allem das Hügelland und die Hochflächen werden abflusswirksam.

Im Gegensatz zur einer meist automatischen Anwendung der spektralen Entmischung in der Fernerkundung wird in der vorliegenden Arbeit eine manuelle Vorgangsweise gewählt. Dabei wird für die untersuchten Ereignisse für jedes Hydrotop die Abflussganglinie berechnet und mit einem Flächenfaktor multipliziert. Die Abflussanteile aus den Hydrotopen werden nun zum Gebietsabfluss überlagert und die simulierte Struktur der Ganglinie mit der beobachteten Struktur verglichen. Der Flächenfaktor wird variiert, bis die simulierte mit der beobachteten Struktur übereinstimmt. Die Strategie ist dabei, die gut identifizierbaren Anteile zuerst zu bestimmen, und dann die weniger leicht identifizierbaren Anteile. Im vorliegenden Fall wird zuerst die rasche Reaktion der versiegelten Flächen betrachtet. Sodann wird die sehr langsame Reaktion des Basisabflusses während des Ereignisses betrachtet, die besonders im Westen wesentlich zum Ereignis beiträgt. Dieser langsame Anteil ist allerdings nicht eindeutig dem Entstehungsgebiet zuzuordnen. Er kann aus dem oberflächennahen Abfluss des schlecht an das Gewässernetz angeschlossenen Hochlandes oder aus dem tiefergründigen Abfluss aus dem Hügelland bzw. den Gräben stammen. Diese Mehrdeutigkeit wird durch den Vergleich unterschiedlicher Ereignisse aufgelöst. Bei den kleinen konvektiven Ereignissen trägt das Hügelland nur zum Basisabfluss bei, bei großen synoptischen Ereignissen bzw. bei den schneebeeinflussten Ereignissen mit großer Vorbefeuchtung auch zum Direktabfluss. Aus den Gräben ist auch bei kleineren Ereignissen ein Direktabflussbeitrag zu erwarten. Die Hochflächen tragen nur nach der Schneeschmelze zum Abfluss bei, und das durch die Topographie verzögert.

Ein Beispiel für ein kleines konvektives Ereignis im August 1996 zeigt Abbildung 3a. Deutlich sind die unterschiedlichen Frequenzen – rasche bzw. gedämpfte Reaktionen – der unterschiedlichen Teilflächen zu erkennen. Die Anpassung an die beobachtete Ganglinie ist zwar nicht perfekt, doch liegt in diesem Schritt das Hauptaugenmerk darauf, die spektrale Charakteristik der beobachteten Ganglinie – rasch bzw. gedämpft – in den verschiedenen Teilen der Ganglinie wiederzugeben. Die raschen Fluktuationen am Beginn des Ereignisses sind offensichtlich auf die versiegelten Flächen im Gebiet zurückzuführen. Bei einem größeren Ereignis (August 2002, Abbildung 3b) verschieben sich die Beiträge der Flächenanteile. Während die versiegelten Flächen beim kleinen Ereignis in Abb. 3a wesentlich zur Charakteristik der Gesamtganglinie beitragen, dominiert bei dem großen Ereignis das Hydrotop Hügelland. Dieses Hydrotop nimmt flächenmäßig den größten Anteil in diesem Teilgebiet ein, wird aber erst bei großen Niederschlagshöhen in vollem Umfang aktiviert.

Abschließend werden einzelne Pixel einem anderen als dem ursprünglich gewählten Hydrotop zugeordnet, um die in diesem Schritt bestimmten Flächenanteile der Hydrotope zu erhalten. Die Auswahl der Pixel erfolgt durch eine Reinterpretation der Information der Karten und der Gebietskenntnis. Sie werden manuell zugeordnet. Die Anzahl der neu zugeordneten Pixel ist 5 bis 10% in jedem Teilgebiet. Das Ergebnis

des zweiten Schrittes ist die adjustierte Zuordnung jedes Pixels zu einem Hydrotop. Abbildung 4 zeigt diese Zuordnung.

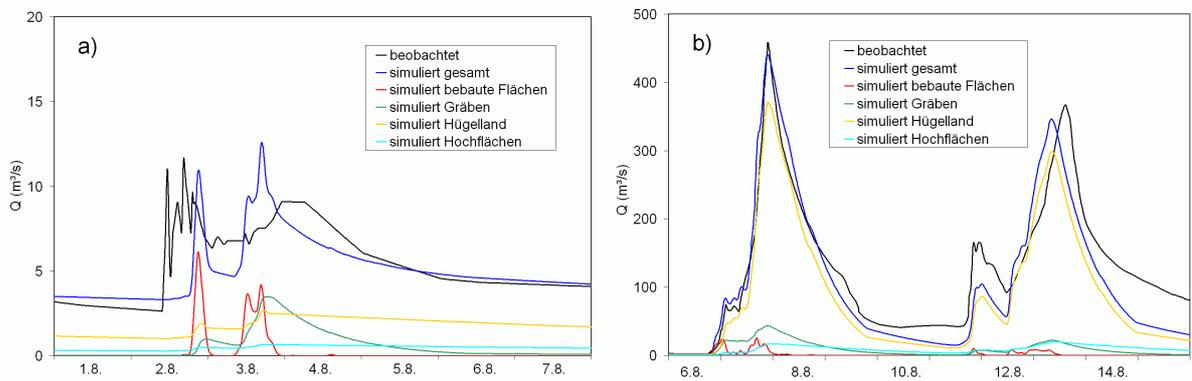


Abb. 3: Spektrale Entmischung: (a) Kleines konvektives Ereignis im August 1996. (b) Großes synoptisches Ereignis im August 2002. Pegel Zwettl/Kamp.

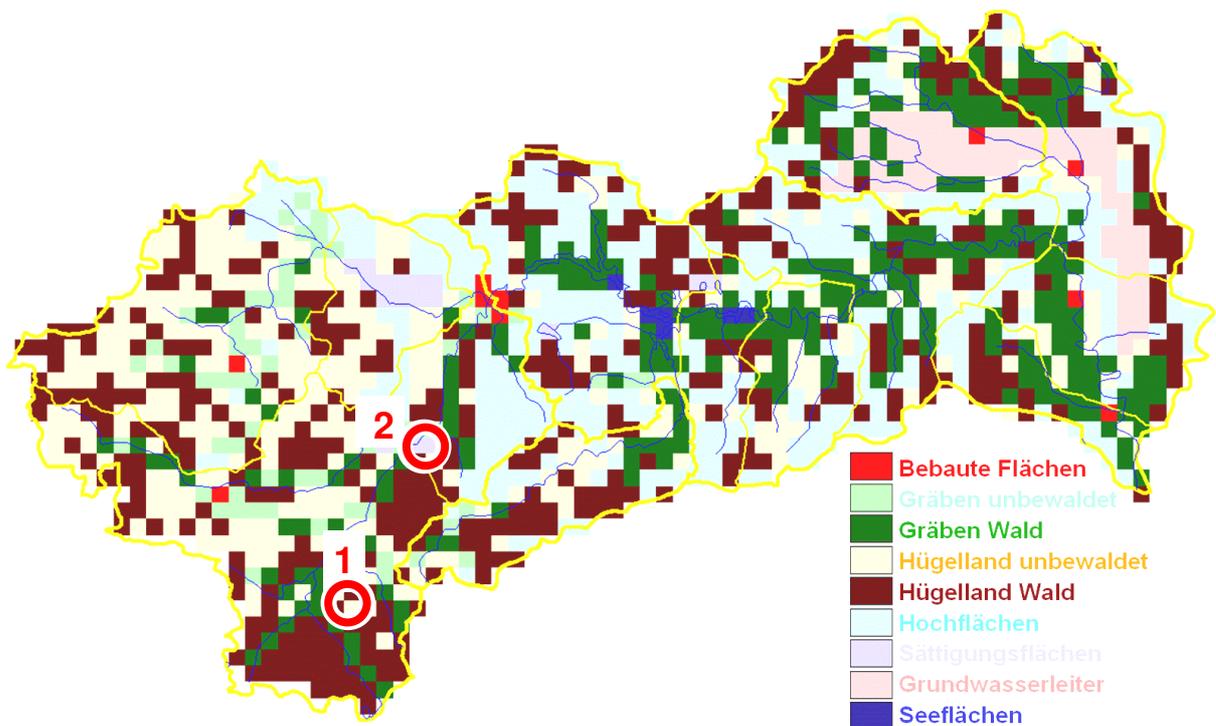


Abb. 4: Angepasste Hydrotupe im Kampgebiet. Die Kreise mit Nummern bezeichnen die Standorte der Fotos aus Abb. 1 bzw. 2.

Schritt 3: Parametereichung (Feinabstimmung)

Im dritten Schritt werden die Modellparameter jedes Hydrotops innerhalb plausibler Grenzen variiert, um eine Feinadjustierung der simulierten Abflussganglinien an die Beobachtungen zu erzielen. Die Hydrotupe Gräben und Hüggelland werden jeweils in Waldgebiete und Freiland unterteilt. In Waldgebieten ist wegen der Streuauflage ein größerer Rückhalt als im Freiland zu erwarten.

Der Vergleich der simulierten mit der beobachteten Abflussganglinie erfolgt vor allem auf Ereignisbasis. Nur die Feinadjustierung der Verdunstungsparameter und der Perkolationsparameter erfolgt auch saisonal. Beobachtete und simulierte Ganglinien werden visuell verglichen, wobei auf die Wiedergabe der folgenden Kenngrößen geachtet wird: (i) Ereignisabflussvolumina; (ii) Aufteilung in raschen, oberflächennahen Abfluss und Bodenabfluss, d.h. die Form der Welle. Wenn vor einem Ereignis über einen längeren Zeitraum der simulierte und beobachtete Basisabfluss nicht übereinstimmt, werden diese Unterschiede den Anfangsbedingungen zugeordnet. Diese Ereignisse werden dann mit geänderten Anfangsbedingungen, bei denen die simulierten und beobachteten Abflüsse zu Beginn des Ereignisses übereinstimmen, nochmals gerechnet. Damit wird verhindert, Einflüsse der Parameter auf saisonaler Skala und Ereignisskala zu vermischen.

Es ist anzunehmen, dass beim a priori Setzen der Parameterwerte (Schritt 1) die relative Einschätzung der Parameter zwischen den Gebieten (d.h. die Unterschiede zwischen den Gebieten) zuverlässiger ist als die Absolutwerte der Parameter. Deshalb wird bei Änderungen der Parameter im Zuge des manuellen Eichvorganges im Schritt 3 darauf Bedacht genommen, die Unterschiede der Parameter zwischen den Hydrotopen nicht zu verändern. Alle Parameterwerte werden nur innerhalb solcher Grenzen variiert, die hydrologisch für das jeweilige Hydrotop als plausibel angesehen werden. Die kalibrierten Werte werden schließlich mit Werten aus der Literatur (z.B. Reihan and Kovalenko, 2001) verglichen.

Das Ergebnis des dritten Schrittes sind adjustierte Modellparameter für jedes Pixel.

Schritt 4: Feinabstimmung der Modellstruktur

Für die Abflussbildung und Abflusskonzentration in jedem Pixel wird eine Modellstruktur herangezogen, die an das HBV Modell angelehnt ist, das ursprünglich für schwedische Verhältnisse entwickelt wurde. Es ist anzunehmen, dass für andere Klimaregionen die Struktur eine gewisse Adaptierung erfordert, um die jeweiligen hydrologischen Prozesse möglichst wirklichkeitsnahe zu beschreiben. Um Hinweise auf notwendige Änderungen der Modellstruktur zu erhalten, werden wiederum simulierte und beobachtete Abflussganglinien verglichen. Der erste Vergleich betrachtet die saisonale Skala. Aus dem Vergleich wird geschlossen, ob die Wasserbilanz innerhalb des Jahres zutreffend durch das Modell beschrieben wird. Dies testet insbesondere die Parameter der langsamen Abflusskomponente (Grundwasser) und die Struktur des Verdunstungsansatzes. Der saisonale Vergleich der Abflussganglinien zeigt, dass die an den Pegeln beobachteten Abflüsse, vor allem nach einem feuchten Frühjahr, durch ein hohes Niveau über mehrere Monate im Sommer (auch in trockenen Sommern) geprägt sind, das durch die Simulation vorerst nicht erreicht werden kann. Die Ursache für diese Diskrepanz wird darin gesehen, dass die saisonale Retention durch Grundwasser in dieser vorläufigen Modellversion nicht richtig wieder gegeben wird, weshalb neben den ursprünglich zwei Speichern ein dritter, sehr langsamer, unterirdischer Speicher als notwendig erachtet wird. Dies wird für alle Hydrotope als notwendig angesehen, nicht nur für das Hydrotop Grundwasserleiter.

Ein zweiter Vergleich betrachtet Einzelereignisse. Ebenso wie in den beiden Schritten zuvor (spektrale Entmischung und Feinabstimmung der Parameter) ist im Zuge einer Adaptierung der Modellstruktur für das Gebiet des Kamp eine Unterscheidung nach Ereignistypen (synoptisch, konvektiv, Schneeschmelze) essenziell, um möglichst unterschiedliche Situationen realistisch abzubilden. Dies ist wichtig, da im Vorhersagefall mit Situationen zu rechnen ist, die sich von denen im vorhandenen Datensatz in ihrem Charakter unterscheiden. Die Abbildungen 5 bis 7 zeigen Beispiele für die unterschiedlichen Ereignistypen im Gebiet des Kamp und einen Vergleich mit den Simulationen mit dem endgültigen Modell am Beispiel des Pegels Zwettl/Kamp (622 km²).

In Abb. 5 ist ein fast ausschließlich auf die Schneeschmelze zurückzuführendes Ereignis dargestellt. Von der Schneeschmelze beeinflusste Ereignisse zeichnen sich dadurch aus, dass der Hauptteil des Abflusses aus dem Einzugsgebiet aus dem unterirdischen Abflussanteil besteht. Durch die Schneeschmelze werden die Böden aufgesättigt, die unterirdischen Hohlräume werden aufgefüllt und die tieferen Fließwege angeschlossen bzw. aktiviert. Aus den Pegeldata ist herauszulesen, dass bei diesem Ereignistyp die langsamen Abflusskomponenten dominieren; die Speicherkonstanten des Zwischenabflusses bewegen sich zwischen 60 und 100 Stunden, was deutlich auf eine Abflussreaktion in den tieferen Bodenschichten hinweist. Die Abflussvolumina bzw. Abflussbeiwerte sind groß, da das gesamte Einzugsgebiet zum Abfluss beiträgt. Der erhöhte Abfluss - und somit der feuchte Gebietszustand - kann mitunter bis in den Frühsommer anhalten. Schon geringe Regenmengen reichen aus, um die Pegel ansteigen zu lassen, weshalb es in dieser Zeit am Kamp häufig zu kleinen und mittleren Hochwässern kommt (z.B. Hochwasser im Mai 1996). Das vorliegende Beispiel in Abb. 5 zeigt die Zeit der Schneeschmelze im April 1996, vor dem Hochwasser. Es handelt sich wie erwähnt um ein reines Schneeschmelzereignis, die Niederschläge in der Phase der stärksten Schmelze sind gering. In den Abflussdaten zeigt sich deutlich der typische Tagesgang infolge des Temperaturganges. Die Abflussspitze tritt entsprechend den Konzentrationszeiten im Gebiet jeweils in den späten Abend- bzw. Nachtstunden auf. Die Auslauflinie ist relativ flach. In der Simulation wird die Dynamik der Abflussganglinie gut wiedergegeben. Zusätzlich ist das simulierte Gebietsmittel des Schneewasserwertes SWW dargestellt und mit beobachteten Schneehöhen einer höhergelegenen (größere Schneehöhen) und einer tiefergelegenen Station (geringere Schneehöhen) verglichen. Der Vergleich von Schneewasserwert und Schneehöhen ist nur qualitativ möglich, da die Schneedichten nicht bekannt sind. Es zeigt sich in der Simulation für den Schneewasserwert eine bezüglich der beobachteten Schneelage im Gebiet plausible Form.

Abb. 6 zeigt ein Beispiel für ein konvektives Ereignis, das auf ein kurzes Gewitter zurückzuführen ist. Konvektive Ereignisse zeichnen sich durch kurze Niederschlagsdauer und hohe Intensitäten aus. Die räumliche Ausdehnung dieser Niederschlagszellen ist jedoch gering. Für die hydrologische Situation im Einzugsgebiet bedeutet das, dass nur ein geringer Gebietsteil zum Abfluss beiträgt. Die Abflussreaktion läuft hauptsächlich an der Oberfläche ab. Von der Lage der Niederschlagszentren im Gebiet

hängt es nun ab, welche Form der Abflusswelle an den Pegeln zu beobachten ist. Liegt das Zentrum des Niederschlages in den Gebietsteilen nahe des Pegels, so zeigen sich am Pegel steile Anstiege und kurze Abflussspitzen. Die Anlaufphase beträgt mitunter weniger als eine Stunde. Befindet sich der Schwerpunkt der Überregnung in vom Pegel weiter entfernten Gebietsteilen, so ergibt sich am Pegel eine ausgerundete Ganglinienform. In diesem Fall mitteln sich die Abflussreaktionen der einzelnen Gebietsteile aus; die Speicherkonstanten bewegen sich zwischen 15 und 30 Stunden. Da nur ein geringer Gebietsteil zum Abfluss beiträgt, sind die Abflussspitzen und – volumina meist relativ gering. Hinsichtlich Hochwasser stellt dieser Ereignistyp zwar keinen maßgeblichen Fall für das Kampgebiet dar, es ist aber wichtig, das Modell auch auf derartige Ereignisse abzustellen, um das volle Spektrum hydrologischer Situationen abzudecken. Im Beispiel in Abb. 6 wurde als Folge eines starken Gewitters am Pegel in Zwettl eine steile, kurze Abflussspitze beobachtet. Der Beginn des Anstieges am Pegel wird mit dem Modell gut wiedergegeben. Das Unterschätzen der sehr steilen Spitze durch das Modell deutet darauf hin, dass die aus den Daten abgeleiteten Niederschlagsintensitäten, vor allem im Bereich der pegelnahen Gebietsteile, unterschätzt werden.

Schließlich zeigt Abb. 7 ein Beispiel für ein Doppelereignis bestehend aus zwei längeren synoptischen Ereignissen. Dieser Ereignistyp erzeugt die größten Hochwässer in der Kampregion. Es sind dies vor allem die langen Sommerereignisse, mit oder ohne Vorregen bzw. Vorbefeuchtung. Durch die lange und großräumige Überregnung werden die Böden großflächig aufgesättigt, wodurch große Gebietsteile zum Abfluss beitragen. Der Anteil an Oberflächenabfluss ist groß, aber auch der Anteil an unterirdischem Abfluss nimmt bei genügend großer Vorbefeuchtung bzw. genügend langer Überregnung stark zu. Ähnlich wie nach der Schneeschmelze werden die Fließwege in den tieferen Bodenschichten aktiviert. Dies bewirkt, dass der Abfluss nach einem Ereignis aufgrund des hohen Anteils des langsam reagierenden Bodenspeichers längere Zeit auf hohem Niveau bleibt. Im Fall des Beispiels in Abb. 7 im August 2005 wird die beobachtete Ganglinie mit dem Modell sehr gut wiedergegeben. Es handelt sich bei diesem Ereignis um ein Verifikationsereignis; diese Daten gingen nicht in die Entwicklung des Modells ein.

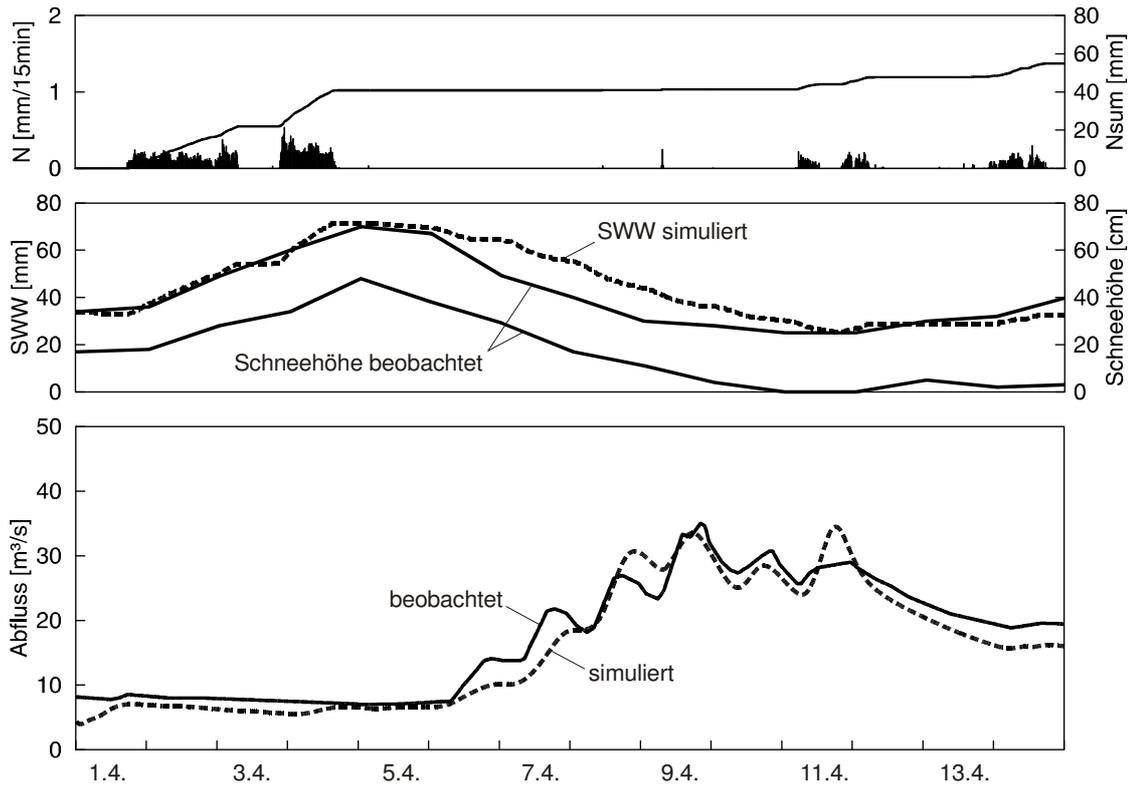


Abb. 5: Schneeschmelzereignis im April 1996 am Pegel Zwettl/Kamp.

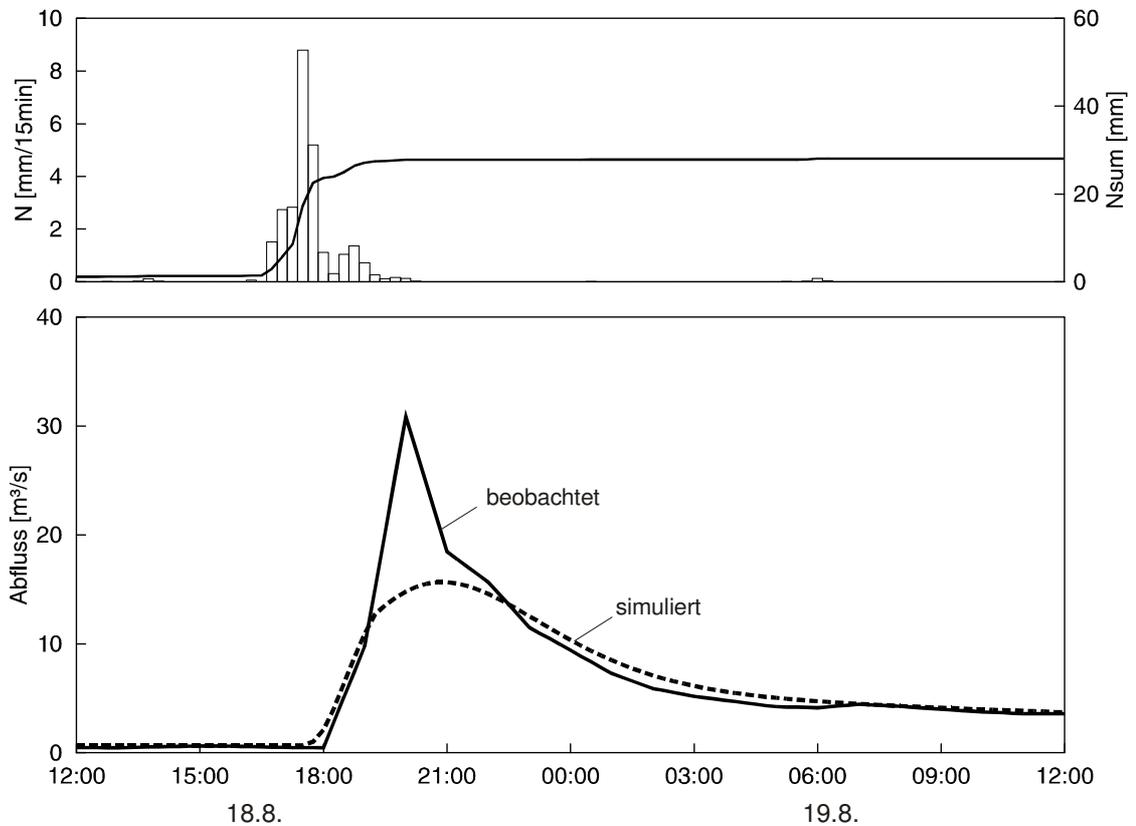


Abb. 6: Konvektives Ereignis im August 2003 am Pegel Zwettl/Kamp.

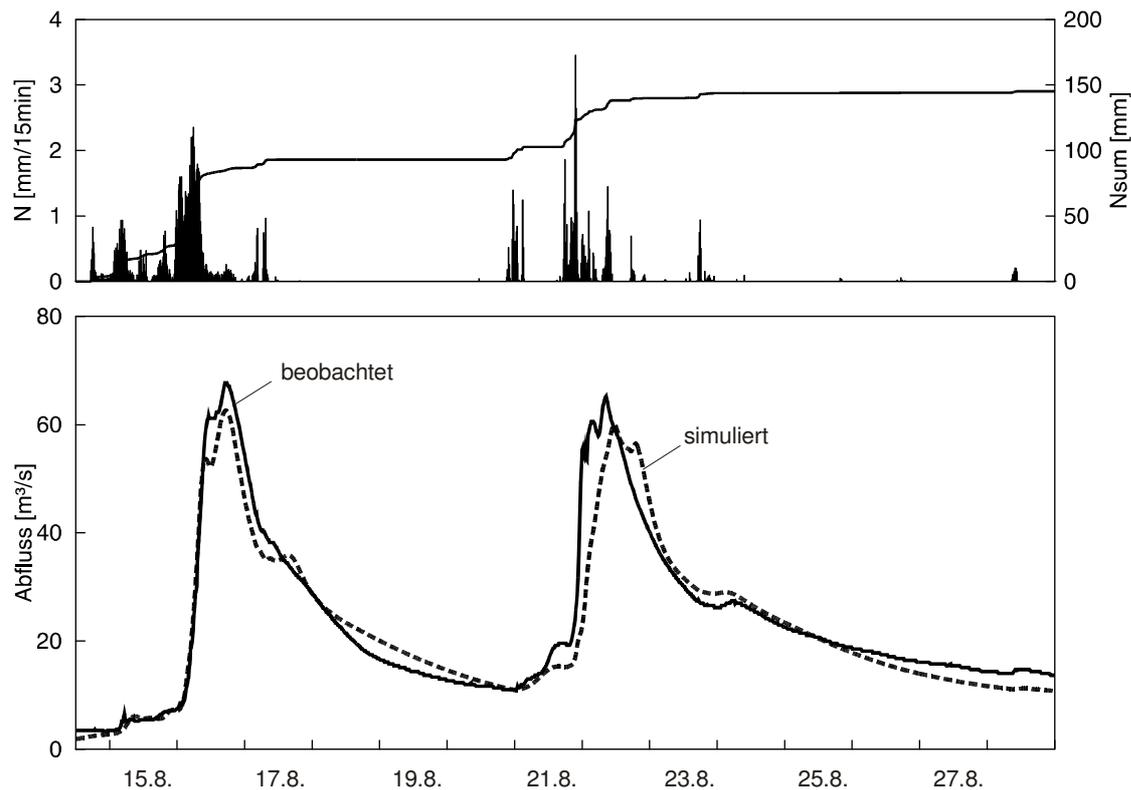


Abb. 7: Synoptisches Ereignis im August 2005 am Pegel Zwettl/Kamp (Verifikationsereignis).

Aus den in der Ereignisanalyse gewonnenen Einschätzung über das hydrologische Gebietsverhalten werden nun weitere Änderungen gegenüber der ursprünglichen Modellstruktur vorgenommen. Die Änderungen erfolgen anhand einer hydrologischen Argumentation unter Einbeziehung der in den Feldbegehungen gewonnenen Vorstellung über die Fließvorgänge im Gebiet. In der ursprünglichen Modellstruktur wird die Feuchte in der obersten Bodenschicht nur durch Verdunstung reduziert. Nicht berücksichtigt ist dabei die Möglichkeit einer schnellen Entwässerung der obersten Bodenschicht während eines Ereignisses zufolge Perkolation in den geklüfteten Fels. Abhilfe ist die Einführung eines Bypasses im Modell, der hydrologisch einer vertikalen Wasserbewegung in Markoporen entspricht, die die Matrix der Bodenzone rasch überbrückt und einen Teil des Niederschlages unmittelbar dem geklüfteten Fels zuführt. Die Gebietskenntnis deutet darauf hin, dass das in vielen Teilen des Kampgebietes ein wichtiger Prozess ist.

Aus der unterschiedlichen Dynamik der beobachteten Abflussganglinien, sowohl bei Betrachtung der saisonalen Skale als auch bei der Analyse der Einzelereignisse, wird auch augenscheinlich, dass bei unterschiedlichem Feuchtezustand im Gebiet der Austausch zwischen oberer und unterer Bodenzone variiert. Aus der Analyse der Abflussganglinien geht hervor, dass der unterirdische Abfluss mit zunehmender Bodenfeuchte größer wird, dass also mehr Wasser versickert. Ebenso wie der Bypass ist die Perkolation im trockenen Gebietszustand gering bzw. nicht vorhanden. Erst wenn genügend Wasser im Boden vorhanden ist, werden die unterirdischen Fließwege aktiviert bzw. angeschlossen. Die Perkulationsrate zwischen oberem und unterem

Speicher wird daher ähnlich wie der zum Abfluss beitragende Teil des Niederschlages von der relativen Bodenfeuchte abhängig gemacht.

Das unterschiedliche Versickerungsverhalten des Gebietes bei unterschiedlichem Feuchtezustand lässt erwarten, dass es auch zu einer Veränderung der Abflussreaktionen kommt, wenn sich die Abflusskomponenten im Boden verschieben. Dies wird auch beim Vergleich unterschiedlicher Ereignistypen im Rahmen der Analyse der Abflussganglinien sichtbar: Speicher 1 und 2 (Zwischenabfluss bzw. Abfluss aus tieferen Bodenschichten) beschreiben bei kurzen Starkregen im Sommer im trockenen Gebietszustand die Abflussreaktion auf Flächen mit längeren Oberflächen- oder oberflächennahen Abflüssen. Viele Flächen zeichnen sich durch geringe Hangneigungen aus oder sind schlecht an das Gewässernetz angeschlossen. Der Abflussbeitrag aus dem Boden muss klein sein. Mit zunehmendem Feuchtezustand im Gebiet, vor allem während und nach der Schneeschmelze, verändert sich die Abflussreaktion. Die Auslauflinien werden flacher, d.h. die Abflusskomponenten verlagern sich hin zur langsameren Komponente. Die hohen Speicherkoeffizienten des Zwischenabflusses weisen darauf hin, dass der maßgebliche Abflussbeitrag aus den tieferen Bodenschichten stammt. Im vorliegenden Gebiet werden in Schritt 5 deshalb die Speicherkoeffizienten als Funktion der Bodenfeuchte angesetzt.

Das Ergebnis des vierten Schrittes ist die adaptierte Modellstruktur für das gesamte Gebiet.

Schritt 5: Plausibilitätskontrolle der simulierten räumlichen Muster

Im fünften und letzten Schritt wird die Plausibilität des Modells getestet. Insbesondere liegt dabei das Schwergewicht auf der Wiedergabe der räumlichen Verteilung der hydrologischen Prozesse. Zur Plausibilitätskontrolle werden deshalb räumliche Muster hydrologischer Größen simuliert. Im Idealfall sollten diese mit räumlich verteilten Messungen verglichen werden (Grayson and Blöschl, 2000). Bei der Entwicklung eines Hochwasservorhersagemodells liegen allerdings in der Regel für die meisten Variablen keine quantitativen Messungen vor. Deshalb werden die simulierten Muster visuell überprüft, ob sie mit der Experteneinschätzung im Einklang sind.

Abbildung 8 zeigt die Verteilung der im Modell simulierten Füllstände des obersten Bodenspeichers S_1 in mm zu Beginn eines großen Ereignisses und während des selben Ereignisses (August 2002). Wie zu erwarten, ist der Füllstand des Speichers während des Ereignisses wesentlich höher als zu dessen Beginn. Der relativ hohe Wert zu Beginn im mittleren Teil des Gebietes ist auf ein Vorereignis mit Zentrum nördlich des Untersuchungsgebietes zurückzuführen. Die geringe Speicherfüllung im Osten ist eine Folge des hochdurchlässigen Untergrundes im Bereich des Porengrundwasserleiters. Die Grundwasserneubildung ist hier hoch, der Wassergehalt in der obersten Bodenschicht entsprechend klein wegen der hohen Perkolationsraten in tiefere Bodenschichten. Diese Verteilung ist als durchaus plausibel einzustufen und stützt die Annahmen über die räumliche Verteilung der Modellparameter.

Nach dem Plausibilitätstest des Schrittes 5 ist anzunehmen, dass das Modell die wesentlichen Abflussprozesse auch räumlich differenziert zutreffend beschreibt.

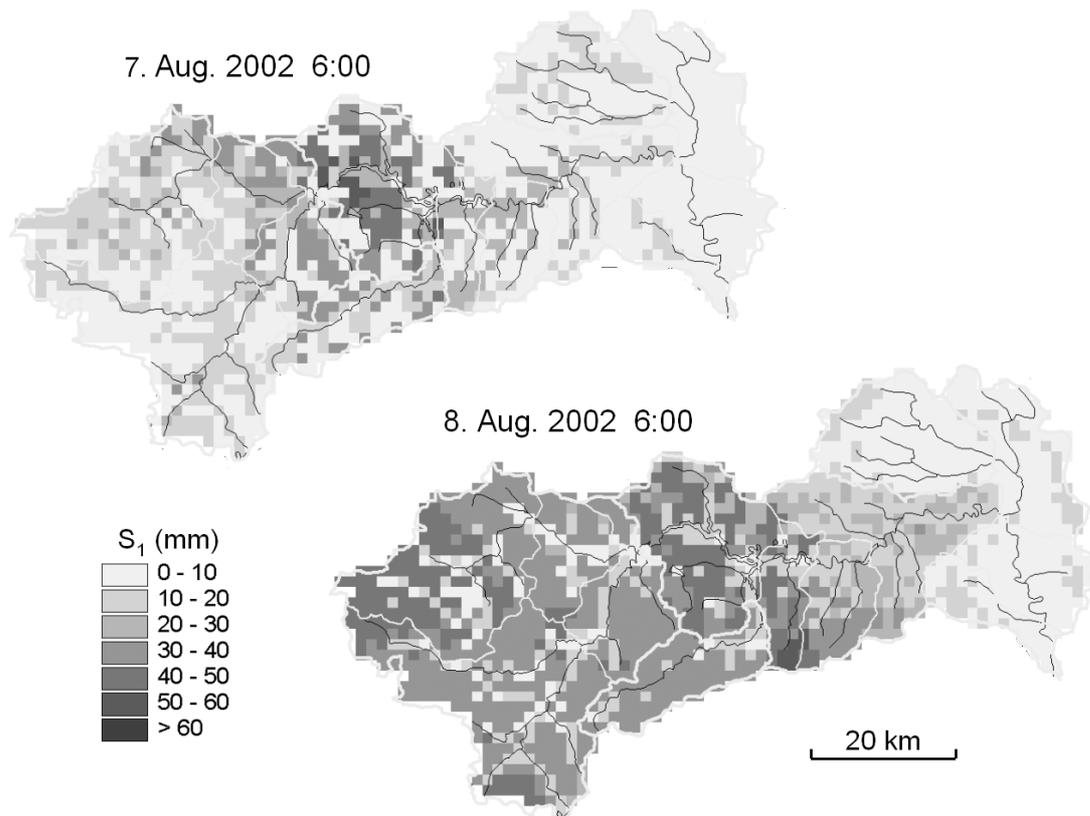


Abb. 8: Füllstand des obersten Bodenspeichers S_1 an zwei Zeitpunkten (Ereignisbeginn und Ereignismitte) für den Vergleich mit der Gebietseinschätzung.

4. Zusammenfassung

Nach diesen fünf Schritten wird der Modellteil der Abflussbildung und Abflusskonzentration auf der Pixelskala als für die operationelle Abflussvorhersage einsetzbar angesehen. Im Kampgebiet ist es besonders wichtig, die Abflussbildung zutreffend zu beschreiben, da der zum Abfluss kommende Anteil des Niederschlags zwischen den Ereignissen stark schwanken kann. Bei manchen Ereignissen kommen weniger als 10% des Niederschlags zum Abfluss, beim Ereignis vom 12. und 13. August 2002 waren es am Pegel Zwettl/Kamp hingegen 60%.

Für den Wellenablauf in den Flussabschnitten werden die Modellstruktur und die Modellparameter in ähnlicher Weise bestimmt. Die dafür zur Verfügung stehenden Informationen sind Abflussdaten, welche die Verformung der Abflusswelle entlang der Gewässer beschreiben, Ergebnisse hydraulischer Simulationen, die für größere als beobachtete Hochwässer die Wellenablaufdynamik beschreiben, sowie Angaben über den Beginn der Ausuferung in verschiedenen Abschnitten des Gewässers auf Basis von Feldbegehungen.

Die hier vorgeschlagene Vorgangsweise zur Modellidentifikation nützt sehr unterschiedliche, relevante Informationen für die Wahl der Struktur und der Parameter eines flächendetaillierten Abflussmodells in einem konkreten Gebiet. Es sind aber nur solche Informationen erforderlich, wie sie typischerweise bei der Entwicklung eines Hochwasservorhersagemodells zur Verfügung stehen. Die Umsetzung dieses Konzeptes zur Modellidentifikation wurde am Beispiel der Abflussbildung für das Kamp-

gebiet beispielhaft vorgestellt. Es kann als Muster für andere Gebiete und andere Abflussprozesse dienen.

Allerdings erfordert die Vorgangsweise einen großen Arbeitsaufwand. Dieser Arbeitsaufwand besteht nicht in der Durchführung zahlreicher Simulationen und Minimierung einer Zielfunktion, sondern in einer detaillierten hydrologischen Interpretation und Argumentation der Konzeptionen. Vorwissen über die Eigenschaften hydrologischer Prozesse ist dafür Voraussetzung. Dieser Einsatz wird als notwendig erachtet, um die Modellstruktur und Modellparameter in einer plausiblen Weise zu identifizieren. Wegen der unterschiedlichen, auch räumlich differenzierten, Informationen und der hydrologischen Überlegungen, die in die Modellidentifikation einfließen, ist zu erwarten, dass das so definierte Modell im Vergleich zur herkömmlichen Eichung die Abflussprozesse im Gebiet genauer beschreibt und deshalb zuverlässigere Abflussprognosen liefert.

5. Literatur

Bergström, S. (1976) Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. Dept. of Water Resour. Engineering, Lund Inst of Technol./Univ. of Lund, Bull. Ser. A, No. 52. 134pp.

Blöschl, G. (2005) Rainfall-runoff modeling of ungauged catchments. Article 133 in: Encyclopedia of Hydrological Sciences, M. G. Anderson (Managing Editor), J. Wiley & Sons, Chichester, pp. 2061-2080.

Blöschl, G., R. Kirnbauer and D. Gutknecht (1991) Distributed snowmelt simulations in an Alpine catchment. 1. Model evaluation on the basis of snow cover patterns. Water Resources Research, 27 (12), 3171-3179.

DVWK (1996) Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen, DVWK-Merkblätter, Heft 238, Bonn.

Fink, M.H., Grünweis, F.M und Wrbka T. (1989) Kartierung ausgewählter Kulturlandschaften Österreichs. Monographien des Umweltbundesamtes Bd. 11. Umweltbundesamt, Wien.

Flügel, W-A. (1995) Delineating hydrological response units by geographical information system analyses for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of the River Bröl, Germany. Hydrological Processes, 9, 423-436.

Grayson, R. B. and G. Blöschl (Eds) (2000) Spatial Patterns in Catchment Hydrology: Observations and Modelling. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 404 pp.

Grayson, R., G. Blöschl, A. Western and T. McMahon (2002) Advances in the use of observed spatial patterns of catchment hydrological response. Advances in Water Resources 25, 1313-1334.

Gutknecht, D., Ch. Reszler und G. Blöschl (2002) Das Katastrophenhochwasser vom 7. August 2002 am Kamp – eine erste Einschätzung. Elektrotechnik und Informationstechnik, 119 (12), 411-413.

Isermann, R. (1974) Prozeßidentifikation. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 188pp.

Kalinin, G.P. and Miljukov, P.I. (1958) Approximate methods of computing unsteady movement of water masses. Trans. Central Forecasting Inst., 68.

Leavesley, G. H. (1973) A Mountain Watershed Simulation Model: Fort Collins, Colorado, Colorado State University, Ph. D. dissertation, 174pp.

Merz, R. und G. Blöschl (2002) Marktüberblick und Beispiele – Software für die NA-Modellierung. Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 164. Niederschlag-Abfluss Modellierung - Simulation und Prognose, Institut für Hydraulik, TU Wien, pp. 223-242.

Parajka J., R. Merz and G. Blöschl (2005a) Regionale Wasserbilanzkomponenten für Österreich auf Tagesbasis. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 57, H 3/4, 43-56.

Parajka J., R. Merz and G. Blöschl (2005b) A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters. Hydrology and Earth Systems Sciences, Vol 9, 157-171. SRef-ID: 1607-7938/hess/2005-9-157.

Reihan, A. and O. Kovalenko (2001) Experience of an application of the HBV model for runoff computation in Estonia. In Environmental Impact and Water Management in a Catchment Area Perspective. Proceedings of the Symposium dedicated to the 40th Anniversary of Institute of Environmental Engineering at Tallinn Technical University, Estonia, Tallinn, 24-26 September. Tallinn, p. 126-134.

Reszler, Ch., G. Blöschl und J. Komma (2006) Simulation der Kraftwerkssteuerung am Kamp. In: Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 199. Technische Universität Wien, Seiten 85-102.

Singh, V. P. (Ed.) (1995) Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, 1130pp.

Vikhamar, D. and R. Solberg (2003) Snow-cover mapping in forests by constrained linear spectral unmixing of MODIS data. Remote Sensing of Environment, 88 (3), 309-323.

Anschrift der Verfasser:

Dipl.-Ing. Christian Reszler
A.o.Univ.Prof. Dr. Günter Blöschl
Dipl.-Ing. Jürgen Komma
O.Univ.Prof. Dr. Dieter Gutknecht
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/222, A-1040 Wien
Email: reszler@hydro.tuwien.ac.at

ENSEMBLEPROGNOSEN VON HOCHWASSERABFLÜSSEN

Jürgen Komma, Christian Reszler, Günter Blöschl, Thomas Haiden

1. Einleitung

Die Verfügbarkeit von genauen Hochwasservorhersagen, bis zu Prognosefristen von mehreren Tagen, wird in zunehmendem Maß auch für kleinere Einzugsgebiete gewünscht. Die Änderung des Anforderungsprofils macht die methodische Weiterentwicklung von Hochwasservorhersagesystemen zu einem wichtigen, interdisziplinären Betätigungsfeld in der Meteorologie und Hydrologie.

Die in der Natur auftretenden atmosphärischen und hydrologischen Prozesse verhalten sich in hohem Maße nicht-linear und führen zu einer Unbestimmtheit des natürlichen Systems. Diese Unbestimmtheit findet sich notwendigerweise auch im strukturellen Aufbau der physikalischen Wettermodelle und der hydrologischen Niederschlag-Abflussmodelle wieder. Deshalb sind Hochwasservorhersagen stets mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Die Größenordnung der Unsicherheiten wird dabei durch die vorherrschenden meteorologischen und hydrologischen Randbedingungen bestimmt. Im Rahmen der Entscheidungsfindung beim Hochwassermanagement stellt die Quantifizierung dieses Unsicherheitsbereiches eine wertvolle Zusatzinformation für die Risikoabschätzung dar.

Eine Methode zur Bestimmung der Unsicherheit von mittel- bzw. langfristigen Niederschlagsvorhersagen ist die Verwendung von Ensemble-Vorhersagen (Buizza, 1997). Dabei wird neben dem Hauptlauf ein Ensemble von zusätzlichen Niederschlagsprognosen, auf Basis von veränderten Anfangsbedingungen des physikalischen Wettermodells, generiert. Diese werden dem hydrologischen Niederschlag-Abflussmodell als Eingangsdaten zur Verfügung gestellt. Die Breite des resultierenden Ensemble-Streubereiches dient dann als Indikator für die Unsicherheit der Hochwasserprognose. In dieser Arbeit wird anhand des operationellen Hochwasservorhersagesystems am Kamp gezeigt, wie derartige Ensemblevorhersagen aufgebaut sind und die daraus gewonnenen Informationen interpretiert werden können.

2. Erfassung der Vorhersageunsicherheit durch Ensembleprognosen

2.1 Prognosefristen und Vorhersageunsicherheit

Generell ist die erzielbare Genauigkeit von Abflussvorhersagen von der jeweiligen Prognosefrist abhängig. Für Gebiete, in denen die Abflussreaktionen und Wellenlaufzeiten im Vergleich zur erforderlichen Prognosefrist kurz sind, ist es sinnvoll, die unterschiedlichen Genauigkeitsstufen durch verschiedene Ansätze bei der Formulierung des Modells zu kombinieren. Blöschl et al. (2006) bezeichnen diese Vorgangsweise als gestuften Ansatz, welcher das Ziel hat, die Genauigkeit der Prognosen zu maximieren und dennoch lange Prognosefristen zu erreichen. Die genauesten Prognosen sind durch die Simulation des Wellenablaufes mit geeigneten hydrolo-

gischen oder hydrodynamischen Ansätzen unter Verwendung von beobachteten Abflüssen zu erreichen. Die Verwendung von Wellenablaufmodellen ist jedoch durch die meist kurzen Laufzeiten in kleinern Einzugsgebieten auf die ersten Stunden der Prognosefrist beschränkt. Eine Verlängerung der Prognosefrist kann durch Niederschlag-Abflussmodelle unter Verwendung des beobachteten Niederschlags erreicht werden. Die Unsicherheiten für diese Vorhersagestufe ergeben sich aus der hydrologischen Modellunsicherheit und den Unsicherheiten im Niederschlagsinput. Eine weitere Verlängerung der Prognosefrist kann nur durch die Verwendung von Niederschlagsprognosen erreicht werden.

Die Güte von Hochwasserprognosen wird maßgeblich von der Genauigkeit und Bestimmtheit der verwendeten Eingangsdaten beeinflusst. Dabei spielt die Komplexität und Erfassbarkeit der natürlichen Prozesse eine wichtige Rolle. Der Wellenablauf in Gerinnestrecken kann in der Regel sehr gut durch hydrodynamische bzw. hydrologische Modellansätze beschrieben werden. Hier kommen die Unsicherheiten hauptsächlich aus der beschränkten Genauigkeit von Abflussmessungen und der daraus resultierenden Unschärfe der Pegelschlüssel. Die Unsicherheiten in der vom Niederschlag-Abflussmodell beeinflussten Genauigkeitsstufe haben zwei wesentliche Ursachen. Zum Einen sind die komplexen Vorgänge bei der Abflussbildung und Abflusskonzentration durch Nicht-Linearitäten und Schwellenwertprozesse bestimmt, zum Anderen sind kleinräumige Niederschlagsmuster, z.B. zwischen den Niederschlagsstationen, nicht genau erfassbar. Dabei ist die Größenordnung des Unsicherheitsbereiches wesentlich von der vorherrschenden hydrologischen Situation abhängig und somit instationär. Im Bereich von Wellenanstiegen nach intensiven Niederschlägen wächst die Unschärfe gegenüber dem Nieder- und Mittelwasserbereich an. Die Größenordnung der Unsicherheit von Niederschlagsprognosen liegt bei Hochwasser weit über jener des Niederschlag-Abflussmodells und hängt von der Stabilität der vorherrschenden Wetterlage ab. Deswegen ist für die Hochwasservorhersagen, die über die Laufzeiten innerhalb des Gebietes hinausgehen, die Unsicherheit im prognostizierten Niederschlag der bestimmende Faktor für die Unsicherheiten im prognostizierten Abfluss.

2.2 Ensemblevorhersagen und Hochwasserwarnung

In der Meteorologie werden Ensemblevorhersagen schon seit Jahren für die Quantifizierung der Prognoseunsicherheiten verwendet (Buizza, 1997). Als Ensemble wird dabei das Kollektiv einer Vielzahl unterschiedlicher Prognoseläufe bezeichnet. Die übliche Vorgehensweise bei der Generierung von Ensembles ist das wiederholte Starten des numerischen Wettermodells auf Basis von unterschiedlichen Anfangsbedingungen. Die Breite des vom Ensemble aufgespannten Streubereiches dient dabei zur Beschreibung der Unsicherheit des Hauptlaufes (deterministischer Lauf) der Vorhersagen von atmosphärischen Variablen (z.B. Niederschlag). Die beiden führenden Institutionen bei der Erstellung von Ensemblevorhersagen sind das European Center for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF) in Reading (GB)

und das US National Center for Environmental Predictions (NCEP) in Maryland (USA).

Werden Ensembleprognosen des Niederschlags als Eingangsgrößen in ein Niederschlag-Abflussmodell verwendet, so erhält man als Ergebnis ein Ensemble von Abflussvorhersagen. Analog zu den Niederschlagsprognosen dient auch bei der Abflussvorhersage der Vertrauensbereich des Ensembles zur Abschätzung der Prognosefehler. Die Grenzen des Vertrauensbereichs werden durch obere und untere Quantile der Ensembles definiert. Die Quantilen geben dabei an, wie viel Prozent der Ensemblemitglieder unterhalb des entsprechenden Wertes liegen. Zum Beispiel ist das 90%-Quantil eines Ensembles als jener Wert definiert, welcher von 90% der Ensemblemitglieder unterschritten wird.

Die Interpretation der Ensemblevorhersagen im Zusammenhang mit der Hochwasserwarnung ist wichtig, um die darin enthaltenen Informationen nutzen zu können. In der Meteorologie werden schon seit längerer Zeit Methoden verwendet, die durch Einführung von Schwellenwerten die Beurteilung von Ensemblevorhersagen ermöglichen (Mason, 1979). Dabei wird die Anzahl der Fehlalarme, der zutreffenden Warnungen, der versäumten Warnungen und der Fälle, für die weder eine Warnung noch ein Ereignis aufgetreten ist, in Tabellenform zusammengefasst. Ein Beispiel für die Interpretation von probabilistischen Hochwasservorhersagen im Zusammenhang mit dem Erreichen einer Warnschwelle ist in Abbildung 1 gezeigt. Neben der deterministischen Prognose sind auch die 90% und 10% Quantilen der Ensemblevorhersage dargestellt. Für das gezeigte Beispiel wird nur durch das 90% Quantil eine Hochwasserwarnung ausgelöst, da nur dieses die Warnschwelle überschreitet. Generell wird das 90%-Quantil weit häufiger zur Hochwasserwarnung führen als dies bei der deterministischen Prognose bzw. beim 50% Quantil der Fall ist. Deshalb ist die Anzahl der versäumten Hochwasserwarnungen für das 90% Quantil am geringsten. Bei Verwendung des 10% Quantils ist hingegen die Anzahl der Fehlwarnungen am geringsten. Wenn die Kosten für eine versäumte Warnung und eine Fehlwarnung gleich sind, dann sind die Gesamtkosten über einen längeren Zeitraum dann am geringsten, wenn das 50% Quantil als Warnkriterium verwendet wird. Sind aber die Kosten für eine versäumte Warnung höher als die Kosten einer Fehlwarnung, dann sind die Gesamtkosten über einen längeren Zeitraum am geringsten, wenn ein größeres Quantil als das 50% Quantil, z.B. das 90% Quantil, als Warnkriterium verwendet wird.

Für die graphische Darstellung des Verhältnisses von Fehlwarnungen zu zutreffenden Warnungen wird in der Meteorologie häufig das ROC (Relative Operating Charakteristik) – Diagramm verwendet (Mason und Graham, 1999). Dieses Diagramm kann in analoger Weise auch für die Darstellung der Warncharakteristik der Ensemblevorhersagen von Abflüssen verwendet werden. Ein schematisches ROC-Diagramm ist in Abbildung 2 dargestellt. Der Prozentsatz von Fehlwarnungen gibt dabei die relative Häufigkeit jener Fälle an, in denen die Warnschwelle vom maßgeblichen Ensemble-Quantil überschritten wird, während der beobachtete Abfluss die Warnschwelle nicht erreicht, bezogen auf die Anzahl aller Fälle, für die der beobachtete Abfluss unterhalb der Warnschwelle bleibt. Der Prozentsatz von

zutreffenden Warnungen gibt dabei die relative Häufigkeit jener Fälle an, in denen die Warnschwelle sowohl vom maßgeblichen Ensemble-Quantil, als auch vom beobachteten Abfluss überschritten wird, bezogen auf die Anzahl aller Fälle, für die der beobachtete Abfluss die Warnschwelle überschreitet. Ein perfektes Vorhersagesystem, das nur zutreffende Warnungen und keine Fehlwarnungen liefert, würde in diesem Diagramm durch einen Punkt in der linken oberen Ecke dargestellt. Da reale Ensemblevorhersagen vom perfekten Zustand abweichen, ergeben sich für die Quantile unterschiedliche Punkte im Diagramm. Durch Verbinden der Quantile ergibt sich eine Kurve, welche das Warnverhalten der Ensemblevorhersagen für unterschiedliche Über- bzw. Unterschreitungswahrscheinlichkeiten charakterisiert. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, durch welches Quantil der Ensemblevorhersage eine Warnung ausgelöst werden soll. Man kann nun eine Tangente an die ROC-Kurve legen und den Winkel α der Tangente in Abhängigkeit vom Verhältnis der Kosten einer Fehlwarnung zu den Kosten einer versäumten Warnung wählen. Der Berührungspunkt entspricht konzeptionell der Quantile, deren Warncharakteristik über einen längeren Zeitraum zur Minimierung der Summe der Kosten der Fehlwarnungen und der Kosten der versäumten Warnungen führt. Sind die Kosten einer Fehlwarnung gegenüber den Kosten eines versäumten Alarmes vergleichsweise klein, ist es sinnvoll, auch den Winkel α klein zu wählen. Für die Hochwasserwarnung ist dies in der Regel der Fall und deshalb ist in erster Linie der obere Vertrauensbereich der Ensembleprognosen von Interesse (Quantile $> 50\%$). Im Beispiel in Abbildung 2 ist für dieses Kostenverhältnis das 90% Quantil der Ensemblevorhersage als Warnkriterium eingezeichnet.

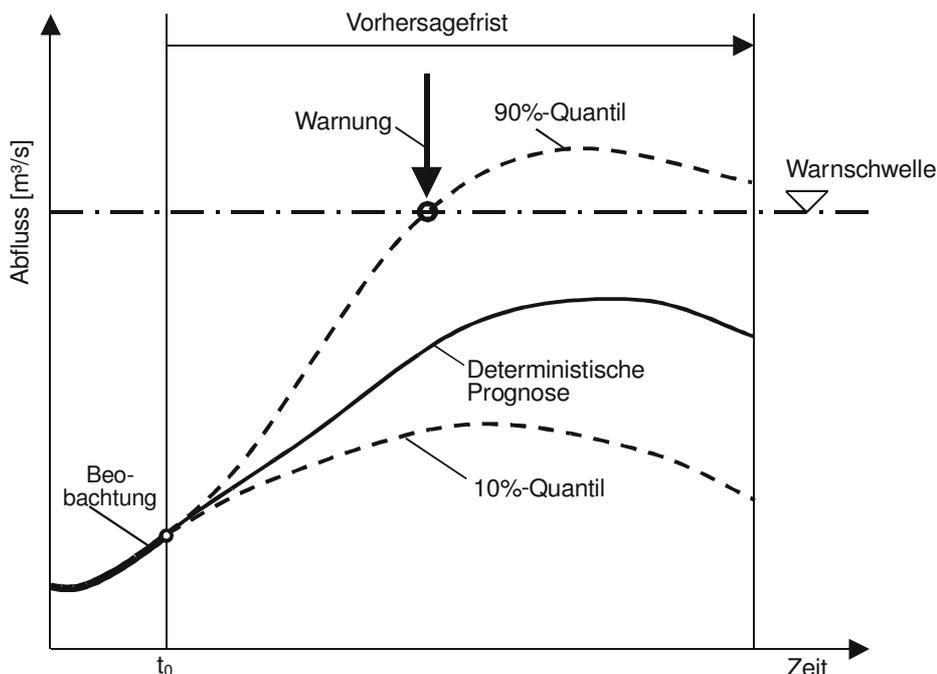


Abb. 1: Prinzipskizze für die Hochwasserwarnung auf Basis der Warnschwellenüberschreitung in Verbindung mit Ensembleprognosen des Abflusses.

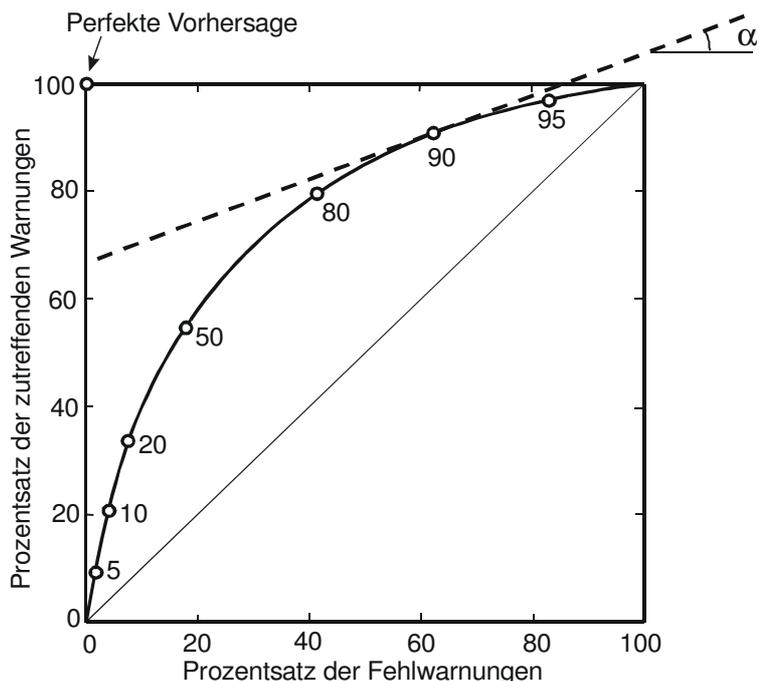


Abb. 2: Schematisches ROC-Diagramm für eine bestimmte Warnschwelle und die 5, 10, 20, 30, 50, 80, 90 und 95% Quantile der Ensemblevorhersagen. Es ist sinnvoll, den Winkel α der Tangente in Abhängigkeit vom Verhältnis der Kosten einer Fehlwarnung zu den Kosten einer versäumten Warnung zu wählen (z.B. kleines α wenn Kosten der Fehlwarnung vergleichsweise gering sind).

3. Niederschlagsvorhersage und Abflussmodell im Kampgebiet

3.1 Niederschlagsvorhersage

An der ZAMG wurde im Rahmen des Kampprojektes ein Niederschlagsanalyse und -prognosesystem entwickelt, das INCA („Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis“) – System. Dieses basiert auf der Kombination von Stationsbeobachtungen, Radardaten und Prognosen von numerischen Wettermodellen zu einem einheitlichen Endprodukt. Dieses Endprodukt, das alle 15 Minuten aktualisiert wird, beinhaltet jeweils ein interpoliertes Niederschlagsfeld von 15 min Niederschlagssummen sowie den deterministischen Hauptlauf und ein Ensemble von 50 Niederschlagsprognosen. Die räumliche Auflösung der Niederschlagsprognosen beträgt dabei 1x1 km.

Die Niederschlagsprognose wird aus zwei Komponenten ermittelt. Die erste Komponente ist eine beobachtungsbasierte Extrapolation, die als Nowcasting bezeichnet wird. Die Extrapolationsmethode beruht auf Verlagerungsvektoren, die aus den Bewegungsrichtungen der beobachteten Niederschlagsfelder ermittelt werden. Die zweite Komponente sind Prognosen der numerischen Wettermodelle ALADIN und ECMWF.

Das ALADIN Modell liefert zweimal pro Tag Prognosen mit einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde und einer räumlichen Auflösung von ca. 10 km. Das Modell des ECMWF wird ebenfalls zweimal am Tag gestartet, weist aber deutlich

geringere zeitliche (6 Stunden) und räumliche (25 km) Auflösungen auf. Die Kombination der unterschiedlichen Vorhersagemethoden erfolgt durch die gewichtete Mittelung der ECMWF und ALADIN Prognosen. Von der ZAMG durchgeführte Modelltests haben gezeigt, dass für Prognosefristen von zwei bis sechs Stunden die Methode der beobachtungsbasierten Extrapolation meist bessere Ergebnisse als die Modellprognose liefert (Haiden et al., 2006). Aus diesem Grund wird während der ersten 2 Stunden der Vorhersage das volle Gewicht auf die Extrapolation der Niederschlagsanalyse gelegt und bis zur sechsten Stunde der Vorhersage linear auf 0 reduziert. Ab der sechsten Stunde werden die Niederschlagsvorhersagen durch die Prognosen der numerischen Wettermodelle ALADIN und ECMWF bestimmt.

Um den Grad der Prognoseunsicherheit zu quantifizieren, wird ein Ensemble von Niederschlagsprognosen generiert. Das ECMWF Modell liefert bei jedem Modelllauf zusätzlich zum Hauptlauf ein Ensemble von 50 Niederschlagsvorhersagen auf Basis von veränderten Anfangsbedingungen. Die räumliche Auflösung der einzelnen Ensemblemitglieder ist mit ca. 40 km deutlich geringer als jene des deterministischen Modelllaufes. Das ALADIN Modell generiert im operationellen Betrieb keine zusätzlichen Ensemblevorhersagen. Deswegen werden Pseudo-Ensembles generiert. Bei den ALADIN Prognosen tritt häufig der Fall ein, dass zwar die vorhergesagten Niederschlagsmengen die richtige Größenordnung haben, jedoch der Ort des Auftretens nicht korrekt prognostiziert wird. Um die räumliche Unsicherheit zu berücksichtigen, wird durch Verschiebung der ALADIN-Niederschlagsfelder in x und y Richtung ein Pseudo-Ensemble von 25 Niederschlagsprognosen erzeugt. Die Größe der Verschiebung geht dabei bis zum Vierfachen der räumlichen Auflösung.

Jedes ECMWF Ensemblemitglied wird nun zufällig mit einem der ALADIN Pseudo-Ensemblemitglieder kombiniert. Dabei werden die räumlich höher aufgelösten ALADIN Niederschlagsfelder auf die ECMWF Vorhersagen skaliert. Weiters werden alle Ensemblemitglieder durch gewichtete Mittelung während der ersten 6 Stunden mit den Niederschlagsmustern der beobachtungsbasierten Extrapolation kombiniert. Analog zur deterministischen Prognose wird während der ersten zwei Stunden das Gewicht voll auf auf das Nowcasting gelegt und bis zur sechsten Stunde auf null reduziert. Deshalb beginnt sich der Streubereich des Niederschlagsensembles erst nach den ersten zwei Stunden aufzuweiten. Die Ensemblesniederschläge werden mit einer Rasterweite von 10 km generiert.

3.2 Abflussmodell

Das Prognosemodell setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen. Dabei wird ein hydrologisches Wellenablaufmodell auf Basis einer nicht-linearen Nash-Kaskade mit einem flächendetaillierten, kontinuierlichen Niederschlag-Abflussmodell kombiniert. Die Parameterisierung der Nash-Kaskade erfolgt auf Basis von beobachteten Abflussdaten und durch Aneichung an Simulationsergebnisse von komplexeren hydrodynamischen Modellen (Blöschl et al. 2006). Die Struktur des Niederschlag-Abflussmodells ist an das von Parajka et al. (2005) verwendete Modell angelehnt. Die räumliche Auflösung des Niederschlag-Abflussmodells beträgt 1 x 1 km und als

zeitliches Rechenintervall wird ein Zeitschritt von 15 Minuten gewählt. Die Wahl der Modellparameter und die Identifikation der Modellstruktur erfolgte manuell und wird von Reszler et al. (2006) im Detail beschrieben.

Das Kernstück des Niederschlag-Abflussmodells ist die Routine zur Simulation des Bodenfeuchtehaushalts. Der Aufteilung des Niederschlags N_r und der Schneeschmelze N_m in den Direktabfluss dQ und jenen Anteil, der die Bodenfeuchte erhöht, wird über eine nicht-lineare Funktion in Abhängigkeit der aktuellen Bodenfeuchte S_{bf} bezogen auf die maximale Speicherkapazität der obersten Bodenzone FC bestimmt (Gl. 1).

$$dQ = \left(\frac{S_{bf}}{FC} \right)^\beta \cdot (N_r + N_m) \quad (1)$$

β ist dabei ein Maß für die Nichtlinearität der Abflussbildung. Bei vollständiger Sättigung der obersten Bodenzone ($S_{bf} = FC$) trägt der gesamte Regen und die gesamte Schneeschmelze zum Abfluss bei. Bei nicht vollständiger Sättigung ($S_{bf} < FC$) tragen Regen und Schneeschmelze auch zur Erhöhung der Bodenfeuchte S_{bf} bei. Eine Verringerung von S_{bf} erfolgt nur durch Verdunstung.

Die Formulierung des Bodenfeuchtehaushalts und der Abflussbildung in Gl. 1 bildet die Nicht-Linearität der natürlichen hydrologischen Prozesse im Niederschlag-Abflussmodell ab. Für die Abflussprognosen bedeutet dieses nicht-lineare Verhalten, dass bereits kleine Unterschiede im Niederschlagsinput zu viel größeren Unterschieden in den Abflussprognosen führen können.

Bei der Verwendung des Niederschlag-Abflussmodells mit den Ensemblevorhersagen des Niederschlags als Modellinput erfolgt die Abflussberechnung für alle 50 Ensembleläufe mit denselben Systemzuständen als Anfangsbedingung. Da die Unsicherheiten durch die hydrologische Modellierung im Vergleich zu den Unsicherheiten der Niederschlagsprognosen im Hochwasserfall gering sind, ist ein expliziter Ansatz zur Berücksichtigung der hydrologischen Unsicherheiten bei den Ensemblevorhersagen nicht erforderlich.

4. Beispiele für Ensemblevorhersagen

Abbildung 3 zeigt die Gebietsmittelwerte der Niederschlagssumme der deterministischen und probabilistischen Niederschlagsvorhersage vom 9. Juli 2005 um 0 Uhr für das Pegelzugsgebiet Zwettl/Kamp (Fläche 622 km²). Die dicke, durchgezogene Linie beschreibt die Summe der beobachteten Niederschläge. Die deterministische Niederschlagsprognose wird durch die dünnere, durchgezogene Linie angezeigt. Die 50 Realisationen der Ensemblevorhersage sind durch strichlierte Linien dargestellt. Der hellgrau hinterlegte Bereich im Hintergrund der Grafik weist den 10-90% Vertrauensbereich des Ensembles aus. Die deterministische und probabilistische Abflussprognose auf Basis der in Abbildung 3 gezeigten Niederschlagsvorhersage ist in Abbildung 4 dargestellt. Der Prognosezeitpunkt ist für dieses Beispiel ungefähr 60 Stunden vor einem beobachteten Hochwasserscheitel. Im Vorfeld

der Prognose führten Niederschläge zu einer Vorbefeuchtung des Einzugsgebiets und zu einem leichten Anstieg des Abflusses. Zum Prognosezeitpunkt sind die Niederschläge bereits abgeklungen und der Pegelstand beginnt wieder zu sinken. Die deterministischen Vorhersagen der Niederschläge und der Abflüsse weisen eine sehr gute Übereinstimmung mit den beobachteten Messwerten auf (Abbildung 3 bzw. Abbildung 4). Der Streubereich der Ensemblemitglieder der probabilistischen Abflussprognose beginnt sich erst nach ca. 12 h langsam aufzubauen. Dies ist durch den Einfluss des gestuften Modellansatzes zu erklären, da dieser für Prognosefristen bis zu einigen Stunden hauptsächlich auf beobachtete Abfluss- und Niederschlagsdaten zurückgreift. Hinzu kommt, dass für die ersten sechs Stunden weder in der deterministischen noch in der probabilistischen Niederschlagsvorhersage nennenswerte Regenmengen prognostiziert werden. Dadurch wird der Bereich ohne nennenswerte Ensemblestreuung am Beginn der Prognose bis zu einer Prognosefrist von 12 Stunden verlängert.

Während sich der Streubereich des Niederschlagsensembles bereits ab der 6. Stunde der Prognosefrist langsam aufbaut, ist eine deutliche Aufweitung der Ensemblestreuung der Abflussprognosen erst ab einer Prognosefrist von ca. 30 Stunden erkennbar. Dieses Verhalten ist damit zu erklären, dass die Unterschiede in den Niederschlagsprognosen bis zu einer Prognosefrist von 24 h vor allem zu unterschiedlichen Feuchtezuständen im Gebiet führen. Die intensiveren Regenfälle ab einer Prognosefrist von 24 h führen dann, verstärkt durch die Wirkung der unterschiedlichen Feuchtezustände der einzelnen Ensembleberechnungen, zu einer raschen Zunahme des Streubereichs des Abflussensembles. Die extreme Streuung der Ensemble-Mitglieder für das letzte Drittel der Prognosefrist wird durch die Nicht-Linearität des Niederschlag-Abflussmodells hervorgerufen. Während sich der Großteil der Ensemblemitglieder im näheren Bereich der deterministischen Durchflussprognose bewegt, zeigen einige Realisationen die Möglichkeit eines steileren Anstiegs mit Höchstwerten über 100 m³/s an. Die beobachtete Abflussganglinie befindet sich nahezu während des gesamten Wellenanstiegs innerhalb des ausgewiesenen Vertrauensbereichs.

Die Vorhersagen in den Abbildungen 5 und 6 beginnen 24 Stunden nach jenen der Abbildungen 3 und 4, am 10. Juli 2005 um 0 Uhr unmittelbar vor dem ersten Anstieg der Hochwasserwelle. Die deterministische Vorhersage und die Ensembleläufe der Niederschlagsprognose weisen während der ersten sechs Stunden der Prognosefrist eine gute Übereinstimmung mit den beobachteten Gebietsmittelwerten auf. Auch die Abflussprognosen geben den ersten, flachen Anstieg während der ersten Stunden der Vorhersage gut wieder. Die intensiven Regenfälle im Bereich der Prognosefrist von 12 Stunden werden allerdings weder von der deterministischen noch von der probabilistischen Niederschlagsvorhersage angezeigt. Die Abweichung vom beobachteten Niederschlagsverlauf wird durch die Abflussberechnung deutlich verstärkt. Während die prognostizierten Niederschlagssummen bis zu einer Prognosefrist von ca. 30 Stunden ungefähr die Hälfte der beobachteten Summe anzeigen, entspricht der prognostizierte Abfluss für diese Prognosefrist nur dem Viertel des

beobachteten Abflusses. Die Verstärkung der Prognosefehler hängt mit dem nicht-linearen hydrologischen Verhalten im Einzugsgebiet zusammen.

Mit der Vorhersage von intensiveren Niederschlägen ab einer Prognosefrist von 30 Stunden beginnt sich der Streubereich des Niederschlags- und Abflussensembles deutlich aufzuweiten, wobei die Ensemblestreuung der Abflussprognosen deutlich größer als jene der Niederschlagsvorhersagen ist. Nach einer Prognosefrist von 48 Stunden erstrecken sich die Ensemblemitglieder der Abflussprognose von 20 m³/s bis zu über 100 m³/s. Der Vertrauensbereich der Ensembleprognosen liegt zwar unterhalb der beobachteten Ganglinie, aber er gibt durch die deutliche Verbreiterung im letzten Drittel der Prognosefrist einen Hinweis auf die Unsicherheit der Abflussprognose und damit auch auf die Möglichkeit eines bevorstehenden Hochwassers.

In den Abbildungen 7 und 8 ist der Zeitpunkt der Prognoseerstellung am 16. August 2005 um 6 Uhr direkt im Anstieg der Hochwasserwelle. Zum Prognosezeitpunkt ist ungefähr die Hälfte des Ereignisniederschlags gefallen und die intensiven Regenfälle halten weiter an. Die Niederschlagsvorhersagen für die ersten Stunden der Prognosefrist stimmen auch in diesem Fall sehr gut mit den beobachteten Werten überein. Es zeigen sich hier bereits nach den ersten drei Stunden Unterschiede zwischen den einzelnen Mitgliedern der Ensembleprognosen. Die Verbreiterung des Streubereiches ist auch beim Ensemble der Abflussprognosen bereits nach 4 Stunden zu erkennen. Im Unterschied zu den vorangegangenen Beispielen (Abbildung 3 bis 6) befindet sich der Prognosezeitpunkt in diesem Fall im steilen Anstiegsbereich der Hochwasserwelle und es treten keine Anfangsverluste mehr auf, wodurch die Reaktionszeiten im Einzugsgebiet wesentlich verkürzt werden. Auch im weiteren Prognoseverlauf zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen beobachteten und prognostizierten Niederschlägen. Die Streuung des Niederschlagsensembles wächst bis zum Ende der prognostizierten Regenfälle, bei einer Prognosefrist von 24 Stunden, stetig an. Die gute Übereinstimmung zwischen Beobachtung und Prognose ist auch für die Abflussvorhersage gegeben. Die Verkleinerung des Streubereichs der probabilistischen Abflussvorhersage ab einer Prognosefrist von 30 Stunden lässt sich daraus erklären, dass ab einer Prognosefrist von 24 Stunden keine Niederschläge mehr prognostiziert sind und keine weitere Variabilität mehr eingetragen wird.

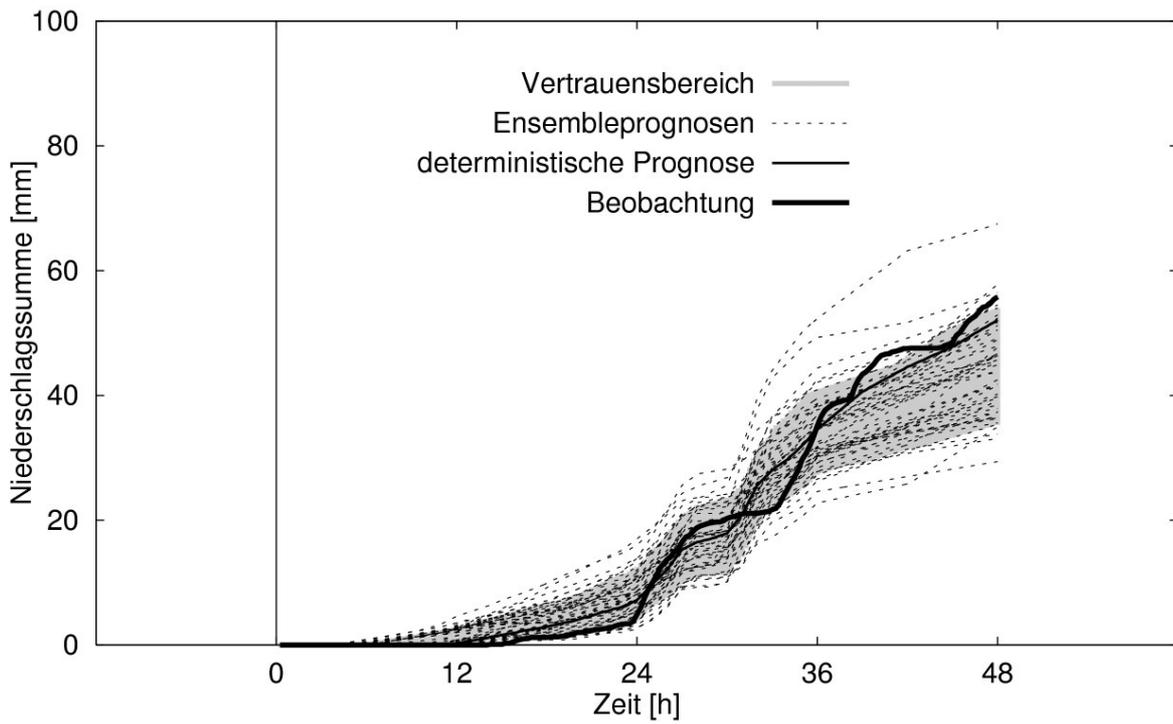


Abb. 3: Gebietsmittelwerte der Niederschlagssummen der deterministischen und probabilistischen 48h-Niederschlagsvorhersagen für den Pegel Zwettl/Kamp am 9. Juli 2005 um 0 Uhr.

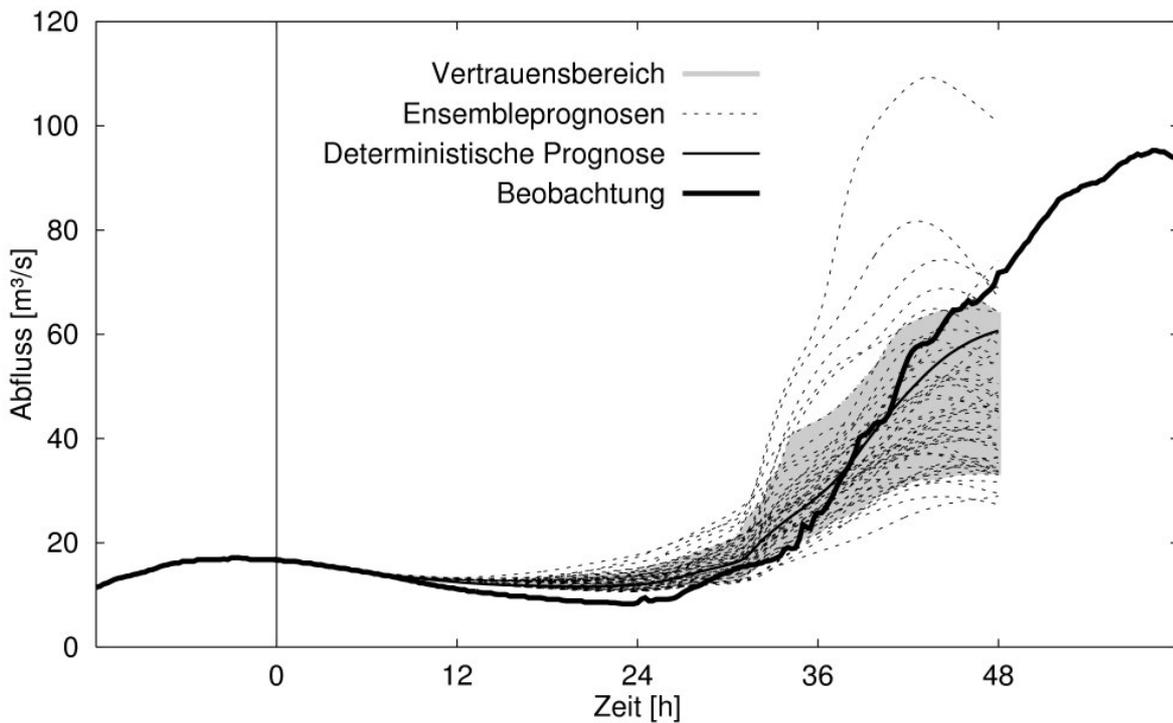


Abb. 4: Deterministische und probabilistische 48h-Abflussvorhersagen für den Pegel Zwettl/Kamp am 9. Juli 2005 um 0 Uhr.

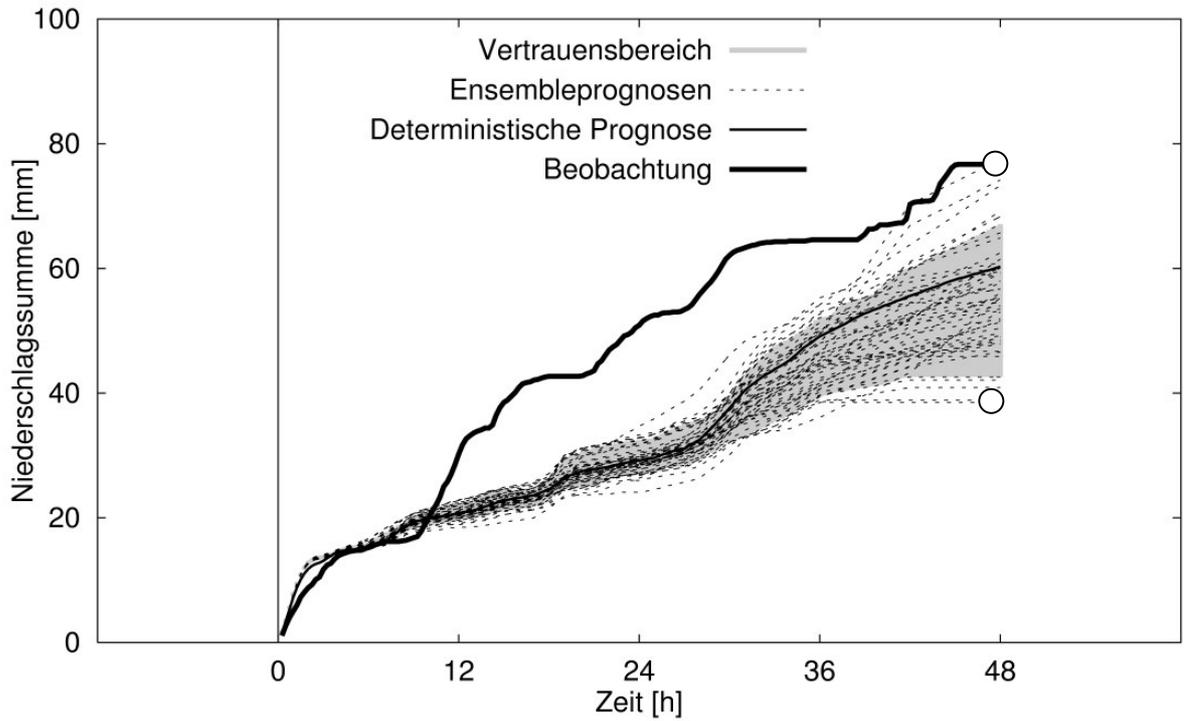


Abb. 5: Gebietsmittelwerte der Niederschlagssummen der deterministischen und probabilistischen 48h-Niederschlagsvorhersagen für den Pegel Zwettl/Kamp am 10. Juli 2005 um 0 Uhr. Die Kreise markieren das maximale bzw. minimale Ensemblemitglied.

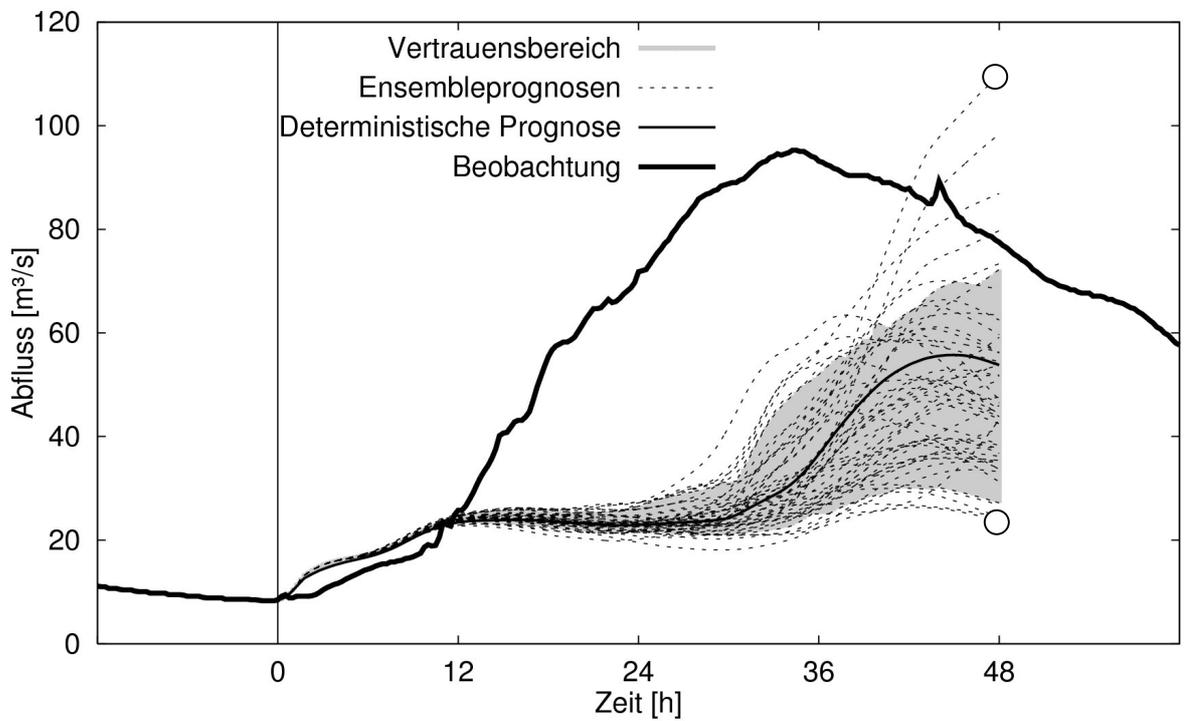


Abb. 6: Deterministische und probabilistische 48h-Abflussvorhersagen für den Pegel Zwettl/Kamp am 10. Juli 2005 um 0 Uhr. Die Kreise markieren das maximale bzw. minimale Ensemblemitglied.

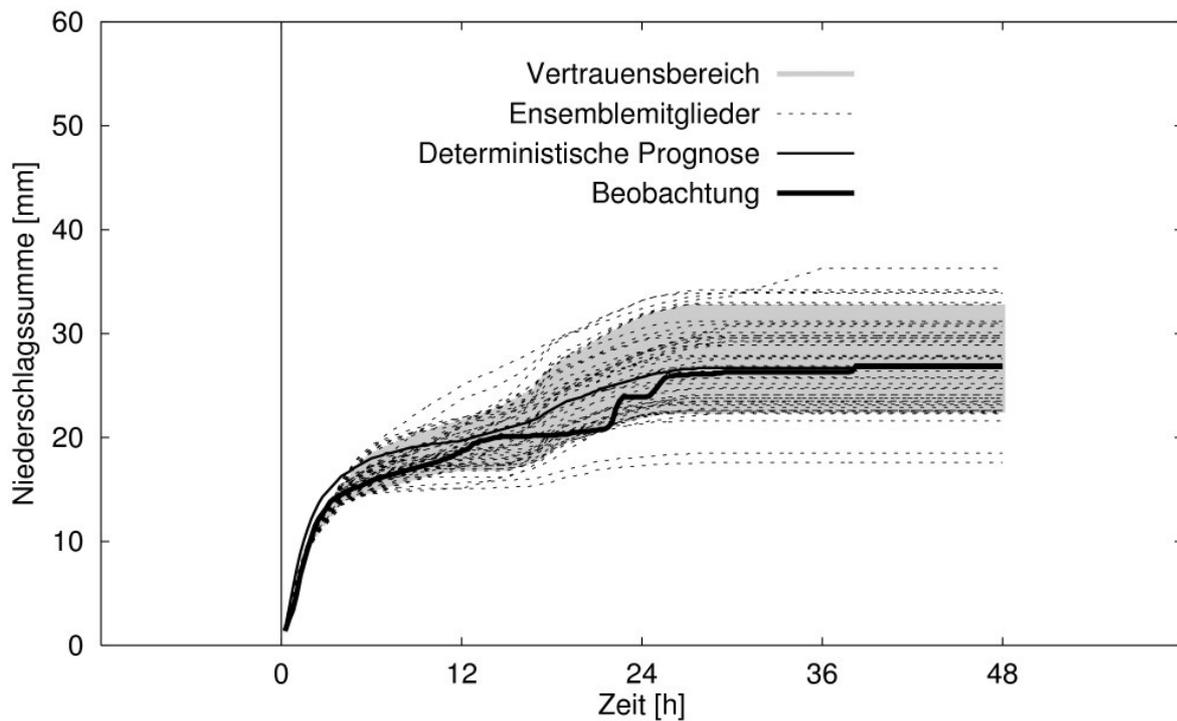


Abb. 7: Gebietsmittelwerte der Niederschlagssummen der deterministischen und probabilistischen 48h-Niederschlagsvorhersagen für den Pegel Zwettl/Kamp am 16. August 2005 um 6 Uhr.

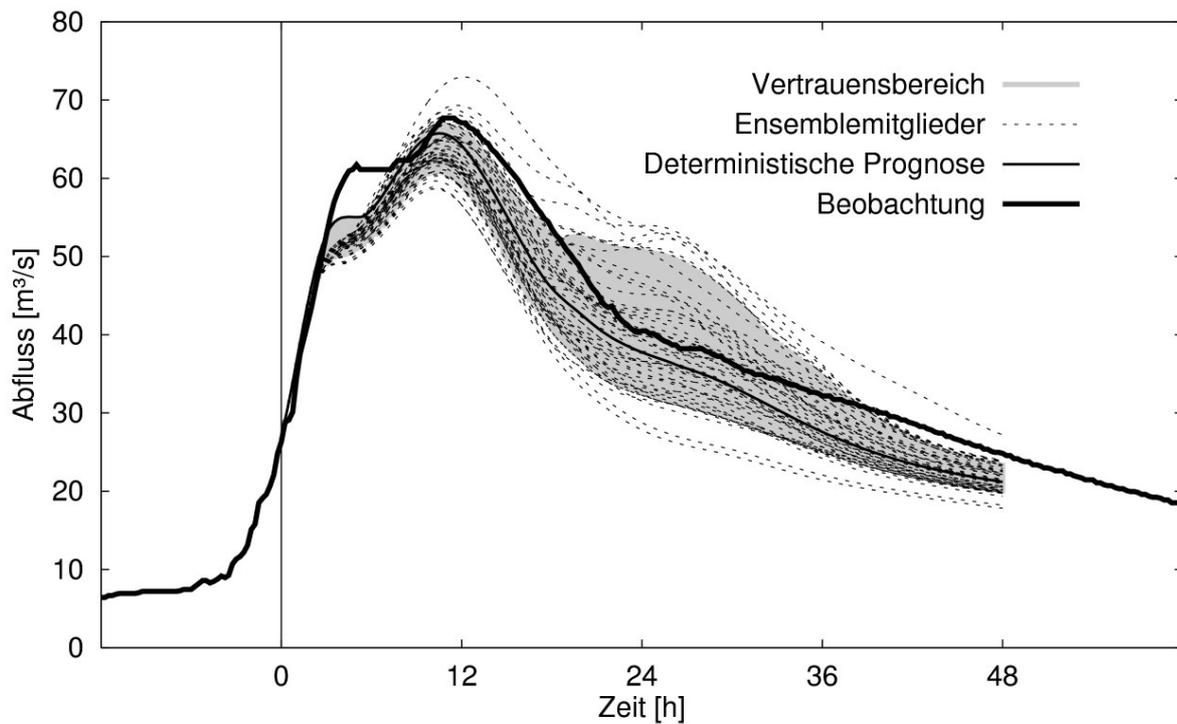


Abb. 8: Deterministische und probabilistische 48h-Abflussvorhersagen für den Pegel Zwettl/Kamp am 16. August 2005 um 6 Uhr.

Im Zusammenhang mit der Verstärkung von Unterschieden im Niederschlagsinput durch die Nicht-Linearität der Abflussprozesse stellt sich die Frage, welchen Einfluss die räumliche Variabilität der Niederschlagsfelder und der hydrologischen Eigenschaften im Einzugsgebiet auf diesen Effekt hat. Als Basis für die genauere Betrachtung der räumlichen Strukturen dienen die durch Kreise markierten Ensembleläufe der Niederschlagsvorhersagen in Abbildung 5 und der Durchflussprognosen in Abbildung 6. Die prognostizierte Gebietsniederschlagssumme für das Einzugsgebiet Zwettl/Kamp beträgt für den minimalen Ensemblelauf 40 mm und für den maximalen Lauf 80 mm (siehe Abbildung 5). Die maximale Streuung des Ensembles beträgt somit 40 mm/48h, was ungefähr dem doppelten Wert des Ensembleminimums entspricht. Wesentlich deutlicher ist der Unterschied zwischen dem Minimum und Maximum des Abflussensembles. Mit über 100 m³/s ist hier das höchste Abflussensemblesmitglied um den Faktor 5 größer als der Abfluss der minimalen Realisation von 20 m³/s. Für die genauere Analyse dieser Unterschiede werden in Abbildung 9 die räumlichen Verteilungen der 48 h-Niederschlagssummen und der resultierenden Abflussreaktionen im Gebiet nach einer Prognosefrist von 48 h für die oben beschriebenen Ensembleläufe dargestellt. Die gröbere Struktur der Niederschlagsfelder resultiert aus der geringeren räumlichen Auflösung (10 km Raster) des Niederschlagsensembles. Die Abflussberechnung mit dem Niederschlag-Abflussmodell erfolgt immer auf Basis des 1 km Rasters. Analysiert man die räumliche Verteilung der minimalen und maximalen Niederschlagsfelder so zeigt sich, dass über das gesamte Modellgebiet die Niederschlagssummen der größten Realisation mit Werten zwischen 45 und 90 mm deutlich über den Summen der minimalen Niederschlagsvorhersage mit Werten zwischen 15 und 75 mm liegen. Im Unterschied zum minimalen Ensemblelauf treten beim maximalen Lauf im westlichen Teil des Einzugsgebietes Bereiche mit sehr hohen Niederschlagssummen konzentriert auf. Die Abbildung der lokalen Abflüsse für den minimalen Ensemblelauf zeigt, dass sich die größten Abflussreaktionen in der Nähe von Zwettl einstellen. Hier befinden sich viele schnell reagierende Feuchtflächen und die versiegelten Flächen der Stadt Zwettl. Die übrigen Bereiche mit erhöhten Abflüssen sind hauptsächlich entlang von Gräben und Gewässerarmen zu finden. Die Unterschiede zwischen den minimalen und maximalen lokalen Abflüssen sind deutlich größer als die der maximalen und minimalen Niederschlagsfelder. So ergeben sich beispielsweise im Bereiche der Stadt Zwettl für das Ensembleminimum lokale Abflüsse von 0-0.07 mm/15min, für das maximale Ensemblemitglied hingegen 0.35-0.42 mm/15min. Die Zonen, die den Hauptanteil des Abflusses liefern, sind im Wesentlichen dieselben wie beim minimalen Ensemblelauf. Die Überlagerung der hohen Niederschlagssummen mit den abflusswirksamen Bereichen rund um Zwettl und entlang der Gräben im südlichen Teil des Gebietes führt zu den sehr heftigen Abflussreaktionen im Gebiet Zwettl/Kamp.

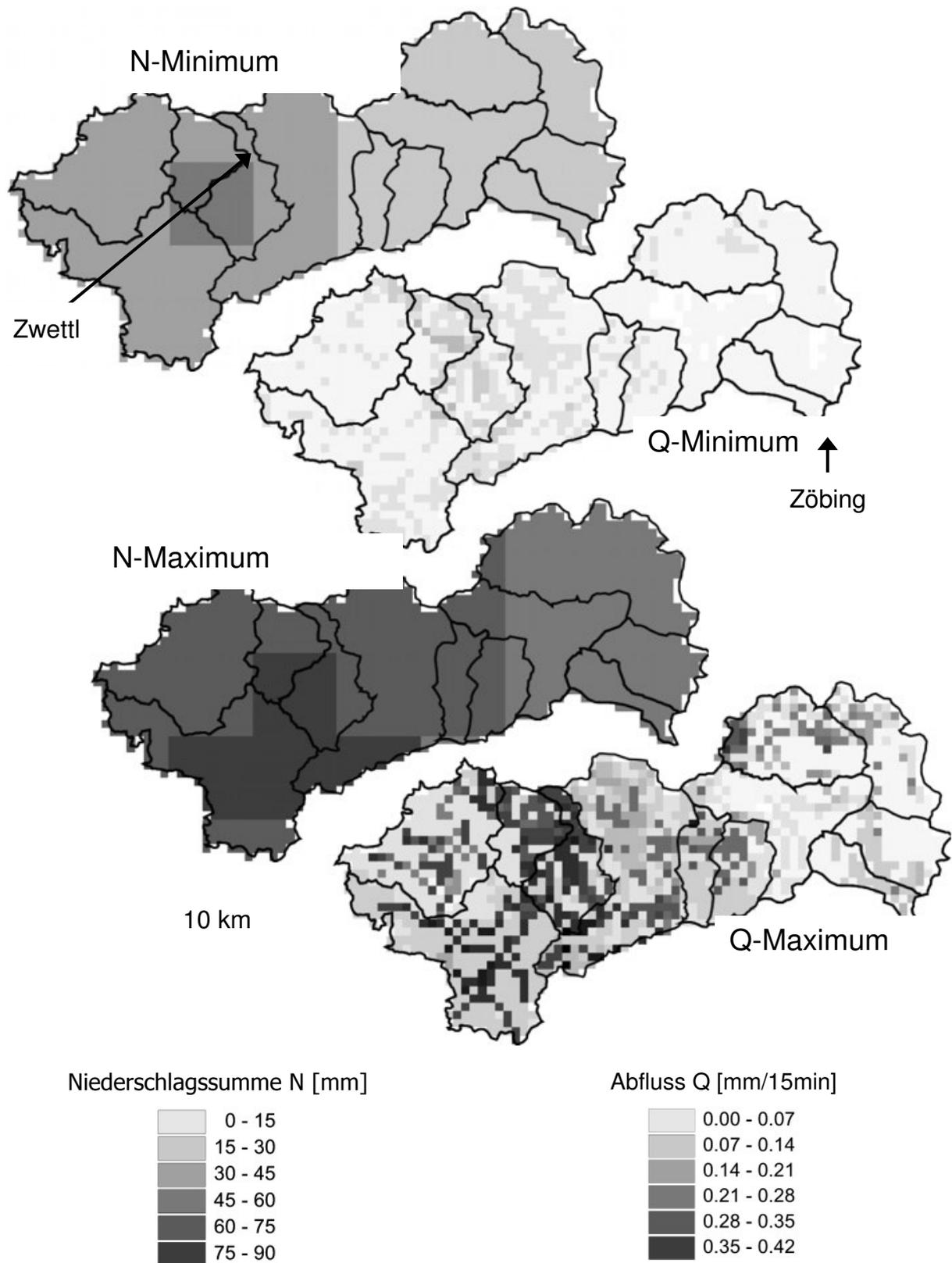


Abb. 9: Räumliche Muster für die Prognosen der 48h-Niederschlagssummen [mm] bzw. des örtlichen Gesamtabflusses [mm/15min] am Ende der Prognosefrist für den minimalen und maximalen Ensemblelauf der Vorhersage vom 10. Juli 2005 um 0 Uhr (siehe Kreise in den Abbildungen 5 und 6).

Dieses Beispiel verdeutlicht, dass, in Abhängigkeit von hydrologischen Anfangs- und Randbedingungen, verhältnismäßig geringe Unterschiede im Niederschlagsinput durch die nicht-lineare Modellstruktur und die Überlagerung hoher Niederschlagssummen mit hydrologisch abflusswirksam Bereichen im Einzugsgebiet sehr viel stärkere Auswirkungen auf die Durchflussprognosen haben können. Durch die Zusammenwirkung der räumlichen Verteilung der prognostizierten Niederschläge und der räumlichen Differenzierung der hydrologischen Eigenschaften im Einzugsgebiet kann das nicht-lineare Verhalten der Abflussreaktionen im Einzugsgebiet verstärkt werden. Durch die räumliche Überlagerung großer Niederschlagsintensitäten mit Bereichen hoher Abflusswirksamkeit kann es zu einer Resonanzwirkung und in weiterer Folge zu sehr hohen Abflüssen kommen. Die großen Unterschiede zwischen den Ensembleläufen geben einen Hinweis auf die zu erwartende Unschärfe der Abflussprognose.

5. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Unsicherheiten von Hochwasserprognosen über mehrere Tage sind hauptsächlich durch die Unsicherheiten im prognostizierten Niederschlag bestimmt. Zur Beschreibung dieser Prognoseunsicherheit können Ensembleprognosen für die Hochwasservorhersage verwendet werden. Für die Interpretation der Ensemblevorhersagen im Zusammenhang mit der Hochwasserwarnung kann das Konzept der ROC (Relative Operating Characteristic)-Kurven angewendet werden. Dabei wird die Warncharakteristik der verschiedenen Ensemble-Quantile durch die Häufigkeit von Fehlwarnungen und zutreffenden Warnungen beschrieben. Sind die Kosten einer Fehlwarnung kleiner als die Kosten einer versäumten Warnung, wie dies zumeist der Fall sein wird, dann sind die Gesamtkosten über einen längeren Zeitraum bei Wahl eines Quantils größer als 50% (z.B. 90%) geringer als bei der Wahl eines Quantils von 50% oder der deterministischen Prognose. Für die Hochwasserwarnung ist deshalb in erster Linie der obere Vertrauensbereich der Ensembleprognosen von Interesse. Am Beispiel der Hochwasserprognose Kamp wurde gezeigt, wie derartige Vertrauensbereiche ermittelt werden können und wie sich die Nichtlinearität des Abflusses in ihnen abbildet.

6. Literatur

Blöschl, G., Ch. Reszler und J. Komma (2006) Hochwasservorhersage für den Kamp. Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 199. Technische Universität Wien, Seiten 39-54.

Buizza, R. (1997) Potential forecast skill of ensemble prediction and spread skill distributions of the ECMWF ensemble prediction system, Monthly Weather Review, 125, 99-119.

Haiden, T., A. Kann, K. Stadlbacher, M. Steinheimer und C. Wittmann (2006) Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) - System overview. ZAMG report, 40p. http://www.zamg.ac.at/fix/INCA_system.doc

Mason, L. (1979) On reducing probability forecasts to yes/no forecasts. Monthly Weather Review, 107, 207-211.

Mason, S. und N. Graham (1999) Conditional probabilities, relative operating characteristics and relative operating levels, Weather and Forecasting, in press

Parajka J., R. Merz and G. Blöschl (2005) Regionale Wasserbilanzkomponenten für Österreich auf Tagesbasis. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 57, H 3/4, 43-56.

Reszler, Ch., J. Komma, G. Blöschl und D. Gutknecht (2006) Identifikation von Modellparametern in detaillierten Modellen. In: Hochwasservorhersage. Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 199. Technische Universität Wien, Seiten 259-278.

Anschrift der Verfasser:

Dipl.-Ing. Jürgen Komma
Dipl.-Ing. Christian Reszler
A.o.Univ.Prof. Dr. Günter Blöschl
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/222, A-1040 Wien
Email: komma@hydro.tuwien.ac.at

WIENER MITTEILUNGEN WASSER • ABWASSER • GEWÄSSER
--

Eine von den Wasserbauinstituten an der Technischen Universität Wien, den Instituten für Wasserwirtschaft der Universität für Bodenkultur und dem Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverband herausgegebene Schriftenreihe

Band Nr		Preis €
1	Das Wasser (1968) Kresser W.	vergriffen
2	Die Gesetzmäßigkeiten der stationären Flüssigkeitsströmung durch gleichförmig rotierende zylindrische Rohre (1968) Breiner, H.	vergriffen
3	Abwasserreinigung - Grundkurs (1969) von der Emde, W.	vergriffen
4	Abwasserreinigungsanlagen - Entwurf-Bau-Betrieb (1969) 4. ÖWWV-Seminar, Raach 1969	vergriffen
5	Zukunftsprobleme der Trinkwasserversorgung (1970) 5. ÖWWV-Seminar, Raach 1970	vergriffen
6	Industrieabwässer (1971) 6. ÖWWV-Seminar, Raach 1971	vergriffen
7	Wasser- und Abfallwirtschaft (1972) 7. ÖWWV-Seminar, Raach 1972	vergriffen
8	Das vollkommene Peilrohr (Zur Methodik der Grundwasserbeobachtung) (1972) Schmidt, F.	vergriffen
9	Über die Anwendung von radioaktiven Tracern in der Hydrologie (1972) Pruzinsky, W. Über die Auswertung von Abflußmengen auf elektronischen Rechenanlagen Doleisch, M.:	18,-
10	1. Hydrologie-Fortbildungskurs (1972)	vergriffen
11	Vergleichende Untersuchungen zur Berechnung von HW-Abflüssen aus kleinen Einzugsgebieten (1972) Gutknecht, D.	vergriffen
12	Uferfiltrat und Grundwasseranreicherung (1973) 8. ÖWWV-Seminar, Raach 1973	vergriffen

Band Nr		Preis €
13	Zellstoffabwässer-Anfall und Reinigung (1972) von der Emde W., Fleckseder H., Huber L., Viehl K.	vergriffen
14	Abfluß - Geschiebe (1973) 2. Hydrologie-Fortbildungskurs 1973	vergriffen
15	Neue Entwicklung in der Abwassertechnik (1983) 9. ÖWWV-Seminar, Raach 1974	vergriffen
16	Praktikum der Kläranlagentechnik (1974) von der Emde W.	vergriffen
17	Stabilitätsuntersuchung von Abflußprofilen mittels hydraulischer Methoden und Trendanalyse (1974) Behr, O.:	18,-
18	Hydrologische Grundlagen zur Speicherbemessung(1975) 3. Hydrologie-Fortbildungskurs 1975	vergriffen
19	Vorhersagen in der Wasserwirtschaft (1976) 1. Hydrologisches Seminar des ÖWWV 1976	10,-
20	Abfall- und Schlammbehandlung aus wasserwirtschaftlicher Sicht (1976) 11. ÖWWV-Seminar, Raach 1976	vergriffen
21	Zur Theorie und Praxis der Speicherwirtschaft (1977) 2. Hydrologisches Seminar des ÖWWV 1977	22,-
22	Abwasserreinigung in kleineren Verhältnissen (1977) 12. ÖWWV-Seminar, Raach 1977	vergriffen
23	Methoden zur rechnerischen Behandlung von Grundwasserleitern (1977) Baron W., Heindl W., Behr O., Reitinger J.	vergriffen
24	Ein Beitrag zur Reinigung des Abwassers eines Chemiefaserwerkes, eines chemischen Betriebes und einer Molkerei (1978) Begert A.	vergriffen
25	Ein Beitrag zur Reinigung von Zuckerfabrikabwasser (1978) Kroiss H.	vergriffen
26	Methoden der hydrologischen Kurzfristvorhersage (1978) Gutknecht D.	vergriffen
27	Wasserversorgung-Gewässerschutz (1978) 13. ÖWWV-Seminar, Raach 1978	vergriffen
28	Industrieabwasserbehandlung - Neue Entwicklungen (1979) 14. ÖWWV-Seminar, Raach 1979	vergriffen
29	Probleme der Uferfiltration und Grundwasseranreicherung mit besonderer Berücksichtigung des Wiener Raumes (1979) Frischherz H.	vergriffen
30	Beiträge zur Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft (1979) o. Univ.-Prof. DDr. Werner Kresser zum 60. Geburtstag	vergriffen

Band Nr		Preis €
31	Grundwasserzuströmungsverhältnisse zu Horizontalfilterrohrbrunnen (1980) Schügerl W.	vergriffen
32	Grundwasserwirtschaft (1980) 3. Hydrologisches Seminar des ÖWWV 1980	25,-
33	Kulturtechnik und Wasserwirtschaft heute (1) (1980)	vergriffen
34	Behandlung und Beseitigung kommunaler und industrieller Schlämme (1980) 15. ÖWWV-Seminar, Raach 1980	vergriffen
35	Faktoren, die die Inaktivierung von Viren beim Belebungsverfahren beeinflussen (1980) Usrael G.	vergriffen
36	Vergleichende Kostenuntersuchungen über das Belebungsverfahren (1980) Flögl W.	vergriffen
37	Ein Beitrag zur Reinigung und Geruchsfreimachung von Abwasser aus Tierkörperverwertungsanstalten (1980) Ruider E.	vergriffen
38	Wasserwirtschaftliche Probleme der Elektrizitätserzeugung (1981) Schiller, G.:	vergriffen
39	Kulturtechnik und Wasserwirtschaft heute (1981) Teil 2	vergriffen
40	Wasseraufbereitung und Abwasserreinigung als zusammengehörige Techniken (1981) 16. ÖWWV-Seminar, Raach 1981	vergriffen
41	Filterbrunnen zur Erschließung von Grundwasser (1981) ÖWWV-Fortbildungskurs 1981	29,-
42	Zur Ermittlung von Bemessungshochwässern im Wasserbau (1981) Kirnbauer R.	22,-
43	Wissenschaftliche Arbeiten, Zeitraum 1977 bis 1981 (1981)	25,-
44	Kulturtechnik und Wasserwirtschaft - heute (1981) Teil 3	25,-
45	Verbundwirtschaft in der Wasserversorgung (1982) ÖWWV-Fortbildungskurs 1982	29,-
46	Gewässerschutzplanung, deren Umsetzung und Zielkontrolle im Einzugsgebiet des Neusiedler Sees (1982) Stalzer W.	vergriffen
47	Wechselwirkung zwischen Planung und Betrieb von Abwasserreinigungsanlagen, Erfahrungen und Probleme (1982) 17. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1982	vergriffen

Band Nr		Preis €
48	Kleinwasserkraftwerke - Notwendigkeit und Bedeutung (1982) Flußstudien: Schwarza, kleine Ybbs, Saalach	vergriffen
49	Beiträge zur Wasserversorgung, Abwasserreinigung, Gewässerschutz und Abfallwirtschaft (1982) o. Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. v.d. Emde zum 60. Geburtstag	vergriffen
50	Kulturtechnik und Wasserwirtschaft - heute (1982) Teil 4	vergriffen
51	Sicherung der Wasserversorgung in der Zukunft (1983) 18. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1983	vergriffen
52	Thermische Beeinflussung des Grundwassers (1983) ÖWWV-Fortbildungskurs, 1983	vergriffen
53	Planung und Betrieb von Regentlastungsanlagen (1984) ÖWWV-Fortbildungskurs, 1984	vergriffen
54	Sonderabfall und Gewässerschutz (1984) 19. ÖWWV-Seminar, Gmunden 1984	vergriffen
55	Naturnahes Regulierungskonzept "Pram" (1984)	26,-
56	Blähschlamm beim Belebungsverfahren (1985) ÖWWV-Fortbildungskurs, 1985	vergriffen
57	Chemie in der Wassergütewirtschaft (1985) ÖWWV-Fortbildungskurs, 1985	vergriffen
58	Klärschlamm - Verwertung und Ablagerung (1985) 20. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1985	vergriffen
59	Wasserkraftnutzung an der Thaya (1985) Pelikan B.	23,-
60	Seminar "Wasser - Umwelt - Raumordnung" (1985)	16,-
61	Gewässerschutz im Wandel der Zeit Ziele und Maßnahmen zu ihrer Verwirklichung (1985) Fleckseder, H.	vergriffen
62	Anaerobe Abwasserreinigung (1985) Kroiss H.	vergriffen
63	Kleine Belebungsanlagen mit einem Anschlußwert bis 500 Einwohnergleichwerte (1985) Begert A.	vergriffen
64	Belüftungssysteme beim Belebungsverfahren (1986) ÖWWV-Fortbildungskurs, 1986	vergriffen
65	Planung und Betrieb von Behandlungsanlagen für Industrie- abwässer (1986) 21. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1986	vergriffen
66	Ausspracheseminar Grundwasserschutz in Österreich (1986) ÖWWV-Fortbildungskurs, 1986	29,-

Band Nr		Preis €
67	Kulturtechnik und Wasserwirtschaft heute (5) (1986)	vergriffen
68	Zur mathematischen Modellierung der Abfluestehung an Hängen (1986) Schmid B.H.	22,-
69	Nitrifikation - Denitrifikation (1987) ÖWWV-Fortbildungskurs, 1987	vergriffen
70	Flußbau und Fischerei (1987)	vergriffen
71	Wasserversorgung und Abwasserreinigung in kleinen Verhältnissen (1987) 22. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1987	vergriffen
72	Wasserwirtschaft und Lebensschutz (1987) Wurzer E.	vergriffen
73	Anaerobe Abwasserreinigung Grundlagen und großtechnische Erfahrung (1988) ÖWWV-Fortbildungskurs, 1988	vergriffen
74	Wasserbau und Wasserwirtschaft im Alpenraum aus historischer Sicht (1988)	22,-
75	Wechselbeziehungen zwischen Land-, Forst und Wasserwirtschaft (1988) ÖWWV-Fortbildungskurs, 1988	vergriffen
76	Gefährdung des Grundwassers durch Altlasten (1988) 23. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1988	vergriffen
77	Kulturtechnik und Wasserwirtschaft heute (6) (1987)	vergriffen
78	Wasserwirtschaftliche Planung bei mehrfacher Zielsetzung (1988) Nachtnebel, H.P.	25,-
79	Hydraulik offener Gerinne (1989) Symposium, 1989	vergriffen
80	Untersuchung der Fischaufstiegshilfe bei der Stauhaltung im Gießgang Greifenstein (1988) Jungwirth M., Schmutz S.	vergriffen
81	Biologische Abwasserreinigung (1989) ÖWWV-Fortbildungskurs, 1989, TU-Wien	vergriffen
82	Klärschlammentsorgung (1989) 24. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1989	vergriffen
83	Viruskontamination der Umwelt und Verfahren der Kontrolle (1990) 2. Symposium	18,-
84	Schadstofffragen in der Wasserwirtschaft (1989) ÖWWV-Fortbildungskurs 1989, TU-Wien	29,-

Band Nr		Preis €
85	Schlußbericht zum Forschungsvorhaben Trinkwasseraufbereitung mit Ultraschall, Projekt Abschnitt I (1989) Frischherz H.; Benes E.; Ernst J.; Haber F.; Stuckart W.	18,-
86	Umfassende Betrachtung der Erosions- und Sedimentationsproblematik (1989) Summer W.	25,-
87	Großräumige Lösungen in der Wasserversorgung (1990) 25. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1990	vergriffen
88	Revitalisierung von Fließgewässern (1990) Beiträge zum Workshop Scharfling, 1989	vergriffen
89	Kulturtechnik und Wasserwirtschaft heute (1990) Teil 9	vergriffen
90	A Study on Kinematic Cascades (1990) Schmid B.H.	18,-
91	Snowmelt Simulation in Rugged Terrain - The Gap Between Point and Catchment Scale Approaches (1990) Blöschl G.	18,-
92	Dateninterpretation und ihre Bedeutung für Grundwasserströmungsmodelle (1990) Blaschke A.P.	nicht erschienen
93	Decision Support Systeme für die Grundwasserwirtschaft unter Verwendung geografischer Informationssysteme (1990) Fürst J.	18,-
94	Schlußbericht zum Forschungsvorhaben Trinkwasseraufbereitung mit Ultraschall; Projekt-Abschnitt 1990 (1990) Frischherz H., Benes E., Stuckhart W., Ilmer A., Gröschl M., Bolek W.	18,-
95	Anaerobe Abwasserreinigung - Ein Modell zur Berechnung und Darstellung der maßgebenden chemischen Parameter (1991) Svardal K.	22,-
96	EDV-Einsatz auf Abwasserreinigungsanlagen (1991) ÖWWV-Fortbildungskurs 1991, TU-Wien	29,-
97	Entfernung von Phosphorverbindungen bei der Abwasserreinigung (1991) ÖWWV-Fortbildungskurs 1991, TU-Wien	25,-
98	Auswirkungen der Wasserrechtsgesetzesnovelle 1990 auf Behörden, Planer und Betreiber kommunaler Abwasserreinigungsanlagen - aus technischer, rechtlicher und wirtschaftlicher Sicht (1991) 26. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1991	36,-
99	Geruchsemissionen aus Abwasserreinigungsanlagen (1991) ÖWWV-Fortbildungskurs 1991,	22,-
100	Anpassung von Kläranlagen an den Stand der Technik (1992) ÖWWV-Fortbildungskurs 1992, TU-Wien	vergriffen

Band Nr		Preis €
101	Umweltbezogene Planung wasserbaulicher Maßnahmen an Fließgewässern (1992) Pelikan B.	18,-
102	Erfassung hydrometeorologischer Elemente in Österreich im Hinblick auf den Wasserhaushalt (1992) Behr O.	i.V.
103	Wasser- und Abfallwirtschaft in dünn besiedelten Gebieten (1992) 27. ÖWWV-Seminar Ottenstein 1992	36,-
104	Virus Contamination of the Environment (1992) Methods and Control	vergriffen
105	Fließgewässer und ihre Ökologie (1993) ÖWAV-Fortbildungskurs 1992, TU-Wien	22,-
106	Festlegung einer Dotierwassermenge über Dotationsversuche (1992) Mader H.	22,-
107	Wasserrechtsgesetznovelle 1990 und neue Emissionsverordnungen (1992) Vorträge anlässlich der UTEC 1992	29,-
108	Chemische Analytik für einen zeitgemäßen Gewässerschutz (1992) Vorträge anlässlich der UTEC 1992	29,-
109	Kulturtechnik und Wasserwirtschaft heute (1994) Teil 10 - Beiträge zum Seminar an der Universität für Bodenkultur im November 1994	i.V.
110	Bemessung u. Betrieb von Kläranlagen zur Stickstoffentfernung (1993) ÖWAV-Seminar 1993, TU-Wien	36,-
111	Wasserreserven in Österreich - Schutz und Nutzung in Gegenwart und Zukunft (1993) 28. ÖWAV-Seminar Ottenstein 1993	vergriffen
112	Contamination of the Environment by Viruses and Methods of Control (1993)	18,-
113	Wasserkraft O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. S. Radler anlässlich seiner Emeritierung	vergriffen
114	Klärwärter-Grundkurs (1994) 2. Auflage 1994	vergriffen
115	Beitrag zur Reduzierung der Abwasseremissionen der Bleicherei beim Sulfatverfahren (1994) Urban W. ISBN 3-85234-001-2	22,-
116	Eigenüberwachung von Abwasserreinigungsanlagen für den Gewässerschutz (1994) ÖWAV-Seminar 1994, TU-Wien ISBN 3-85234-002-0	25,-

Band Nr		Preis €
117	Abwasserreinigungskonzepte - Internationaler Erfahrungsaustausch über neue Entwicklungen (1995) ÖWAV-Seminar 1994, TU Wien ISBN 3-85234-003-9	25,-
118	3 Jahre WRG-Novelle (1994) 29. ÖWAV-Seminar: Ottenstein 1994 ISBN 3-85234-004-7	19,-
119	Landeskulturelle Wasserwirtschaft (1994) anlässlich der Emeritierung von o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. H. Supersperg	vergriffen
120	Gewässerbetreuungskonzepte - Stand und Perspektiven (1994) Beiträge zur Tagung an der BOKU 1994 ISBN 3-85234-010-1	32,-
121	Generelle Entwässerungsplanung im Siedlungsraum (1996) ÖWAV-Seminar 1995, TU Wien ISBN 3-85234-011-X	29,-
122	Bedeutung von geowissenschaftlicher Zusatzinformation für die Schätzung der Transmissivitätsverteilung in einem Aquifer (1994) Kupfersberger H.	18,-
123	Modellierung und Regionalisierung der Grundwassermengenbildung und des Bodenwasserhaushaltes (1994) Holzmann, H.	22,-
124	Pflanzenkläranlagen - Stand der Technik, Zukunftsaspekte (1995) ÖWAV-Seminar, BOKU Wien ISBN 3-85234-014-4	22,-
125	Abwasserreinigung - Probleme bei der praktischen Umsetzung des Wasserrechtsgesetzes, (1995) ÖWAV-Seminar 1995, TU-Wien ISBN 3-85234-015-2	32,-
126	Konfliktfeld Landwirtschaft - Wasserwirtschaft (1995) 30. ÖWAV-Seminar, Ottenstein 1995 ISBN 3-85234-016-0	29,-
127	Alte und neue Summenparameter (1995) ÖWAV-Seminar 1995, TU-Wien ISBN 3-85234-017-9	29,-
128	Viruskontamination der Umwelt und Verfahren der Kontrolle (deutsch oder englisch) (1995) 4. Symposium Univ.Prof.Dr. R. Walter ISBN 3-85234-019-5	0,-
129	Einfluß von Indirekteinleitungen auf Planung und Betrieb von Abwasseranlagen (1996) ÖWAV-Seminar 1996, TU-Wien ISBN 3-85234-020-9	vergriffen

Band Nr		Preis €
130	Zentrale und dezentrale Abwasserreinigung (1996) 31. ÖWAV-Seminar, Ottenstein 1996 ISBN 3-85234-021-7	36,-
131	Methoden der Planung und Berechnung des Kanalisationssystems (1996) ÖWAV-Seminar 1996, BOKU-Wien ISBN 3-85234-022-5	29,-
132	Scale and Scaling in Hydrology (1996) Blöschl G. ISBN 3-85234-023-3	vergriffen
133	Kulturtechnik und Wasserwirtschaft heute (11) (1996) Integrale Interpretation eines zeitgemäßen Gewässerschutzes ISBN 3-85234-024-0	12,-
134	Ein Beitrag zur Charakterisierung von Belüftungssystemen für die biologische Abwasserreinigung nach dem Belebungsverfahren mit Sauerstoffzufuhrmessungen (1996) Frey W. ISBN 3-85234-025-X	22,-
135	Nitrifikation im Belebungsverfahren bei maßgebendem Industrieabwassereinfluß (1996) Nowak O. ISBN 3-85234-026-8	36,-
136	1. Wassertechnisches Seminar (1996) Nebenprodukte von Desinfektion und Oxidation bei der Trinkwasseraufbereitung ISBN 3-85234-027-6	i.V.
137	Modellanwendung bei Planung und Betrieb von Belebungsanlagen (1997) ÖWAV - Seminar 1997, TU-Wien ISBN 3-85234-028-4	32,-
138	Nitrifikationshemmung bei kommunaler Abwasserreinigung (1997) Schweighofer P. ISBN 3-85234-029-2	25,-
139	Ein Beitrag zu Verständnis und Anwendung aerober Selektoren für die Blähschlammvermeidung (1997) Prendl L. ISBN 3-85234-030-6	22,-
140	Auswirkungen eines Kläranlagenablaufes auf abflußschwache Vorfluter am Beispiel der Kläranlage Mödling und des Krottenbaches (1997) Franz A. ISBN 3-85234-031-4	25,-
141	Neue Entwicklungen in der Abwassertechnik (1997) ÖWAV - Seminar 1997, TU-Wien ISBN 3-85234-032-2	36,-

Band Nr		Preis €
142	Kulturtechnik und Wasserwirtschaft heute (11) (1997) Abfallwirtschaft und Altlastensanierung morgen ISBN 3-85234-033-0	18,-
143	Abwasserbeseitigung und Wasserversorgung in Wien (1997) Eine ökonomische Beurteilung der Einnahmen, Ausgaben und Kosten Kosz M. ISBN 3-85234-034-9	22,-
144	Raum-Zeitliche Variabilitäten im Geschiebehaushalt und dessen Beeinflussung am Beispiel der Drau (1997) Habersack H. ISBN 3-85234-035-7	29,-
145	Fortbildungskurs: Biologische Abwasserreinigung (1998) ÖWAV - Seminar 1998, TU-Wien ISBN 3-85234-036-5	vergriffen
146	2. Wassertechnisches Seminar (1998) Desinfektion in der Trinkwasseraufbereitung ISBN 3-85234-037-3	i.V.
147	Eigenüberwachung und Fremdüberwachung bei Kläranlagen (1998) 32. ÖWAV-Seminar , Linz 1998 ISBN 3-85234-038-1	36,-
148	Grundwasserdynamik (1998) ISBN 3-85234-039-C	36,-
149	Die Tradition in der Kulturtechnik (1998) Kastanek F. Simulationsanwendung bei der Störung durch poröses Medium (1998) Loiskandl W. ISBN 3-85234-040-4	22,-
150	Auswirkungen von Niederschlagsereignissen und der Schneeschmelze auf Karstquellen (1998) Steinkellner M. ISBN 3-85234-041-1	36,-
151	Experiences with soil erosion models (1998) ISBN 3-85234-042-X	29,-
152	Ein Beitrag zur Optimierung der Stickstoffentfernung in zweistufigen Belebungsanlagen (1998) Dornhofer K. ISBN 3-85234-043-8	25,-
153	Hormonell aktive Substanzen in der Umwelt (1998) ÖWAV / UBA Seminar 1998, BOKU Wien ISBN 3-58234-044-6	vergriffen
154	Erfassung, Bewertung und Sanierung von Kanalisationen (1998) ÖWAV Seminar 1999, BOKU Wien ISBN 3-8523-045-4	29,-

Band Nr		Preis €
155	Nährstoffbewirtschaftung und Wassergüte im Donauraum (1999) ÖWAV - Seminar 1999, TU-Wien ISBN 3-85234-046-2	32,-
156	Der spektrale Absorptionskoeffizient zur Bestimmung der organischen Abwasserbelastung (1999) UV-Seminar 1998, Duisburg ISBN 3-85234-047-0	22,-
157	Bedeutung und Steuerung von Nährstoff- und Schwermetallflüssen des Abwassers (1999) Zessner M. ISBN 3-85234-048-9	25,-
158	Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Stoffbilanzen in der Abfallwirtschaft (1999) Rechberger H. ISBN 3-85234-049-7	vergriffen
159	Sicherheit und Gesundheitsschutz auf Abwasseranlagen und deren Evaluierung (2000) ÖWAV – Seminar 2000, TU-Wien ISBN 3-85234-050-0	22,-
160	Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Hydrologie alpiner Einzugsgebiete (2000) Hebenstreit K. ISBN 3-85234-051-9	25,-
161	Innovative Messtechnik in der Wasserwirtschaft (2000) Präsentation eines Forschungsprojektes ÖWAV – Seminar 2000, BOKU – Wien ISBN 3-85234-052-7	vergriffen
162	Sickerwasser und Oberflächenabdichtung auf Reaktordeponien (2000) ÖWAV - Seminar 2000, Wirtschaftskammer Wien ISBN 3-85234-053-5	25,-
163	Abfall- und Abwasserentsorgung in kleinen Verhältnissen (2000) ÖWAV - Seminar 2000, Ottenstein ISBN 3-85234-054-3	25,-
164	Niederschlag-Abfluss-Modellierung – Simulation und Prognose (2000) ÖWAV-Seminar 2000, TU Wien ISBN 3-85234-055-1	30,-
165	Mehrdimensionale Abflussmodellierung am Beispiel der Lafnitz (2000) Habersack, H. / Mayr, P. / Grlinger, R. / Schneglbeger, St. ISBN 3-85234-056-x	25,-
166	Anpassung von Kläranlagen – Planung und Betrieb (2001) ÖWAV-Seminar 2001, TU Wien ISBN 3-85234-057-8	40,-

Band Nr	Preis €
167 Bepflanzte Bodenfilter zur weitergehenden Reinigung von Oberflächenwasser und Kläranlagenabläufen (2001) Laber J. ISBN 3-85234-058-6	25,-
168 Kanalbetrieb und Niederschlagsbehandlung (2001) ÖWAV-Seminar 2001, BOKU Wien. ISBN 3-85234-059-4	29,-
169 Development of a Simulation Tool for Subsurface Flow Constructed Wetlands (Entwicklung eines Simulationsmodells für bepflanzte Bodenfilter) (2001) Langergraber G. ISBN 3-85234-060-8	25,-
170 Simulation von Niederschlagszeitreihen mittels stochastischer Prozessmodelle unter Berücksichtigung der Skaleninvarianz (2001) Bogner ISBN 3-85234-061-6	25,-
171 Sewage Sludge Disposal – Sustainable and/or Reliable Solutions (2001) ÖWAV / EWA Workshop 2001, TU-Wien ISBN 3-85234-062-4	25,-
172 Stickstoffentfernung mit Biofiltern (2002) Nikolavcic B. ISBN 3-85234-063-2	30,-
173 Anaerobe Abwasserreinigung: Beeinflussende Faktoren der Versäuerung eines Zitronensäurefabrikabwassers (2002) Moser D. ISBN 3-85234-064-0	20,-
174 Gewässerschutz bei Entlastungsbauwerken der Mischkanalisation (2002) Fenz R. ISBN 3-85234-065-9	25,-
175 Wechselwirkung von physikalischen, chemischen und biotischen Prozessen in aquatischen Systemen (2002) Kreuzinger N. ISBN 3-85234-066-7	i.V.
176 Benchmarking in der Abwasserentsorgung (2002) ÖWAV Workshop Februar 2002, TU-Wien ISBN 3-85234-067-5	30,-
177 Klärschlamm (2002) Möglichkeiten und Verfahren zur Verwertung / Entsorgung ab 2004 ÖWAV Seminar April 2002, Wirtschaftskammer Österreich Schlammbehandlung und Entsorgung ÖWAV / TU – Workshop September 2000, TU-Wien ISBN 3-85234-068-3	30,-
178 Arzneimittel in der aquatischen Umwelt (2002) ÖWAV-Seminar 2002, BOKU Wien ISBN 3-58234-069-1	30,-

Band Nr		Preis €
179	Untersuchungen zur Entfernung natürlicher radioaktiver Stoffe aus Trinkwasser und Überblick zu deren Verbreitung in Österreich (2002) Staubmann K. ISBN 3-85234-070-5	25,-
180	Zum Fließwiderstandsverhalten flexibler Vegetation (2002) Stephan U. ISBN 3-85234-071-3	30,-
181	Understanding and estimating floods at the regional scale (2002) Merz, R. ISBN 3-85234-072-1	30,-
182	Kanalmanagement – Neues Schlagwort oder alte Herausforderung? (2003) ÖWAV-Seminar 2003, BOKU Wien ISBN 3-85234-073-X	30,-
183	Fortbildungsseminar Abwasserentsorgung (2003) ÖWAV-Seminar Februar 2003, TU Wien ISBN 3-85234-074-8	40,-
184	Klärschlamm (2003) ÖWAV-Seminar November 2003, TU Wien ISBN 3-85234-075-6	30,-
185	Nachhaltige Nutzung von Wasser (2003) Endbericht zum Modul MU11 im Rahmen des Forschungsschwerpunktes "Nachhaltige Entwicklung österreichischer Kulturlandschaften " ISBN 3-85234-076-4	30,-
186	Inspektion von Kanalisationen (inkl. Umsetzung ÖNORM EN 13508-2) ÖWAV-Informationsveranstaltung 2004, BOKU Wien ISBN 3-85324-077-2	25,-
187	Datengewinnung, -verwaltung und –nutzung in der Wassergütwirtschaft (2004) ÖWAV-Seminar März 2004, TU Wien ISBN 3-85234-078-0	40,-
188	CSB Elimination in höchstbelasteten Belebungsstufen und ihre Auswirkung auf die Stickstoffelimination von zweistufigen Anlagen unter dem Gesichtspunkt der mathematischen Modellierung (2004) Haider, S. ISBN 3-85234-079-9	30,-
189	Beitrag zum Benchmarking von Abwasserreinigungsanlagen Lindtner, S. ISBN 3-85234-080-2	25,-
190	Öffentlichkeitsarbeit auf Kläranlagen ÖWAV-Seminar Juni 2004, St. Pölten ISBN 3-85234-081-0	30,-
191	Das Verhalten ausgewählter organischer Spurenstoffe bei der biologischen Abwasserreinigung (2004) Clara, M. ISBN 3-85234-082-9	25,-

Band Nr		Preis €
192	Chemie in der Wassergütewirtschaft (2005) ÖWAV-Seminar Februar 2005, TU Wien ISBN 3-85234-083-7	45,-
193	Three-dimensional numerical modelling of turbulent river flow using polyhedral finite volumes (2005) Trithart, M. ISBN 3-85234-084-5	30,-
194	Abwasserentsorgung im ländlichen Raum: Stand der Technik und alternative Methoden ÖWAV-Seminar September 2005, BOKU Wien ISBN 3-85234-085-3	Preis auf Anfrage
195	Betriebserfahrungen moderner Kläranlagen ÖWAV-Seminar März 2006, TU Wien ISBN 3-85234-086-1	i.V.
196	Kanalmanagement 2006 – Projektergebnisse und Praxiserfahrungen ÖWAV-Informationsveranstaltung 24.1.2006, Wien. ISBN 3-85234-087-X	30,-
197	Methoden der hydrologischen Regionalisierung Seminar ÖWAV, TU Wien, Lebensministerium, ÖGH, Wien. ISBN 3-85234-088-8	30,-
198	Process based regionalisation of low flows Laaha, G. ISBN-10 3-85234-089-6 ISBN-13 978-3-85234-089-0	30,-
199	Hochwasservorhersage – Erfahrungen, Entwicklungen & Realität Seminar ÖWAV, TU Wien ISBN-10 3-85234-090-X ISBN-13 978-3-85234-090-6	30,-

Die Bände sind zu beziehen bei:

Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft
der Technischen Universität Wien
Karlsplatz 13/226, A-1040 Wien

Band: 12, 15, 16, 20, 28, 34, 35, 36, 37, 47, 49, 53, 54, 56, 57, 58, 61, 62, 63, 64, 65, 69, 73, 81, 82, 84, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 105, 107, 108, 110, 114, 116, 117, 121, 125, 127, 129, 130, 134, 135, 137, 138, 139, 140, 141, 143, 145, 147, 152, 153, 155, 156, 157, 158, 159, 161, 162, 166, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 183, 184, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 195

Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie
der Technischen Universität Wien
Karlsplatz 13, A-1040 Wien

Band: 1, 2, 8, 9, 17, 21, 23, 26, 30, 31, 41, 42, 52, 66, 68, 74, 90, 91, 92, 102, 122, 132, 148, 164, 180, 181, 193, 197, 198, 199

Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau
der Universität für Bodenkultur,
Muthgasse 18, A-1190 Wien

Band: 18, 19, 32, 38, 43, 44, 45, 48, 50, 55, 59, 60, 70, 75, 78, 86, 89, 93, 101, 106, 109, 113, 123, 144, 160, 165, 167, 169

Institut für Wasservorsorge, Gewässerökologie und Abfallwirtschaft
der Universität für Bodenkultur,
Muthgasse 18, A-1190 Wien

Band: 22, 29, 39, 40, 46, 67, 71, 72, 76, 77, 80, 83, 85, 87, 88, 94, 103, 112, 115, 118, 120, 124, 126, 128, 131, 133, 136, 142, 146, 150, 154, 163, 167, 168, 169, 178, 179, 182, 185, 186, 194, 196

Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft
der Universität für Bodenkultur
Muthgasse 18, A-1190 Wien

Band: 119, 149, 151, 170