

## **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 km<sup>2</sup> Oberfläche und 51 Mio. m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup>/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 km<sup>2</sup> und einen Nutzinhalt von 20 Mio. m<sup>3</sup>. 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 m<sup>3</sup>/s.

Der Speicher *Thurnberg* hat die Funktion eines Ausgleichsbeckens und besitzt bei Stauziel eine Oberfläche von 0,4 km<sup>2</sup> und einen Nutzinhalt von 0,8 Mio. m<sup>3</sup>. 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 m<sup>3</sup>/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 <sub>E</sub> (km <sup>2</sup> )	STZ (m)	V (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	O (km <sup>2</sup> )	HWE	Turbinen
Ottenstein	Ottenstein	889	495,0	51	4,3	2 Stau- klappen	4 Ma Σ100m <sup>3</sup> /s
Dobra	Krumau	940	437,0	20	1,5	freier Überfall	3 Ma Σ30m <sup>3</sup> /s
Thurnberg	Wegscheid	1015	364,0	0,8	0,4	3 Senk- schützen	2 Ma Σ16,5m <sup>3</sup> /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 m<sup>3</sup>/s erhöht. Steigt der Zulauf weiter, werden die Schützen an der Sperre Thurnberg gesenkt und die Abgabe bis auf in Summe 30 m<sup>3</sup>/s erhöht. Im nächsten Schritt wird unter Bedachtnahme auf die Zuflüsse zum Kamp unterhalb der Speicherkette entschieden, zu welchem Zeitpunkt mehr als 30 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/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:

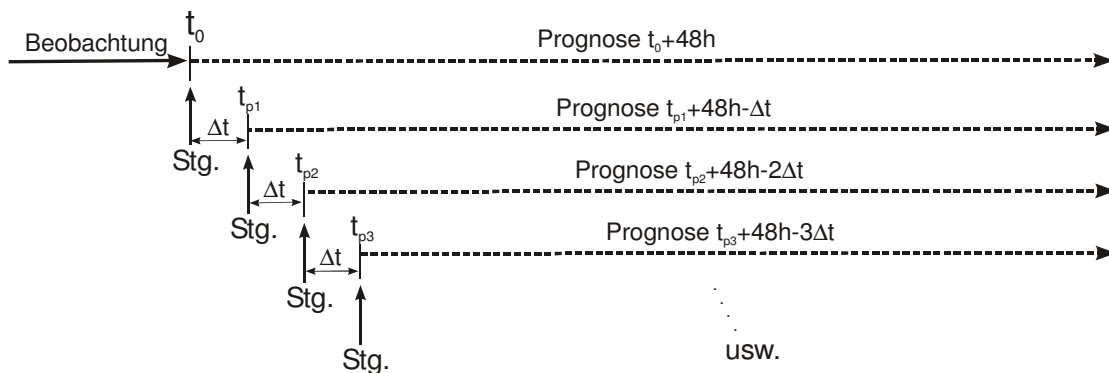
- Wie groß ist der Zulauf zu den drei Speichern?
- Wie groß ist das freie Speichervolumen?
- Wie ist die Situation im Unterlauf des Kamp?

### **3. Entwicklung der Regeln für die Kraftwerkssteuerung**

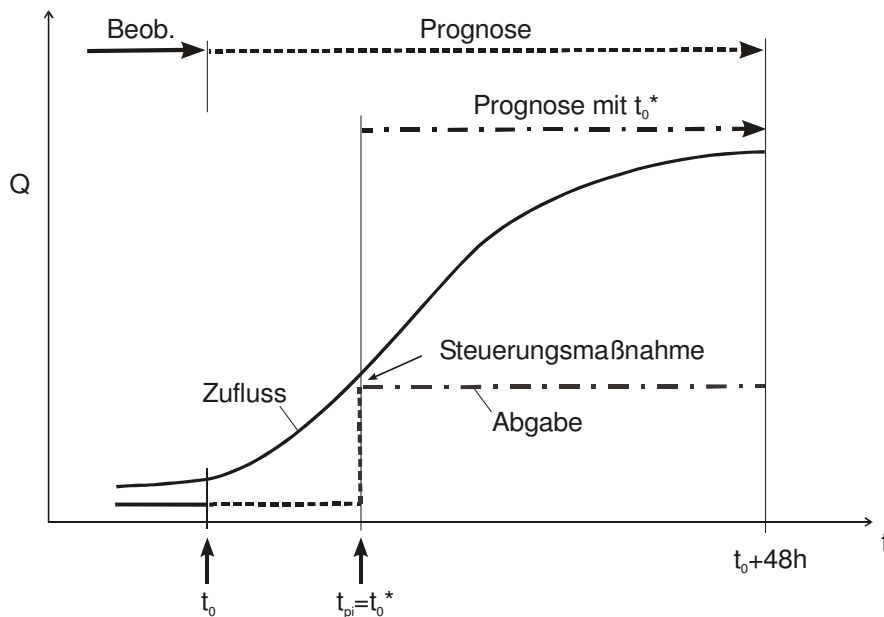
#### **3.1 Steuerungsprinzip des Kraftwerksmoduls**

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.  $\Delta t$  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 beziehungsweise 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 beziehungsweise 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 <sup>3</sup> /s	groß	Vorabsenkung mit max. 18m <sup>3</sup> /s	VA_R4
		klein	Vorabsenkung mit max. 30m <sup>3</sup> /s	VA_R5
Schlechtwetter	<150m <sup>3</sup> /s	rel. groß	Auffangen der Welle im Speicher (Aufstau) bis zu zulässiger Kote	SCHL_R6
	>150m <sup>3</sup> /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

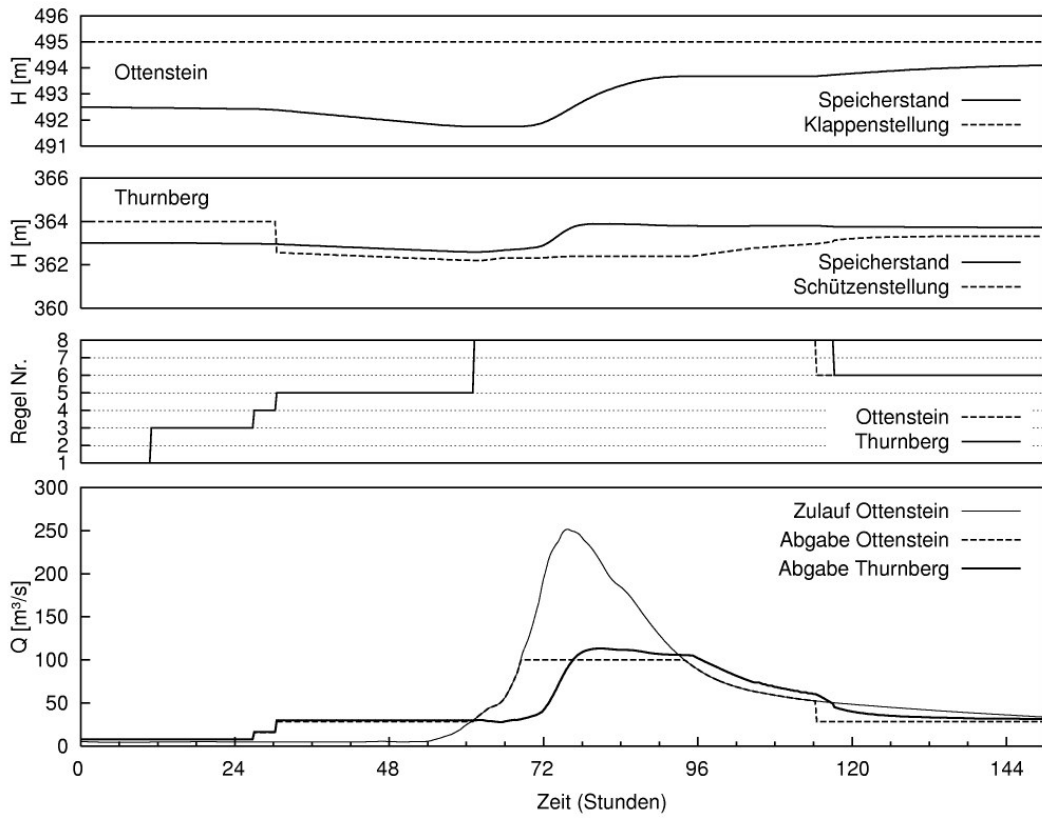
Vorzeichen des Fehlers angesetzt. Für die Optimierung wird also eine um den angesetzten Fehler verminderte prognostizierte Zuflussganglinie verwendet.

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.

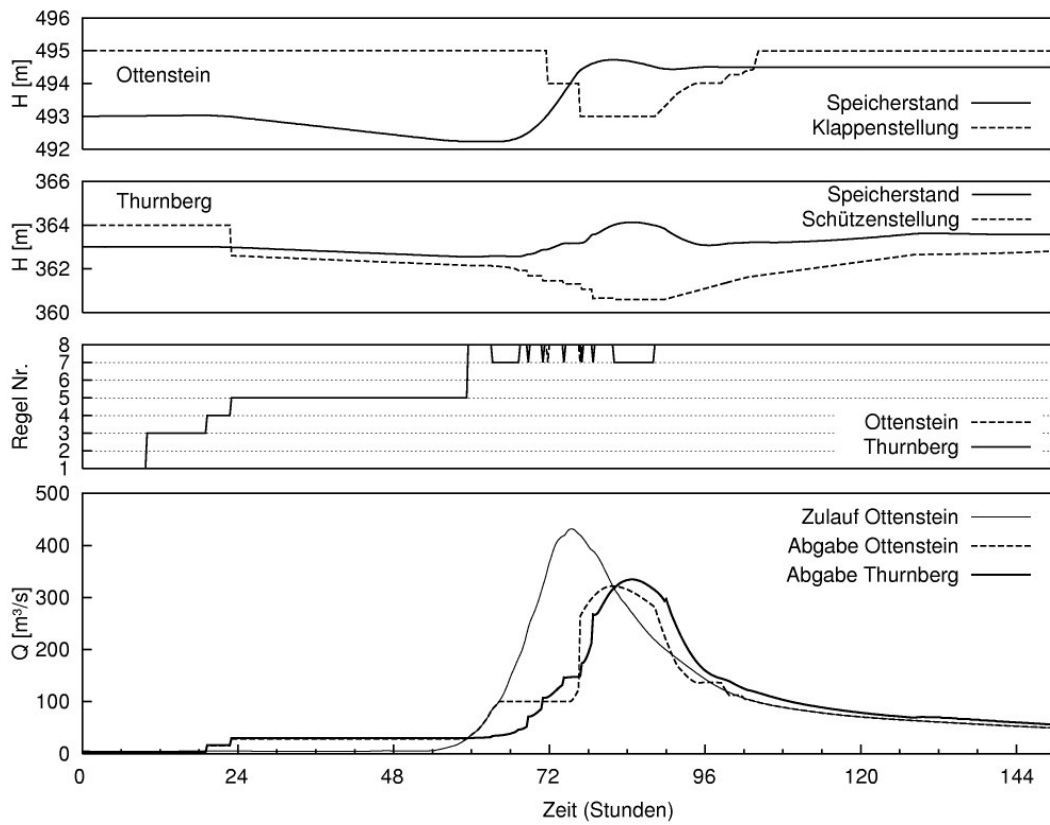
#### **4. Szenarien**

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).

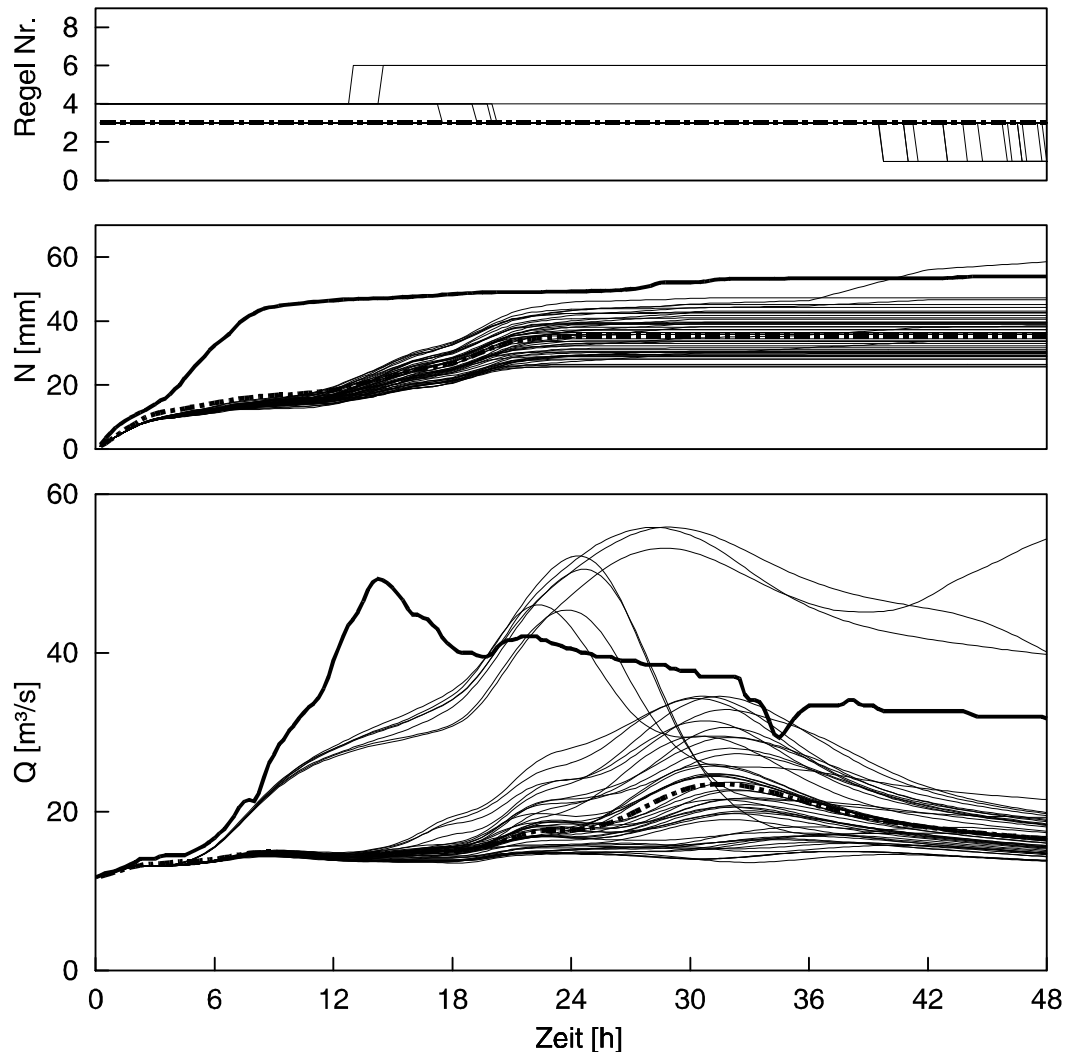
In den Abbildungen ist weiters die Zeitverzögerung zwischen Ottenstein und dem unterliegenden Speicher Thurnberg zu sehen, vor allem am Beginn des Anstiegs. Dieser wird durch das Rückhaltevermögen des dazwischen liegenden Speichers Dobra noch verstärkt. Bei kleinen Zuflüssen sind die Regeln für Ottenstein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

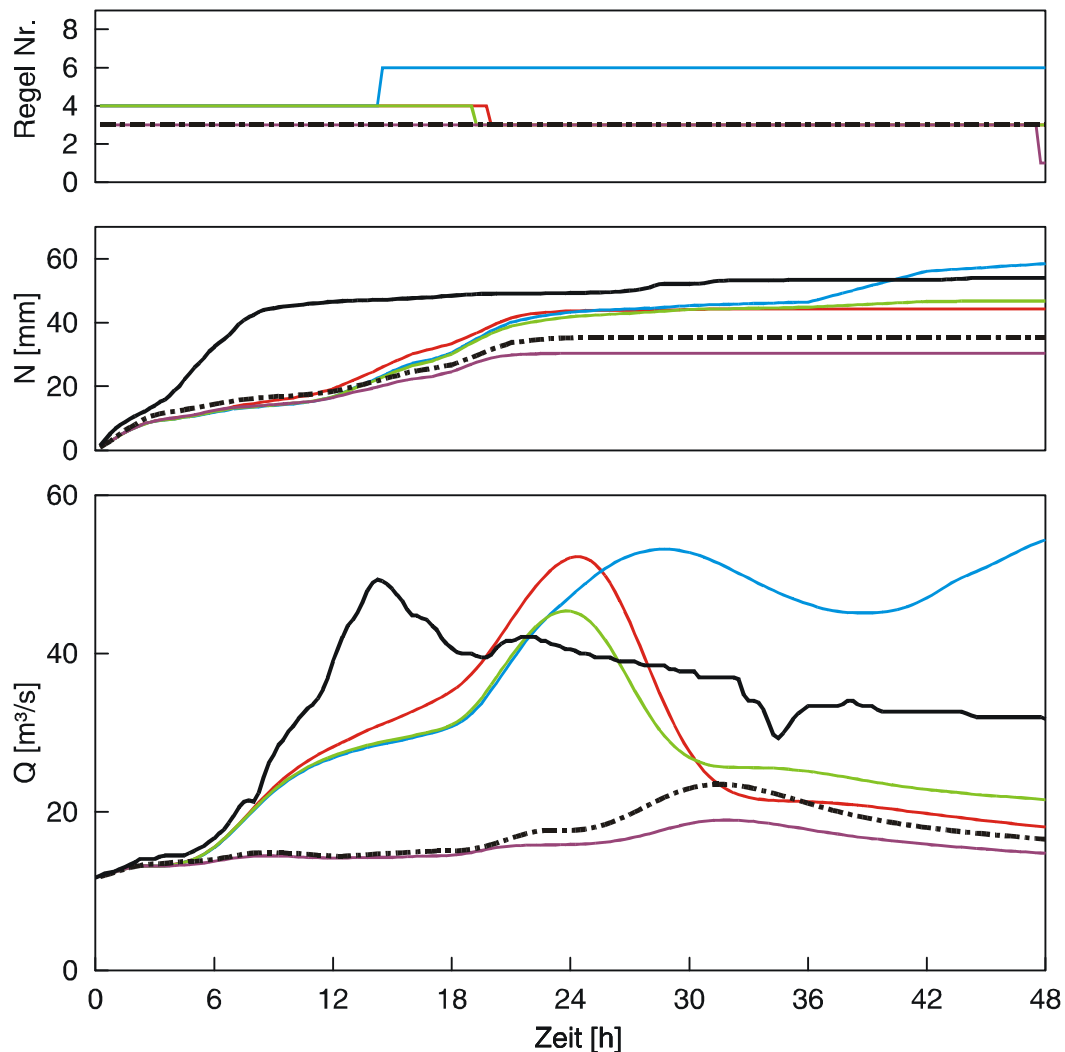
jene Prognosen, welche auf den größeren Niederschlags- und somit Zuflussprognosen basieren. Bei diesen Prognoseläufen werden hinsichtlich der prognostizierten Zuflüsse und des freien Speichervolumens über die Prognosefrist bestimmte Grenzen und Marken über- bzw. unterschritten. Der Kraftwerksmodul simuliert 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

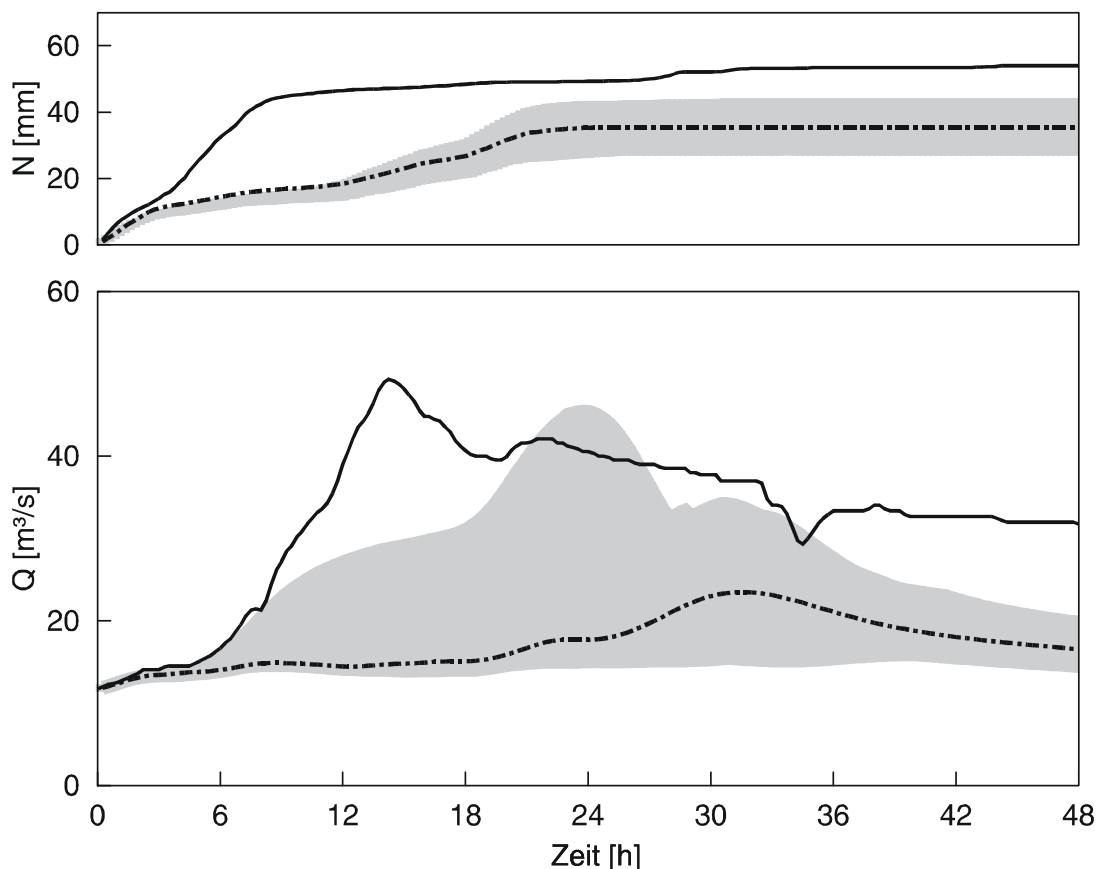
der Abgabe (Regel Nr. 4). Im Falle der etwas niedriger prognostizierten Niederschläge wird eine Reduktion der Abgabe nach etwa 20 Stunden simuliert, der entsprechende Regelverlauf zeigt einen Rückgang von 4 auf 3, bei dem kleineren Lauf früher, bei dem größeren Lauf später (rote und grüne Linien). Die 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  $t_0$ .

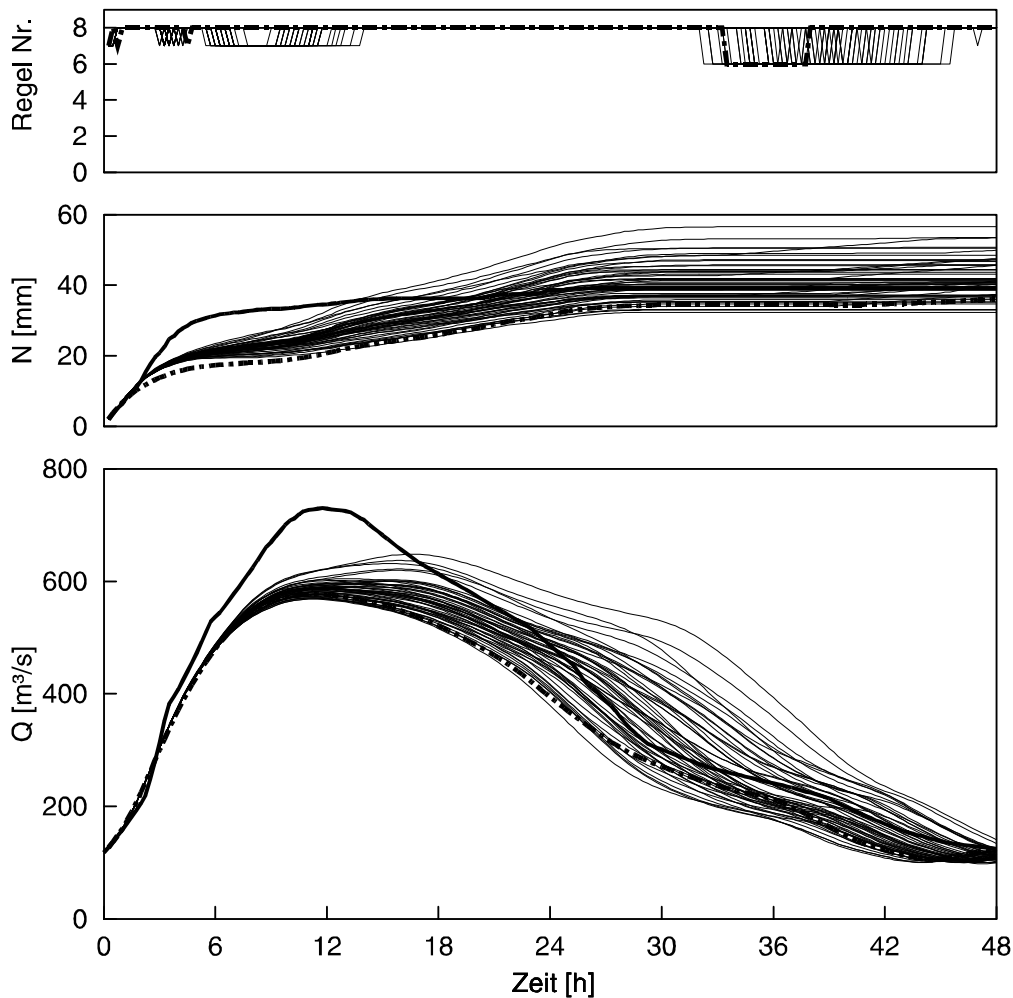
Schließlich ist eine Realisation dargestellt, bei der die Prognose unterhalb der deterministischen Prognose liegt. Entsprechend sind die prognostizierten Niederschläge geringer als die des deterministischen Laufes. Der Kraftwerksmodul simuliert eine konstante Abgabe bzw. Beibehaltung der Regel (violette 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  $t_0$ .

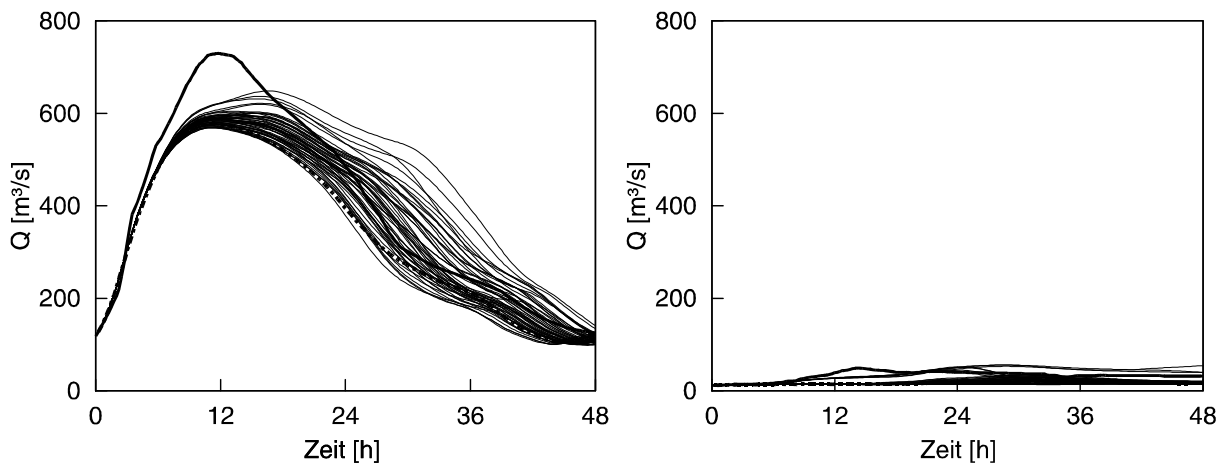
Beim zuvor beschriebenen Ereignis handelt es sich um ein kleines Hochwasser am Kamp. Zum Vergleich ist in Abbildung 9 die Ensembleprognose für ein großes Hochwasser dargestellt. Die Darstellung zeigt die Prognose beim Anstieg der Welle und einen Vergleich mit den beobachteten Pegeldaten in Stiefern. 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 Abflusszwischen-speicherung 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

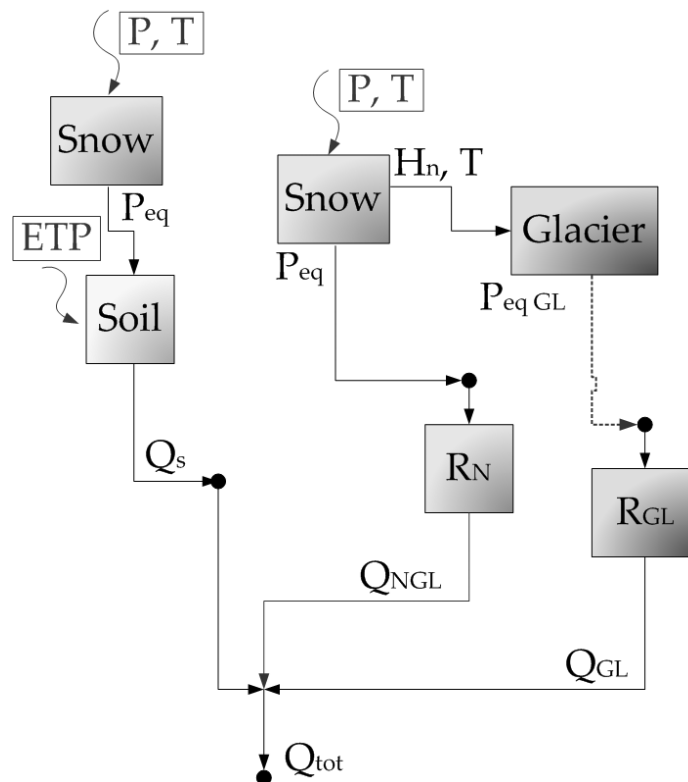
entwickelt worden (Jordan et al., 2005a). Das vorgestellte Modell berücksichtigt den Einfluss des Präventivbetriebs auf die Energieproduktion als auch auf potentielle Schäden an mehreren Kontrollpunkten innerhalb des Flussgebiets. Die entwickelte Simulationsoptimierung ermöglicht es, in kürzester Zeit 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 km<sup>2</sup> 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):

$$P^* = \alpha \cdot P \quad (1)$$

mit  $P^*$  = flüssiger Niederschlag in m/s,  $\alpha$  = Unterscheidungsfaktor 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.

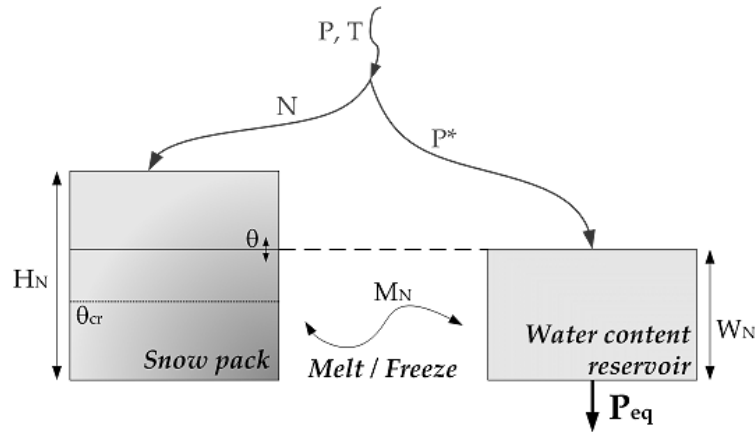
Der äquivalente Niederschlag wird vom Wasserreservoir produziert (Gln. 6 bis 8):

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

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

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

mit  $\theta$  = relativer Wassergehalt im Schnee,  $\theta_{cr}$  = 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,  $i_{\text{inf}}$  = Infiltrationsintensität in m/s,  $h$  = Niveau des Infiltrationsreservoirs in m,  $h_{\max}$  = Kapazität des Infiltrationsreservoirs in m,  $ETR$  = reale Evapotranspiration in m/s,  $Q_{\text{base}}$  = Basisabfluss in m<sup>3</sup>/s,  $k$  = Abgabekoeffizient in 1/s und  $S$  = Oberfläche in m<sup>2</sup>.

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  $i_{\text{net}}$  = 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<sup>1/3</sup>/s,  $J_0$  = mittlere Hangneigung und  $B$  = Hangbreite in m.

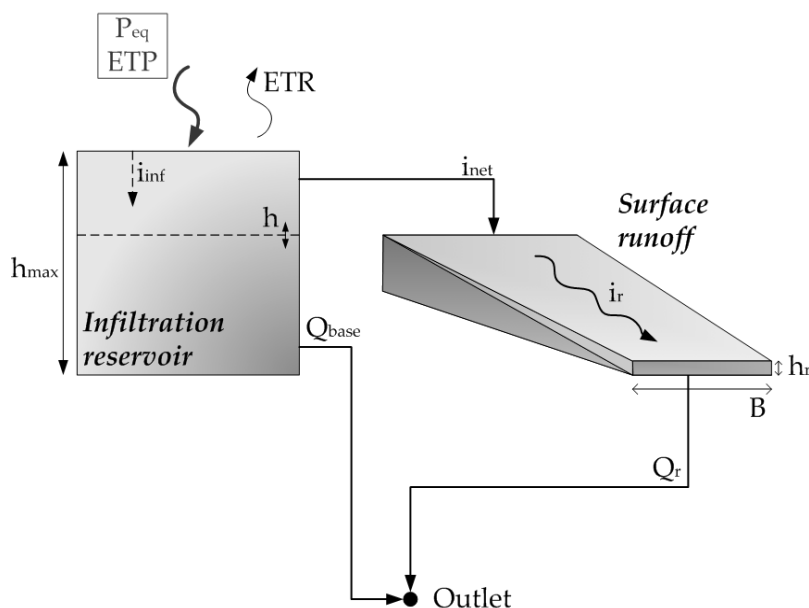


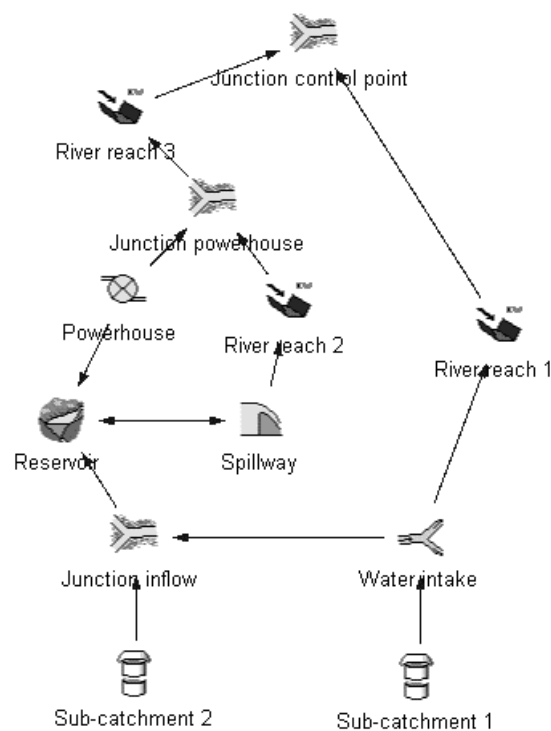
Abb. 3: Infiltrations- und Oberflächenabflussmodell.



### 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 Betriebsschemata 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.

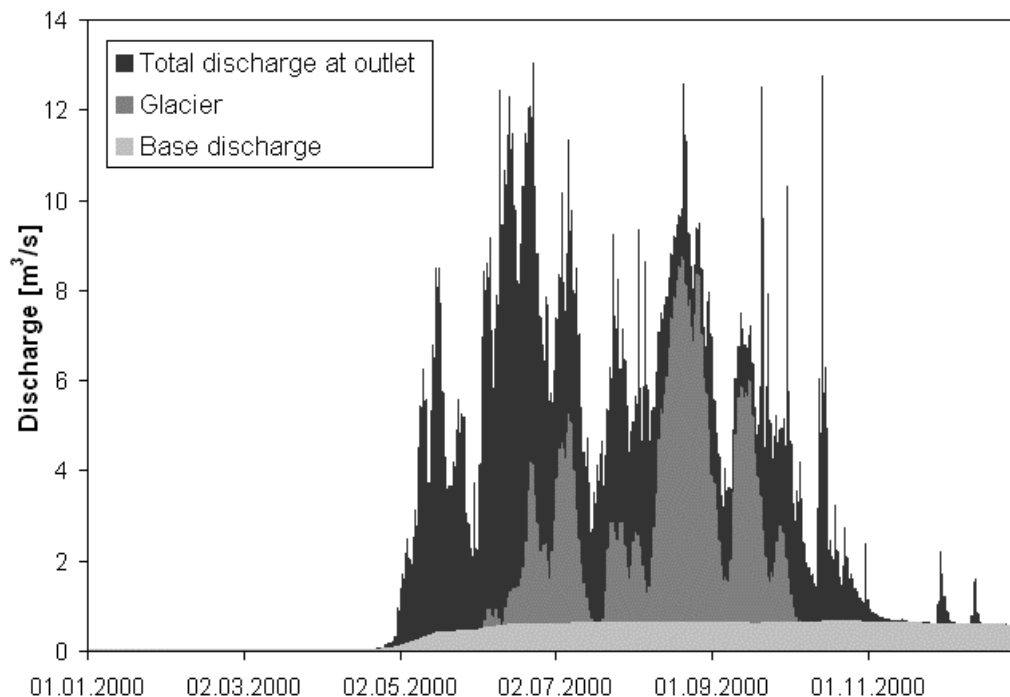
Das vereinfachte Modell verwendet vorhergesagte Speicherzuflüsse, gefasste Wassermengen und Hochwasserganglinien an zahlreichen Kontrollpunkten innerhalb des Flussgebietes. Der ideale Präventivbetrieb wird durch Optimierung des Dämpfungseffektes jedes einzelnen Speichers ermittelt. Der Einfluss der Kraftwerke 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

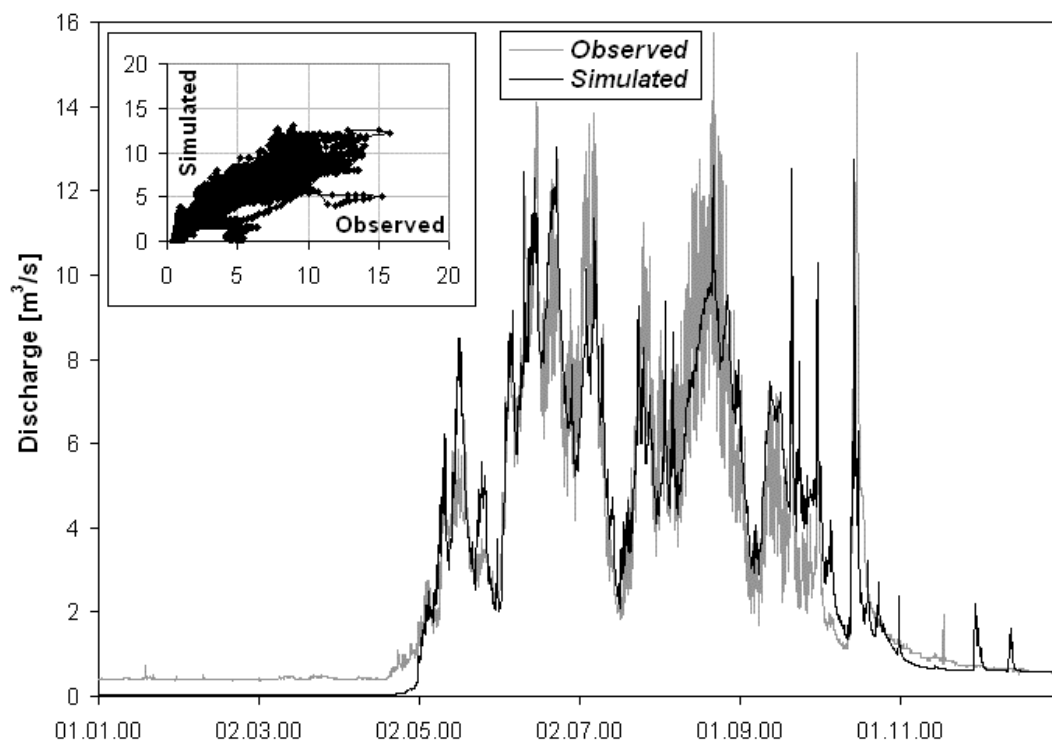
Jedes Teileinzugsgebiet wird mittels mehrerer zu kalibrierender Parameter beschrieben. Die Kalibrierungsparameter für ein Gletscherhöhenband sind  $A_n$ ,  $A_{GL}$ ,  $K_N$  und  $K_{GL}$  (vgl. Gln. 1 - 13). Die anderen Parameter ( $b_p = 0.0125$ ,  $\theta_{cr} = 0.1$ ,  $T_{cp1} = 0^\circ\text{C}$ ,  $T_{cp2} = 0^\circ\text{C}$ ,  $T_{cr} = 2^\circ\text{C}$ ) 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).

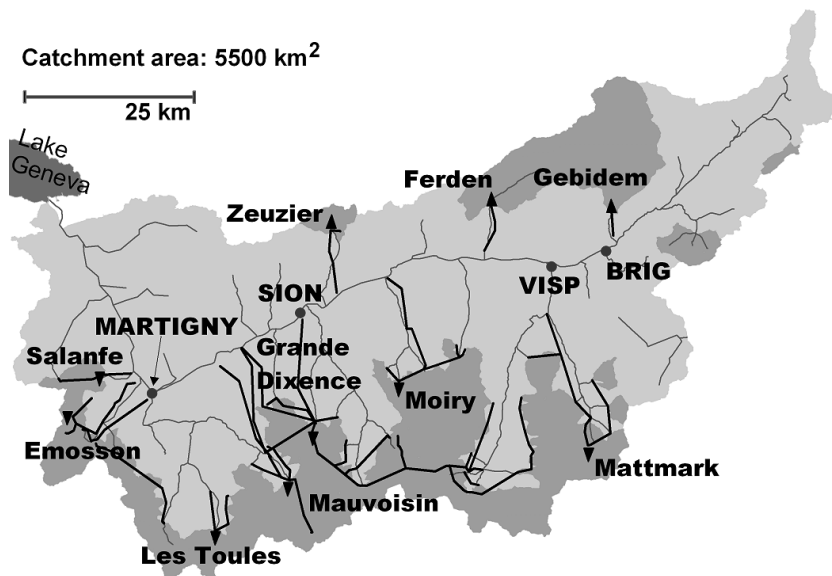
Der verbleibende Anteil setzt sich bis Juni aus Schneeschmelze, von Juli bis November aus Oberflächenabfluss zusammen. Die Reihenfolge der zu eichenden Parameter erfolgt dabei in Anlehnung an den hydrologischen Jahreskreislauf. Zur Güteanschätzung des Modell wird der Nash Indikator verwendet (Nash and 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

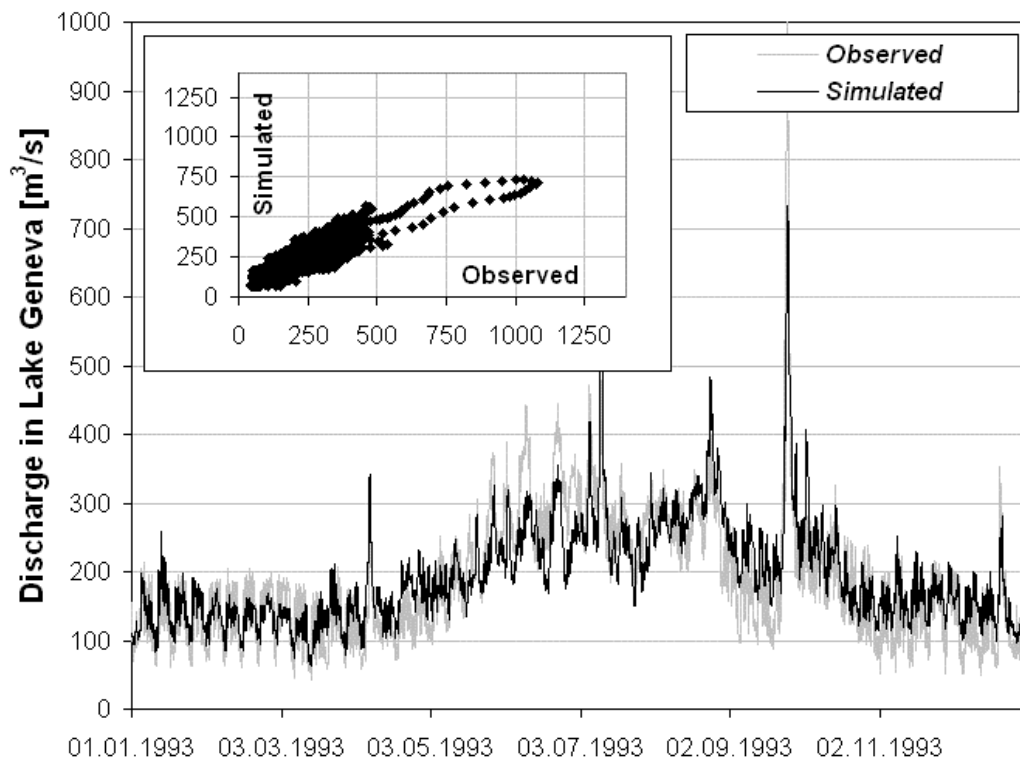
Das Rhoneeinzugsgebiet oberhalb des Genfer Sees beinhaltet 10 größere Speicherkraftwerke (Abb. 7). Sie entwässern etwa 30% des gesamten Einzugsgebietes und haben folglich einen bedeutenden Einfluss auf das Abflussregime der Rhone und einiger Nebenflüsse. Durch Rückhalteeffekte der Speicher kann der Spitzenabfluss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

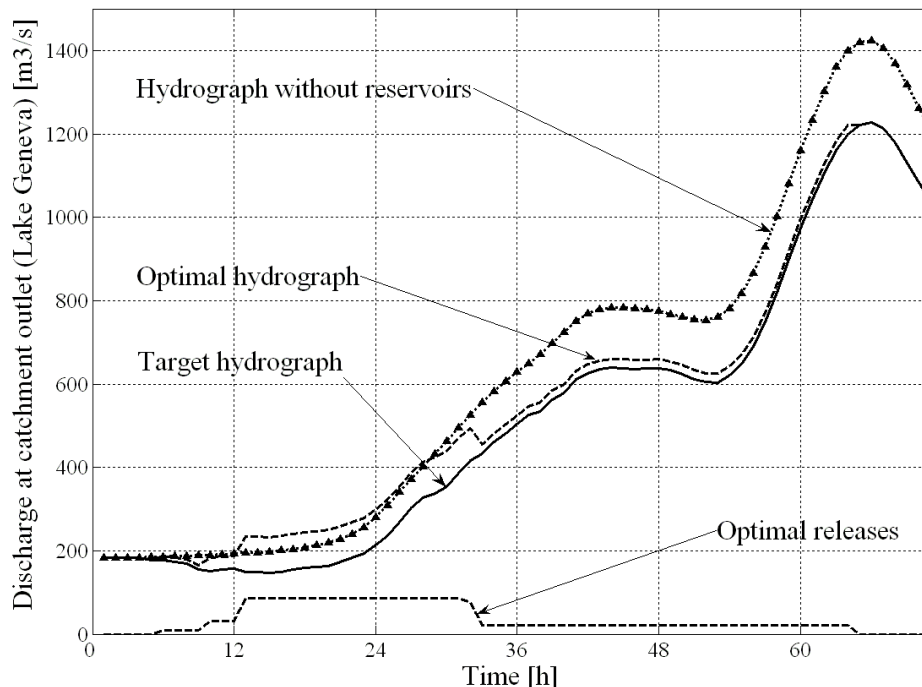
Die Güte des Modells zeigt Abb. 8. Der Nash Indikator liegt bei 0.737 und der Bias bei 1.03. Die prognostizierten Abflüsse während der Schneeschmelze werden unterschätzt. Das gleiche gilt für den Spitzenabfluss im September 1993. Hier fehlen etwa 350 m<sup>3</sup>/s. Nichtsdestotrotz werden der hydrologische 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).

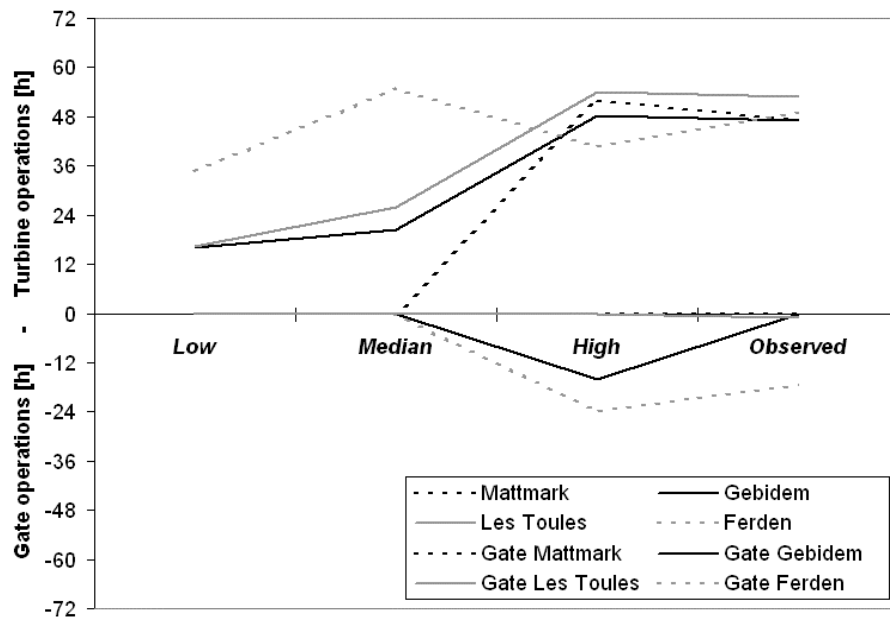
Hoch: erhöhte hydrologische Vorhersage. Der Niederschlag wird um 20%, die Temperatur um 2 °C erhöht.

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 km<sup>2</sup> aus dem Lungau zur Drau.

Die Salzach ist mit einem Gesamteinzugsgebiet von 6728 km<sup>2</sup> 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 km<sup>2</sup> rund 178 m<sup>3</sup>/s, das Verhältnis MQ zu höchstem Hochwasser HHQ (2300 m<sup>3</sup>/s, Reihe 1951 bis 2005) liegt bei 1 : 13, während jenes von Niederwasser NNQ (12,5 m<sup>3</sup>/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 km<sup>2</sup> liefern im Unterlauf nach dem Salzachdurchbruch beträchtliche Beiträge zur Hochwasserentwicklung. Flussab von Salzburg hat die Saalach, mit 1157 km<sup>2</sup> 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 Hochwassermanagement 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 m<sup>3</sup>/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 Sachverständigenvorschriften 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.

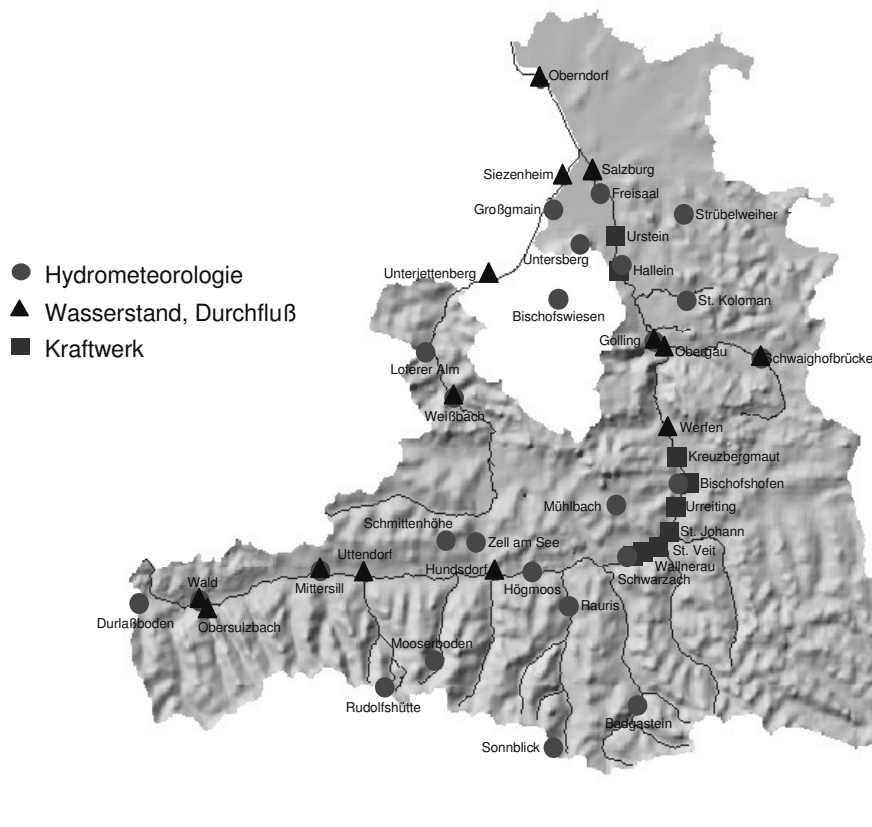


Abb. 1: Messnetz HYDRIS I.

### 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.

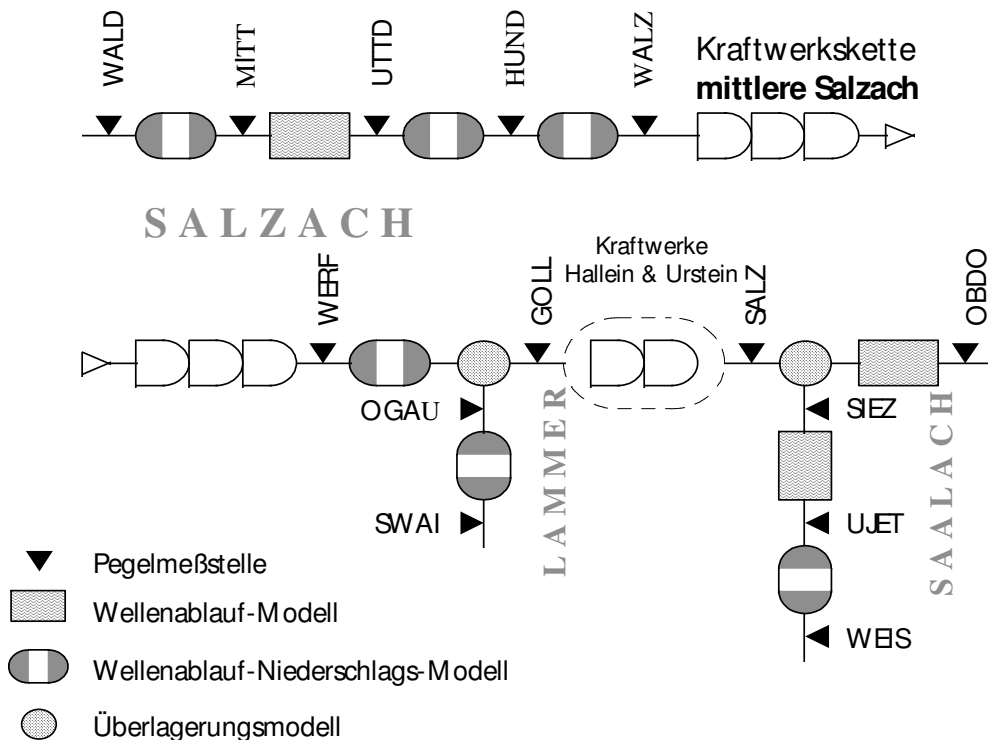


Abb. 2: Gesamtmodell Hydris I.

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.



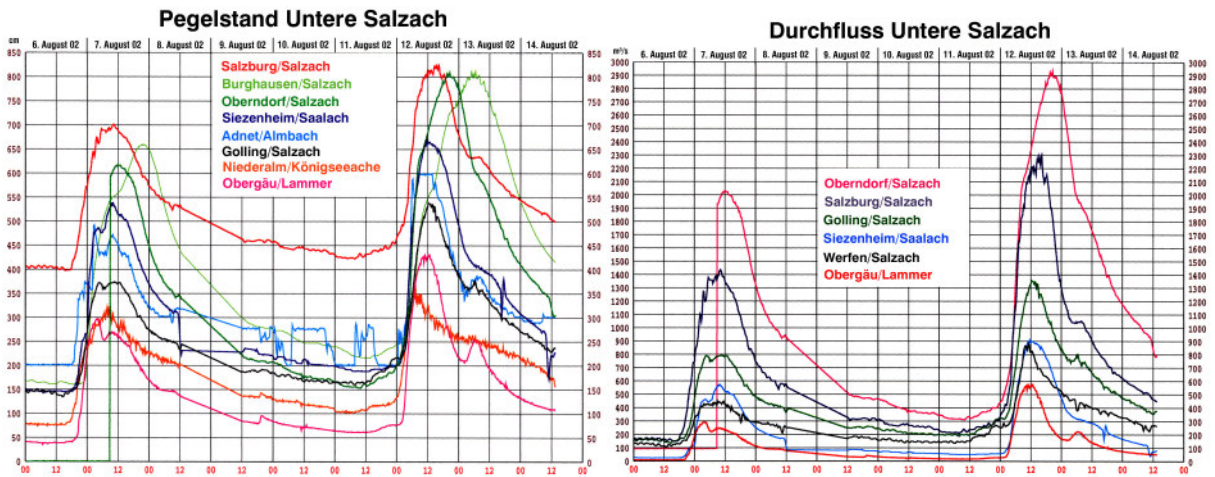


Abb. 3: Wasserstand und Durchfluss Untere Salzach im August 2002.

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).

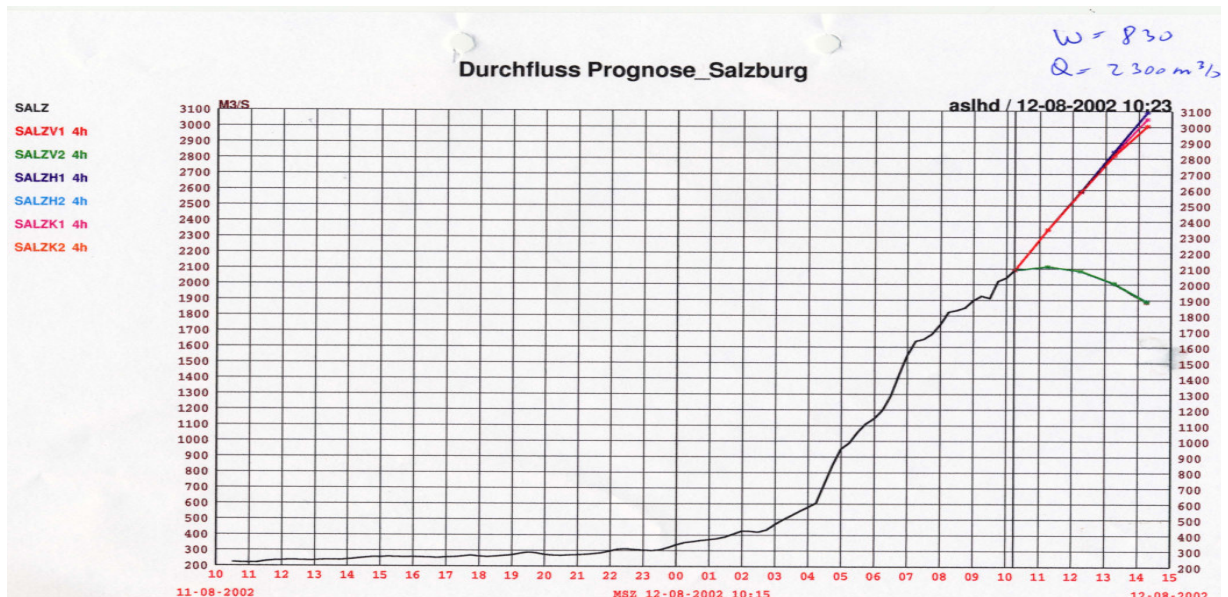


Abb. 4: Durchflussprognose am 12. August 2002.

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 km<sup>2</sup> 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/m<sup>2</sup>, an der unteren Salzach 25 – 35 l/m<sup>2</sup> 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 m<sup>3</sup>/s, dies entspricht einem ca. 80 – 100 jährlichen Hochwasserereignis (Abbildung 5).

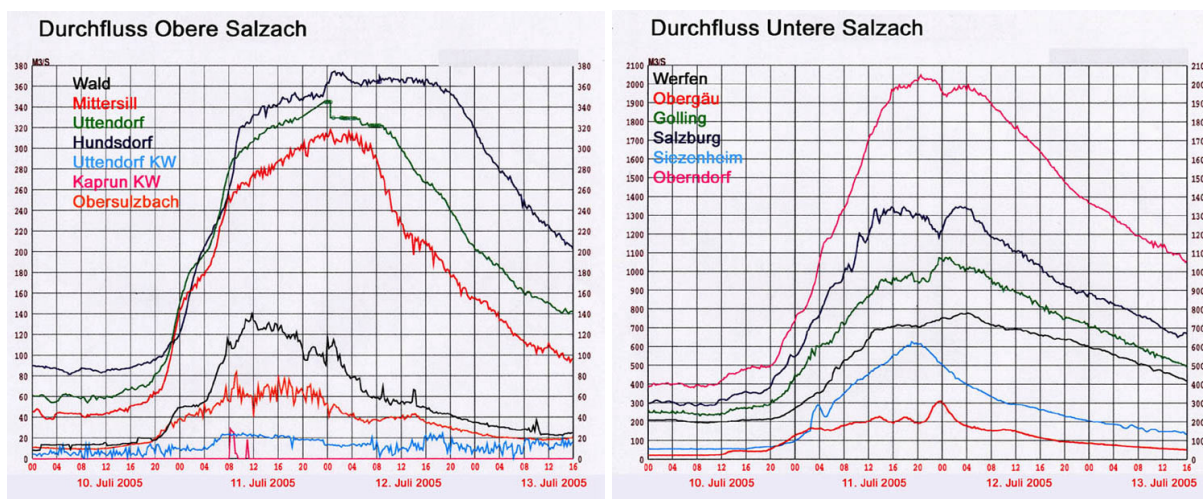


Abb. 5: Durchfluss Obere und Untere Salzach im Juli 2005.

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 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/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 km<sup>2</sup> 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**

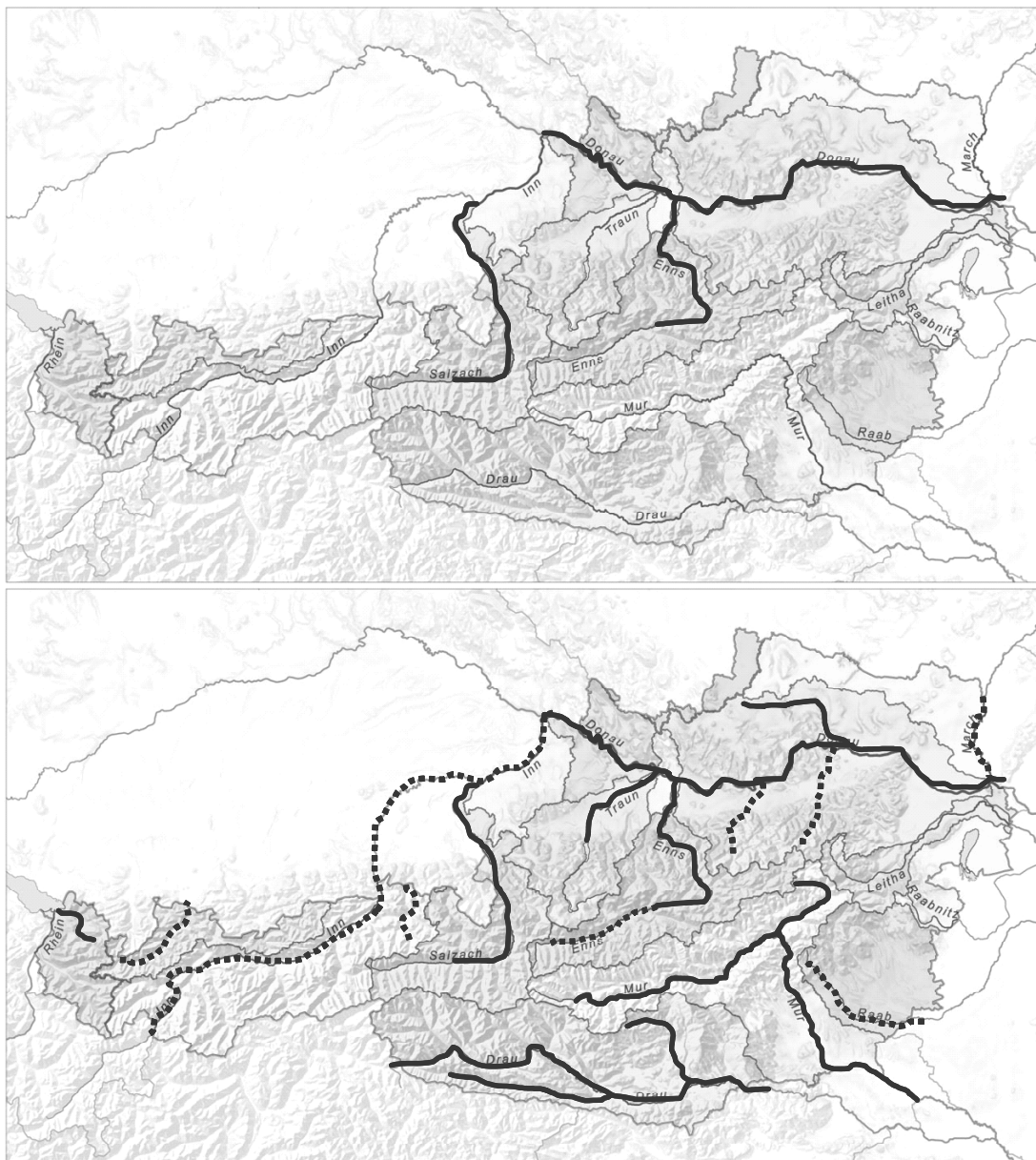
Die Warnung vor einem Hochwasserereignis ist ein wesentlicher Bestandteil im Handlungskreislauf – Ereignis, Bewältigung, Wiederherstellung und Vorbeugung – des integrierten Hochwassermanagements. Nur eine zeitgerechte und räumlich zutreffende Prognose kann den Einsatz von Hilfskräften und den von technischen 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-

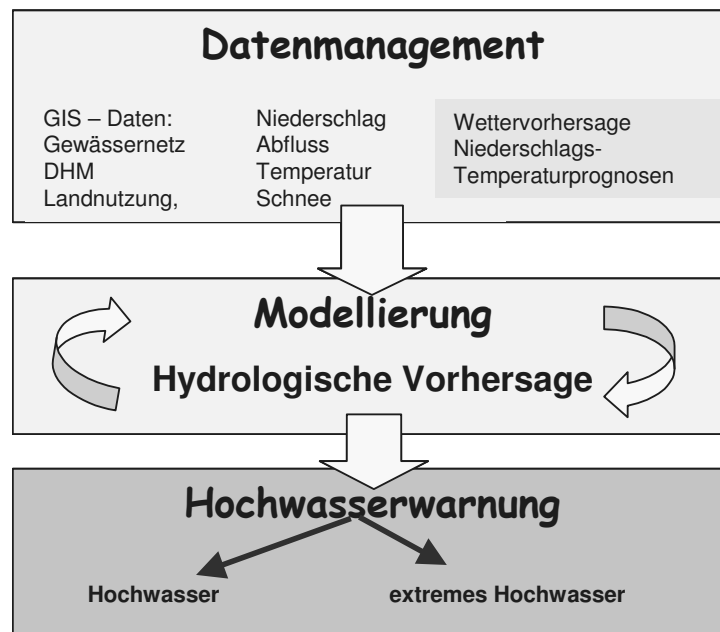
system für alle größeren Gewässer in Kärnten als zentrale Elemente der Warnung bei den hydrographischen Diensten für die Steiermark und Kärnten integriert. Die Abbildung 1 zeigt, dass ein Modell für den Inn, den Lech und das Tiroler – Achengebiet in Entwicklung ist. In Salzburg und Oberösterreich werden 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/m<sup>2</sup> 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 km<sup>2</sup> 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.

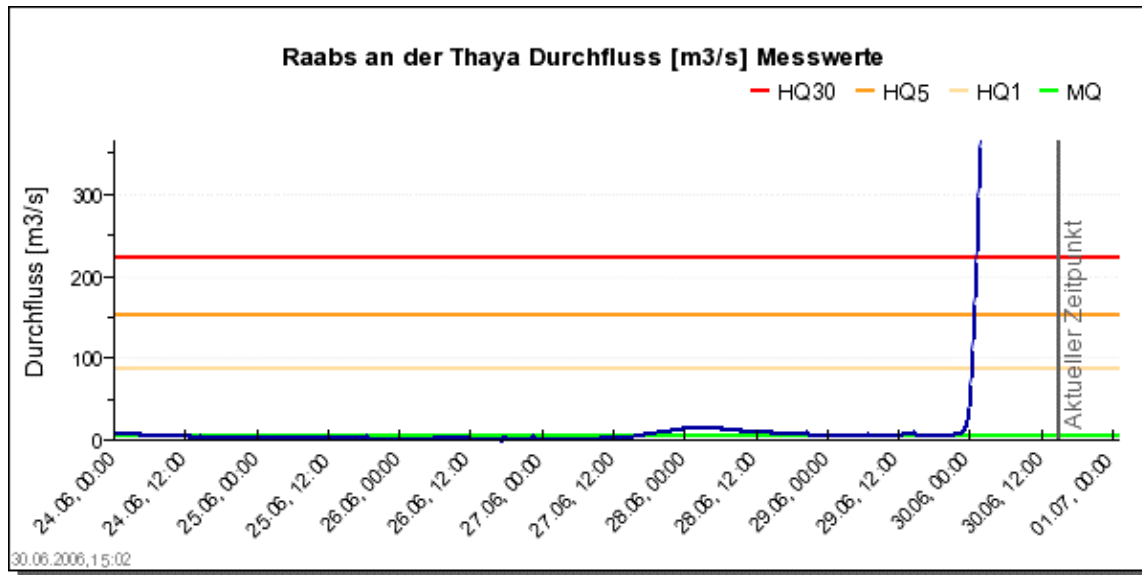
*Die aktuellen Prognosen weisen auf eine Ausdehnung der intensiven Niederschläge in der kommenden Nacht nach Westen hin. Es können das Tiroler Unterland und das Zillertal mit ca. 50 mm Niederschlag (lokal sind auch größere Mengen möglich) betroffen sein. Für Salzburg, Oberösterreich und die Obersteiermark 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.

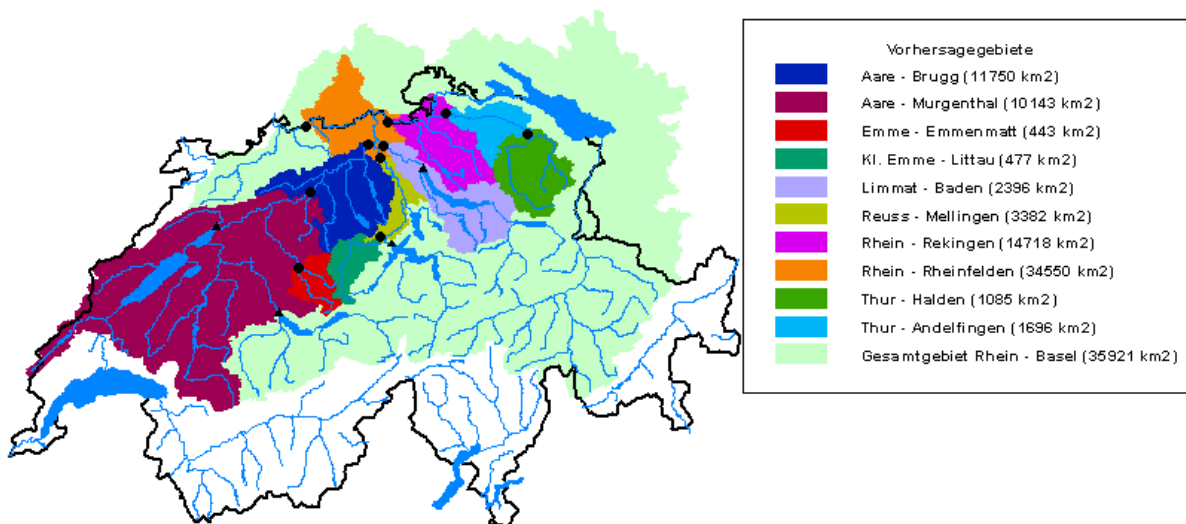
### 2. Vorhersagebetrieb und Kunden des BAFU

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 m<sup>3</sup>/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.

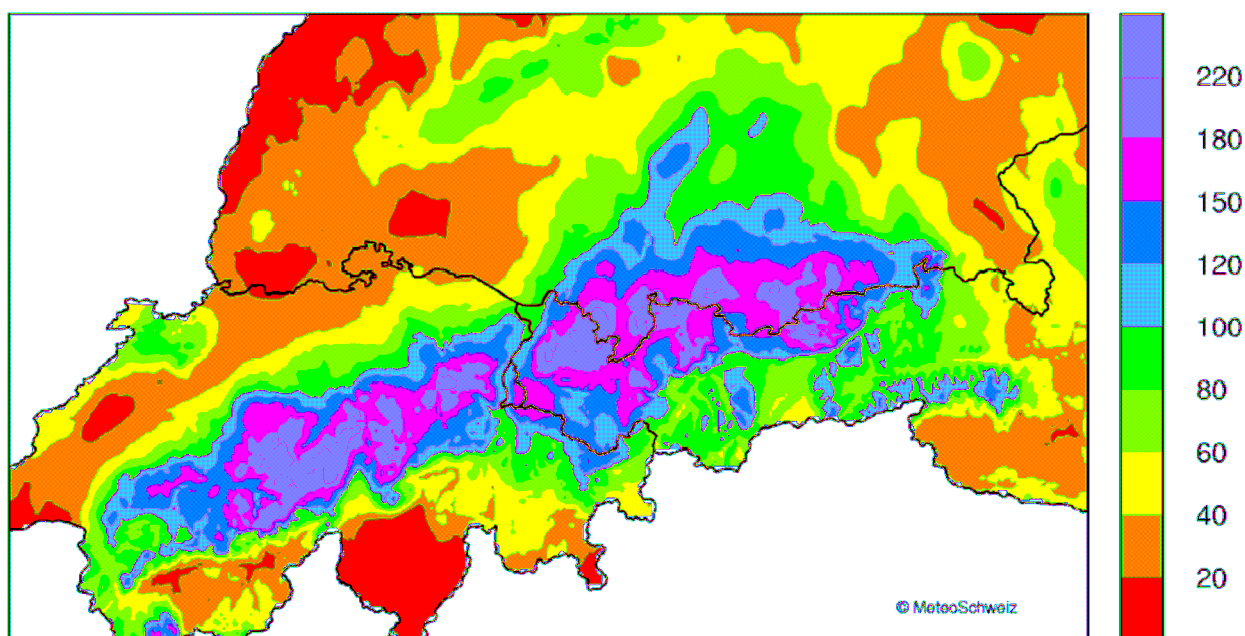
## 4. Hochwasser August 05

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.

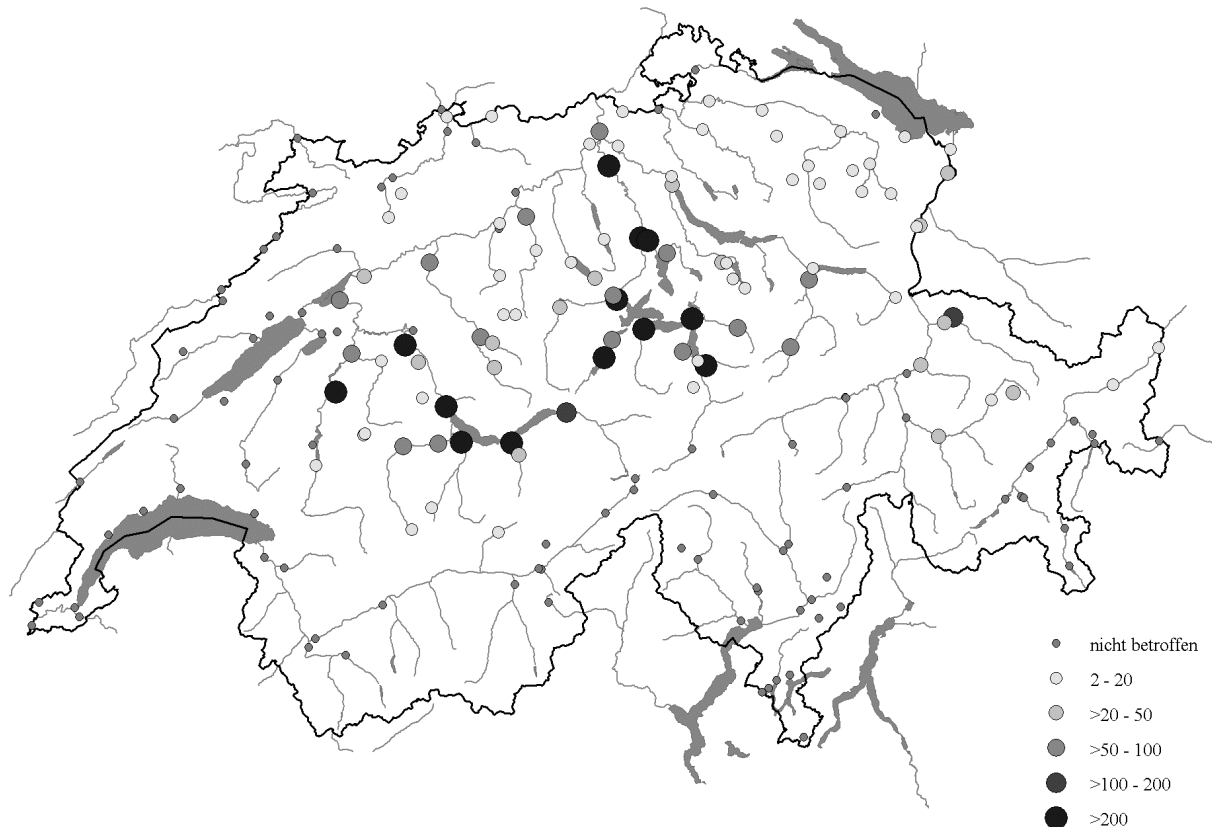


Abb. 3: Wiederkehrperiode der Abflussspitzen des Augusthochwasser 2005.

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.

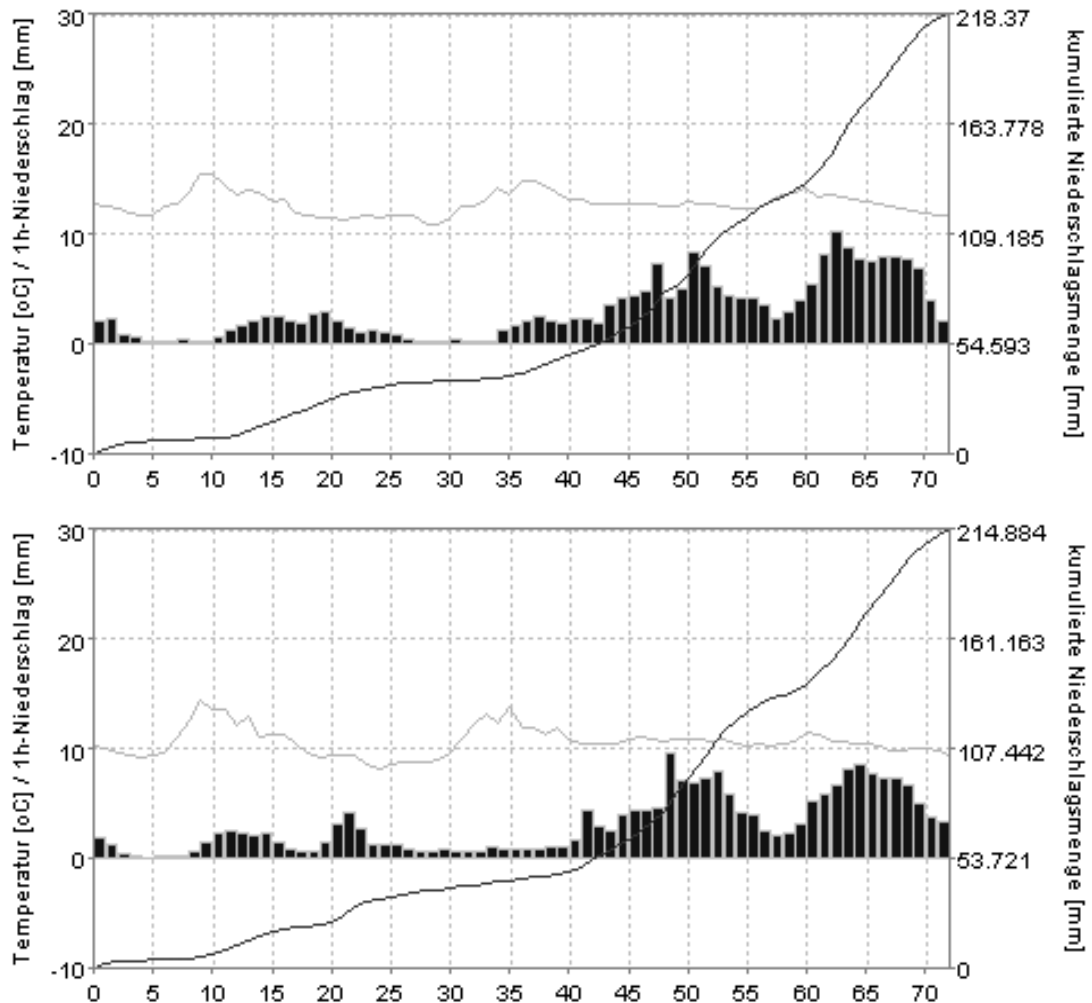
### **4.3 Vorhersagetätigkeit und eine kurze Beurteilung der Güte**

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 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/s mit einem Bulletin beliefert, was hier der Fall war.

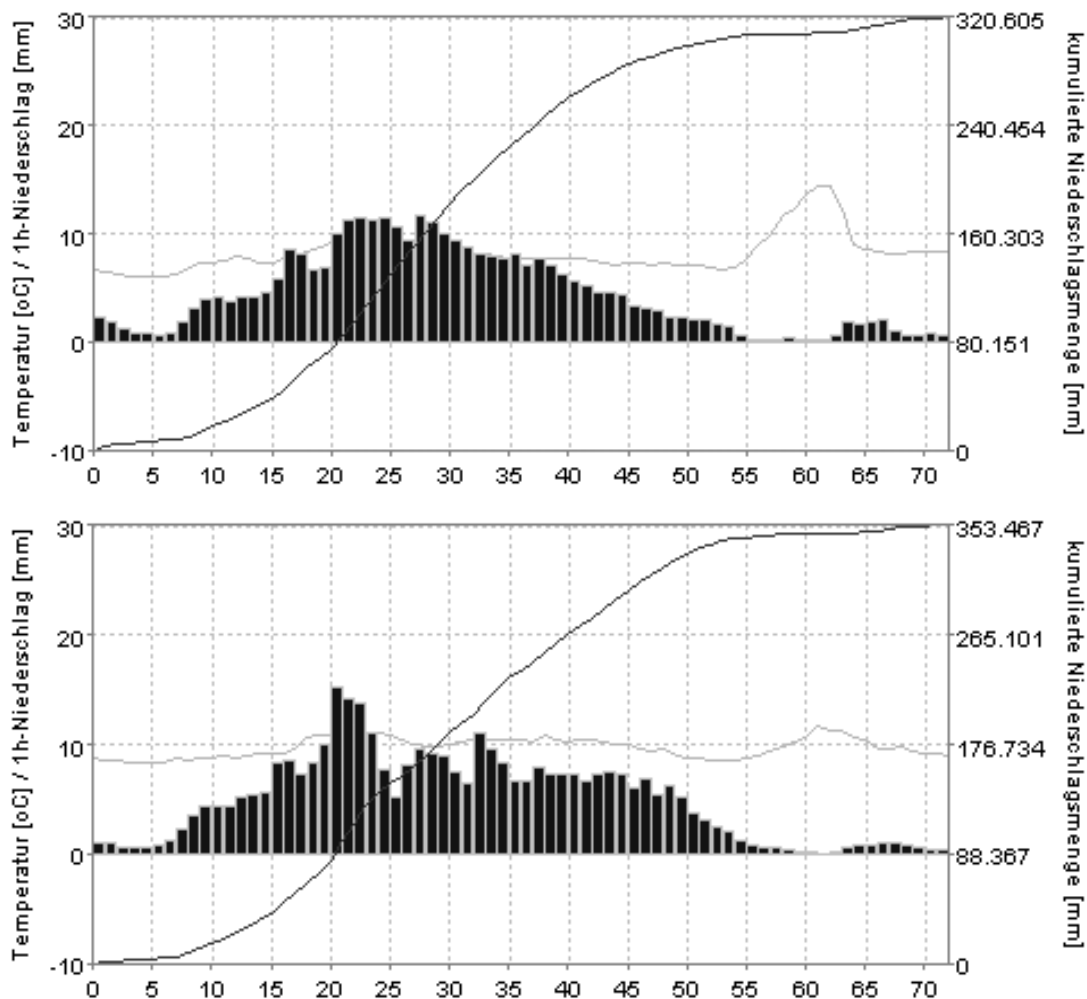
Zu diesem Zeitpunkt waren alle Kunden, welche Vorhersagen vom BAFU beziehen, mit einem Hochwasserbulletin für mindestens eine ihrer abonnierten Vorhersagestationen beliefert. Die Problematik bestand darin, dass gerade in kleineren Gebieten (Kleine Emme, Emme) zu diesem Zeitpunkt das Ausmaß und der Zeitpunkt 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 <sub>x</sub>	Bemerkung	Spitze gemessen (Stundenmittel), Zeitpunkt	HQ <sub>x</sub>
Rhein – Rheinfelden	3116 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +24h	2 – 5		3464 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +15h	5 – 10
Rhein – Rekingen	1630 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +35h	20		1249 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +35h	2 – 5
Aare – Murgenthal	535 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +30h	< 2	Warngrenze nicht überschritten	937 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +17h	5 – 10
Aare – Brugg	583 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +24h	< 2	Warngrenze nicht überschritten	1057 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +21h	5 – 10
Emme - Emmenmatt	177 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +26h	< 2	Nicht öffentlich, nur Kt. Bern	490 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +5h	100
Reuss – Mellingen	800 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +16h	200		860 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +21h	> 200
Kleine Emme - Littau	506 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +12h	10 – 20	Nicht öffentlich, Plausibilisierung Mellingen	649 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +7h	> 200
Limmat – Baden	326 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +23h	< 2		510 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +5h	10 – 20
Thur – Andelfingen	1114 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +33h	100 – 200		720 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +33h	2 – 5
Thur – Halden	1102 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +28h	20 – 50	Nicht öffentlich, nur Kt. Thurgau	795 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +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.

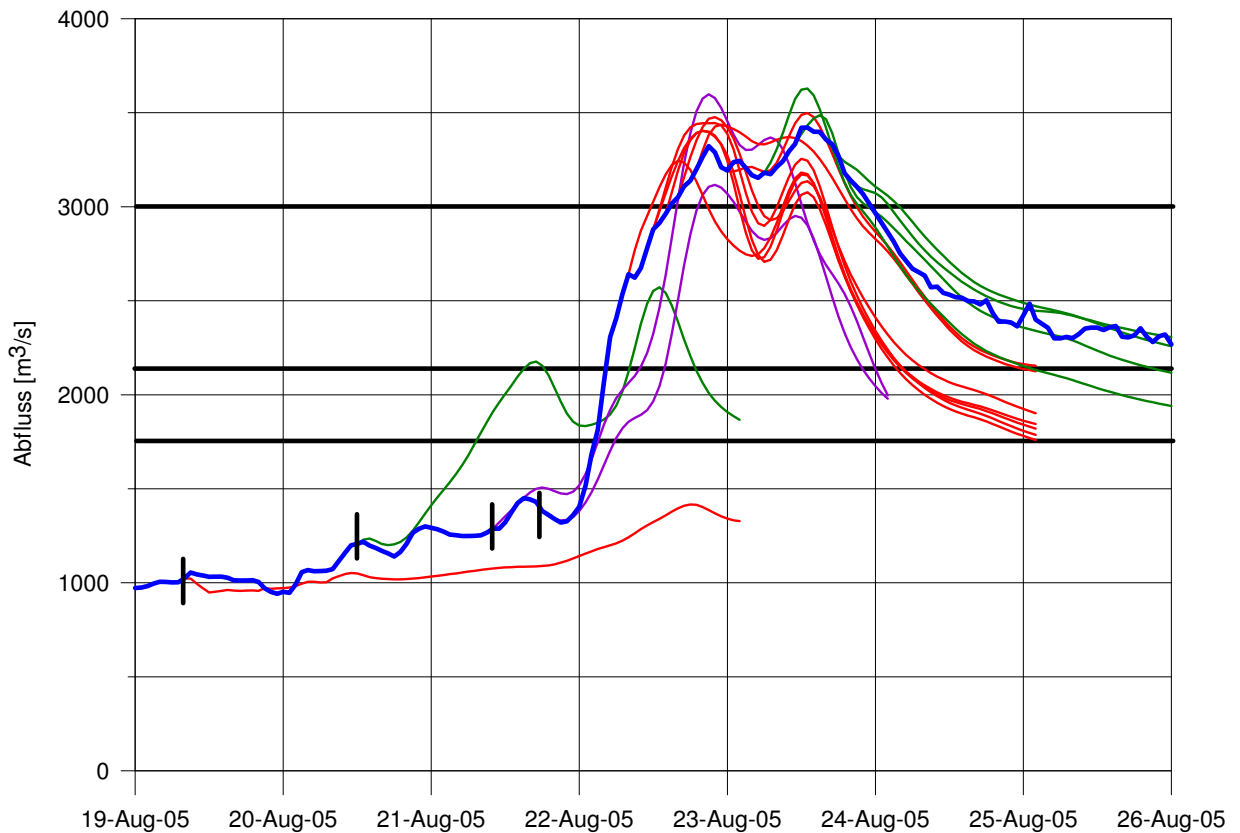
Ab dem 23. August rückten vor allem die großen Seen ins Zentrum des Interesses, währenddem an den Fliessgewässern, deren Abflussverhalten nicht durch Seen beeinflusst ist, eine Entspannung der Situation auftrat. Für den Bielersee und den Vierwaldstättersee wurden Einschätzungen über die weitere Entwicklung 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.

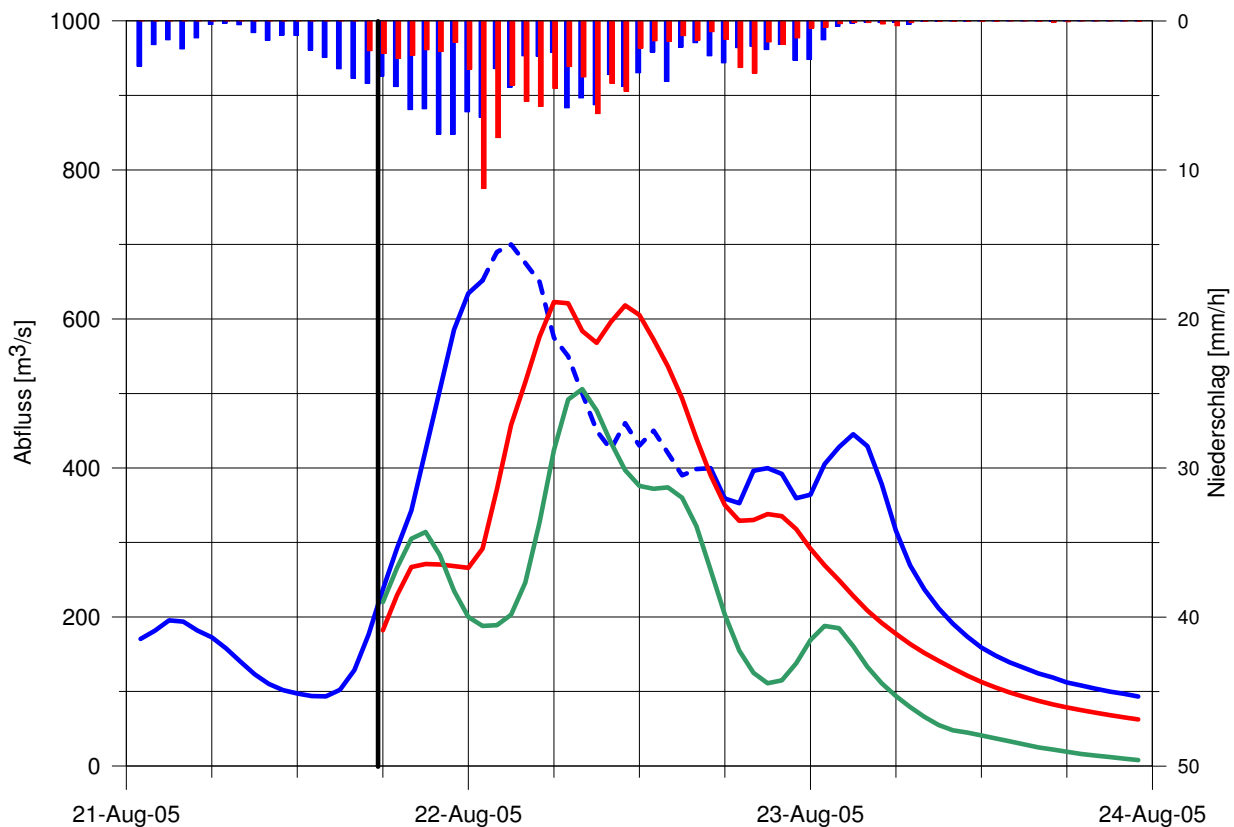
Abbildung 6 zeigt die Vorhersagen für die Station Rhein – Rheinfelden. Im momentan operationellen System HBV3-ETHZ werden die Zuflüsse von ungefähr 40 hydrometrischen Stationen unterhalb der Alpenrandseen berücksichtigt. Die längsten Laufzeiten im vom Modell abgedeckten Gebiet betragen etwa 12 Stunden. 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-Rheinfeldern 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  $-10^{\circ}\text{C}$  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

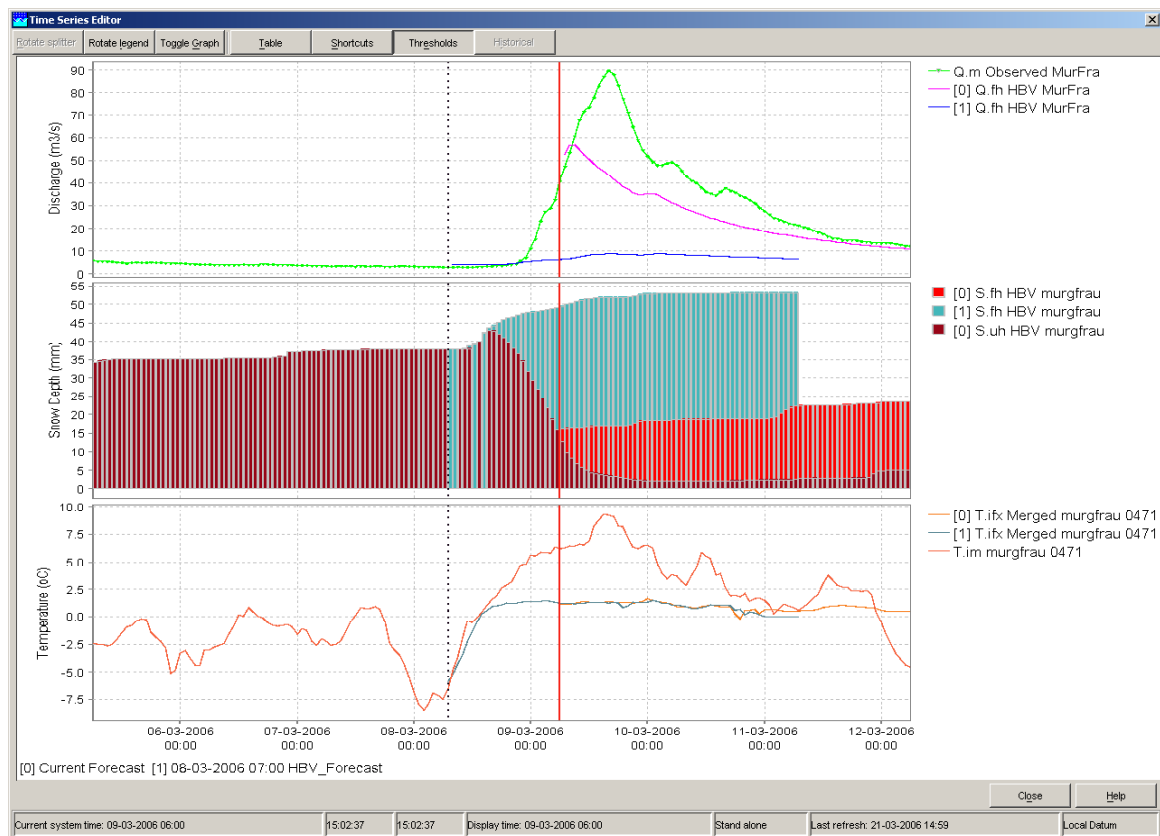
Augusthochwassers 05 sowie der Hochwasserereignisse 1999 der Zusammenhang „Viel Schnee = Hochwassergefahr“ hergestellt, was zu vielen Medienanfragen an den Vorhersagedienst führte.

## 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**

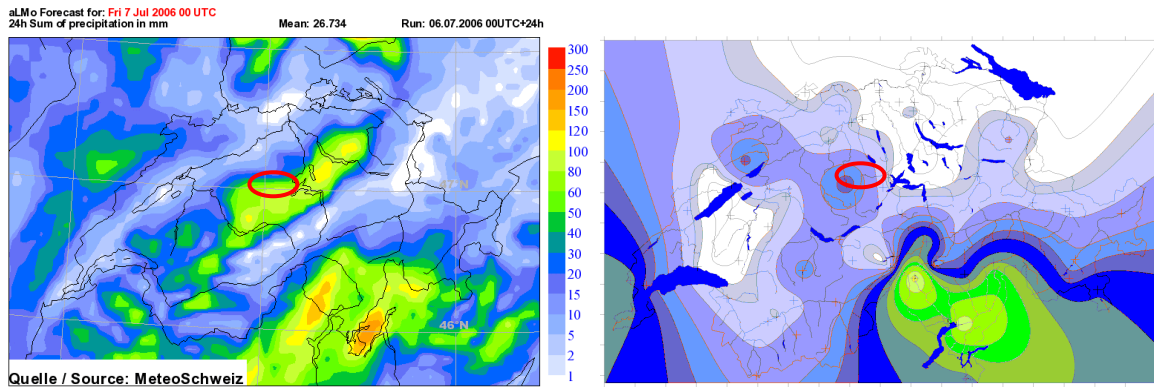
Bei konvektiven Wetterlagen tritt regelmäßig das Phänomen auf, dass für das Einzugsgebiet der Kleinen Emme sowohl in HBV3-ETHZ als auch in FEWS sehr hohe Abflussspitzen gerechnet werden, welche jedoch regelmäßig nicht eintreffen. Vor allem im operationellen System HBV3-ETHZ erreichen diese Spitzen zum 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.

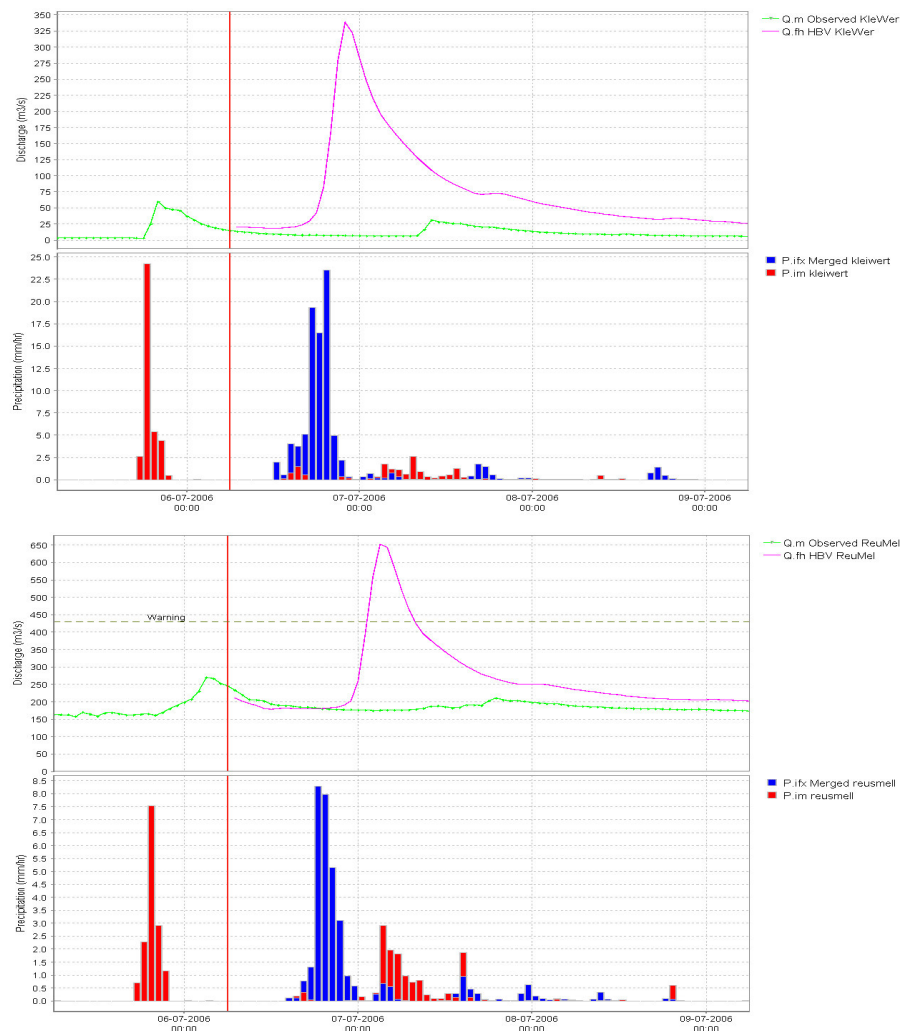
### **6.2 Vorhersage für den 06. Juli 2006**

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 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/s erwartet (entspricht etwa einem HQ20), bedingt durch eine andere Aggregation der prognostizierten Niederschläge in HBV3-ETHZ sogar 925 m<sup>3</sup>/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

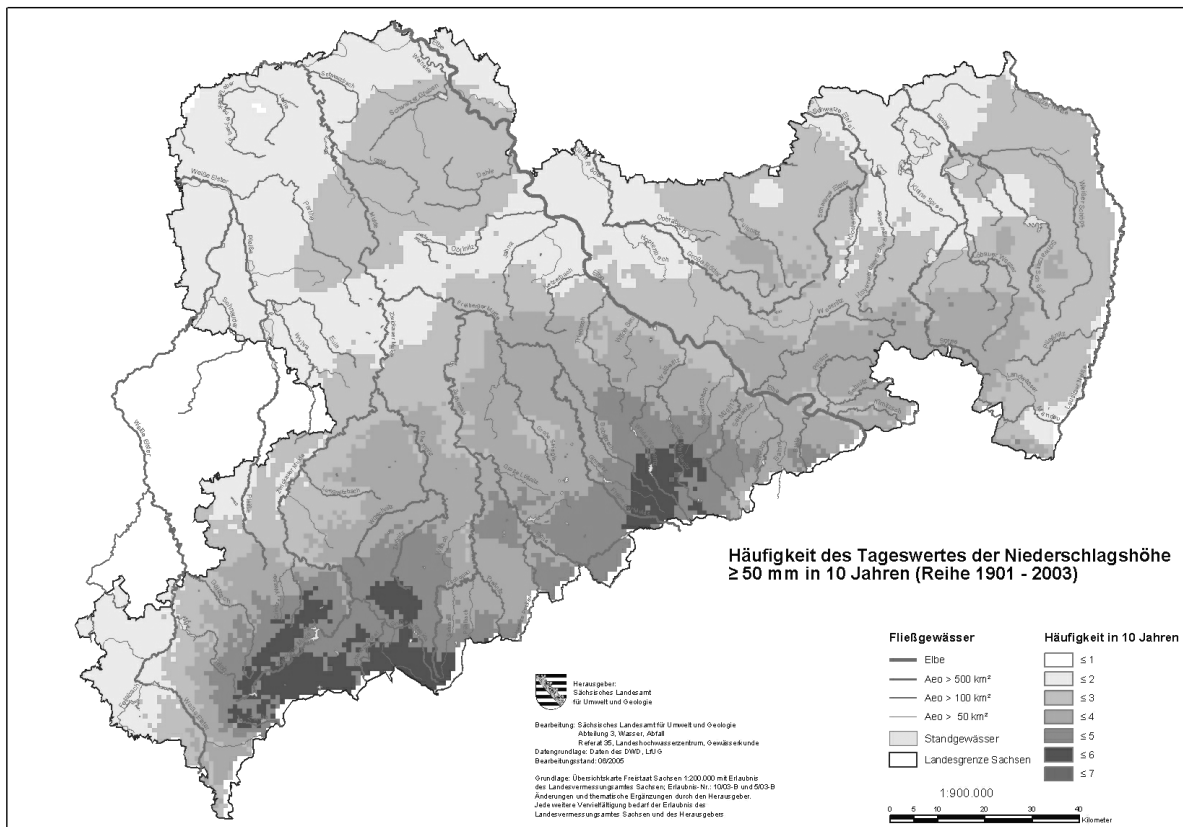
### 1. Einleitung

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 km<sup>2</sup> 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 $\text{km}^2$	Zeitbezug	NQ	MQ	MHQ	HHQ (Jahr)
				in $\text{m}^3/\text{s}$			
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. m<sup>3</sup> und einem Hochwasserrückhalteraum von 152 Mio. m<sup>3</sup> 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.

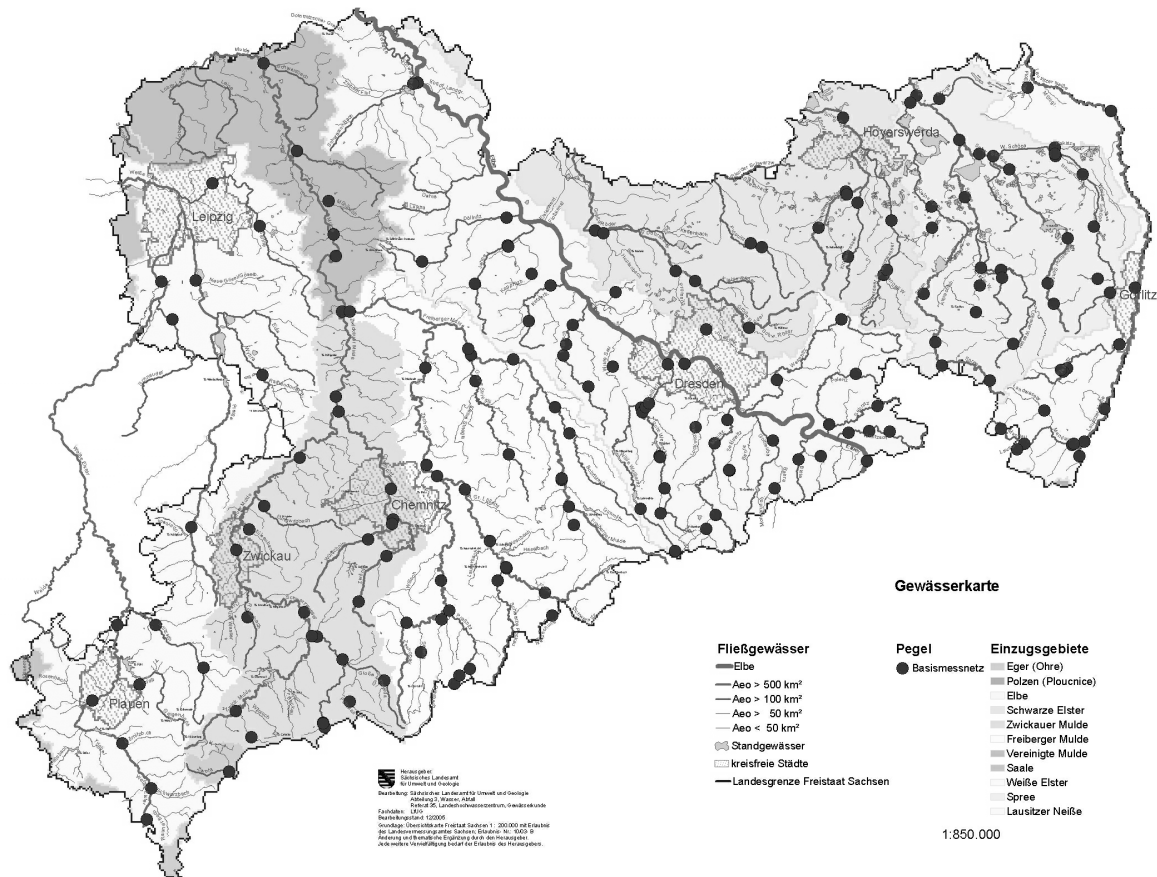


Abb. 2: Das Basispegelmessnetz des Freistaat Sachsen.

### 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.

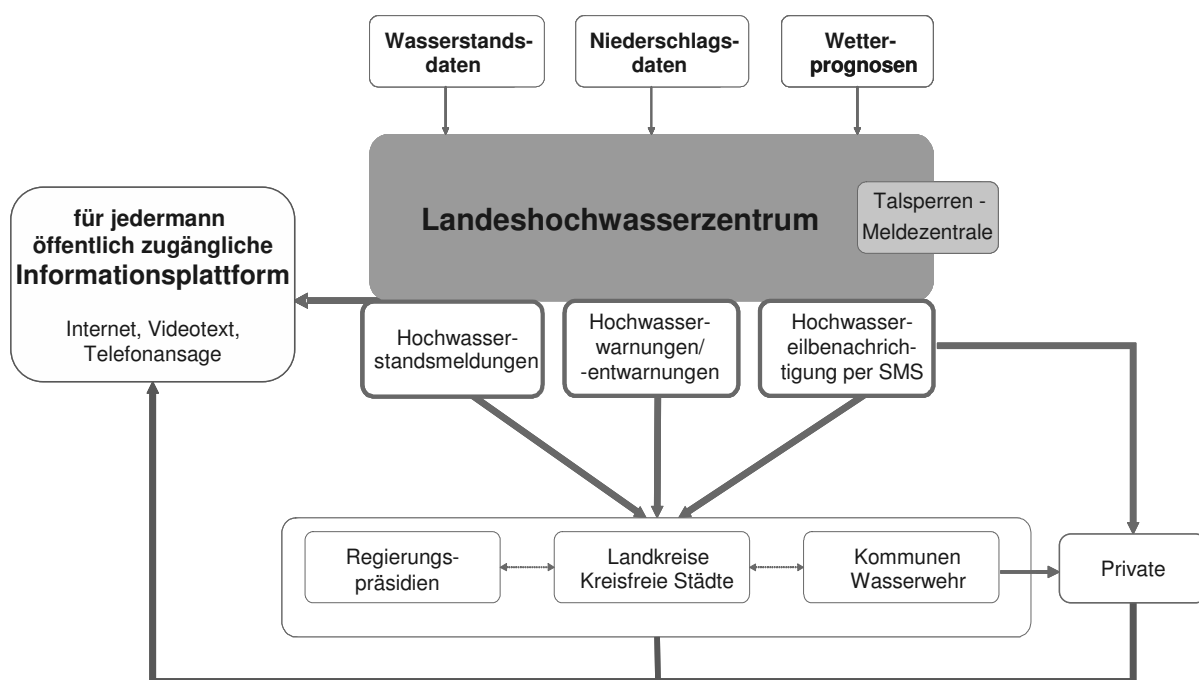


Abb. 3: Melde- und Informationswege der Hochwassernachrichten im Freistaat Sachsen.

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).

Hochwassernachricht		Flussgebiet							gesamt
		Elbestrom	Nebenflüsse der oberen Elbe	Schwarze Elster	Mulden	Weisse Elster	Spree	Lausitzer Neiße	
Hochwassereilbenachrichtigung	insgesamt	77	178	88	450	126	87	59	1065
	davon Dritte	0	27	5	183	10	4	12	241
Hochwasserstandsmeldungen		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.

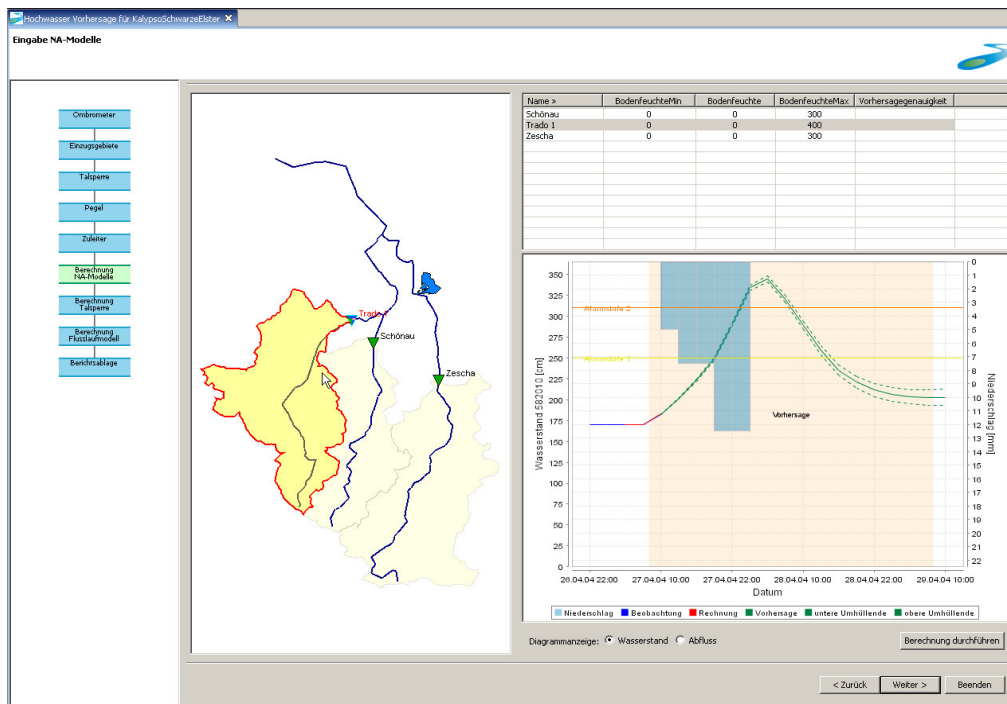


Abb. 4: Integriertes Hochwasservorhersagemodell der Schwarzen Elster in Oberfläche von KALYPSO-NA.

## 6. Frühjahrshochwasser 2006

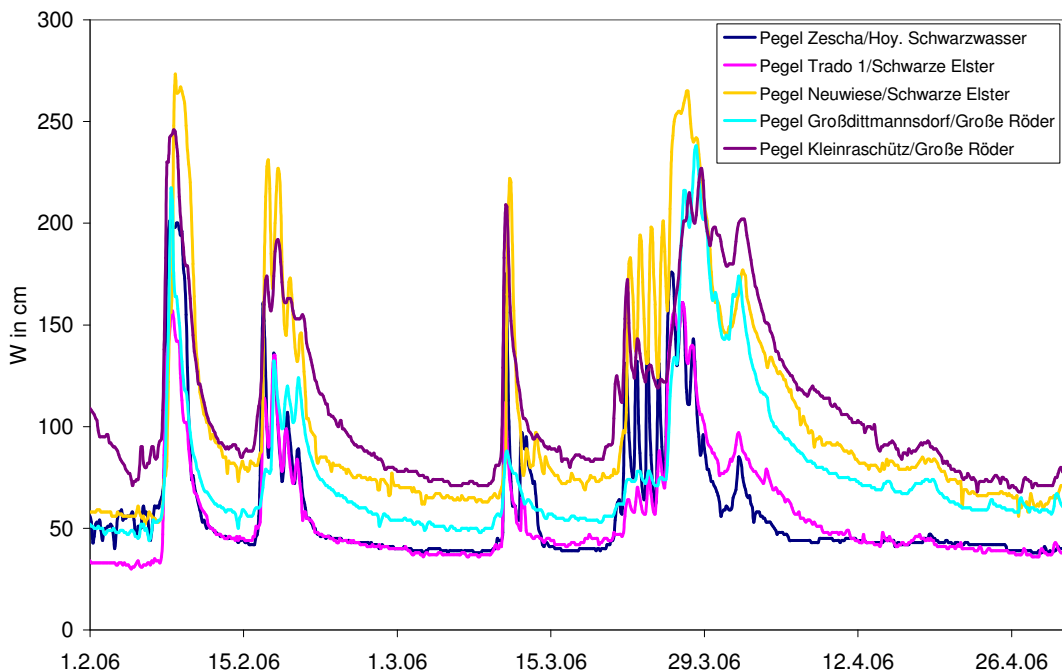
Für das Landeshochwasserzentrum war das Frühjahrshochwasser 2006 seit dem Hochwasser im August 2002 der schwierigste Einsatz. Einmal war die Hochwasserperiode, die sich vom Februar bis Anfang April erstreckte, ausgesprochen lang. Zum anderen war sie durch unterschiedliche Phasen (Eisstau, Schneeschmelze, 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 Eisaufläufe 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.



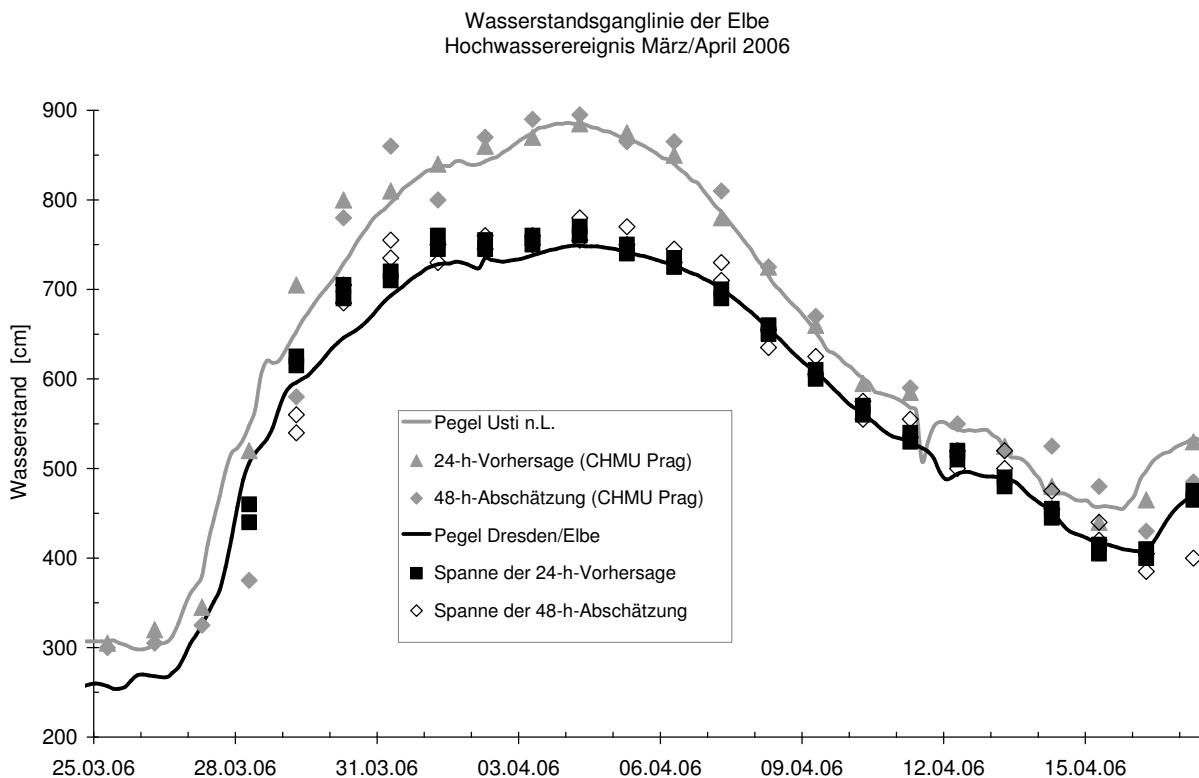
**Abb. 5:** Deichöffnung am Deich der Schwarzen Elster ca. 350 m unterhalb der Brücke Tätzschwitz (Foto: SMUL, 2006).



**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.

Pötzsch, 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](mailto:petra.walther@lfug.smul.sachsen.de)  
<http://www.umwelt.sachsen.de/lfug>