

## OPERATIONELLE HOCHWASSERVORHERSAGEN FÜR DAS EINZUGSGEBIET DES RHEINS IN DER SCHWEIZ

### OPERATIONAL FLOOD FORECASTING FOR THE SWISS RIVER RHINE BASIN

Therese Bürgi<sup>1</sup>

#### ZUSAMMENFASSUNG

Seit Mitte der 80er Jahre des letzten Jahrhunderts erstellt die Abteilung Hydrologie des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) Wasserstands- und Abflussvorhersagen für den Rhein bis Rheinfelden. Das BAFU arbeitet heute mit der dritten Generation von Vorhersagesystemen, nämlich mit dem Flood Early Warning System – FEWS, welches das gesamte Einzugsgebiet des Rheins bis Basel abdeckt. Die täglich gerechneten und veröffentlichten Vorhersagen erstrecken sich in stündlicher Auflösung über die nächsten 72 Stunden. Während Hochwassersituationen sind Abflussvorhersagen und Warnungen ein wichtiges Instrument für die lokalen Behörden, um rechtzeitig Vorsorgemassnahmen zu planen. An Hand von Fallbeispielen werden die Möglichkeiten und Grenzen der Abflussvorhersagen in einem komplexen hydrologischen Gebiet aufgezeigt, deren Verlässlichkeit diskutiert, sowie die Anforderungen an einen operationellen Dienst erläutert. Im Rahmen des Forschungsprojektes MAP D-Phase testet das BAFU zwischen Juni 2007 und November 2007 die neuesten numerischen Wettermodelle. Besondere Bedeutung kommt dabei dem probabilistischen Wettermodell COSMO-LEPS zu. Erste Erfahrungen mit hydrologischen Ensemble und Wahrscheinlichkeitsvorhersagen werden an Hand jüngster Ereignisse diskutiert.

**Keywords:** Hochwasservorhersage, Warnungen, Hydrologische Modelle

#### ABSTRACT

The Swiss Hydrological Survey of the Federal Office for the Environment (FOEN) has been drawing up operational water level and runoff forecasts for the River Rhine at Rheinfelden since the 1980s. FOEN is today working with the third generation of forecasting systems, with the Flood Early Warning System – FEWS. The forecasts cover the following 72-hour period and provide information for each hour. During flood situations these forecasts are of fundamental importance for local authorities in the planning of flood protection and emergency measures. With the illustration of recent events the challenges within a complex hydrological system will be shown, possibilities and limits of hydrological forecasts as well as their quality and requirements for an operational service with respect to warnings and alerts will be discussed. From June 2007 to November 2007 FOEN participates in the MAP D-Phase project within which the newest meteorological numerical forecasts, especially the probabilistic forecasts are tested. First experiences will be illustrated with some recent events.

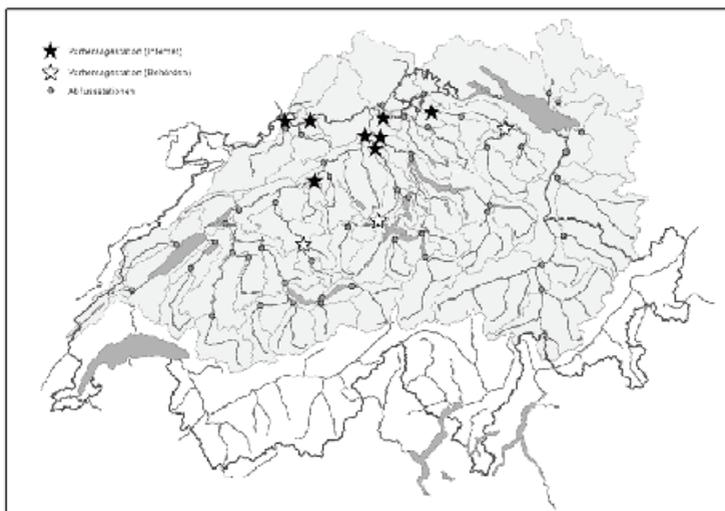
**Keywords:** flood forecast, warning, hydrological model

---

<sup>1</sup> Bundesamt für Umwelt, Abtl. Hydrologie, CH-3003 Bern (phone: +41 31 324 76 73; fax: +41 31 324 76 81; e-mail: therese.buergi@bafu.admin.ch)

## DAS VORHERSAGESYSTEM FEWS

Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) erstellt Wasserstands- und Abflussvorhersagen seit Mitte der 80er Jahre des letzten Jahrhunderts. Seit Juni 2007 steht beim BAFU die dritte Generation von Vorhersagesystemen im operationellen Einsatz, nämlich das Vorhersagesystem **Flood Early Warning System** - FEWS (Bürgi, 2002). Im Gegensatz zu den früheren Systemen deckt FEWS das gesamte Einzugsgebiet des Rheins bis Basel ab (Abb. 1). Es schliesst darin auch die Zuflüsse der Nachbarstaaten Österreich und Deutschland ein. Das gesamte Einzugsgebiet von rund 36'000 km<sup>2</sup> ist in 62 Teileinzugsgebiete unterteilt. Diese Unterteilung berücksichtigt die Komplexität des alpinen hydrologischen Raumes wie auch die Verfügbarkeit von Online-Daten. An jedem Gebietsausfluss steht eine automatische Messstation. Die Teilgebetsgrössen variieren zwischen etwa 100 km<sup>2</sup> und 3'300 km<sup>2</sup>, wobei das grösste Einzugsgebiet den Bodensee mit seinen rechts- und linksufrigen Zuflüssen einschliesst. Die mittlere Einzugsgebietsgrösse liegt bei ca. 550 km<sup>2</sup>. Bei vielen Einzugsgebieten ist das natürliche Abflussregime beeinträchtigt, sei es durch den Einfluss der Stromproduktion mit Speicherseen und Kraftwerksbetrieben oder durch die Steuerung der Ausflüsse der grossen Alpenrandseen. Die Beeinflussung durch Kraftwerke ist im Modell eher rudimentär abgebildet. Dagegen sind die Schemata zur Regulierung der Ausflüsse aus den Alpenrandseen in detaillierter Form im System eingebaut. Eine weitere Herausforderung an ein Vorhersagesystem im Alpenraum ist die geringe Dichte des meteorologischen Messnetzes.



**Abb. 1** Das Einzugsgebiet Rhein bis Basel ist in 62 Teileinzugsgebiete unterteilt. Für 8 Stationen werden die Abflussvorhersagen im Internet publiziert. Diese, plus zurzeit drei weitere Stationen stehen den Behörden für die Massnahmenplanung vor und während eines Hochwassers zur Verfügung.

**Fig. 1** The river basin Rhine up to Basel, divided into about 60 sub-basins. For 8 stations runoff forecasts are published on internet. These and the forecast of three more stations are delivered to local authorities as instrument for the planning of flood protection measures.

In FEWS ist das hydrologische Modell HBV-96 (Lindström et al., 1997) eingebaut. Zu dessen Nachführung bis zum Vorhersagezeitpunkt fliessen stündliche Abflussmesswerte des

hydrologischen Messnetzes der Schweiz und einiger Stationen der Nachbarstaaten Österreich und Deutschland sowie stündliche Daten des automatischen, meteorologischen Messnetzes von MeteoSchweiz ein. Für die Berechnung der Abflussvorhersage wird der direkte Modell-output des deterministischen Wettermodells COSMO7 von MeteoSchweiz eingesetzt. COSMO7 steht zweimal täglich um ca. 5 Uhr bzw. 17 Uhr MEWZ mit Startzeit um 1 Uhr bzw. 13 Uhr MEWZ zur Verfügung. Damit stehen im System FEWS für alle Stationen der 62 Teileinzugsgebiete Vorhersagen für die nächsten drei Tage zur Verfügung. Von 8 Stationen der Mittellandflüsse werden die Resultate als Vorhersagebulletins ins Internet gestellt. Bei niedrigen bis mittleren Abflussverhältnissen stehen diese von Montag bis Freitag gegen 9 Uhr zur Verfügung. Vor und während Hochwassersituationen werden die Vorhersagen mehrmals täglich, sowie auch an Wochenenden und Feiertagen neu berechnet.

Zur Massnahmenplanung vor und während Hochwasserereignissen besteht für Einsatzbehörden das Angebot eines Hochwasser-Vorhersage-Abonnements. Dieses umfasst die rechtzeitige Warnung vor einer Überschreitung eines gemeinsam definierten Abflusswertes an den gewünschten Stationen, die Belieferung mit allen Vorhersagen während eines Hochwassers, telefonische Beratung sowie die Entwarnung. Zusätzlich zum Vorhersagebulletin, welches den reinen Modell-Output wiedergibt, erhalten die Kunden eine Einschätzung der Niederschlagsvorhersage des COSMO7 und eine Interpretation der Abflussvorhersage. Die Einschätzung von COSMO7 beruht dabei auf einer Diskussion mit den Prognostikern von MeteoSchweiz. Die Zustellung der Vorhersagen erfolgt per Fax oder E-mail. Kombiniert mit diesen wird ebenfalls ein Vorhersage-SMS angeboten, das mit einem kurzen Text auf die aktualisierte Vorhersage im Internet verweist.

Die Vorhersagegüte der 62 Stationen ist unterschiedlich. In mittleren und kleineren Einzugsgebieten beeinträchtigen Gebietseigenschaften wie anthropogen beeinflusste Abflussregimes, Karst oder ein hoher Vergleitscherungsgrad die Güte der Vorhersagen. Zudem nimmt die Vorhersagbarkeit des Niederschlags ab, je kleiner die Gebietsgrösse ist. Um einen gewinnbringenden Einsatz und Nutzen von Abflussvorhersagen zu erzielen, diskutiert das Vorhersageteam gemeinsam mit den Kunden vor Abschluss eines Hochwasser-Vorhersage-Abonnements die Bedürfnisse wie auch die Möglichkeiten und Grenzen der Vorhersagen für die gewünschten Stationen. Die Vorhersagen der mittleren und kleineren Gebiete stehen wegen der grossen Unsicherheiten zurzeit nicht dem breiten Publikum zur Verfügung. Sie werden jedoch den kantonalen Fachstellen für Naturgefahren und Wasser angeboten. Ihre Kenntnisse zu den lokalen Verhältnissen, eine Schulung zu den Vorhersagen sowie der enge Kontakt mit dem Vorhersageteam verbessern die Interpretation und ermöglichen einen nutzbringenden Einsatz der Vorhersage und darauf aufbauend eine situationsgerechte Massnahmenplanung. Heute werden Hochwasservorhersagen an die Fachstellen von 8 Kantonen, die Nationale Alarmzentrale, die Rheinschifffahrtsdirektion sowie diverse Kraftwerksbetriebe und private Unternehmungen geschickt.

### **Vorhersagen im Rahmen von MAP D-Phase**

Während der Monate Juni 2007 bis November 2007 arbeitet die Abteilung Hydrologie mit im internationalen Projekt MAP D-Phase; D-Phase steht für **Demonstration of Probabilistic Hydrological and Atmospheric Simulation of flood Events in the Alpine region**. MAP D-Phase hat zum Ziel die Fortschritte der Forschung in der Meteorologie seit dem Projekt MAP im Jahre 1999 aufzuzeigen; insbesondere jene bezüglich der Vorhersage von Starkniederschlägen und der resultierenden Hochwasserereignissen in alpinen Gebieten. Erstmals testen Wetterdienste, Hydrologische Dienste und End-User gemeinsam die neuen Wetter- und die damit gekoppelten hydrologischen Modelle. Nebst dem COSMO7, welches beim BAFU die operationelle Abflussvorhersage antreibt, fliessen während MAP D-Phase verschiedene

weitere deterministische und probabilistische Wettermodelle (Tab. 1) in ein parallel laufendes Vorhersagesystem ein.

**Tab. 1:** Während MAP D-Phase beim BAFU im Test stehende Wettermodelle

**Tab. 1:** During MAP D-Phase FOEN tests following weather models

Modell	Modelltyp	Auflösung	Höchste Gipfel	Vorhersagezeitraum	Läufe/Tag	Eintreffen bei BAFU
COSMO7	Lokalmodell	7 km	> 3000 m	72 h	2 x	4 h später
COSMO2	Lokalmodell	2.2 km	> 4000 m	bis 30 h	8 x	6 h später
EZMWF	Globalmodell	25x40 km	~ 2500 m	240 h	2 x	11 h später
COSMO-LEPS	Ensemble Modell 16 Member	10 km	~ 3000 m	132 h	1 x	11 h später
SRNWP-PEPS	Ensemble Modell Bis 21 Member	7 km		30 – 72 h	4 x	

Das während MAP D-Phase produzierte BAFU-Bulletin enthält drei Grafiken unterschiedlicher Darstellungsarten. 1) Ein Vergleich der Abflussvorhersagen angetrieben mit den drei deterministischen Wettermodellen COSMO7, COSMO2 und EZMWF. 2) Ein Vergleich zwischen der operationellen Abflussvorhersagen angetrieben mit dem COSMO7 gegenüber den einzelnen Läufen des SRNWP-PEPS. 3) Eine Gegenüberstellung des operationellen Laufes mit den Vorhersagen angetrieben mit dem Ensemble Modell COSMO-LEPS, dargestellt als Perzentile. Das BAFU publiziert, wie alle andern Mitwirkenden, die Resultate auf der MAP D-Phase Visualisierungsplattform und informiert seine Kunden via E-Mail über allfällige Überschreitungen von Schwellenwerten.

Die umfangreiche Visualisierungsplattform, auf welcher die Resultate einer Vielzahl von meteorologischen und hydrologischen Modellen publiziert sind, kann jederzeit eingesehen werden. Die Vorhersagedienste wie auch die Empfänger der Vorhersagen werden mit einer Fülle von neue Produkte und neuen Herausforderungen konfrontiert. Aufbauend auf den Feedbacks von den Kunden, den gewonnen Erfahrungen während abgelaufener Ereignisse und den Auswertungen der im Rahmen von MAP D-Phase erstellten Vorhersagen, werden die Vorhersageprodukte weiterentwickelt.

## WARNTÄTIGKEIT DES BAFU IN DEN MONATEN JUNI 2007 BIS AUGUST 2007

Der Sommer 2007 ist laut MeteoSchweiz (MeteoSchweiz, 2007) von einer intensiven Niederschlagsstätigkeit geprägt. Im Juni 2007 bringt eine ungewöhnlich lang anhaltende Gewitterlage mit mehreren Unwettern in verschiedenen Regionen verheerende Hochwasser. Auf einen regenreichen Juli folgen anfangs und Ende August massive Unwetter mit enormen Regenmengen, die zu Rekordabflüssen an verschiedenen BAFU-Messstationen führen. Wie können solche Ereignisse vom Vorhersagesystem FEWS erfasst bzw. vorhergesagt werden? Wo liegen die Grenzen und wie präsentiert sich die Warntätigkeit des BAFU für seine Kunden?

Das BAFU hat für 11 Stationen des Vorhersagesystem FEWS mit den Fachstellen von 8 Kantonen Vereinbarungen für Hochwasserwarnungen abgeschlossen. Für jede dieser Stationen erfolgt ein Weckruf, d.h. eine Hochwasservorhersage, an die betreffenden Kantone sobald in der Vorhersageperiode der vereinbarte Schwellenwert überschritten wird. Während der drei Monate Juni 2007 bis August 2007 verschickt das BAFU insgesamt 30 Warnungen, davon sind 11 als Fehlalarme zu verzeichnen. Für 16 gemessene Überschreitungen der ver-

einbarten Schwellenwerte wird die rechtzeitige Warnung verpasst. Die Tabelle 2 zeigt, dass 8 dieser verpassten Warnungen den mittelgrossen Einzugsgebieten Emme-Emmenmatt (443 km<sup>2</sup>) und Kleine Emme-Littau (447 km<sup>2</sup>) zuzuordnen sind. Bei diesen Ereignissen handelt es sich um lokale Gewitter grösserer Intensität, für welche die zeitliche und örtliche Wettervorhersage in einem alpinen Raum sehr schwierig ist und höchstens mit Kurzfrist-Vorhersagen erfasst werden könnte. Bei vier von diesen acht verpassten Ereignissen steigt in der Folge des intensiven Niederschlags der Abfluss des Gewässers derart an, dass es auch bei den unterliegenden Stationen Aare-Murgenthal und Reuss-Mellingen zu Überschreitungen der Schwellenwerte kommt.

**Tab. 2:** Zusammenstellung der Ereignisse von Juni 2007 bis August 2007: Q-Warn entspricht den vereinbarten Schwellenwerten für die Warnung. Korrekte Warnungen (ohne Schattierung), Fehlalarme (dunkelgrau schattiert) und verpasste Ereignisse (hellgrau schattiert).

**Tab. 2:** Event List from June 2007 to August 2007: Q-Warn indicates the agreed threshold for warnings. Correct warnings (without shade), false alarms (dark grey shaded) and missed events (light grey shaded).

Datum Q-Warn		Emme 100	Murgenthal 600	Brugg 945	Kl.Emme 300	Mellingen 400	Halden 300	Andelf. 300	Rheinf. 1725
1/2.6.07	Gem.	108	644	----	----	300	81	97	1753
V:1.06.07/09	Vorh.	107	606	----	----	538	300	321	2360
9.6.07	Gem.	103	----	----	----	----	----	----	----
	Vorh.	keine							
12.6.07 / 01	Gem.	137	----	----	----	----	----	----	----
V:11.6.07/09	Vorh.	58							
12.6.07 / 22	Gem.	143	----	----	----	----	----	----	----
V:12.6.07/09	Vorh.	51							
15.6.07	Gem.	103	----	----	----	----	----	----	----
V:15.6.07/09	Vorh.	54							
21.6.07	Gem.	22	717	830	25	282	25	61	1944
V:19.6.07/09	Vorh.	---	900	1389	---	455	---	---	2592
V:20.6.07/09	Vorh.	146	817	881	447	682	---	452	2647
V:20.6.07/19	Vorh.	22	565	612	55	285	716	743	2228
4.7.07	Gem.	217	708	----	----	445	----	----	2190
V:3.7.07/09	Vorh.	81	517			243			1647
9.7.07	Gem.	123	740	----	----	----	----	----	2161
V:9.7.07 / 09	Vorh.	66	684						1800
21/22.7.07	Gem.	293	752	----	324	485	---	65	2009
V:20.7.07/09	Vorh.	51	467		61	221		350	1845
24.7.07	Gem.	140	742	----	----	----	----	----	2067
V:23.7.07/09	Vorh.	50	600						1563
8/9.8.07	Gem.	481	1254	1386	548	766	812	787	4095
	Vorh.								
29./30.8.07	Gem.	----	784	961	----	----	----	230	2311
	Vorh.		770	908				340	2438

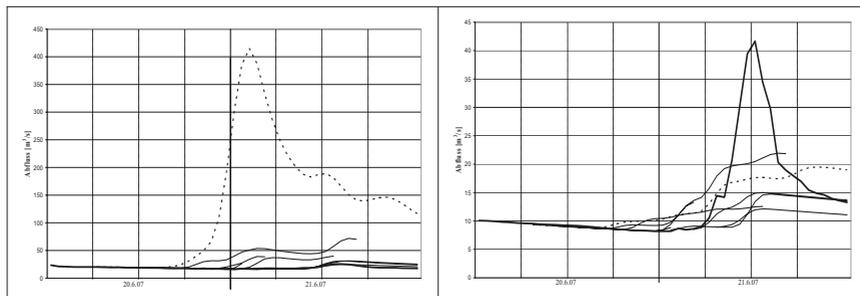
Ebenso stehen die Fehlalarme, welche grösstenteils in denselben Gebieten verzeichnet werden, im Zusammenhang mit der sommerlichen konvektiven Wetterlage. In diesen Fällen werden jeweils grössere Niederschlagsmengen für die entsprechenden Gebiete vorausgesagt. Die eigentliche Entladung findet schliesslich nicht in diesen Gebieten statt. Der Fehlalarm vom 21. Juni 2007 und das Grossereignis vom 8./9. August 2007, vor welchem rechtzeitig gewarnt wird, werden beispielhaft in den nächsten Abschnitten näher erläutert.

## FEHLALARM FÜR DEN 21. JUNI 2007

Die Schweiz liegt zwischen einem kräftigen atlantischen Tief mit Kern bei Irland und einem flachen Hoch mit Kern über dem Baltikum. Eine mässige Strömung aus Südwest führt sehr warme und feuchte Gewitterluft heran. Am Abend des 20. Juni 2007 und in der ersten Nachthälfte bilden sich heftige Gewitter; zuerst in den westlichen Voralpen, dann im Berner Mittelland und schliesslich in den Schwyzer und Glarner Voralpen. Die zweite Nachthälfte verläuft ruhig, allerdings bleibt die Luft schwülwarm. Am frühen Morgen bildet sich über der Genferseeregion eine markante Gewitterfront, welche in weniger als vier Stunden über das Mittelland bis zum Bodensee zieht (MeteoSchweiz, 2007).

Im Vorfeld dieser Gewitternacht warnt MeteoSchweiz am Vormittag und Nachmittag des 20. Juni 2007 vor heftigen Gewittern. Die Schwerpunkte werden für den Jura, die Nordalpen und die Nordostschweiz angekündigt. Zu beiden Zeitpunkten der Meteo-Warnung ist eine präzisere Lokalisierung der später erfolgenden Gewitter nicht möglich. Die Meteorologen verweisen deshalb für die genaueren Angaben auf die kurzfristig ausgegebenen Gewitterwarnungen, die so genannten „Flash Orage“.

Der 00-UTC-Lauf des COSMO7 vom 20. Juni 2007 prognostiziert grössere Niederschlagsmengen im Raum Emme / Kleine Emme / Napf für den späteren Nachmittag, sowie für das Gebiet der Thur in der Nacht auf den 21. Juni 2007. Die Berechnung der Abflussvorhersage mit FEWS löst, im Gegensatz zur meteorologisch grossräumig gehaltenen Aussage, einzugsgebiets-scharf Warnungen für das Gebiet der Emme bis Emmenmatt, der Kleinen Emme bis Littau und für die Thur bis Andelfingen aus. Entsprechend werden die lokalen Fachstellen informiert. Zusätzlich zum Bulletin mit dem reinen Modell-Output erhalten diese die Information darüber, dass die prognostizierten Niederschläge des COSMO7 als zu hoch angenommen werden können, dass allerdings mit lokalen Gewittern gerechnet werden muss. Ebenfalls wird auf die Vorhersagen aus COSMO-LEPS hingewiesen, welche deutlich tiefere Abflüsse aufweisen.

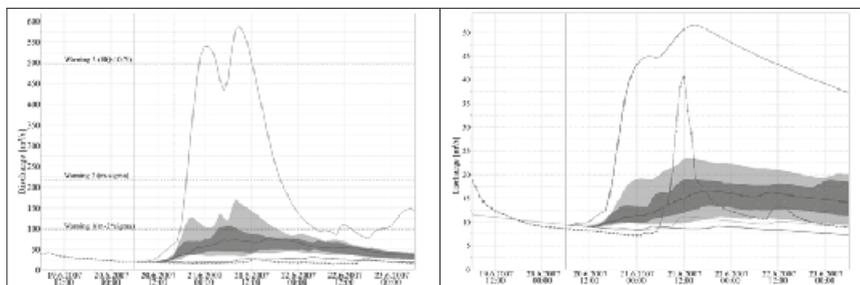


**Abb. 2:** Gemessene Abflüsse (fett), COSMO7-Vorhersagen (gestrichelt) und COSMO2-Vorhersage (dünn) für die Kleine Emme-Littau (links) und die benachbarte Wigger-Zofingen (rechts) vom 20.6.07. In der kleinen Emme ist der prognostizierte Abfluss überschätzt in der Wigger unterschätzt.

**Fig. 2:** Measured runoffs (bold), COSMO7-forecasts (dotted) combined with COSMO2-forecasts (fine) for Kleine Emme-Littau (left) and the neighbour sub-basin Wigger-Zofingen (right) on 20.6.07. For the sub-basin of Kleine Emme the forecast driven by COSMO7 overestimates whereas it is underestimated for the Wigger.

Abbildung 2 zeigt die sehr hohen prognostizierten Abflüsse für die Stationen Kleine Emme-Littau und Wigger-Zofingen, zwei benachbarte Gebiete. Dargestellt sind die Abflussvorhersagen, welche am 20. Juni 2007 vormittags mit COSMO7 berechnet werden. Sowie zusätzlich alle für denselben Tag vorhandenen COSMO2-Vorhersagen. Deutlich kommt die grosse Überschätzung bei Littau und im Gegensatz dazu die Unterschätzung bei Zofingen zum

Ausdruck. Die kurzfristigeren, räumlich besser aufgelösten und häufiger aktualisierten COSMO2-Vorhersagen zeigen bei Littau schon früh, dass kaum mit einem ansteigenden Abfluss gerechnet werden muss. Den steilen und schnell ansteigenden Abfluss in der Wigger wird jedoch auch mit den COSMO2-Vorhersagen unterschätzt. Wird die Wahrscheinlichkeitsvorhersage von COSMO-LEPS (Abb. 3) betrachtet, so überschätzen auch diese grösstenteils den Abfluss für die Kleine Emme. Dieser pendelt um die untere umhüllende Kurve des Ensembles. Dagegen ist der Abfluss der Wigger deutlich innerhalb des Ensemble-Spreads von COSMO-LEPS, wenn auch nur mit einer kleinen Wahrscheinlichkeit eine so hohe Abflussspitze erwartet werden kann. Die räumliche Gitterauflösung des COSMO7 wie auch von COSMO-LEPS ist für Wetterphänomene wie Gewitter zu grob. Die feine Auflösung von COSMO2 und die hohe Verfügbarkeit von neuen Vorhersageläufen ermöglichen ein häufigeres aufdatieren der hydrologischen Vorhersage und damit ein Anpassen der Abflussvorhersagen an das ablaufende Ereignis. Welche Wettermodelle sich jedoch für die Vorhersage bestimmter Ereignisse und damit für die Abflussvorhersage am besten eignen, ist Gegenstand weiterer Untersuchungen.



**Abb. 3:** COSMO-LEPS-Vorhersagen vom 20.6.07 05 UTC für die Kleine Emme-Littau (links) und Wigger-Zofingen (rechts).

**Fig. 3:** COSMO-LEPS-forecasts of 20.6.07 05 UTC for Kleine Emme-Littau (left) and Wigger-Zofingen (right).

## DAS EREIGNIS VOM 8./9. AUGUST 2007

Ein abgeschlossenes Höhentief über dem westlichen Alpenraum führt in der Höhe sehr feuchte Luftmassen aus südlicher, später südöstlicher Richtung zur Schweiz. Diese Luft wird im Zusammenhang mit einer Tiefdruckbildung über Norditalien angehoben und gleitet zudem auf kühlere Luft auf, die mit nordwestlichen Winden in Bodennähe auf der Alpennordseite einfließt. Dies führt zu mehrstündigen, teils sehr intensiven Niederschlägen. Grosse Niederschlagsmengen fallen im Jura, im Mittelland und im Raum Zürich. Die Messstationen verzeichnen Regenmengen wie sie alle 30 bis 50 Jahre vorkommen (MeteoSchweiz, 2007).

Die Meteorologen warnen wegen des markanten Luftmassenwechsels schon ab dem 6. August 2007 in regelmässigen Abständen vor Starkniederschlägen. Die Gefahrenstufe wechselt in der Folge von gelb am Morgen des 8. Augusts 2007 über orange am Mittag bis zur Gefahrenstufe rot am Abend. Die Warnungen werden für das westliche Mittelland und den zentralen Alpennordhang ausgegeben.

Die anhaltenden Niederschläge führen in vielen Kantonen zu kritischen Abflusssituationen und zu Hochwasserschäden. Das Messnetz des BAFU registriert an 15 Messstationen neue Rekordwerte. Am deutlichsten übertroffen wird der bisherige Höchstwert an der Aare in Murgenthal. Weitere Rekordabflüsse verzeichnen die Emme, die Aare unterhalb der Emme-

mündung bis zum Rhein, die Birs und die Ergolz. Der Wasserstand des Bielersees erreicht seit der zweiten Juragewässerkorrektur einen neuen Höchststand.

Die Abflussvorhersagen vom 8. August 2007 Vormittag zeigen hohe bis extreme Abflüsse für die Emme, die Aare, die Kleine Emme und die Reuss sowie in Folge des Routings für den Rhein bei Rheinfelden. Die Warnschwellen werden an den jeweiligen Stationen teils deutlich überschritten. Der Vorhersagedienst informiert die entsprechenden Naturgefahrenfachstellen des Mittellandes. Er vermerkt auf dem erläuternden Beilageblatt, dass die Vorhersagen für die Aare auf einem konstant bei  $500\text{m}^3/\text{s}$  angenommenen Ausfluss aus dem Bielersee basieren, und dass aufgrund der prognostizierten Niederschläge des COSMO7 im Gebiet unterhalb des Bielersee grosse Abflüsse generiert werden. Wegen der vorhergesagten hohen Abflüsse und des einsetzenden Regens werden mit dem 00-Uhr-UTC-Lauf des COSMO7 weitere Vorhersagen gegen 11 Uhr und 15 Uhr sowie um 19 Uhr mit dem neusten COSMO7-Lauf von 12 Uhr UTC gerechnet. Mit der Abendvorhersage erfolgt zusätzlich die Warnung für das Thurgebiet.

Die im Mittelland anhaltend intensiven Niederschläge lassen die Flüsse rascher ansteigen als in den Vorhersagen gerechnet. Der Vorhersagedienst verfolgt daher die Situation erstmals auch während der ganzen Nacht. Er erteilt an verschiedene Fachstellen und Einsatzkräfte Auskünfte zur aktuellen Lage und erläutert an Hand der neusten Berechnungen die Weiterentwicklung. Am 9. August 2007 wird im 2-Stunden-Intervall gerechnet.

#### Situation in der Aare

Während des Grossereignisses im August 2007 werden unter anderem auch in der Emme und der Aare Rekordabflüsse registriert. Die Abflüsse für die Aare bei Murgenthal (Abb. 4) bilden sich unter Berücksichtigung der entsprechenden Fliesszeiten aus dem Ausfluss aus dem Bielersee, dem Zufluss der Emme und dem im Zwischeneinzugsgebiet generierten Zufluss. Bei der Station Murgenthal liegt die kritische Abflusshöhe bei  $850\text{m}^3/\text{s}$ . Wird diese überschritten, so muss in unterliegenden Siedlungsgebieten mit Überschwemmungen gerechnet werden. Der Ausfluss aus dem Bielersee wird gesteuert. Ein Regulierreglement legt fest, wie das Wehr zu bedienen ist. Es ist das Ergebnis vieler Kompromisse zwischen den Interessen der Gewässernutzung (Schifffahrt, Wasserkraft, Fischerei und Freizeit) und jenen des Bevölkerungs- bzw. Umweltschutzes. Ziel ist es, die Seestände innerhalb den in den Reglementen definierten Wasserständen zu halten. Zwischen den betroffenen Kantonen ist vereinbart, den Ausfluss des Bielersees während Hochwassersituation so zu steuern, dass die  $850\text{m}^3/\text{s}$  bei Murgenthal nach Möglichkeit nicht überschritten werden. Die aktuelle Steuerung des Bielersee-Ausflusses während Hochwasser basiert auf dem Regulierreglement, den aktuellen hydrologischen Beobachtungen, insbesondere wegen der schnellen Fliesszeiten auf jenen der Emme bei Emmenmatt, sowie auf den Wettervorhersagen.



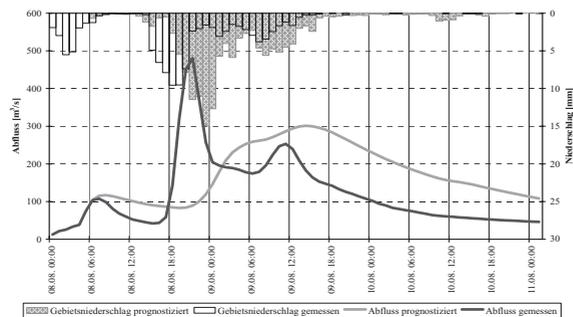
**Abb. 4:** Situationsplan für das Einzugsgebiet der Emme und den Zusammenfluss mit der Aare. Die Regenmesser sind als Punkte, die Abflussmessstationen als Dreiecke dargestellt.

**Fig. 4:** Position plan of Emme and the confluence with the river Aare. The signatures for rain gauges are circles that ones for runoff gauges are triangles.

Bei der Analyse der Vorhersagen und der gemessenen Abflüsse für die Emme und die Aare wird deutlich, wie präzise die einzelnen Glieder der ganzen Vorhersagekette mit einander verknüpft sein müssen, um eine rechtzeitige Massnahmenplanung zu ermöglichen.

### Analyse des Gebietsniederschlags für das Teileinzugsgebiet Emme

Der interpolierte gemessene Gebietsniederschlag für das Einzugsgebiet der Emme-Emmenmatt basiert auf den Messungen von Regenmessern (Abb. 4) teils weit ausserhalb des Einzugsgebietes. Die Summe der in FEWS interpolierten Gebietsniederschläge während der intensivsten Regenzeit von 14:00 Uhr bis 20:00 Uhr beträgt etwa 45 mm. Demgegenüber steht die aufsummierte prognostizierte Niederschlagsmenge von ca. 70 mm, wobei die intensivsten Niederschläge für die Stunden zwischen 17:00 Uhr und Mitternacht vorhergesagt sind. Die Abbildung 5 zeigt, dass der gemessene Abfluss deutlich höher und steiler ist als der prognostizierte, obwohl die vorhergesagten Niederschlagsintensitäten wie auch die Gesamtniederschlagssumme höher sind als die gemessenen. Der steile und hohe Anstieg des Emmeabflusses lässt vermuten, dass wesentlich grössere Niederschlagsmengen gefallen sind, als mit den in FEWS zur Verfügung stehenden online-Stationen berechnet werden kann. Der Gebietsniederschlag ist eine wichtige Grösse für die Modelleichung wie für die Berechnung der aktuellen Speicherzustände im operationellen Vorhersagesystem. Das Beispiel zeigt, dass mit dem aktuellen Messnetz lokale, intensive Niederschläge zuwenig genau erfasst werden können.



**Abb. 5:** Einzugsgebiet Emme-Emmenmatt. Vergleich zwischen gemessenem und mit COSMO7 vorhergesagtem Niederschlag sowie gemessenem und vorhergesagtem Abfluss.

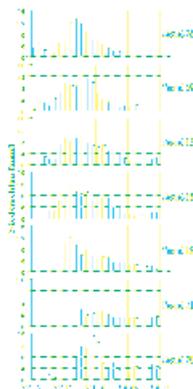
**Fig. 5:** Sub-basin Emme-Emmenmatt. Comparison of measured and in COSMO7 forecasted precipitation as well as measured and forecasted runoff.

Der Vergleich des gemessenen und in COSMO7 vorhergesagten Niederschlagsverlaufes hat gezeigt, dass die Phase des intensivsten Niederschlages vier bis fünf Stunden später stattfindet als im Wettermodell vorhergesagt wird. Die Spitze des vorhergesagten Abflusses ist wegen der Unterschätzung des Niederschlags und seiner Intensität bedeutend tiefer und infolge des zeitlich später angekündigten Niederschlags um fast 12 Stunden verzögert.

Ein Vergleich (Abb. 6) mit den verschiedenen Läufen des COSMO2 zeigt, dass nur der Lauf von 06 Uhr UTC ähnliche Niederschlagshöhen wie COSMO7 für den Hauptniederschlag vorhersagt. Im Lauf von 06 Uhr UTC stimmt zudem die zeitliche Verteilung der grossen Intensitäten besser mit derjenigen der gemessenen Werte überein. Demzufolge hätte mit den später verfügbaren Läufen des COSMO2 die eingetretene Abflussspitze ebenfalls nicht mit genügender Genauigkeit vorhergesagt werden können, was insbesondere die Abflusshöhe und das zeitliche Eintreffen der Spitze betrifft.

**Abb. 6:** Vergleich der Niederschlagsvorhersagen im Gebiet der Emme bei Emmenmatt für die verschiedenen COSMO2-Läufe mit dem 00-UTC-Lauf des COSMO7 für den 8.8.07 12h bis 9.8.07 12h.

**Fig. 6:** Comparison of precipitation forecasts for the sub-basin Emme at Emmenmatt of the different runs of COSMO2 with the 00-UTC-run of COSMO7 for the 8.8.07 12h until 9.8.07 12h.



## Seeregulierung Bielersee

Extreme Abflüsse werden auch für die Station bei Murgenthal vorhergesagt und registriert. Diese überschreiten die kritische Marke von  $850 \text{ m}^3/\text{s}$  deutlich. Die Abbildung 7 zeigt die Abflusskurven für den Ausfluss aus dem Bielersee bei Brügg, den Zufluss der Emme bei Emmenmatt sowie den Rekordabfluss der Aare bei Murgenthal. Die Drosselung des Abflusses bei Brügg ist eindrücklich sichtbar.



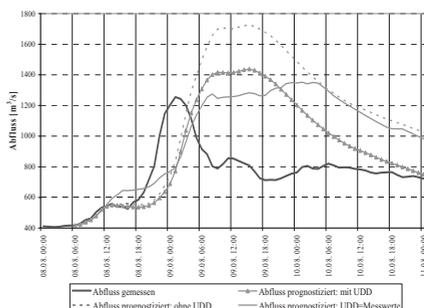
**Abb. 7:** Während Hochwasser wird der Ausfluss des Bielersees bei Brügg kurzfristig entsprechend dem Zufluss der Emme bei Emmenmatt gedrosselt.

**Fig. 7:** During flood situations the outflow of the Bielersee at Brügg is reduced at short-term according to the confluence of Emme at Emmenmatt.

Solche anthropogenen Beeinflussungen des Abflusses können die Qualität der Vorhersagen von unterhalb der Regulierung liegenden Stationen stark beeinflussen. Demzufolge sind gut eingespielte Kommunikationsabläufe zwischen den regulierenden Behörden und dem Vorhersagedienst in Hochwasserfällen entscheidend. Daneben sollte das Vorhersagesystem für die verschiedenen Steuerungsoptionen gerüstet sein. Im Vorhersagesystem FEWS sind deshalb die Regulierschemata der Seen eingebaut. Die Option „User Defined Discharge“ kurz „UDD“ ermöglicht zusätzlich die manuelle Eingabe, der von den Behörden geplanten ausserordentlichen Seeausflüsse. Während Hochwassersituationen sind möglichst genaue Steuerangaben insbesondere dann wichtig, wenn kurzfristig von den vereinbarten Schemata abgewichen wird. Die Auswirkungen der unterschiedlichen Reguliermassnahmen auf die Vorhersagen bei Murgenthal zeigt die Abbildung 8 an Hand der Vormittagsvorhersage vom 8. August 2007 für Murgenthal.

**Abb. 8:** Vorhersage Aare-Murgenthal vom 8.8.7 09: Vergleich zwischen der offiziellen Abflussvorhersage mit konstant gehaltenem Ausfluss Bielersee bei 500 m<sup>3</sup>/s (mit UDD), der Simulation unter Verwendung des eingebauten Regulierschemas (ohne UDD) sowie einer Simulation basierend auf gemessenen Ausflüssen aus dem Bielersee (UDD=Messwerte).

**Fig. 8:** Forecast for Aare-Murgenthal from 8.8.07 09: Comparison between the official forecast under the assumption of a constant outflow of Bielersee at 500 m<sup>3</sup>/s (mit UDD), the simulation calculated with the implemented regulation schema at Bielersee (ohne UDD) and simulation calculated with the measured outflow at Bielersee (UDD=Messwerte).



Die Simulation basierend auf dem Regulierschema weist deutlich höhere Abflüsse aus als jene mit den gemessenen Bielerseeausflüssen. Diese wiederum entspricht in der Höhe recht genau der effektiv bei Murgenthal gemessenen Abflussmenge, allerdings ist in der Simulation die Spitze einige Stunden später angekündigt als sie tatsächlich eingetreten ist. Was sich mit der oben in Abbildung 5 erwähnten Tatsache erklären lässt, dass der Hauptniederschlag früher fällt als im Wettermodell des 00-UTC-Laufes von COSMO7 angekündigt ist. Dass der Abfluss, simuliert mit den gemessenen Bielerseeausflüssen, im Modell so lange so hoch bleibt, kann nebst den Unsicherheiten der Wettervorhersage auch noch auf jene des hydrologischen Modells hinweisen.

Für die Steuerung des Bielerseeausflusses, während solch extremen Situationen, sind für die Einsatzbehörden, wegen der schnellen Reaktions- und Fließzeiten, zeitlich und in der Abflusshöhe exakte Vorhersagen für den Zufluss der Emme und den Abfluss der Aare entscheidend. Auf der anderen Seite sind für verlässliche Vorhersagen bei einer Station wie Murgenthal einerseits zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Niederschlagsmessungen und Niederschlagsvorhersagen wichtig, andererseits sind für den Vorhersagedienst die Angaben zu den geplanten Ausflüssen aus dem Bielersee notwendig. Ein häufiges Aufdatieren der Vorhersagen an die neusten Steuermassnahmen und an das aktuelle Niederschlags- und Abflussgeschehen verbessern die Vorhersage.

## SCHLUSSFOLGERUNGEN

Das Vorhersagesystem FEWS läuft erst seit einigen Monaten im operationellen Betrieb. Ein erster Testfall bestand das System schon während des Hochwassers im August 2005 – damals im Parallelbetrieb. Mit dem Augustereignis 2007 ist für das System, wie auch für den Vorhersagedienst eine weitere Bewährungsprobe bestanden. Die Abdeckung des gesamten Rheineinzugsgebietes, die Integration der Alpenrandseen sowie die umfassenden Möglichkeiten zur Datensichtung unterstützen die Prognostiker bei der Interpretation des ablaufenden Ereignisses und sind wichtige Hilfsmittel in den Diskussionen mit den Kunden.

Während des Sommers 2007 entladen sich verschiedentlich grosse Gewitter im Einzugsgebiet des Rheins und damit im Berechnungsgebiet von FEWS. Einige führen zu immensen Sachschäden. Die Ausdehnung dieser Ereignisse ist allerdings meistens kleiner, als die Gebietsunterteilung von FEWS und können damit weder erfasst noch vorhergesagt werden. Konvektive Niederschläge werden im COSMO7-Modell zwar angedeutet. Doch ist die Auflösung dieses Modells für die exaktere Lokalisierung von Gewittern, die Bestimmung deren Niederschlagsintensitäten und des zeitlichen Verlaufes nicht genügend. Daher ist mit

der aktuellen Konfiguration von FEWS das Risiko für Fehlalarme bzw. verpasste Ereignisse bei Gewitterlagen gross.

Dagegen hat sich FEWS für grossräumige Ereignisse bewährt. Die Kunden des BAFU werden für alle Stationen rechtzeitig gewarnt. Die Höhe bzw. das zeitliche Eintreffen der Spitze kann jedoch nicht überall zufrieden stellend genau vorhergesagt werden. Ebenso sind Schwachstellen bezüglich der Geschwindigkeit und Dynamik aufgedeckt. Das hydrologische Vorhersagesystem stösst insbesondere in kleinen und mittleren Einzugsgebieten mit der heutigen Konfiguration an die Grenzen der für die Fachstellen und Einsatzkräften benötigten Genauigkeit zur Einsatzplanung.

Die ersten Erfahrungen, die während MAP D-Phase mit den neusten meteorologischen Vorhersagemodellen gesammelt werden, stimmen positiv. Insbesondere eine Kopplung des hydrologischen Systems mit dem Ensemble-Vorhersagemodell COSMO-LEPS ist viel versprechend und wird von den Kunden positiv aufgenommen. Ermöglicht werden damit nicht nur mittelfristige Vorhersage über 3-5 Tage, sondern sie bilden vor allem ein wertvolles Hilfsmittel zur besseren Einordnung der deterministischen Vorhersagen. Die Vorteile des häufig aufdatierten Modells COSMO2 können noch nicht vollständig beurteilt werden. Weitere Untersuchungen und Analysen gemeinsam mit den Kunden sind dazu noch nötig.

Die Erkenntnisse aus den Ereignissen des Sommers 2007, die Erfahrungen mit den neuen Produkten der Wetterdienste und Kontakte mit den Kunden zeigen, dass die Anforderungen an den hydrologischen Vorhersagedienst weiter zunehmen werden. Vermehrte Anstrengungen sind notwendig, um für kleinere Einzugsgebiete zuverlässige Vorhersagen zu erstellen. Aus organisatorischer Sicht ist es wichtig, während Hochwasserereignissen den Vorhersagedienst rund um die Uhr in Betrieb zu halten. Dies alles verlangt jedoch entsprechende personelle Ressourcen. Das Ereignis vom 8. August 2007 illustriert einmal mehr wie wichtig institutionalisierte und eingespielte Kommunikationswege zwischen den involvierten Fachstellen und Einsatzorganen sind. Regelmässige Kontakte unter den Behörden und eine kontinuierliche Schulungen aller Beteiligten verbessern die Interpretation der Vorhersagen und ermöglichen eine situationsgerechte Massnahmenplanung.

## LITERATUR

- Bürgi, Th. 2002: Operational flood forecasting in mountainous areas (Ed. Spreafico M., Weingartner R.) International Conference on Flood Estimation. March 6-8, 2002, Bern, Switzerland. Proceedings. Report no II-17 of the International Commission for the Hydrology of the Rhine basin: 397-406.
- Lindström, G. et al. (1997): Development and test of the distributed HBV-96 hydrological Model. In: Journal of Hydrology 201, p 272-288, Elsevier.
- MeteoSchweiz 2007: Witterungsberichte Juni 2007, Juli 2007, August 2007