IFKIS-Hydro Sihl : ein operationelles Hochwasservorhersagesystem für die Stadt Zürich und das Sihltal

Autor(en): **Zappa, M. / Jaun, S. / Badoux, A.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **102 (2010)**

Heft 3

PDF erstellt am: **28.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-941666

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

IFKIS-Hydro Sihl: Ein operationelles Hochwasservorhersagesystem für die Stadt Zürich und das Sihltal

M. Zappa, S. Jaun, A. Badoux, J. Schwanbeck, N. Addor, K. Liechti, I. Roeser, A. Walser, D. Viviroli, S. Vogt, M. Gerber, J. Trösch, R. Weingartner, M. Oplatka, G.R. Bezzola, J. Rhyner

Zusammenfassung

Als Folge der Hochwasserabflüsse der Shil im August 2005 wurden hydrologische Studien durchgeführt die zeigen, dass am Standort Zürich Hochwasserereignisse mit Spitzen von 310 bis 600 m^3s^{-1} möglich sind. Aufgrund dieser Erkenntnisse beschloss das Amt für Abfall, Energie und Luft AWEL, ein regionales Hochwasserwarnsystem zur Verbesserung der Hochwassersicherheit der Stadt Zürich und des Sihltals zu realisieren. Das Kernstück des Hochwasservorhersagesystems für die Sihl ist das hydrologische Modell PREVAH. Zusammen mit dem hydraulischen Modell FLORIS bildet es die Modellkette für das auf die Stadt Zürich massgeschneiderte Warnsystem. Die für die Initialisierung des hydrologischen Modells erforderlichen meteorologischen und hydrologischen Daten werden aus einer gemeinsamen Datensammlung entnommen, die im Rahmen des Projekts IFKIS-HYDRO lanciert wurde. Um eine nützliche Vorwarnzeit zu erhalten (z.Z. bis zu 5 Tage), wird das hydrologische Modellsystem mit Wetterdaten aus verschiedenen atmosphärischen Vorhersagemodellen angetrieben. Für die hier präsentierten Simulationen (Juni 2007 bis Dezember 2009) wurden Daten des probabilistischen COSMO-LEPS bzw. des deterministischen COSMO-7 verwendet. Zur gründlichen Analyse der Güte der Modellkette wurden vergangene Abflussvorhersagen nachgerechnet und ausgewertet. Dazu wurden verschiedene Gütemasse jeweils für den Median der mit COSMO-LEPS angetriebenen Simulation mit der von COSMO-7 angetriebenen Simulation sowie mit einem Referenzlauf (interpolierte, operationell verfügbare Beobachtungen) verglichen. Die Auswertungen zeigen, dass die Referenzsimulation deutlich bessere Ergebnisse erzielt als jegliche Vorhersage. Was die Vorhersageprodukte anbelangt, schneiden die probabilistischen Abflussprognosen generell besser ab als die deterministischen Vorhersagen. Die Gütemasse sind für die COSMO-LEPS angetriebenen Simulationen besser und verschlechtern sich langsamer mit zunehmender Vorlaufzeit als die entsprechenden Werte für die mit COSMO-7 angetriebenen Simulationen. Die Verifikation der Modellkette deutet darauf hin, dass probabilistische Abflussvorhersagen als Entscheidungsgrundlage für die Massnahmeplanung im Einzugsgebiet der Sihl besser geeignet sind als deterministische Abflussvorhersagen.

1. Einleitung

In der Schweiz werden am Bundesamt für Umwelt BAFU seit über 20 Jahren operationelle Abfluss- und Wasserstandsvorhersagen für das Rheineinzugsgebiet erstellt. Aus der Analyse des Augusthochwassers 2005 (Bezzola und Hegg, 2007) resultierte, dass auch für mittlere und kleine Schweizer Einzugsgebiete ein Bedarf für Abflussvorhersagen besteht. Des Weiteren wurde die Notwendigkeit von längeren Vorwarnzeiten aufgezeigt. Längere Vorwarnzeiten führen jedoch zu grösseren Unsicherheiten in der Vorhersage (Pappenberger und Beven, 2006) und sind daher nicht unproblematisch. Da anhand von deterministischen Vorhersagen die Unsicherheiten in der hydrologischen Modellierung nicht quantifiziert werden können, werden neuerdings probabilistische Vorhersagen auf der Basis eines Ensembles möglicher zukünftiger Witterungsverläufe zur Hilfe genommen (Ehrendorfer, 1997). Gekoppelte hydrometeorologische Vorhersagesysteme gestützt auf Ensembles wurden in der Folge entwickelt und getestet (z.B. Verbunt et al., 2007; Jaun and Ahrens, 2009). Im Jahr 2007 folgte im Rahmen des Projektes MAP D-PHASE (Mesoscale Alpine Program – Demonstration of Probabilistic Hydrological and Atmospheric Simulation of Flood Events in the Alps; Zappa et al., 2008) eine umfangreiche Demonstration des aktuellen Standes der Möglichkeiten in der hydrologischen und meteorologischen Modellierung, in welche sowohl Entwickler und Anbieter als auch die Endnutzer der Vorhersageprodukte involviert waren. Seither haben die MeteoSchweiz, das BAFU, und die WSL eng zusammengearbeitet und erste massgeschneiderte Vorhersagesysteme entwickelt.

Im vorliegenden Beitrag präsentieren wir die Implementierung eines probabilistischen Hochwasservorhersagesystems für das voralpine Einzugsgebiet der Sihl. Hochwasserereignisse können anhand einer Reihe von täglich durchgeführten Modellierungen schon frühzeitig erkannt werden, womit die Sicherheit der Stadt Zürich im Allgemeinen sowie die Situation während den Bautätigkeiten am Bahnhof Löwenstrasse (kritische Bauphase 2008 bis 2011) im Speziellen verbessert wird.

Im nächsten Abschnitt beschreiben wir das Einzugsgebiet der Sihl. Nachfolgend wird in Abschnitt 3 das dafür entwickelte Vorhersagesystem vorgestellt. In Abschnitt 4 präsentieren wir die Verifikation des Vorhersagesystems für die Periode Juni 2007 bis Dezember 2009 (Addor, 2009; Addor et al., 2010). In einem zweiten Beitrag (Badoux et al., 2010, «Wasser Energie Luft», Dezember-Ausgabe 2010) gehen wir auf die durch die Bauarbeiten im Zürcher Hauptbahnhof momentan verschärfte Gefahrensituation in der Stadt Zürich ein. Es werden die angewendeten Werkzeuge zur Entscheidungshilfe bei der Hochwasservorhersage präsentiert sowie die Organisation der Projektgruppe, das Sicherheitsdispositiv und die zur Verfügung stehenden Handlungsoptionen diskutiert.

2. Das Sihleinzugsgebiet

2.1 Gebietsbeschreibung

Das Einzugsgebiet der Sihl bis Zürich umfasst eine Fläche von 336 km² und erstreckt sich bei einer mittleren Höhe von 1060 m ü.M. westlich sowie südwestlich des Zürichsees *(Bild 1)*. Das Gebiet hat seinen höchsten Punkt am Druesberg auf 2282 m ü.M. im Grenzbereich der Teileinzugsgebiete der oberen Sihl und der Minster. Am unteren Ende des Sihltals wird am Standort Zürich-Sihlhölzli auf 412 m ü.M. der Abfluss der Sihl gemessen und 2 km in nordöstliche Richtung mündet diese auf rund 404 m ü.M. in die Limmat. Das Gesamteinzugsgebiet ist zu rund 42% bewaldet. Wiesen und Weiden (32%) sowie alpine und subalpine Wiesen und Rasen (13%) stellen weitere häufig vertretene Landnutzungen dar. Unproduktive Flächen (Wasser, Fels) nehmen nur 6% der Einzugsgebietsfläche ein.

Teileinzugsgebiete	Fläche [km²]	Teilfläche ab Auslass Sihlsee [km²]	Mittlere Höhe [m ü. M.]	Betreiber
Minster, Euthal	59.2	-	1333	BAFU
Sihlsee, Wasserstand	155.5	-	1243	Etzelwerk AG
Sihl, Auslass-Sihlsee	155.5	-	1243	Etzelwerk AG
Alp, Einsiedeln	46.6	-	1151	BAFU
Biber, Biberbrugg	31.9	-	997	BAFU
Sihl, Blattwag	257.5	102.5	1171	Kt. Zürich
Sihl, Zürich	336.0	180.5	1047	BAFU

Tabelle 1. Gebietskenngrössen der Teileinzugsgebiete der Sihl für welche operationelle Abfluss-/Wasserstandmessung verfügbar sind (modifiziert nach Schwanbeck et al., 2007; vgl. auch Bild 1).

Aufgrund der starken Beeinflussung des Abflusses der Sihl durch die Wasserkraftnutzung lässt sich das gesamte Einzugsgebiet am Pegel Schlagen (Auslass Sihlsee in *Bild 1*) unmittelbar unterhalb des Sihl-Stausees in zwei durch den Sihlsee hydrologisch entkoppelte Hauptteile gliedern *(Bild 1)*: in einen südlich gelegenen Teil (Einzugsgebiet des Sihlsees, 155 km²) sowie in einen nördlich des Sihlsees gelegenen, etwas grösseren Teil (rund 181 km²) der sich bis nach Zürich erstreckt.

Das obere Einzugsgebiet umfasst knapp die Hälfte der gesamten Gebietsfläche, aber aufgrund der Höhenlage sowie des Einflusses der Orographie fallen hier im Vergleich zum unteren Teilgebiet im Mittel die grösseren Niederschlagsmengen an. Somit wurde ursprünglich auch der grössere Anteil des Abflusses der Sihl am Standort Zürich in diesem oberen Einzugsgebietsteil gebildet. Seit dem Beginn der Wasserkraftnutzung zeigt sich dies jedoch nicht mehr im Abflussregime der Sihl. Die gesamten Wassermengen der oberen Sihl, der Minster und einigen kleineren Bäche werden seit dem Jahr 1938 auf einer Höhe von rund 889 m ü.M. im Sihlsee zwischengespeichert und zu einem grossen Teil über einen 2900 m langen Druckstollen zur Stromproduktion in die Zentrale in Altendorf geführt und schliesslich in den Zürichsee geleitet. Im Pumpspeicherbetrieb wird gelegentlich Wasser vom Zürichsee in den Sihlsee gepumpt.

Diese starke Beeinflussung des Regimes der Sihl muss im hydrometeorologischen Vorhersagesystem berücksichtigt werden. Zu diesem Zweck wird das Gesamteinzugsgebiet zur Abflussmodellierung in Teileinzugsgebiete unterteilt *(Bild 1)*, wobei darauf geachtet wurde, dass diese möglichst mit einer Pegelmessstelle versehen sind. Je mehr einzelne Abflussmessreihen zur Verfügung stehen, desto besser lassen sich die freien Parameter des verwendeten hydrologischen Modells kalibrieren.

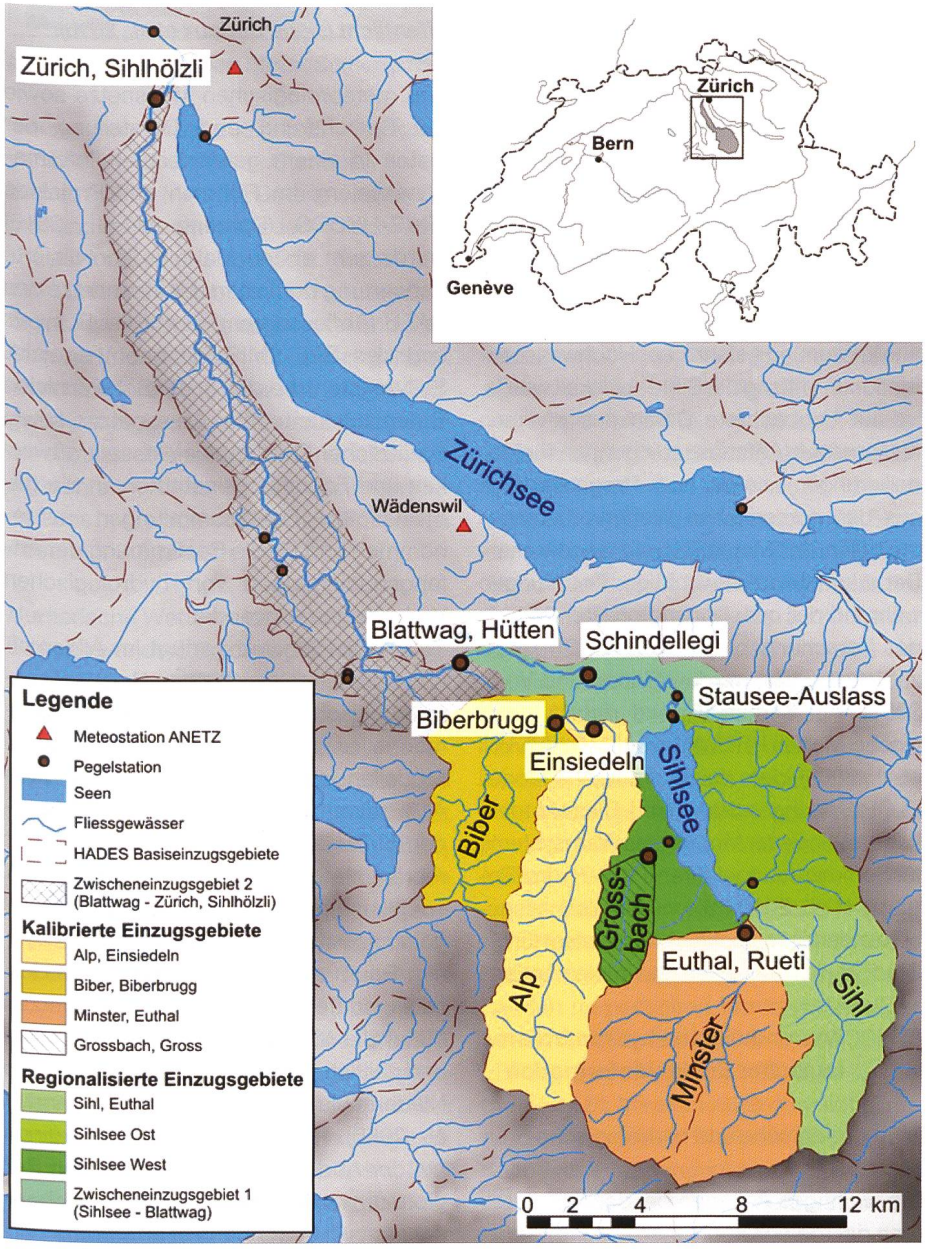

Bild 1. Übersicht über das Einzugsgebiet der Sihl und dessen Gliederung in die verschiedenen Teileinzugsgebiete (aus Schwanbeck et al., 2007; vgl. auch Tabelle 1).

2.2 Historische Hochwasser

Historische Hochwasser an der Sihl mit beträchtlichen Schäden für die Stadt Zürich und das Sihltal sind aus den Jahren

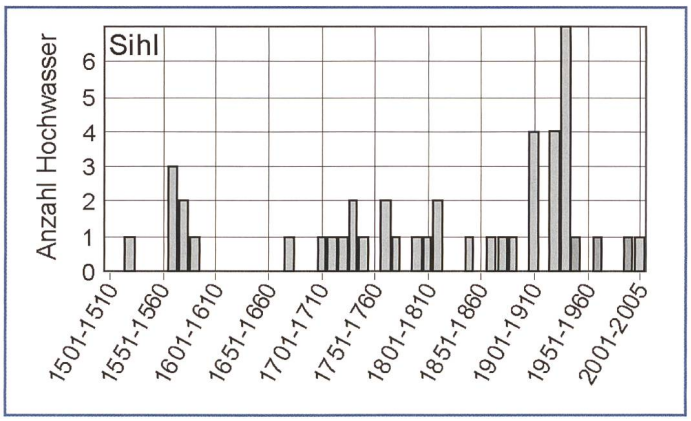

Bild 2. Historische Hochwasser der Sihl von 1501 bis 2005. Für jede Dekade wurde die Anzahl der historischen (ungemessenen) bzw. seit 1919 der gemessenen Hochwasser mit einer Abflussspitze über 200 m^3s^{-1} gezählt (aus: Schmocker-Fackel and Naef, 2010).

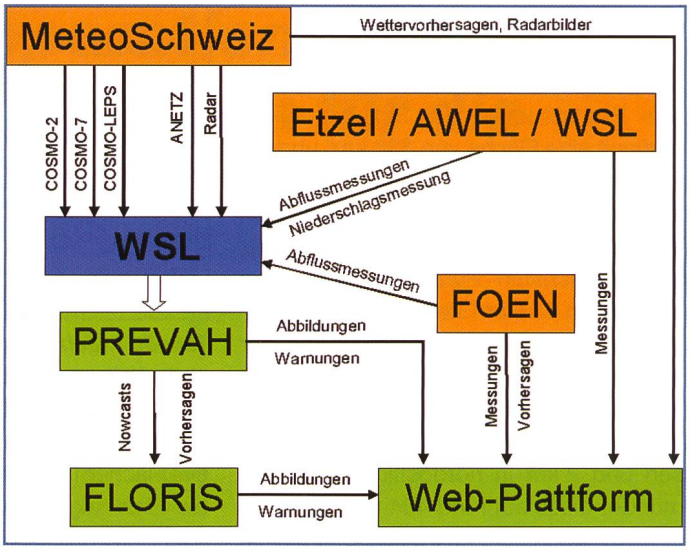

Bild 3. Schematische Darstellung der Vorhersagekette. Die orangen Felder kennzeichnen die Datenlieferanten (Datenimput); an der WSL laufen alle Daten zusammen und werden durch die Modelle PREVAH und FLORIS verarbeitet. Schliesslich werden Bilder und Auswertungen auf einer passwortgeschützten Web-Plattform veröffentlicht (siehe Badoux et al., 2010).

1846, 1874 und 1910 bekannt. Zwar gibt es aus dieser Zeit noch keine Pegelmessungen, trotzdem lässt sich die Grössenordnung dieser Ereignisse abschätzen. Dabei kann auf die Untersuchungen der Scherrer AG (2007) zurückgegriffen werden: Für das Hochwasser vom 31. Juli bis 1. August 1874 wurden Spitzenabflüsse der Sihl von 460–570 m^3s^{-1} rekonstruiert; bei dem Hochwasser im Juni 1910 sind in Zürich wahrscheinlich Höchstwerte von 380–475 m^3s^{-1} aufgetreten.

In der Studie von Schwanbeck et al. (2007) wurden mit dem kombinierten hydrologisch-hydraulischen Modellsystem PREVAH/FLORIS, das auch im hier vorgestellten operationellen Betrieb verwendet wird, extreme Niederschlagsszenarien zu den entsprechenden Abflussszenarien für die Sihl analysiert. Dabei wurde gezeigt, dass Hochwasserereignisse mit Spitzen im Bereich von 310–600 m^3s^{-1} am Standort Zürich auch unter heutigen Verhältnissen durchaus auftreten können.

In der über 90 jährigen Abflussmessreihe der Sihl traten so hohe Werte jedoch nur einmal auf. Im Jahr 1934, als der Abfluss der Sihl noch nicht durch die Wasserkraftnutzung beeinflusst war, wurden rund 340 m^3s^{-1} verzeichnet. In den darauf folgenden 71 Jahren von 1938–2008 nach Erstellung des Sihlsees stieg der Abfluss nie über die im August 2005 erreichte Marke von 280 m^3s^{-1}. Generell traten seit der Inbetriebnahme des Stausees weniger grosse Abflüsse auf als in der Zeit davor *(Bild 2)*. Während in den 1970er und 1980er Jahren alle Spitzen kleiner als 200 m^3s^{-1} waren, sind in den letzten 12 Jahren (1998–2009) drei bedeutende Ereignisse aufgetreten (1999, 2005 und 2007).

Aufgrund dieser Erkenntnisse beschloss das Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft AWEL, ein regionales Hochwasserwarnsystem zur Verbesserung der Hochwassersicherheit der Stadt Zürich und des Sihltals zu realisieren (vgl. Badoux et al., 2010).

3. Das PREVAH/FLORIS Hochwasservorhersagesystem für die Sihl

Das Vorhersagesystem, das für die frühzeitige Erkennung gefährlicher Hochwassersituationen entlang der Sihl entwickelt wurde, ist auf beobachtete Daten aus diversen Messnetzen (Anfangsbedingungen für Modellierungen) sowie auf Prognosedaten aus den numerischen Wettervorhersagemodellen der MeteoSchweiz angewiesen. Dabei konnte auf die wichtigen Erfahrungen während der quasi-operationellen Periode des Forschungsprojektes MAP D-PHASE zurückgegriffen werden (Zappa und Vogt, 2007). Als Kernstück wird das hydrologische Modell PREVAH eingesetzt (Viviroli et al., 2009), dem das hydraulische Modell FLORIS nachgeschaltet wird. Diese Modellkette ist eines der Module des Warnsystems für Sommernaturgefahren IFKIS-Hydro (Romang et al., 2010). Sie wurde als massgeschneidertes regionales Warnsystem für die Stadt Zürich entwickelt und implementiert.

3.1 Anwendung von hydrometeorologischer Echtzeitinformation

Meteorologische und hydrologische Messnetze

Ein wichtiges Anliegen bei der Bereitstellung der meteorologischen Datengrundlagen ist die koordinierte Nutzung der verschiedenen existierenden hydrologischen und meteorologischen Messnetze sowie die Speicherung und Darstellung der Daten in einem gemeinsamen Informationssystem. Im Rahmen des Projektes IFKIS-HYDRO (Romang et al., 2010) wurde zum ersten Mal eine koordinierte Verwertung der Daten der Messnetze des BAFU (Abflussdaten), der MeteoSchweiz und des SLF (IMIS-Stationen) erreicht. Seit neustem werden in der Schweiz auch Daten aus kantonalen Messnetzen sowie zusätzlichen Quellen, wie Wasserkraftwerken und Forschungsinstituten, in die gemeinsamen Datensammlungen aufgenommen und für die Bestimmung der Anfangsbedingungen von hydrologischen Vorhersagen verwendet.

Die Schweiz verfügt im Allgemeinen über ein relativ dichtes Netz von meteorologischen Stationen. Für den operationellen Betrieb von hydrologischen Modellen zur Ausgabe von akkuraten Abflussvorhersagen in mittleren bis kleinen Einzugsgebieten fehlen dennoch oft repräsentative Messstationen. Dies trifft vor allem im von komplexer Topographie gekennzeichneten alpinen und voralpinen Raum zu. Als Alternative zu Niederschlagsdaten aus Bodenmessnetzen bietet die MeteoSchweiz heute räumlich und zeitlich hoch aufgelöste, quantitative Niederschlagsradardaten an (Germann et al., 2006). Probleme bestehen allerdings bei der Abdeckung von inneralpinen Regionen, wo das Radarsignal stark abgeschattet wird (Germann et al., 2006).

Zur Modellierung der Sihl werden Niederschlagsdaten in stündlicher Auf-

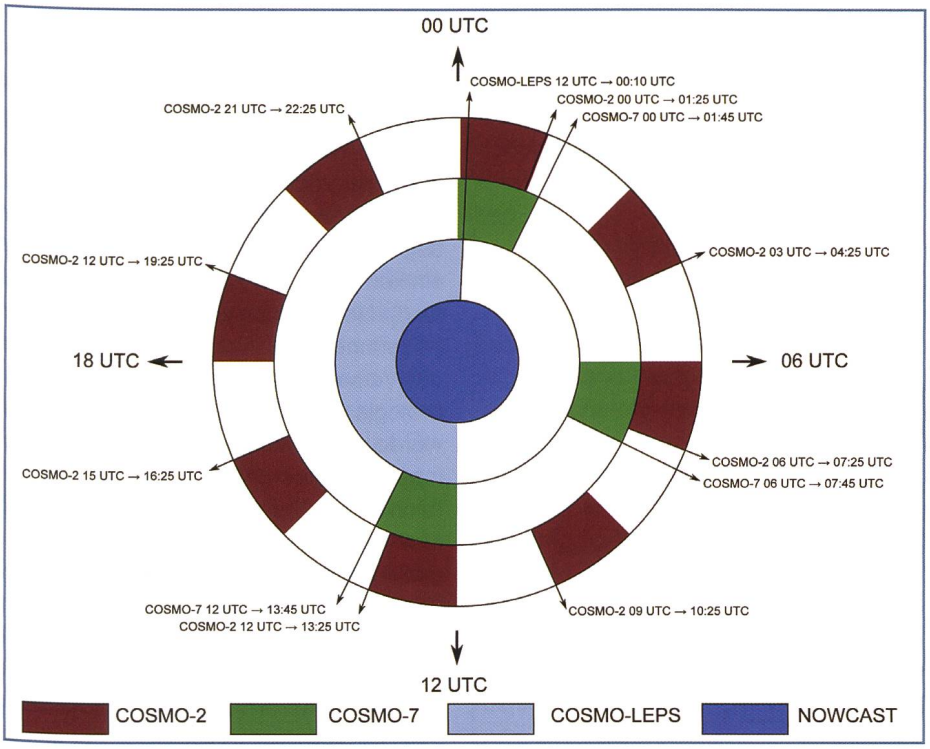

Bild 4. Modellfahrplan MeteoSchweiz (Stand April 2010, Entwurf S. Vogt)

lösung von gesamthaft zehn Stationen verwendet. Drei dieser Stationen liefern zudem alle 10 Minuten Daten, was die Ermittlung von hohen Niederschlagsintensitäten im Gebiet ermöglicht. Sieben der zehn Stationen sind mit weiteren meteorologischen Sensoren ausgerüstet und stellen auch Informationen zur Lufttemperatur, relativen Feuchte, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit und Sonnenscheindauer bereit. Alle diese Parameter werden, zusätzlich zum Niederschlag, dazu verwendet, das hydrologische Modell PREVAH (s. Abschnitt 3.3) anzutreiben.

Numerische Wettermodelle

Das verwendete hydrologische Modellsystem wird mit Wetterdaten aus numerischen Vohersagemodellen angetrieben. Diese modellieren den Zustand der Atmosphäre der kommenden Stunden und Tage. Derzeit betreibt die MeteoSchweiz drei Wettermodelle (COSMO-LEPS, COSMO-7 und COSMO-2), welche sich in Bezug auf die räumliche Auflösung und die Vorhersageperiode voneinander unterscheiden (Rotach, 2007).

Für die mittelfristige Frühwarnung liefert das probabilistische COSMO-LEPS täglich 16 einzelne Vorhersagevarianten (Member) der Wetterentwicklung für die kommenden fünf Tage, welche als gleich wahrscheinlich betrachtet werden. Das Modellergebnis wird als Ensemblevorhersage dargestellt, und hat sich in der Meteorologie als sehr nützlich erwiesen. Solche Vorhersagen berücksichtigen die Unsicherheiten in der Bestimmung des Anfangszustandes der Atmosphäre und lassen die Berechnung der Eintretenswahrscheinlichkeit bestimmter Ereignisse zu. Die Maschenweite von COSMO-LEPS betrug bis Dezember 2009 10 km. Seither stehen operationell COSMO-LEPS Vorhersagen mit einem horizontalen Gitterabstand von 7 km zur Verfügung.

COSMO-7 (6.6 km Maschenweite) ist ein klassisches deterministisches Wettermodell und liefert drei Mal pro Tag eine Vorhersage für die kommenden 72 Stunden. Für die kurzfristige Warnung (<24 Stunden) bietet die MeteoSchweiz alle drei Stunden die Ergebnisse des räumlich hoch aufgelösten (2.2 km Maschenweite) deterministischen Wettermodells COSMO-2 an. Dieses berechnet die Entwicklung von Konvektionszellen explizit und soll dadurch und durch die Assimilation von Niederschlagsradardaten zuverlässigere Kurzfristwarnungen vor starken Gewittern bieten.

Bild 4 stellt die zeitliche Abfolge der Rechenzeiten der für die hydrologische Vorhersage zur Verfügung stehenden numerischen Wettervorhersagen mit COSMO-2, COSMO-7 und COSMO-LEPS graphisch dar. Ein COSMO-2-Lauf trifft rund 85 Minuten nach dem Initialisierungstermin an der WSL ein *(Bild 3)*. Die benötigten umfangreichen Messungen und das Übermitteln und Aufbereiten dieser Daten benötigt allein gut 50 Minuten, während die anschliessende Berechnung der Vorhersage noch rund 30 Minuten in Anspruch nimmt. Die nachgeschaltete Abflussvorhersage mit PREVAH/FLORIS dauert weitere fünf Minuten, erst dann stehen die Produkte für den Endbenutzter bereit. COSMO-7-Vorhersagen benötigen 105 Minuten Rechenzeit an der MeteoSchweiz und weitere 8 Minuten für die hydrologische Vorhersage an der WSL. Bei den hydrologischen Vorhersagen entfällt der Hauptteil der Prozessorlast auf die hydraulischen Berechnungen. Die Berechnung der probabilistischen COSMO-LEPS-Vorhersagen mit 16 Membern ist nochmals deutlich aufwändiger. Die Ergebnisse der Wettermodellläufe am Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage (ECMWF, Reading, UK) stehen der WSL 12 Stunden nach deren Initialisierung zur Verfügung. PREVAH/FLORIS benötigt rund 45 Minuten auf einem 8-Prozessor Linux-Server, um die daraus resultierende 5-Tages-Ensemblevorhersage zu rechnen.

Abflussdaten

Innerhalb des Einzugsgebietes stehen Abflussdaten von sechs Messstationen in Echtzeit zur Verfügung *(Tabelle 1)*. Diese fliessen jedoch nicht unmittelbar in die Modellrechnungen ein. Einzig Informationen zum Pegelstand des Stausees werden stündlich assimiliert (s. Abschnitt 3.3).

3.2 Die hydrologisch-hydraulische Vorhersage

PREVAH

Das für die Abflussvorhersage der Sihl verwendete hydrologische Prognosemodell ist eine für den operationellen Betrieb weiterentwickelte Version des Einzugsgebietsmodells PREVAH (Precipitation-Runoff-Evapotranspiration HRU related Model; Viviroli et al., 2009a). Das Modellsystem ermöglicht die flächendifferenzierte Modellierung, bei der die räumlichen Unterschiede innerhalb eines Einzugsgebietes sowohl im Ablauf der hydrologischen Prozesse als auch der meteorologischen Eingangsvariablen berücksichtigt werden. PREVAH erfordert die Gliederung eines Gebietes nach Teilflächen mit ähnlichen hydrologischen Eigenschaften (HRUs). Zu den wesentlichen Grundbestandteilen des Modellsystems gehören verschiedene Teilmodelle zur Simulation der Schneedecke, allfälliger Gletscherflächen, der Interzeption von Niederschlag, der Feuchteausschöpfung durch Evapotranspiration, der Abflussbildung sowie der Abflusskonzentration.

Im operationellen Betrieb läuft die

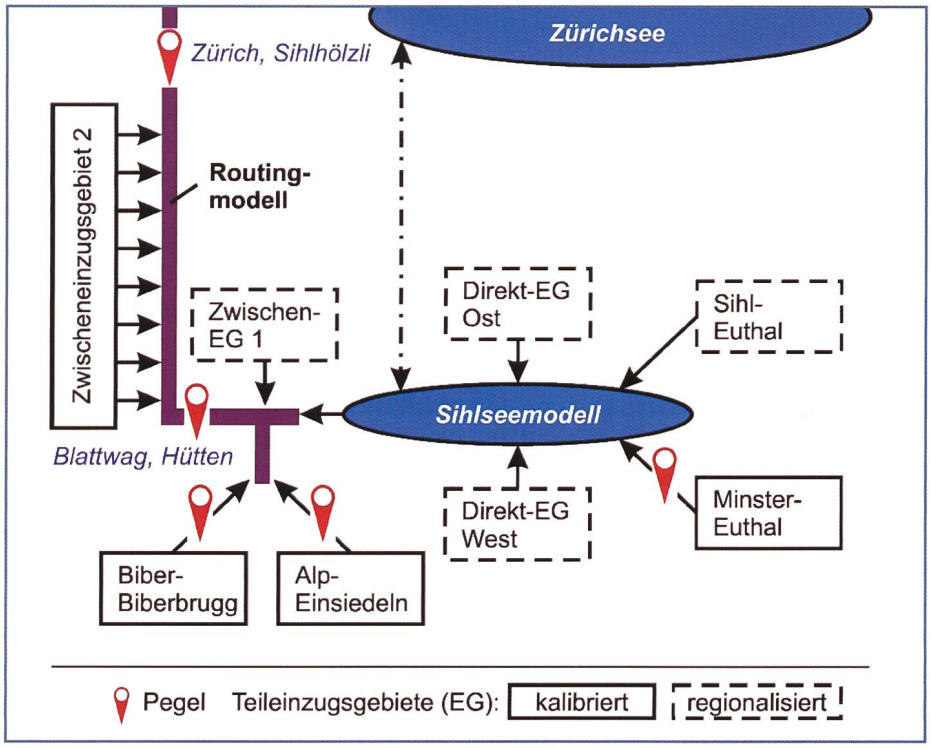

Bild 5. Aufbau des kombinierten Gesamtmodells «Sihl-Zürich» aus acht hydrologischen Teilgebietsmodellen, einem Seemodell und einem Routingmodell (nach Schwanbeck et al., 2007).

Prognoseversion von PREVAH auf einem Linux-Rechner und ist an die in *Bild 3* dargestellte Datenkette angebunden. In der Planungs- und Implementierungsphase wurden für jedes zu simulierende Teileinzugsgebiet mehrere Arbeitschritte durchgeführt: (1) Aufbereitung der Rauminformationen; (2) Definition der relevanten Wetterstationen; (3) Eichung und Verifikation des Modellansatzes mit historischen Daten; (4) Erzeugung von Dateien und Programmierung von Skripten zur Festlegung der Datenflüsse und Steuerung des Prognosemodells; (5) Anbindung an die operationelle Datenkette; (5) Nacheichung.

Seit Juni 2008 ist das PREVAH-Vorhersagesystem für die Sihl implementiert und liefert kontinuierlich Vorhersagen. Ab 2010 wird die Datenkette als eines der ersten Regionalmodule auch in das Vorhersagesystem FEWS (für «Flood Early Warning System») des BAFU implementiert. Die Simulationsergebnisse werden zudem auf der am 1. März 2010 lancierten Gemeinsamen Informationsplattform Naturgefahren des Bundes (GIN) dargestellt.

PREVAH-Kalibrierung

Die Kalibrierung des hydrologischen Modells für die neun Teileinzugsgebiete der Sihl erfolgte im Rahmen der Studie von Schwanbeck et al. (2007) zur Analyse des Hochwasserereignisses im August 2005. Für jedes Teileinzugsgebiet wurden 12 freie – das heisst justierbare – gebietsspezifische Parameter von PREVAH bestimmt. Dies erfolgte entweder durch Kalibrierung gegenüber beobachteten Abflussganglinien (Minster, Alp und Biber) oder durch Regionalisierung nach der Methodik von Viviroli et al. (2008) *(Bild 5)*. Während der Kalibrierung werden die freien Parameter durch Minimierung einer objektiven mathematischen Funktion, welche die Abweichungen zwischen Beobachtung und Simulation beschreibt, optimiert (Viviroli et al., 2009b). Bei der Eichung wurden Parameterkombinationen bevorzugt, die sowohl für Hochwasser wie auch für mittlere Abflüsse robuste Resultate liefern. Folglich zeigen simulierte Niedrigwasserabflüsse im operationellen Betreib gelegentlich schlechtere Resultate.

Für diejenigen Teileinzugsgebiete für die keine Beobachtungsdaten vorliegen, wurden die freien Modellparameter mit dem speziell zur Anwendung von PREVAH entwickelten Regionalisierungsverfahren (Viviroli et al., 2008) bestimmt. Die Grundlage dieses Verfahrens bildet eine Datenbank von 140 mesoskaligen Schweizer Einzugsgebieten, die erfolgreich mit dieser Methode kalibriert wurden. Die in der Datenbank gespeicherten Parameter können mittels Kriging, Regressionsbeziehungen oder Ähnlichkeitsbetrachtungen für jedes beliebige mesoskalige Gebiet innerhalb des Einzugsgebietes des Rheins verwendet werden.

FLORIS

Um den genauen Verlauf von Hochwasserwellen im lang gezogenen Teileinzugsgebiet unterhalb der Messstelle Blattwag *(Bild 1)* besser simulieren zu können, wurde dem hydrologischen Modell PREVAH das hydraulische Modell FLORIS («Flood Routing System») nachgeschaltet. FLORIS ist ein kommerzielles 1D-Simulationssystem für die Nachbildung von Abflussprozessen in Gerinnen, das in den 1990er Jahren an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) entwickelt wurde. In Zusammenarbeit mit privaten Ingenieurbüros (SCIETEC in Linz, Österreich und TK Consult in Zürich) wurde das Modell in den letzten Jahren weiterentwickelt. Im vorliegenden Projekt ermöglicht FLORIS ein Routing der Abflüsse aus den oberen Teileinzugsgebieten sowie die Bestimmung des Sihlsee-Pegels (s. Badoux et al., 2010). Die Anfangsbedingungen der FLORIS-Vorhersagen basieren auf einem Lauf des hydrologischen Modells mit beobachteten meteorologischen Daten und Messwerten des Seepegels.

Für die Durchführung der hydraulischen Berechnungen wurde das Gerinne der Sihl mit Hilfe von regelmässig aufgenommenen Querprofilen beschrieben (Diskretisierung). Im Gebiet der Stadt Zürich ab der Mündung in die Limmat betragen die Abstände zwischen zwei Querprofilen ungefähr 100 m. Entlang des Sihltals bis zur Staumauer des Sihlsees wachsen die Querprofilsabstände auf 600 m an. Für eine Berechnung mit FLORIS ist dies zuwenig (Numerik). Aus diesem Grund wurden zusätzliche Querprofile interpoliert, sodass mindestens alle 150 m ein Querprofil vorliegt. Im Flusslauf befinden sich Bauwerke wie zum Beispiel Schwellen, Wehre oder Brücken. Schwellen und Wehre können durch das Modell FLORIS simuliert werden, Brücken lassen sich nur teilweise berücksichtigen. Die Brückenpfeiler, die sich im Gerinne befinden und somit das Profil verkleinern, haben einen Einfluss auf den Abfluss. Hingegen kann die Unterkante einer Brücke nicht im Modell abgebildet werden. Der Sihlsee wird stark vereinfacht mit 21 Querprofilen diskretisiert, die mit Hilfe der Höhenlinien der Landeskarten erstellt wurden.

Kopplung PREVAH/FLORIS

Die vorhergesagte Ganglinie der Minster, die regionalisierten Teilgebietsganglinien der weiteren Zuflüsse sowie der Direktniederschlag auf die Seeoberfläche (abzüglich der Verdunstung) sind die entscheidenden Grössen für die Bilanzierung des

Sihlseemodells. Zusätzlich wird dem See Wasser durch Turbinierung (geschätzt basierend auf Regressionsanalysen einer zweijährigen Datenreihe) entzogen und in den Zürichsee geleitet. In die Sihl unterhalb der Staumauer wird mindestens soviel Wasser entlassen, wie nötig ist, um die gesetzlich festgelegten Restwassermengen zu garantieren. Die Bereiche oberhalb und unterhalb der Staumauer sind hydrologisch und hydraulisch erst dann vollständig gekoppelt, wenn während grossen Niederschlagsereignissen und bei einem hohen Seestand das Betriebsreglement des Stausees ab einem Seestand von 888.70 m ü.M. in Kraft tritt und in der Folge grössere Wassermengen in die Sihl abgelassen werden müssen (Badoux et al., 2010). Die Turbinierung, die erforderliche Menge an Restwasser und das Betriebsreglement wurden in einem zwischengeschalteten Modul abgebildet.

Unterhalb des Auslasses aus dem Sihlsee werden die Fliessvorgänge im Gerinne der Sihl unter Berücksichtigung der Wehre und Schwellen durch das Modell FLORIS berechnet. Alle simulierten Abflüsse aus den oberhalb liegenden sowie angrenzenden Einzugsgebieten fliessen in diese Berechnungen ein. Bis zur Abflussmessstation Blattwag-Hütten – der ersten Vergleichsmöglichkeit unterhalb des Sihlsees – sind dies der (gesteuerte) Abfluss aus dem Sihlsee, die natürlichen Abflüsse von Alp und Biber sowie die Beiträge des Zwischeneinzugsgebietes Sihlsee-Blattwag (vgl. *Bild 1*).

4. Verifikation der operationellen Modellkette

Die in *Bild 3* schematisch illustrierte Modellkette ist seit September 2008 im operationellen Betrieb. Sobald die MeteoSchweiz eine neue Vorhersage eines ihrer Wettermodelle liefert, werden die entsprechenden aktuellen Anfangsbedingungen für das hydrologisch-hydraulische Modell berechnet. Die beobachteten Klimaparameter werden mit den Klimaparametern aus den COSMO-Modellen verknüpft, um eine hydrologische Vorhersage zu berechnen.

Zur gründlichen Analyse der Güte der Modellkette wurden Vorhersagen für die Periode vom 1. Juni 2007 bis zum 31. Dezember 2009 (insgesamt 945 Vorhersagen) nachgerechnet und ausgewertet. Da die Sicherheitsverantwortlichen für die Planung von Interventionsmassnahmen auf Vorhersagen mit langer Vorlaufzeit angewiesen sind (Badoux et al., 2010), wurden zu diesem Zweck nur die Vorhersagen von COSMO-7 (00:00 UTC-Lauf) und COSMO-LEPS verwendet.

Zum besseren Verständnis der Abbildungen (*Bilder 6* bis *9*) fokussieren die folgenden Abschnitte auf die Beschreibung der Ergebnisse für die Periode von Juni bis Dezember 2007. Während dieser Zeitspanne ist am 8./9. August 2007 das grösste Ereignis der gesamten Zeitreihe aufgetreten. Zudem werden die Vorhersagen für ein weiteres Hochwasserereignis des Jahres 2008 (15./16. August) im Detail diskutiert. Eine umfassendere Darstellung der Ergebnisse findet sich in Addor (2009) und Addor et al. (2010).

4.1 Statistische Kennwerte für die gesamte Zeitreihe

Die Güte der Vorhersagen der komplexen Modellkette kann nicht als Ganzes und nicht allein durch eine einzelne Kennzahl wiedergegeben werden. Zu diesem Zweck müssen mindestens die Abflussvorhersage für den Standort Zürich und die Vorhersage des Sihlsee-Pegels beurteilt werden. Zudem ist es unerlässlich, die Güte der Prognosen für unterschiedliche Vorlaufzeiten zu evaluieren.

Die mit dem Wettermodell COSMO-LEPS angetriebenen probabilistischen Abflussvorhersagen ermöglichen Aussagen für ein bis fünf Tage in die Zukunft. Zur Übersicht wurden hier die statistischen Kennwerte nur für den Median der 16 Ensemble-Member bestimmt. Diese starke Vereinfachung ermöglicht unter Verlust der probabilistischen Information einen direkten Vergleich mit den deterministischen COSMO-7-Vorhersagen, welche einen Zeitraum von ein bis drei Tagen in die Zukunft abdecken. Für eine umfassende probabilistische Auswertung der verarbeiteten COSMO-LEPS-Daten verweisen wir auf Addor (2009).

Vorhersageabschnitte mit gleichen Vorlaufzeiten (z.B. Tag +3, 49 bis 72 Stunden ab Initialisierung der Vorhersage) wurden miteinander verbunden. Somit entstand eine kontinuierliche Zeitreihe von hydrologischen Vorhersagen mit identischen Vorlaufzeiten (LT), welche mit beobachteten Werten und einem Referenzlauf (HREF) des hydrologischen Modells verglichen werden konnten. HREF basiert auf Simulationen mit PREVAH/FLORIS, welche interpolierte, operationell verfügbare Beobachtungen der benötigen Klimaparameter als Antrieb benutzen. Folgende Gütemasse wurden berechnet:

- Die Effizienz (E) nach Nash and Sutcliffe (1970), welche den Mittelwert der Beobachtungen als Mass für das Modell annimmt (E > 0 bedeutet, dass das Modell eine Zeitreihe besser abschätzt als das Mittel der Beobachtungen).
- Die Abweichung der mittleren simulierten vom mittleren beobachteten Abfluss (DV). Werte über 1.0 deuten auf eine Überschätzung des mittleren Abflusses durch das Modell.
- Der mittlere absolute Fehler (MAE).

Tabelle 2 fasst diese statistischen Kennwerte für sämtliche Vorlaufzeiten (LT1 bis LT5) und für den Referenzlauf zusammen. Für die Bestimmung der statistischen Kennwerte der Seestandsmodellierung wird nicht von absoluten Werten ausgegangen. Der Wasserstand des Sihlsees wird stattdessen in eine Differenzganglinie (in cm gegenüber dem Vortag) transformiert. Dies ermöglicht eine robustere Aussage darüber, wie gut das Modell die Schwankungen des Sihlsees voraussagt.

Die Evaluation zeigt, dass die Referenzsimulation (HREF) deutlich besser als jegliche Vorhersage abschneidet. Die vorhergesagten meteorologischen Variablen sind wie erwartet nicht in der Lage, die Qualität der interpolierten Beobachtungen als Inputdaten für hydrologische

Station	HREF	LT1	LT2	LT3	LT4	LT5
Abfluss Zürich [m^3/s]						
E: COSMO-LEPS Med.	0.87	0.69	0.44	0.26	0.2	0.11
E: COSMO7		0.55	0.2	-0.09	-	-
DV: COSMO-LEPS Med.	1.17	1.18	1.18	1.12	1.09	1.03
DV: COSMO7		1.12	1.7	1.12	-	-
MAE: COSMO-LEPS Med.	3	3.9	5.2	5.6	6	6.3
MAE: COSMO7		4.1	5.7	6.2	-	-
Sihlsee [cm]						
E: COSMO-LEPS Med.	0.84	0.65	0.65	0.58	0.52	0.46
E: COSMO7		0.64	0.56	0.46	-	-
MAE: COSMO-LEPS Med.	1.7	2.4	5.9	9.2	12.5	15.9
MAE: COSMO7		2.4	6.3	10.1	-	-

Tabelle 2. Verifikation der simulierten Daten anhand der gemessenen Datenreihen für die Periode von Juni 2007 bis Dezember 2009. Die Tabelle gibt eine Zusammenstellung aller statistischen Kennwerte für sämtliche Vorlaufzeiten (LT1 bis LT5 für COSMO-LEPS und LT1 bis LT3 für COSMO-7) sowie für den Referenzlauf (HREF).

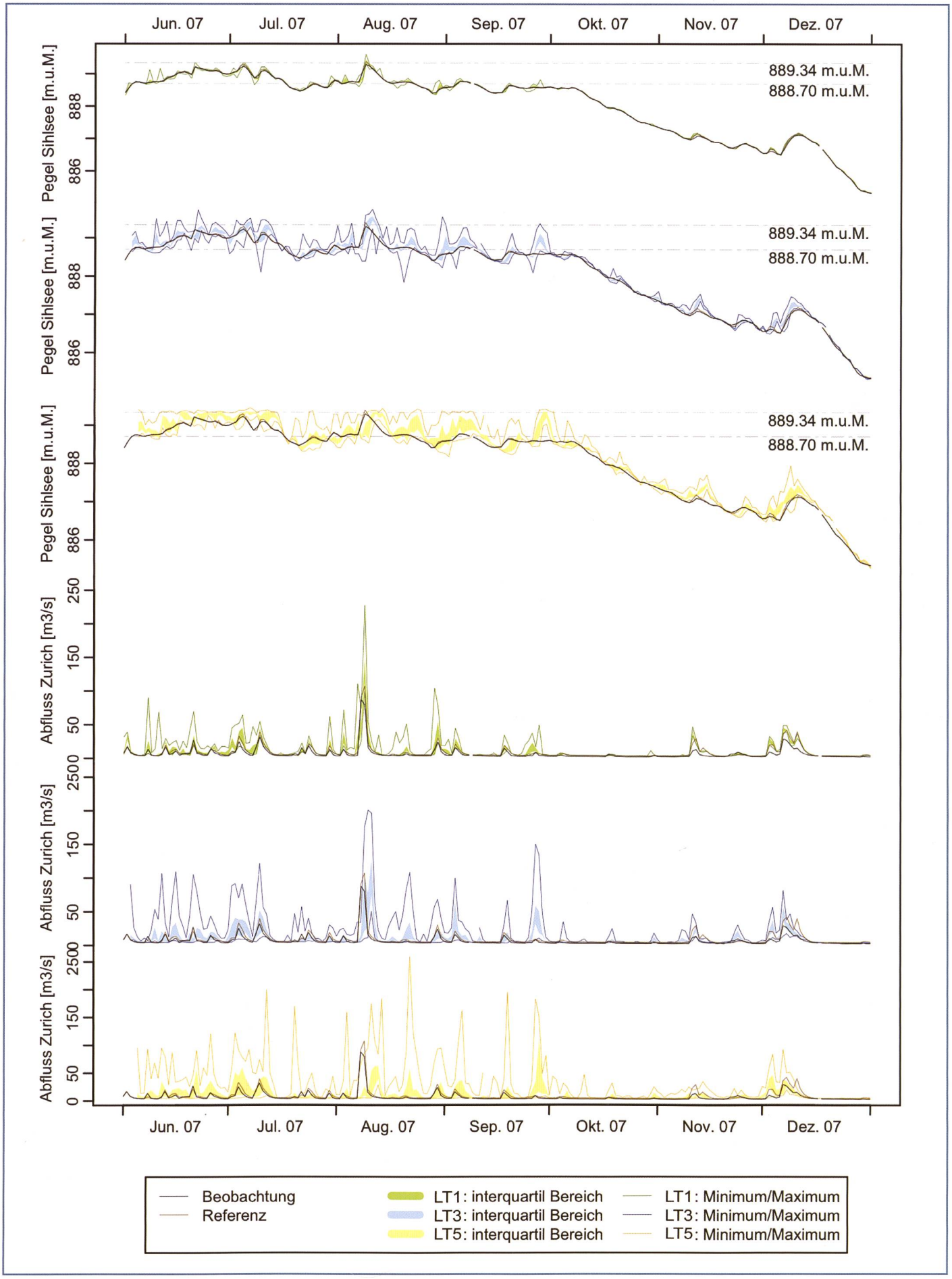

Bild 6. Angekettete COSMO-LEPS-Vorhersagen (Tagesmittel) mit unterschiedlicher Vorlaufzeit (LT, 1 Tag in grün, 3 Tage in hellblau, 5 Tage in gelb) für die Periode Juni bis Dezember 2007. Die drei oberen Graphiken beziehen sich auf die Vorhersage des Seestandes. Die Staukote (889.34 m ü.M.) und die Kote 888.7 m ü.M. (Kote Betriebsreglement bei raschem Seeanstieg) für den Sihlsee sind angegeben. Die drei unteren Gangliniengruppen beziehen sich auf Vorhersagen des Abflusses der Sihl für den Standort Zürich Sihlhölzli.

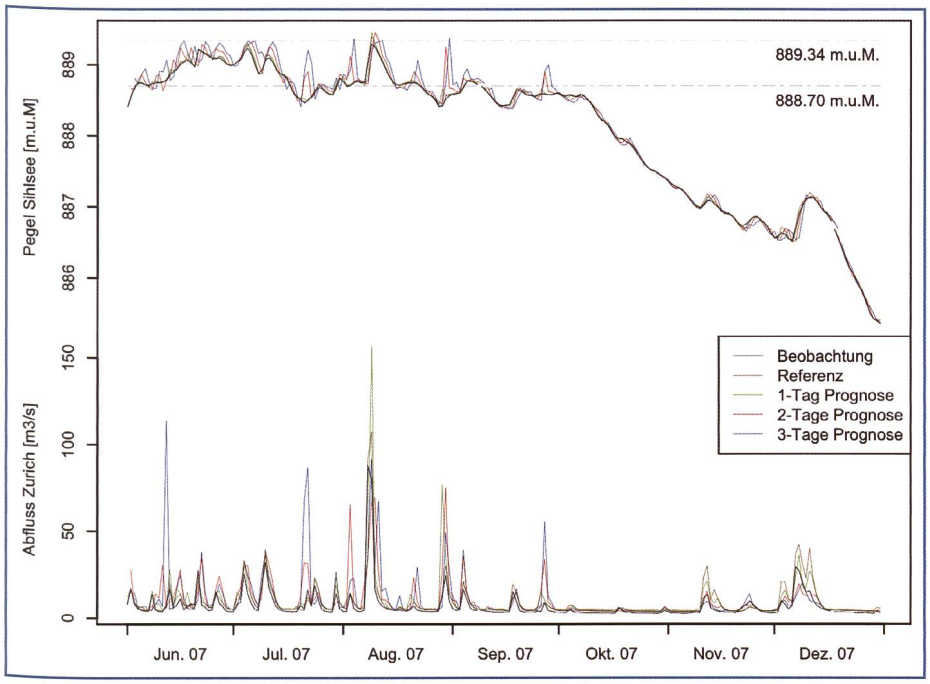

Bild 7. Angekettete COSMO-7-Vorhersagen (Tagesmittel) mit unterschiedlicher Vorlaufzeit (LT, 1 Tag in grün, 2 Tage in rot, 3 Tage in hellblau) für die Periode Juni bis Dezember 2007. Die obere Graphik bezieht sich auf die Vorhersage des Seestandes. Die Staukote (889.34 m ü. M.) und die Wehrreglementkote (888.7 m ü. M.) für den Sihlsee sind angegeben. Die untere Graphik bezieht sich auf Vorhersagen des Abflusses der Sihl für den Standort Zürich Sihlhölzli.

Simulationen zu erreichen. Was die Vorhersageprodukte betrifft, kann festgehalten werden, dass die probabilistischen Abflussprognosen (COSMO-LEPS-Ensemble und entsprechender Median) generell einen besseren Eindruck hinterlassen als die deterministischen Vorhersagen mit COSMO-7.

Die statistischen Kenngrössen E, DV und MAE sind insgesamt für die von COSMO-LEPS angetriebenen Simulationen besser und sie verschlechtern sich langsamer mit zunehmendem Vorhersagezeitraum als die entsprechenden Werte für die auf COSMO-7 basierenden Vorhersagen. Insbesondere scheinen Wahrscheinlichkeitsprognosen von COSMO-LEPS stabilere mittelfristige Prognosen bei instabilen atmosphärischen Bedingungen zu bieten. *Tabelle 2* zeigt, dass COSMO-LEPS bei Vorlaufzeiten von vier und fünf Tagen (LT4 und LT5) eine ähnliche oder bessere Güte aufweist als COSMO-7 bei einer Vorlaufzeit von 3 Tagen (LT3).

4.2 PREVAH/FLORIS COSMO Vorhersage Juni bis Dezember 2007

COSMO-LEPS

Bild 6 gibt eine qualitative Übersicht der Güte der probabilistischen Modellkette über einen längeren Zeitabschnitt von Juni bis Dezember 2007. Die Abbildung zeigt Resultate für die Station Zürich Sihlhölzli und für den Pegelstand des Sihlsees. Der Referenzlauf für die Simulation der mittleren Tageswerte zeigt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der PREVAH/FLORIS-Kette und den Beobachtungen. Diese visuelle Einschätzung wird durch die statistischen Kennwerte bestätigt *(Tabelle 2)*. Es ist zu beachten, dass die Simulationen des Seestandes jeden Tag bei Initialisierung der Simulation mit der Beobachtung um 00:00 Uhr abgeglichen werden. Es ist darum nicht überraschend, dass das Modell die Dynamik des Sihlsees während eines Tages gut nachbilden kann, da diese eine grosse Trägheit aufweist. Die kleinen Abweichungen zwischen HREF und den beobachteten Tagesmitteln (OBS) beruhen auf Unsicherheiten der operationellen Erfassung und der räumlichen Interpolation der beobachteten meteorologischen Variablen sowie auf Unsicherheiten im Bereich der Parametrisierung und Kalibrierung der hydrologisch-hydraulischen Modellkette.

Auch für das untere Teileinzugsgebiet bis Sihlhölzli werden mit HREF gute bis sehr gute Resultate erzielt. In grün, hellblau und gelb werden jeweils die Ergebnisse der probabilistischen Vorhersagen dargestellt. Für die Interpretation wurden Vorhersageabschnitte mit gleicher Vorlaufszeit aneinandergekettet. Dies ermöglicht eine intuitive Einschätzung der sich verändernden Vorhersage mit länger werdenden Vorlaufszeiten. Für LT1 (grün), LT3 (hellblau) und LT5 (gelb) werden unterschiedliche Bandbreiten des Interquartalbereichs berechnet. Je länger die Vorlaufszeit, desto breiter wird dieser Bereich. Dies ist ein Zeichen von wachsender Unsicherheit mit zunehmender Laufzeit in der operationellen Vorhersage. Natürlich gibt es Fälle, wie etwa im Juli 2007, wo bereits mit fünf Tagen Vorlaufszeit ein Set von Vorhersagen vorliegt, das jeweils kompakt um den berechneten Wert liegt.

Das Hochwasser am 8. und 9. August 2007 wurde ab einer Vorlaufszeit von drei Tagen zufriedenstellend vorhergesagt. Dies sowohl für den Abfluss in Zürich, wie auch für den Stand des Sihlsees, welcher knapp auf das Stauziel von 889.34 m ü.M. anstieg.

Fehlalarme sowie verpasste Ereignisse sind die beiden Hauptprobleme in der Hochwasserwarnung. Auf *Bild 6* z.B. ist Ende September ersichtlich, dass in der Prognose mit drei und fünf Tagen Vorlaufzeit ein Abflussereignis mit Seeanstieg (mit möglicher Überschreitung der Warnstufe 3) als wahrscheinlich prognostiziert wird. Für rund ein Drittel der Member wird ein Abfluss von > 100 $m^3 s^{-1}$ für den Standort Zürich angegeben. Schliesslich verzeichnete die Vorhersage am Vortag des vermuteten Ereignisses viel tiefere Werte und somit zeigte keine bedrohliche Lage an. In Wahrheit stieg der Seestand an diesem Tag kaum an und der Abfluss am Standort Zürich HB stieg nur unbedeutend.

COSMO-7

Bild 7 ist das Pendant zu *Bild 6* für mit COSMO-7-Modelldaten angetriebene Simulationen von PREVAH/FLORIS. Sowohl für den Abfluss in Zürich Sihlhölzli, wie auch für den Pegelstand des Sihlsee sind hier die deterministischen Vorhersagen mit drei, zwei und einem Tag Vorlaufzeit aneinandergekettet.

Basierend auf der visuellen Betrachtung der Ganglinien ist es schwierig zu erkennen, ob die COSMO-7-basierten hydrologischen Vorhersagen besser abschneiden als diejenigen von COSMO-LEPS. Die statistischen Kennwerte (Tabelle 2 und Abschnitt 4.1) deuten auf ein leicht besseres Resultat von COSMO-LEPS. Vergleicht man die Ganglinien für den in den *Bildern 6* und *7* dargestellten Zeitabschnitt, erkennt man keine grundlegenden Abweichungen der Modellresultate. Für den 8. und 9. August liefert auch PREVAH/FLORIS-COSMO-7 für jede der drei Vorlaufszeiten eindeutige Anzeichen dafür, dass ein bedrohliches Hochwasser bevorsteht.

Bei konvektiven Wetterlagen besteht die Tendenz, dass die deterministische Vorhersage mit zwei oder drei Tagen Vorlaufzeit bedrohliche Abflussentwicklungen anzeigt. Solche Perioden werden von PREVAH/FLORIS-COSMO-LEPS oft optimistischer eingestuft. In der Periode von Juni bis August 2007 traten solche Fälle mit prognostizierten Abflüssen von 50–100 $m^3 s^{-1}$ dreimal auf *(Bild 7)*. In allen diesen Fällen zeigten jeweils mehr als drei Viertel der Member der probabilistischen Modellkette bei jeder Vorlaufszeit unbedrohliche Abflussverhältnisse, was sich auch bewahrheitete *(Bild 6)*. Auch die mit COSMO-7 angetriebene hydrologische Modellierung überschätzt das Abflussgeschehen Ende September 2007 bei Vorlaufszeiten von mehr als einem Tag. An diesem Fall zeigt sich die Wichtigkeit einer funktionierenden Alarmorganisation, welche mit diesen Methoden der Abflussvorhersage und ihrer Interpretation vertraut ist. Zu diesem Zeitpunkt im Herbst 2007 wurden noch keine operationellen hydrologischen Modellierungen für die Sicherheit der Stadt Zürich und der Baustelle Bahnhof Löwenstrasse bereitgestellt. Andernfalls gehen die Autoren davon aus, dass die in Badoux et al. (2010) beschriebenen organisatorischen Massnahmen eingeleitet worden wären. Ein Entscheid zur Vorabsenkung des Sihlsees um 75 cm drei Tage vor dem «Nicht-Ereignis» hätte getroffen werden können. In einem solchen Fall hätte dies finanzielle Folgen (Entschädigung für die Betreiber des Etzelwerkes) mit sich gebracht.

4.3 Simulation der Dotierwassermengen Juni-Dezember 2007

Die Abflussvorhersagen können selbstverständlich auch für andere Fragestellungen als die Frühwarnung vor Hochwasser verwendet werden. Aus Sicht der Wasserwirtschaft und des Gewässerschutzes ist es zum Beispiel auch interessant zu wissen, wie gut und wie lange sich die Dotierwassermengen einhalten lassen. Die für die Sihl (Pegel Blattwag) derzeit verbindlichen Dotiermengen, die per Gesetz in den Flussabschnitt unterhalb des Stausees geleitet werden müssen, betragen je nach Saison mindestens 2.5 $m^3 s^{-1}$ (Winter), bzw. 3.0 $m^3 s^{-1}$ (Sommer). Falls die kumulierten Abflussmengen der Alp, der Biber und des restlichen Zwischeneinzugsgebiets bis Blattwag *(Bild 1)* diesen Wert nicht erreichen, müssen die Betreiber des Sihlsees die Restwassermengen vom Grundwert von rund 0.4 $m^3 s^{-1}$ erhöhen. Dieses Wasser ist ein Verlust für die Wasserkraftnutzung, aber lebenswichtig für das Ökosystem des Flusses. *Bild 8* zeigt, dass die PREVAH/FLORIS-Modellkette gut in der Lage ist, eine nötige Erhöhung des Ausflusses aus dem See zur Einhaltung der Dotiermengen mit drei Tage Vorlaufzeit vorauszusagen. Das System ist auch grösstenteils in der Lage die Abfolge von trockener und feuchter Witterung mit einer Vorlaufszeit von drei Tage widerzugeben. Die 16 simulierten Vorhersagen für die Restwassermengen (auch hier als Ensembleprognose dargestellt) zeigen mit ihrer Bandbreite die möglichen Entwicklungen der vorgeschriebenen Abgabemengen, die in drei Tagen dem Fluss zugeführt werden müssen. Obwohl momentan von geringer ökonomischer Bedeutung, könnte diese Information zukünftig im Rahmen von Optimierungsprozessen bezüglich der Wasserkraftnutzung in die Produktionsplanung einbezogen werden.

4.4 Beispiel: Ereignis vom 15./16. August 2008

Die wichtigste Herausforderung für das Modellsystem bleibt aber die zuverlässige Vorhersage von Hochwasser für die Sicherheitsverantwortlichen im Sihltal und der Stadt Zürich (Badoux et al.,2010). Da die Stadt lange vor dem Eintreffen eines Ereignisses mit der Einleitung von Notfallmassnahmen beginnen muss, werden die Vorhersagen Tag für Tag berechnet und allfällige Veränderungen (Beruhigung, Bestätigung oder Verschärfung) der jüngsten Vorhersage gegenüber der Vorhersagen der Vortage müssen den Nutzern so einfach wie möglich zugänglich gemacht werden.

Seit der Einführung der probabilistischen Vorhersagen werden zum Beispiel sogenannte Persistenztafeln zusammengestellt (Thielen et al., 2009), die zeigen, mit welchen Wahrscheinlichkeiten mit der Überschreitung eines Grenzwertes in den kommenden Tagen zu rechnen ist. *Bild 9* zeigt eine erweiterte Variante solcher Tafeln, welche für ein Ereignis an der Sihl im August 2008 nachgerechnet wurde (Addor, 2009).

Die Ordinate zeigt den Tag an dem die COSMO-LEPS-Vorhersage gestartet wurde. Die dazugehörenden Kästchen auf der Abszisse geben für jeden der fünf Tage der Vorhersage eine Information über die wahrscheinlichste Warnmeldung (innere Farbe, mit Angabe der zugehörigen Anzahl Member) und die extremste Warnmeldung (Randfarbe mit zugehörigem Maximalwert für den jeweiligen Tag). Diese Bilder lesen sich am besten «vertikal» und «von unten nach oben». Man sucht sich einen Tag in der letzten Zeile auf der X-Achse (die letzte Vorhersage) und vergleicht die Farben und Angaben mit den Vorhersagen der Vortage für denselben Zeitpunkt.

In *Bild 9* sieht man zum Beispiel, dass die «Warnstufe-Orange» (> 100 $m^3 s^{-1}$) am 15. und 16. August bereits in der Vorhersage des 12. August als möglich eingestuft wird, wobei zu diesem Zeitpunkt noch keine Maximalwerte von über 150 $m^3 s^{-1}$ erwartet wurden. Die Vorhersagen vom 13. August 2008 deuteten auf eine deutliche Verschärfung der Situation hin. Für den 15. und 16. August wurden eindeutig mehr als 60 $m^3 s^{-1}$ (gelbe Warnstufe) als wahrscheinlich erachtet. Einen weiteren Tag später (14. August 2008) erhärtete sich die Vermutung, dass der Spitzenabfluss mehr als 100 $m^3 s^{-1}$ erreichen könnte.

Bild 10 zeigt die entsprechenden «Spaghetti-Plots» (eine Linie pro COSMO-LEPS-Member) für den Sihlsee und den Standort Zürich Sihlhölzli. Zusätzlich sind die COSMO-7 Vorhersage und der Referenzlauf dargestellt. Es ist gut zu erkennen, dass bis am 16. August ein Seeanstieg um rund 80 cm und ein bedrohlicher Seestand über der Staukote von 889.34 m ü.M. als möglich erachtet wurde. Es ist aber sehr schwierig zu beurteilen, wie viele Member

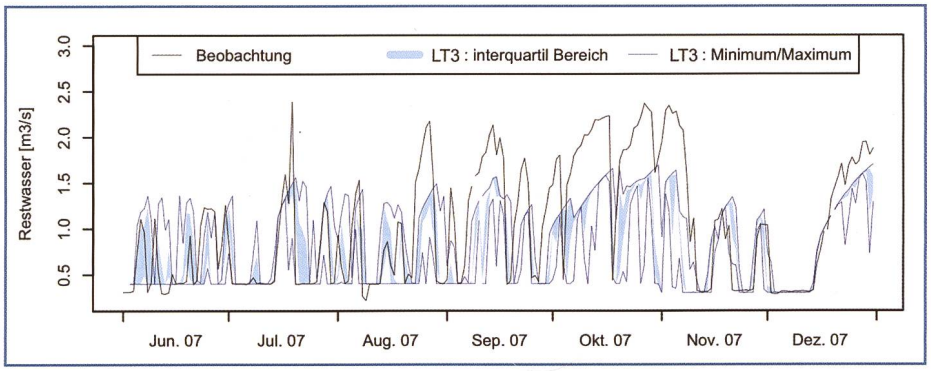

Bild 8. Angekettete COSMO-LEPS-Vorhersage (Tagesmittel) mit unterschiedlicher 3-Tage-Vorlaufzeit (TP) für die Periode Juni bis Dezember 2007. Die Graphiken beziehen sich auf die Vorhersage der Restwassermengen, welche aus dem Stausee in die Sihl (Bild 1) zur Einhaltung der Dotiermengen in Blattwag geleitet werden müssen.

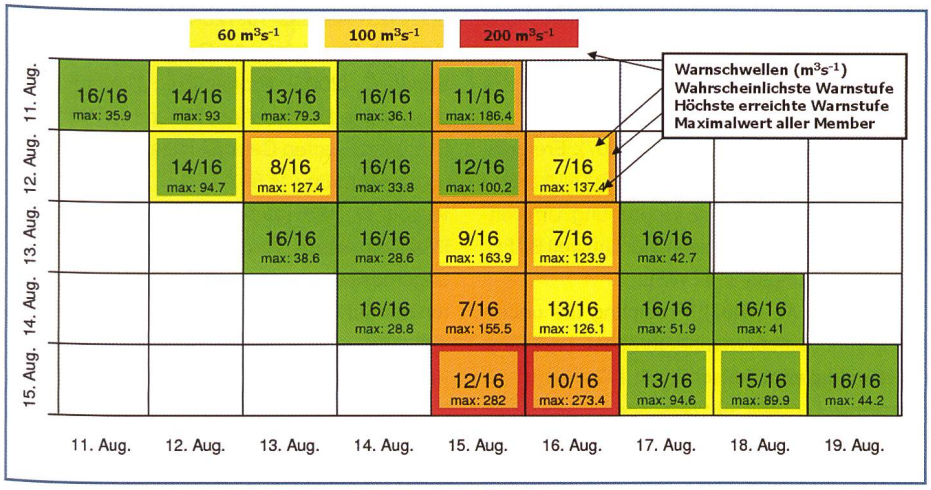

Bild 9. Persistenztafeln zur COSMO-LEPS-Vorhersage des Spitzenabflusses der Sihl in Zürich für das Ereignis des 15./16. August 2008. Die Ordinate definiert den Tag an dem die COSMO-LEPS-Vorhersage gestartet wurde. Die Abszisse definiert den Vorhersagezeitraum. In den Kästchen wird für jeden der fünf Tage der Vorhersage die entsprechende Warnstufe angegeben. Die Legende erklärt die Bedeutung der Farben (Warnstufen) und der Ziffern in den einzelnen Kästchen.

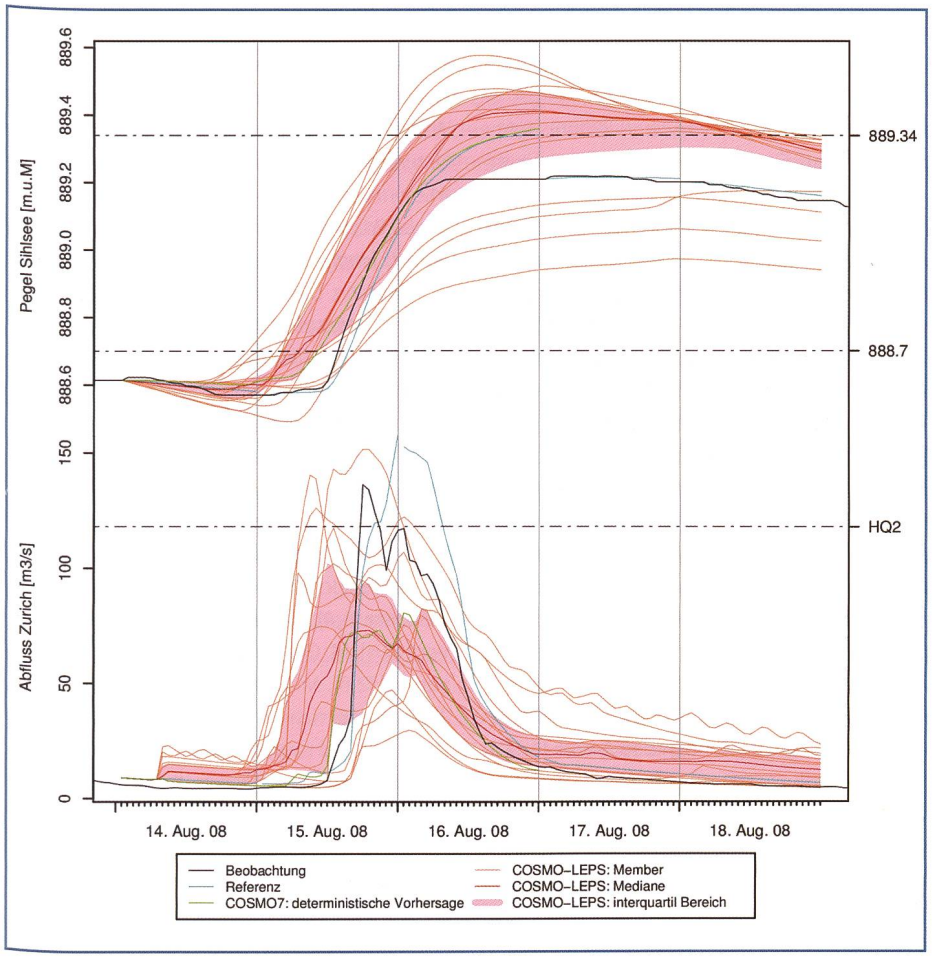

Bild 10. «Spaghetti-Plot» der a posteriori COSMO-LEPS-Vorhersage für die Periode vom 14. bis 18. August 2008. Die COSMO-7-Vorhersage und der Referenzlauf sind ebenso dargestellt. Die obere Graphik zeigt die Vorhersage des Standes des Sihlsees. Die untere Graphik die Vorhersage der Abflussganglinie für den Standort Zürich Sihlhölzli.

tatsächlich auf ein Hochwasser mit einer Wiederkehrperiode von 2 Jahre (HQ2, *Bild 10*) für Zürich Sihlhölzli deuten. Die Persistenztafel *(Bild 5)* fasst diese Informationen zusammen und zeigt, dass in 7 der 16 berechneten Szenarien mit einer Abflussspitze von über 100 $m^3 s^{-1}$ zu rechnen ist.

Die Vorhersage vom 15. August bestätigt die Vorhersage des Vortages, wonach Warnstufe «Orange» höchstwahrscheinlich sowohl am 15. wie auch am 16. August 2008 übertroffen wird. Die Abflussmessungen zeigten, dass die Schwelle von 100 $m^3 s^{-1}$ an beiden Tagen übertroffen wurden. Am 15. August wurden rund 155 $m^3 s^{-1}$ gemessen und am 16. August, bei sinkendem Pegelstand, übertraf auch eine zweite kleine Abflussspitze die HQ2 Marke von 118 $m^3 s^{-1}$.

Dieses Beispiel zeigt Möglichkeiten zur Präsentation der komplexen Information von COSMO-LEPS-Vorhersagen, die dem Endnutzer die Interpretation von probabilistischen Vorhersagen erleichtern sollen. Seit April 2010 werden die gezeigten Persistenztafeln operationell generiert und auf der IFKIS-Sihl-Informationsplattform dargestellt (Badoux et al., 2010).

5. Schlussfolgerungen

Präzise Abflussvorhersagen in alpinen und voralpinen Gebieten werden, neben der komplexen Topographie, durch die schwierige örtliche und mengenmässige Vorhersage von konvektivem Niederschlag erschwert. Während den Sommermonaten ist die Vorhersageunsicherheit auf Grund der instabilen atmosphährischen Bedingungen deshalb am höchsten. Mit Hilfe von Ensemblevorhersagen kann diese Vorhersageunsicherheit zumindest teilweise abgeschätzt werden. Die vorliegende Arbeit zeigt die erfolgreiche Integration von probabilistischer meteorologischer Information in ein operationelles hydrologisch-hydraulisches Modellsystem.

Die qualitative Evaluation mittels angeketteter Modellläufe zeigt positive Ergebnisse. Die Unsicherheitsbänder in *Bild 6* und *Bild 7* wachsen zwar mit zunehmendem Vorhersagehorizont, aber zeigen keine konstant hohe Bandbreite (Wetter-Dynamik wird abgebildet). Die Erkenntnisse aus der Verifikation der Modellkette deuten auf Vorteile von COSMO-LEPS gegenüber der deterministischen Variante COSMO-7 hin. Es lohnt sich deshalb in den höheren Rechenaufwand zu investieren, um eine bessere Entscheidungsgrundlage für die Massnahmenplanung im Einzugsgebiet der Sihl zu erhalten.

Eine Eigenheit von probabilistischen Vorhersagen ist, dass sie – anders als deterministische Vorhersagen – nach einem Ereignis nicht als «richtig» oder «falsch» eingestuft werden können, da nur die Wahrscheinlichkeit einer Überschreitung eines zu bestimmenden Schwellwertes vorhergesagt werden kann. Es muss folglich beurteilt werden, ab wann eine Vorhersage für den Endbenutzer nützlich ist. Dies kann dann auch der Fall sein, wenn die Vorhersage nach deterministischen Massstä-

ben falsch war (Zappa und Vogt, 2007). Es ist Sache der Modellanbieter, die mit den probabilistischen Vorhersagen einhergehenden Unsicherheiten den Endnutzern zu kommunizieren. Während die deterministische Vorhersage eine eindeutige, aber möglicherweise falsche Grundlage für eine Ja-/Nein-Entscheidung liefert, bieten die probabilistischen Vorhersagen eine ehrlichere und umfassendere Einschätzung der Situation. Dies bedeutet natürlich einen einschneidenden Paradigmenwechsel in der Interpretation von Hochwasservorhersagenprodukte (vgl. *Bild 10*). Für einen nutzbringenden Einsatz der Vorhersagen ist deshalb eine kontinuierliche Schulung aller Beteiligten unerlässlich. Die kommenden Jahre werden zeigen, welche Produkte in der Praxis nützlich sind und künftig als Entscheidungshilfen für die Fachstellen, die im Krisenfall für den Hochwasserschutz zuständig sind, zur Verfügung gestellt werden sollten.

Im zweiten Beitrag («Wasser Energie Luft», Dezemberausgabe 2010) zu IFKIS-HYDRO Sihl berichten Badoux et al. (2010) über den operationellen Umgang mit dem vorgestellten Vorhersagesystem anhand des Beispiels des Baus der neuen Durchmesserlinie (Bahnhof Löwenstrasse) mitten in der Stadt Zürich.

6. Danksagung

Wir bedanken uns bei allen an diesem Projekt beteiligten Personen. Besonderer Dank geht an das Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich AWEL und an das Bundesamt für Umwelt BAFU für die Finanzierung dieses innovativen regionalen Hochwasservorhersagesystems. Zudem danken wir Felix Fundel, Nadine Hilker, Mina Ossiaa und Christoph Hegg (alle WSL) sowie Uli Kuhlmann (TK Consult AG) für die Unterstützung bei der Ausführung dieses Projektes. Ingo Petzold (SLF) danken wir für die Mithilfe bei der Integration von IFKIS-Hydro Sihl in GIN.

Literatur

Addor, N. (2009): Towards flood mitigation in the Sihl catchment using operational ensemble hydrometeorological forecasts. Masterarbeit an der ETH Zurich.

Addor, N., Jaun, S., Zappa, M. (2010): Towards flood mitigation in a small mountainous catchment: evaluation of deterministic and probabilistic operational hydrometeorological forecasts. Hydrology and Earth System Sciences (submitted).

Badoux, A., Zappa, M., Schatzmann, M., Oplatka, M., Bösch, M., Jaun, S., Gross, M., Steiner, P. Hegg, C., Rhyner, J. (2010): IFKIS-Hydro Sihl: Beratung, Alarmorganisation und Handlungsmöglichkeiten während des Bau der Durchmesserlinie beim Hauptbahnhof Zürich. «Wasser Energie Luft», Ausgabe 4/2010.

Bezzola, G.R., Hegg, C. (Ed.) (2007): Ereignisanalyse Hochwasser August 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Umwelt-Wissen Nr. 0707. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidg. Forschungsanstalt WSL.

Ehrendorfer, M. (1997): Predicting the uncertainty of numerical weather forecasts: a review. Meteorologische Zeitschrift, 6: 147–183.

Germann, U., Galli, G.; Boscacci, M., Bolliger, M. (2006): Radar precipitation measurement in a mountainous region. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 132: 1669–1692.

Jaun, S., Ahrens, B. (2009): Evaluation of a probabilistic hydrometeorological forecast system. Hydrology and Earth System Sciences, 13: 1031–1043.

Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. (1970): River flow forecasting through conceptual models (1), a discussion of principles. Journal of Hydrology, 10: 282–290.

Pappenberger, F., Beven, K.J. (2005): Ignorance is bliss: Or seven reasons not to use uncertainty analysis. Water Resources Research, 42: W05302, doi:10.1029/2005WR004820.

Romang, H., Zappa, M., Hilker, N., Gerber, M., Dufour, F., Frede, V., Bérod, D., Oplatka, M., Hegg, C., Rhyner, J. (2010): IFKIS-Hydro: an early warning and information system for floods and debris flows. Natural Hazards (published online), doi:10.1007/s11069-010-9507-8.

Rotach, M. (2007): Neue Entwicklungen in der Wettervorhersage: Potenzial und Anforderungen für Anwender. In: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL (Hrsg.) Warnung bei aussergewöhnlichen Naturereignissen, Forum für Wissen 2007: 19–23.

Scherrer AG (2007): Eine Literaturauswertung der Hochwasser an der Sihl und der Limmat (1846, 1852, 1874, 1876, 1910 and 1953). Kurzbericht KA07/31 zu Handen des Amtes für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) des Kantons Zürich, Reinach (unveröffentlicht).

Schmocker-Fackel, P., Naef, F. (2010): More frequent flooding? Changes in flood frequency in Switzerland since 1850. Journal of Hydrology, 381(1-2): 1–8.

Schwanbeck, J., Viviroli, D., Röser, I., Trösch, J., Weingartner, R. (2007): Prozessbasierte Abschätzung von Hochwassern im Einzugsgebiet der Sihl. Schlussbericht zur Studie im Auftrag des Amtes für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) des Kantons Zürich, Bern/Zürich (unveröffentlicht).

Thielen, J., Bartholmes, J., Ramos, M.-H., de Roo, A. (2009): The European Flood Alert System - Part 1: Concept and development, Hydrology an Earth System Sciences, 13, 125–140, doi:10. 5194/hess-13-125-2009

Verbunt, M., Walser, A., Gurtz, J., Montani, A., Schär, C. (2007): Probabilistic Flood Forecasting with a Limited-Area Ensemble Prediction System: Selected Case Studies. Journal of Hydrometeorology, 8: 897–909.

Viviroli, D., Weingartner, R., Gurtz, J. (2008): Prozessbasierte Hochwasserabschätzung in ungemessenen mesoskaligen Einzugsgebieten der Schweiz «Wasser Energie Luft», 100(2): 125–130.

Viviroli, D., Zappa, M., Gurtz, J., Weingartner, R. (2009a): An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. Environmental Modelling and Software, 24: 1209–1222.

Viviroli, D., Zappa, M., Schwanbeck, J., Gurtz, J., Weingartner, R. (2009b): Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland – Part I: Modelling framework and calibration results. Journal of Hydrology, 377(1–2): 191–207.

Zappa, M., Vogt, S. (2007): Hochwasservorhersagesysteme der neusten Generation im Praxis-Test. In: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL (Hrsg.) Warnung bei aussergewöhnlichen Naturereignissen, Forum für Wissen 2007: 25–31.

Zappa, M., Rotach, M. W., Arpagaus, M., Dorninger, M., Hegg, C., Montani, A., Ranzi, R., Ament, F., Germann, U., Grossi, G., Jaun, S., Rossa, A., Vogt, S., Walser, A., Wehrhan, J., Wunram, C. (2008): MAP D-PHASE: Realtime demonstration of hydrological ensemble prediction systems. Atmospheric Science Letters, 9: 80–87.

Anschrift der Verfasser

M. Zappa [1], S. Jaun [1,5], A. Badoux [1], J. Schwanbeck [2,8], N. Addor [1], K. Liechti [1], I. Roeser [3,4], A. Walser [4], D. Viviroli [2,8], S. Vogt [5,4], M. Gerber [6], J. Trösch [3], R. Weingartner [2,8], M. Oplatka [7], G.R. Bezzola [5], J. Rhyner [6]

[1] Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf
[2] Geographisches Institut der Universität Bern GIUB, Bern
[3] TK Consult AG, Zürich
[4] MeteoSchweiz, Zürich
[5] BAFU, Bundesamt für Umwelt, Bern
[6] WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Davos
[7] AWEL, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Zürich
[8] Oeschger-Zentrum für Klimaforschung, Universität Bern, Bern