IFKIS-Hydro Sihl : Beratung und Alarmorganisation während des Baus der Durchmesserlinie beim Hauptbahnhof Zürich. 2. Teil

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

Objekttyp: **Article**

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

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

Heft 4

PDF erstellt am: **29.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-941673

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: Beratung und Alarmorganisation während des Baus der Durchmesserlinie beim Hauptbahnhof Zürich (2. Teil)

A. Badoux, M. Zappa, M. Schatzmann, M. Oplatka, M. Bösch, S. Jaun, M. Gross, P. Steiner, C. Hegg, J. Rhyner

Zusammenfassung

Durch den Bau des neuen Bahnhofs Löwenstrasse wird das Überschwemmungsrisiko in der Zürcher Innenstadt und auf der Baustelle Durchmesserlinie erhöht. Im vorliegenden Artikel präsentieren wir die Umsetzung von Vorhersageprodukten eines komplexen, probabilistischen Hochwasservorhersagesystems für das Einzugsgebiet der Sihl (Regionalmodul IFKIS-Hydro Sihl). Modellausgaben werden mit Produkten zur Entscheidungshilfe ergänzt und dienen der Früherkennung potentiell bedrohlicher Abflussereignisse. Im Falle von prognostizierten kritischen Hochwasserspitzen der Sihl sind die folgenden organisatorischen Massnahmen vorgesehen: (i) Vorabsenkung des Sihlsees zur Reduktion der Abflussspitzen im Raum Zürich Hauptbahnhof und (ii) Alarmorganisation zur Einleitung einer Baustellenräumung und einer allfälligen Baustellenflutung. Über eine mögliche Vorabsenkung oder eine Baustellenräumung und -flutung entscheiden zwei verschiedene Expertengruppen. Das System IFKIS-Hydro Sihl wird in der ersten Bauphase des Projektes Durchmesserlinie bislang erfolgreich eingesetzt. Dies setzt voraus, dass das System durch gut geschultes Personal betrieben wird, das in verschiedenen Situationen mit Unsicherheiten der meteorologischen und vor allem hydrologischen Modelldaten umzugehen weiss und diese den Endnutzern kommunizieren kann. Glücklicherweise sind seit Baubeginn grössere Abflussereignisse ausgeblieben. Im vorliegenden Artikel wird anhand von zwei mittleren Ereignissen (Juli und August 2009) der Umgang mit den Vorhersageprodukten erläutert. Zudem wird auf die daraus abgeleiteten Empfehlungen an die Endbenutzer eingegangen.

1. Einleitung

Hochwasser stellen von alters her eine zerstörerische Naturgefahr dar, die vielerorts den Lebensraum der Menschen regelmässig bedroht. Treten im Zusammenhang mit Starkniederschlagsereignissen Naturgefahrenprozesse wie z.B. Hochwasser, Rutschungen oder Murgänge auf, wird die Gesellschaft hauptsächlich aufgrund von Todesfällen und Schäden an privaten Gütern und Infrastrukturen in Mitleidenschaft gezogen (z.B. Barredo, 2009; Guzzetti et al., 2005; Jonkman und Vrijling, 2008; Merz et al., 2004). Gemäss Berz et al. (2001) tritt weltweit keine andere Naturgefahr derart oft auf und richtet solch hohe Schäden an wie Hochwasser. Besonders kritische Situationen entstehen, wenn dicht besiedelte Gebiete von Hochwasser betroffen sind (Kreibich und Thieken, 2009; Kunreuther, 2006). Als Beispiele in der neueren Vergangenheit wären in Europa die Überflutungen durch den Arno in Florenz 1966 (Morandini, 1967), durch die Elbe in Dresden und Prag 2002 (Walther et al., 2004) oder durch die Aare in Bern 1999 und 2005 (BWG, 2000; Bezzola und Hegg, 2007) zu erwähnen.

In der Schweiz verursachten Hochwasser, Rutschungen, Murgänge und Steinschlag für den Zeitraum von 1972–2007 Gesamtschäden von durchschnittlich 360 Mio. CHF pro Jahr (Hilker et al., 2008). Über 90% dieser Schadenskosten sind dabei auf den Naturgefahrenprozess Hochwasser zurückzuführen (Hilker et al., 2009). Hochwasser der Sihl ziehen die Stadt Zürich schon seit jeher in Mitleidenschaft, wobei erste schwere Ereignisse aus den Jahren 1562 und 1732 aktenkundig sind. Weitere gravierende Überschwemmungen folgten 1846, 1874 und 1910. Im Jahr 1865 formulierte der Zürcher Karl Bürkli erstmals die Idee einer Ableitung der Sihl in den Zürichsee. Rund zehn Jahre später reichte er in seiner Funktion als Kantonsrat eine Motion ein, die zwar vom Kantonsingenieur geprüft, aber – auch nach einem zweiten Vorstoss 1897 – nie realisiert wurde (Vischer, 2003). In den folgenden Jahrzehnten wurde kaum mehr über solche Projekte gesprochen, was sicher auch mit dem Bau der Staumauer und der Aufstauung des Sihlsees 1932–1937 zu tun hat. Seither ereigneten sich in der Tat kaum grössere Hochwasser in der Sihl. Interessanterweise liegen jedoch in den Archiven Berichte aus den Jahren 1962 und 1971 vor, die zeigen, dass damals die Idee eines Hochwasser-Entlastungsstollens von der Sihl in den Zürichsee erneut aufgegriffen wurde (Vischer, 2003). Öffentlich thematisiert wird der Entlastungsstollen erst wieder seit dem Hochwasserereignis im August 2005.

Ein moderner, kosteneffektiver Schutz vor Hochwassergefahren in bebauten Gebieten besteht aus einer Kombination von regelmässigem Gerinneunterhalt, raumplanerischen und bautechnischen Massnahmen und einer gut geschulten Notfallorganisation, die unter anderem ein erfolgreiches Abflussvorhersagesystem umfasst. Der Bedarf einer Früherkennung extremer Wetterphänomene und den daraus resultierenden hydrologischen Ereignissen ist in der Schweiz nach dem Hochwasser 2005 stark gestiegen. Ein Früherkennungssystem basiert auf einer effizienten Erfassung, Übermittlung und Darstellung ereignisrelevanter Daten und Informationen – vor und während gefährlichen Naturereignissen. Dies erfordert eine zentrale Daten- und Informationsplattform, die jederzeit von den verantwortlichen Personen in den zuständigen Krisenstäben aufgerufen und konsultiert werden kann (Bründl et al., 2004). Eine solche steht für die Sihl mit IFKIS-Hydro (Romang et al., 2007; 2010) zur Verfügung. Im Verlaufe des Jahres 2010 wird die Plattform IFKIS-Hydro Sihl in die neue Gemeinsame Informationsplattform für Naturgefahren des Bundes (GIN) integriert (Heil et al., 2010).

Im vorliegenden Beitrag präsentieren wir die Umsetzung von Vorhersageprodukten eines komplexen, probabilistischen Hochwasservorhersagesystems für das voralpine Einzugsgebiet der Sihl (vgl. Zappa et al., 2010; «Wasser Energie Luft» 3-2010). Im Rahmen des Projektes «Durchmesserlinie (DML) SBB» wird seit 2007 im Areal des Zürcher Hauptbahnhofs unterhalb der Sihl der neue Bahnhof Löwenstrasse erstellt (Schatzmann et al., 2008). Die Arbeiten führen zu einer Reduktion der Abflusskapazität der Sihl (*Bild 1*, vgl. auch Abschnitt 2.2) und somit zu einer vorübergehenden Verschärfung des Hochwasserrisikos im Bereich des Hauptbahnhofes. Die Modellausgaben des Vorhersagesystems werden mit weiteren Entscheidungshilfeprodukten ergänzt und dienen zur Früherkennung potenziell bedrohlicher Abflussereignisse in der Zürcher Innenstadt im Allgemeinen und auf der Baustelle DML im Speziellen.

In Abschnitt 2 gehen wir auf die Hochwassersituation entlang der Sihl mit Schwerpunkt Zürich Hauptbahnhof ein. Nachfolgend werden die angewendeten Werkzeuge der Hochwasserwarnung präsentiert (Abschnitt 3) sowie die Organisation der Expertengruppen, die zur Verfügung stehenden Handlungsoptionen und das Sicherheitsdispositiv diskutiert (Abschnitt 4). Abschliessend zeigen wir in Abschnitt 5 anhand zweier Hochwasserereignisse im Sommer 2009 wie die Produkte des Vorhersagesystems interpretiert und als Basis für die Entscheidfindung verwendet werden.

2. Hochwassersicherheit des Sihltals und der Stadt Zürich

2.1 Gebietsbeschreibung und historische Hochwasser

Das voralpine Einzugsgebiet der Sihl bis Zürich umfasst eine Fläche von 336 km^2 und weist eine mittlere Höhe von 1060 m ü.M. auf. Das Gebiet reicht von 412 m ü.M. am Standort Zürich-Sihlhölzli (Abflussmessstation des Bundesamtes für Umwelt BAFU) bis auf 2282 m ü.M. (Spitze Drusberg, Kt. SZ). Eine besondere hydrologische Charakteristik des Einzugsgebietes der Sihl stellt die Form des untersten Gerinneabschnittes entlang des Sihltals bis zur Stadt Zürich dar. Je nach hydrologischen Vorbedingungen unterhalb des Stausees werden Hochwasserwellen aus den Teileinzugsgebieten der Alp oder der Biber in diesem schmalen und rund 30 km langen Streifen mehr oder weniger stark abgeflacht. In Abhängigkeit des vorherrschenden Abflusses variieren die Fliesszeiten entlang dieses Abschnittes zudem stark. Während Hochwasserspitzen kleiner Ereignisse den Pegel Sihlhölzli bis zu sechs Stunden nach ihrer Registrierung an der Messstation Blattwag (oberes Sihltal) erreichen, dauert dies bei grösseren Ereignissen nur knapp drei Stunden. Detaillierte Angaben zum Gesamtgebiet, den verschiedenen Teileinzugsgebieten der Sihl sowie zur beträchtlichen Beeinflussung des Abflussregimes der Sihl seit Beginn der Wasserkraftnutzung 1938 werden in Zappa et al. (2010) gegeben.

Historische Hochwasser an der Sihl mit beträchtlichen Schäden in Zürich sind aus den Jahren 1846, 1874 und 1910 bekannt. Zur Zeit dieser Ereignisse existierte allerdings der Sihlsee noch nicht. Seit dessen Bau blieben grössere Hochwasserereignisse aus. Es lässt sich somit nicht sagen, ob unter den heutigen Bedingungen ähnlich hohe Werte aufgetreten wären. Es gilt jedoch zu beachten, dass auch heute unter ungünstigen Bedingungen, z.B. bei bereits hohem Seestand und einsetzendem Starkregen, eine Speicherung im Stausee nicht möglich ist. In solchen Fällen können unter Berücksichtigung der vorgeschriebenen Entlastungsausflüsse sehr grosse Wassermengen aus dem Einzugsgebiet des Sihlsees in das untere Einzugsgebiet der Sihl abfliessen und zur Erhöhung eines bestehenden Spitzenabflusses beitragen. Aus diesem Grund ist es für die Hochwassersicherheit des Sihltals und der Stadt Zürich wichtig, die Nutzung des Sihlsees als Hochwasserrückhalteraum in Betracht zu ziehen.

2.2 Der Hauptbahnhof als neuralgischer Punkt für die Hochwassersicherheit der Stadt Zürich

Der über der Sihl angelegte Hauptbahnhof sowie die flussaufwärts angrenzenden Stadtteile liegen auf oder an der Peripherie des natürlichen Schwemmkegels der Sihl, der über die vergangenen 10 000 Jahre geschüttet wurde. Der Bereich um den Hauptbahnhof liegt deshalb a priori in einer potenziellen Risikozone, was auch durch die Chroniken der verschiedenen Hochwasserereignisse der Sihl im Laufe der letzten Jahrhunderte bestätigt wird (Zappa et al., 2010). Letztmals stand der Hauptbahnhof während des Ereignisses im Juni 1910 unter Wasser. Damals war die Situation des Bahnhofes allerdings noch etwas anders. Heute fliesst die Sihl – rund 500 m oberhalb ihrer Mündung in die Limmat – in einem System von fünf parallelen, 200 m langen Durchlässen unter dem Zürcher Hauptbahnhof hindurch (*Bilder 1* bis *3*). Diese Anordnung stellt aus Sicht der Hochwassersicherheit eine der Hauptgefährdungen im Stadtgebiet dar, da sie über dem Gewässer keinen Raum lässt und Blockierungen und Verklausungen durch Schwemmholz und anderem Treibgut begünstigt.

Mit seinen gegen 3000 Fahrten pro Tag ist der Zürcher Hauptbahnhof einer der meistfrequentierten Bahnhöfe der Welt. Aufgrund seiner Stellung als Knotenpunkt im Schweizer Schienennetz haben Betriebsstörungen grossräumige

Bild 1. Die Sihl fliesst unter dem Hauptbahnhof Zürich hindurch. Zwei der insgesamt fünf Durchlässe waren (zum Zeitpunkt der Aufnahme) mit Fluttoren geschlossen, welche im Falle einer Baustellenflutung geöffnet werden könnten. Aufnahmedatum: 14. Juli 2008; Abfluss rund 105 m^3 s^{-1}; Aufnahme von Oberstrom.

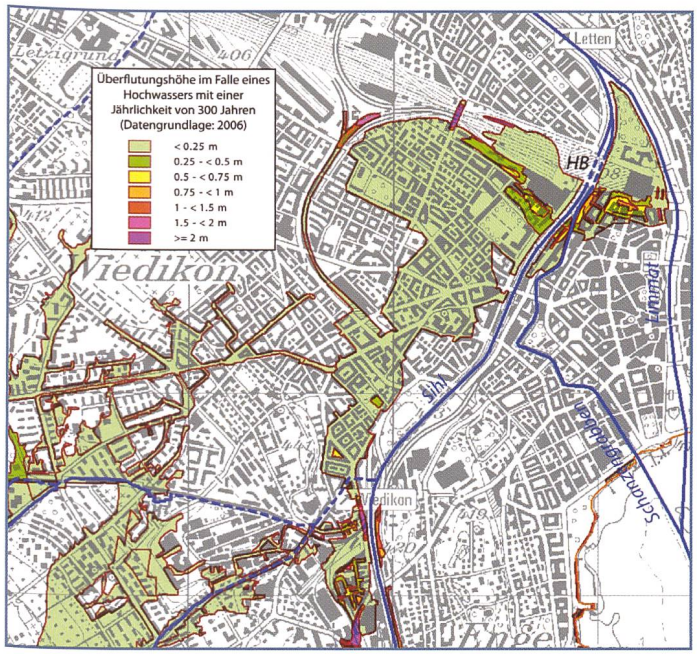


Bild 2. Überflutungskarte der Zürcher Innenstadt im Falle eines Hochwassers der Sihl mit einer Wiederkehrperiode von 300 Jahren (ca. 450 $m^3 s^{-1}$). Die verschiedenfarbigen Flächen geben die Höhe einer Überschwemmung im Stadtgebiet an (HB = Hauptbahnhof). Die vollständige Originalkarte ist online verfügbar unter: www.gis.zh.ch [Juli 2010].

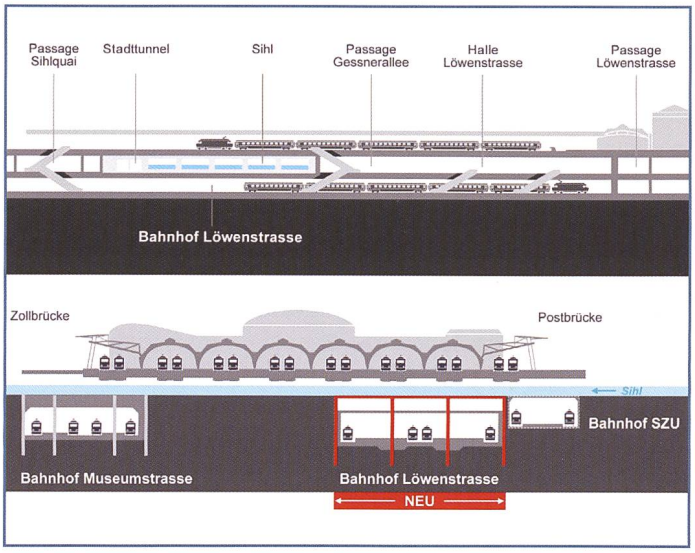


Bild 3. Querschnitt der Sihl im Bereich des Zürcher Hauptbahnhofes mit Oberbahnhof, Sihl und neuem Bahnhof Löwenstrasse (oben). Längsschnitt der Sihl im Bereich des Zürcher Hauptbahnhofes mit Oberbahnhof, Sihl und neuem Bahnhof Löwenstrasse (rot) neben den bestehenden unterirdischen Bahnhöfen Museumstrasse und SZU (unten) (Quelle: SBB).

Auswirkungen. Zudem besteht im Falle einer Überschwemmung ein sehr grosses Schadenspotenzial im Bahnhof – inklusive der ganzen angrenzenden Tunnelsysteme – und in seiner Umgebung (*Bild 2* und *3*). Groben Abschätzungen zu Folge muss von direkten und indirekten Schäden in der Grössenordnung von mehreren 100 Millionen CHF bis mehreren Milliarden CHF ausgegangen werden. Ebenso ist von einer direkten Gefahr für Personen auszugehen, da täglich 350 000 Passagiere den Zürcher HB benutzen.

Im Rahmen der Bauarbeiten des neuen unterirdischen Bahnhofs Löwenstrasse werden zwischen April 2008 und Dezember 2010 die Seitenwände und die Decke des unterirdischen Bahnhofs aus den einzelnen Durchlässen der Sihl heraus gebaut *(Bild 3)*. Während dieser kritischen Bauphase wird der Durchflussquerschnitt des Flusses um 40% (während den Wintermonaten vorübergehend sogar um 60%) reduziert, wenn jeweils zwei bis drei der fünf unter dem Bahnhof führenden Durchlässe geschlossen bleiben. Aufgrund dieser Kapazitätsreduktion wird das bereits bestehende Hochwasserrisiko beträchtlich erhöht und es ergibt sich somit ein zusätzlicher Bedarf an präzisen Abflussvorhersagen. Hochwasserereignisse von rund 300 $m^3 s^{-1}$, was einer Wiederkehrperiode von 30–40 Jahren entspricht, können bereits zur Überflutung der Baustelle und schlimmstenfalls der gesamten unterirdischen Anlagen (inklusive den Bahnhöfen Museumstrasse und SZU sowie den Gewerbebetrieben von RailCity und Shopville) sowie der angrenzenden Stadtteile im Grossraum des Zürcher Hauptbahnhofes führen.

Um einen kleinen Teil der während der Bauzeit verminderten Abflusskapazität zurück zu gewinnen, wurden verschiedene bauliche Massnahmen (z.B. Sohlenabsenkung, Sohlen- und Uferstabilisierungen, Installation von Fluttoren usw.) in die Wege geleitet, welche hier nicht im Detail beschrieben werden. Daneben sind zwei organisatorische Massnahmen vorgesehen, welche massgeblich auf dem in Zappa et al. (2010) beschriebenen Prognosemodell beruhen: Die Vorabsenkung des Sihlsees und die Alarmorganisation zur Räumung und Flutung der Baustelle. Mit der Vorabsenkung des Sihlsees soll der Spitzenabfluss am Zürcher Hauptbahnhof auf weniger als 300 $m^3 s^{-1}$ reduziert werden. Im Handbuch zur Alarmorganisation sind sämtliche Handlungen beschrieben, welche ein termingerechtes und kontrolliertes Fluten der Baustelle ermöglichen. Das heisst, dass die Kapazität der Sihl von drei Durchlässen wieder auf die ursprünglichen fünf Durchlässe vergrössert werden kann. In Abschnitt 4 dieses Beitrages werden das Vorgehen bei einer Vorabsenkung des Sihlsees sowie die Einleitung der Baustellenräumung und -flutung im Detail erläutert.

3. Werkzeuge zur Entscheidungshilfe

Das Hochwasserereignis 2005 führte in der Stadt Zürich kaum zu Schäden. Die vom Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich (AWEL) in Auftrag gegebene Ereignisanalyse zeigte jedoch, dass bereits geringe bis mittlere Verschiebungen der Niederschlagsfelder zu schwerwiegenderen Überschwemmungen geführt hätten (Schwanbeck et al., 2007). Als Sofortmassnahme entwickelten das Geographische Institut der Universität Bern GIUB, die Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, das Büro TK-Consult und die MeteoSchweiz das System IFKIS-Hydro Sihl, mit dem seit Herbst 2008 operationell Informationen für die Notfallorganisation und für den Hochwasserrückhalt im Sihlsee zur Verfügung stehen. Im März 2010 ist die gemeinsame Informationsplattform Naturgefahren (GIN) des Bundes aufgeschaltet worden, die IFKIS-Hydro Sihl als erstes Regionalmodul integriert (Heil et al., 2010).

3.1 Visualisierungsplattform für Modellwarnungen

Grundlage für eine Entscheidungsfindung und Massnahmenplanung sind schnell und benutzergerecht zur Verfügung gestellte Informationen zur meteorologischen und hydrologischen Lageentwicklung. Dazu dient eine für das AWEL massgeschneiderte, internetbasierte Lösung auf der

Grundlage von IFKIS-Hydro (Romang et al., 2010). In diese Visualisierungsplattform *(Bild 4)* fliessen Vorhersageprodukte des operationellen Hochwasservorhersagesystems PREVAH/FLORIS (Zappa et al., 2010), Informationen der meteorologischen Modelle sowie gemessene hydrometeorologische Daten (Niederschlag, Niederschlagsradar, Schneehöhe, Abfluss usw.) ein. Dabei wurde auf eine gute Kompatibilität mit GIN geachtet. Der Benutzer kann über die Plattform laufend auf die neuesten Modellergebnisse und Messungen zugreifen, welche ihm eine Einschätzung der Lage im Einzugsgebiet erlauben und eine solide Grundlage für die Entscheidungsfindung liefern. *Tabelle 1* gibt eine Übersicht über die zur Verfügung stehenden Produkte zur Entscheidungshilfe. Einmal täglich liefert die MeteoSchweiz das COSMO-LEPS Ensemble (in Form von 16 einzelnen, gewichteten Membern), eine Vorhersage der Wetterentwicklung der nächsten fünf Tage. Mittels dieser mittelfristigen Prognosen wird das hydrologisch/hydraulische Modellsystem PREVAH/FLORIS angetrieben, welches das Abflussverhalten der Sihl und ihrer Teileinzugsgebiete für denselben Zeitraum von fünf Tagen modelliert. Anhand der dreimal täglich von der MeteoSchweiz gelieferten COSMO-7 Daten wird zusätzlich eine deterministische Abflussvorhersage für einen Zeitraum von drei Tagen berechnet. Hier stehen dem Nutzer auch Simulationen der Sihl zur Verfügung, die durch die Kombination des Wettermodells mit dem am BAFU betriebenen hydrologischen System FEWS erstellt werden. Für einen Vorhersagezeitraum von jeweils 24 Stunden stehen schliesslich achtmal täglich die Abflussvorhersagen zur Verfügung, welche vom räumlich hoch aufgelösten deterministischen atmosphärischen Modell COSMO-2 angetrieben werden. Zudem können die Nutzer alle modellierten Daten auch jederzeit mit aktuellen Messdaten vergleichen und so die Entwicklung eines Hochwassers im Gebiet (inkl. Teileinzugsgebiete mit Messstationen) leicht verzögert nachvollziehen. Hydrologische Abflussdaten erscheinen dabei mit einer Verzögerung von rund 60 Minuten auf der Plattform, Daten des Niederschlagsradars liegen alle fünf Minuten neu vor.

Die Zusammenstellung von Informationen mit unterschiedlicher Vorlaufszeit (und Aktualisierungsfrequenz) auf der Plattform soll während komplexen Hochwassersituationen entlang der Sihl verlässliche Daten sowohl für die Frühwarnung als auch für das Management des Ereignisses in Echtzeit bieten. Je näher ein Hochwasser rückt, desto genauere, zeitlich und räumlich höher aufgelöste Informationen stehen dem Anwender zur Verfügung. Diese weisen nicht nur regionalen, sondern auch stark lokalen Charakter auf.

Produkt	Modus	Vorlaufzeit	Aktualisierung	Warnungen per
Wahrscheinlichkeitskarten & Meteogramme	EPS [1]	120 h	d	Email / SMS
PREVAH/FLORIS / COSMO_LEPS	H-EPS [2]	120 h	d	WEB
PREVAH/FLORIS / COSMO_7	NWP [3]	72 h	d/3	WEB
FEWS_HBV / COSMO_7	NWP [3]	72 h	d/3	Email / SMS
PREVAH/FLORIS / COSMO_2	NWP [3]	24 h	3 h	WEB
PREVAH/FLORIS / Niederschlagsradar	Now-casting	< 6 h	h	WEB
PREVAH/FLORIS / Niederschlagsmessgeräte	Now-casting	< 6 h	h	WEB
Abflussganglinien	Echtzeit	-	30 min	Anruf (Tel.)
Niederschlagsradar	Echtzeit	-	5 min	Email / SMS

1 Ensemble Vorhersagesystem
2 Hydrologisches EPS
3 Numerische Wettervorhersage (deterministisch)

Tabelle 1. Übersicht über die auf der Warnplattform der DML (vgl. Bild 4) zur Entscheidungshilfe vorhandenen Produkte, die nach der maximalen zur Verfügung stehenden Vorlaufzeit geordnet sind (abnehmend von oben nach unten).

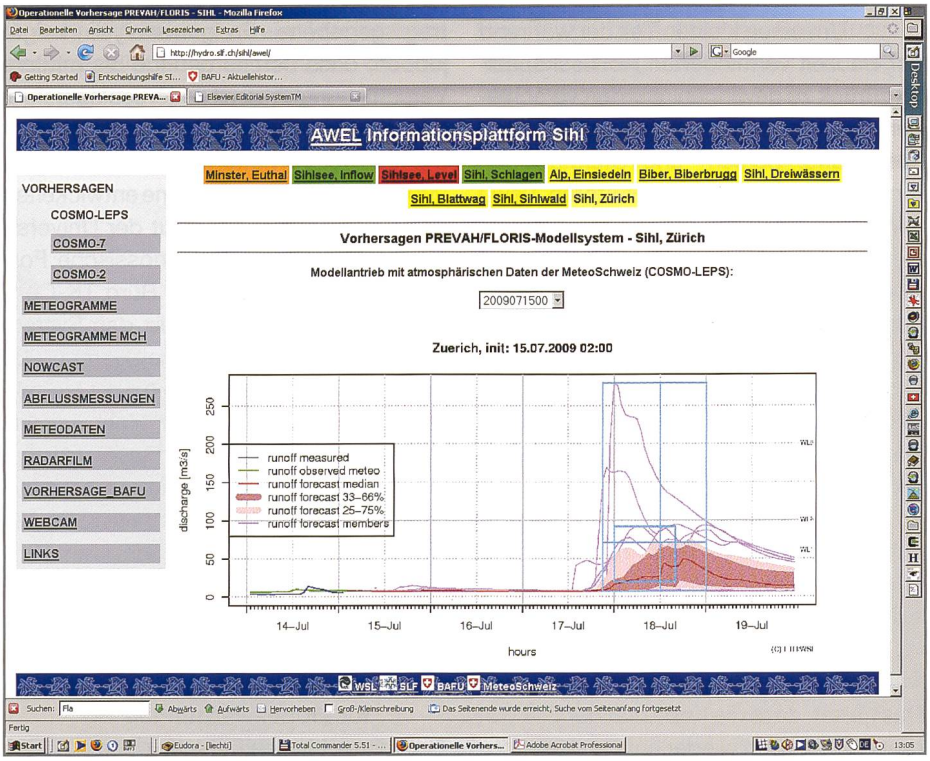


Bild 4. Die webbasierte Visualisierungsplattform IFKIS-Hydro Sihl am 15.07.2009. Die wahrscheinlichste Abflussspitze der Sihl beim Hauptbahnhof von rund 75 $m^3 s^{-1}$ wird mit rund 80 Stunden Vorlaufzeit auf den 18.07.2009 um 12:00 Uhr vorausgesagt. Abflussspitzen von über 150 $m^3 s^{-1}$ sind möglich (zwei Member). Die tatsächlich gemessene Spitze betrug rund 115 $m^3 s^{-1}$ und wurde am 18.07.2009 um 04:20 Uhr gemessen (Quelle: Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Kanton Zürich).

3.2 Warnstufen für die Baustelle Durchmesserlinie

Für den Bau des Bahnhofs Löwenstrasse als Bestandteil der Durchmesserlinie wurde vom Bundesamt für Verkehr BAV eine eigenständige Alarmorganisation für Hochwasser in der Sihl gefordert. Diese unterscheidet sich von derjenigen des Kantons Zürich und wird im Folgenden beschrieben. Kernelement ist die Plattform IFKIS-Hydro Sihl. Diese stellt Alarme auf drei verschiedenen Warnstufen für alle berücksichtigten Abflussmessstellen sowie für virtuelle Kontrollpunkte, wie etwa der gesamte Zufluss in den Sihlsee dar. Die aktuell gültigen Warnstufen für ausgewählte Kontrollpunkte im Einzugsgebiet der Sihl sind in *Tabelle 2* wiedergegeben. Die Definition der Warnstufen für Standorte mit Abflussmessstationen basieren auf der statistischen Wiederkehrperiode von Er-

eignissen. Warnstufe 1 (WS1) entspricht einem Abflusswert mit einer Wiederkehrdauer von rund 60 Tagen. Bei WS2 beträgt die Wiederkehrperiode 120 bis 180 Tage und bei WS3 beträgt sie 10 Jahre. Für den virtuellen Kontrollpunkt Zufluss Sihlsee entsprechen die drei Warnstufen denjenigen Zuflussmengen in m^3s^{-1}, welche einer Zunahme des Seespiegels um 1 cm, 2 cm bzw. 4 cm innerhalb einer halben Stunde entsprechen. Für den Pegel des Sihlsees selbst sind die Warnstufen gemäss dem Regulierreglement definiert.

Loggt sich ein Anwender in IFKIS-Hydro Sihl ein, kann er sich auf einen Blick informieren, ob für ein gewisses Teileinzugsgebiet oder für die Sihl am Standort Zürich eine Frühwarnung ausgegeben wurde. Die Modellwarnungen basieren auf den durch COSMO-LEPS, COSMO-7 und COSMO-2 angetriebenen PREVAH/FLORIS Modellierungen. Der Hintergrund des Schriftzuges des betroffenen (Teil-) Einzugsgebietes ist gemäss der aktuell zutreffenden Warnstufe eingefärbt (z.B. roter Hintergrund für «Sihlsee, Level» in *Bild 4*). Während bei einer grünen Hintergrundsfarbe keine der hydrologischen Vorhersagen die tiefste Warnstufe erreicht hat, kennzeichnet ein gelber, oranger oder roter Hintergrund die Überschreitung der WS1, WS2 bzw. WS3. Die hydrologischen Ensemble-Vorhersagen (H-EPS) machen den Benutzer auf eine allfällige Warnung für ein Gebiet aufmerksam, wenn mindestens ein Drittel der Member eine der vordefinierten Warnstufen überschritten hat. Auf der Visualisierungsplattform werden zudem die Modellganglinien und -warnungen der letzten sechs Tage angezeigt, was für die Nachvollziehbarkeit von zurückliegenden Entscheidungen wichtig ist.

4. Organisatorische Massnahmen im Rahmen des Projektes DML

Der Bau des Bahnhofs Löwenstrasse im Rahmen des Projektes «Durchmesserlinie SBB» führt – wie bereits in Abschnitt 1 und 2 ausgeführt – zu einer vorübergehenden Einengung des bereits begrenzten Abflussquerschnittes der Sihl. Entsprechend wurden organisatorische Massnahmen erarbeitet, welche im Falle von erwarteten Hochwasserspitzen zur Durchführung gelangen. Während die «Vorabsenkung Sihlsee» innerhalb eines Zeitraumes von drei Tagen vor Ereignisbeginn durchgeführt wird, tritt die Einleitung der Baustellenräumung und -flutung frühestens 24 Stunden vor Ereignisbeginn bzw. während der Ereignisphase in Kraft.

4.1 Vorabsenkung Sihlsee

Das Einzugsgebiet des Sihlsees umfasst fast die Hälfte der gesamten betrachteten Einzugsgebietsfläche. Eine Reduktion oder gänzliche Unterbindung des Abflusses aus diesem Teileinzugsgebiet kann den Hochwasserabfluss der Sihl deutlich reduzieren, und somit das Hochwasserrisiko in der Stadt Zürich temporär wesentlich entschärfen. Um während eines Hochwasserereignisses eine solche Abflussreduktion zu ermöglichen, muss der Sihlsee entweder bereits vor dem Niederschlag einen sehr tiefen Pegelstand aufweisen, oder der See muss vorzeitig künstlich abgesenkt werden.

Eine Vorabsenkung des Sihlsees kann in Betracht gezogen werden, wenn die meteorologischen und hydrologischen Vorhersagen unter Berücksichtigung des aktuellen Seestandes des Sihlsees aufzeigen, dass der Seepegel das Stauziel von 889.34 m ü.M. überschreiten könnte oder wenn eine Pegelzunahme von mehr als 2 cm in 30 Minuten (ab einem Pegel von 888.70 m ü.M.) zu erwarten ist. Diese beiden Situationen würden aufgrund des Wehrreglements in einer automatischen Hochwasserentlastung des Sees resultieren, was zu einem ungünstigen Zusammenfallen der Wassermengen aus dem Sihlsee mit allfälligen Hochwasserspitzen aus den unterliegenden Einzugsgebieten der Alp und/oder Biber führen könnte. Um ein Rückhaltevolumen von 10, 20 oder sogar 30 Mio. m^3 zu schaffen, muss eine Entlastung in einem Zeitraum der Grössenordnung von 24 bis 48 Stunden, in Extremfällen bis 72 Stunden vor Ereignisbeginn erfolgen. Die genaue Menge abzulassenden Wassers wird mittels eines Berechnungs- und Entscheidungsschemas ermittelt, das auf den vorliegenden Niederschlags- und Abflussvorhersagen basiert, und auch die Turbinierwassermengen des Kraftwerkes berücksichtigt.

Die Prognose von lokalen Gewitterereignissen ist über einen Zeitraum von 48 bis 72 Stunden nicht möglich, weshalb eine Vorabsenkung in erster Linie als Massnahme bei lang anhaltenden, ausgiebigen Niederschlagsereignissen (analog August 2005 und 2007 oder Mai 1999) vorgesehen ist. Liegt der Pegel des Sihlsees sehr hoch (höher als 888.50 m ü.M.) und ist eine grosse allgemeine Gewitteraktivität prognostiziert, kann aber ebenfalls eine Vorabsenkung in Betracht gezogen werden.

Durch eine vorzeitige Absenkung des Sihlsees steigt der resultierende Abfluss in der Sihl auf einen Wert von 60 bis 130 $m^3 s^{-1}$, in Extremfällen auf bis ~ 170 $m^3 s^{-1}$ (entspricht einem kleinen Hochwasser mit einer Jährlichkeit von unter 5 Jahren). Da sich eine Änderung des Wasserstandes in der Sihl bei Niederwasser viel stärker bemerkbar macht als bei Hochwasser, erfolgt im Falle einer Absenkung die Erhöhung der Abflüsse je nach vorherrschendem Wetter unterschiedlich schnell. Bei schönem Wetter erfolgt der Anstieg bis auf einen Abfluss von 20 $m^3 s^{-1}$ über mindestens sechs Stunden. Dies erlaubt den Erholungssuchenden entlang der Sihl, sich in einem angemessenen Zeitraum aus dem Flussbett bzw. dem Uferbereich zurückzuziehen. Ist die Witterung schlecht, erfolgt der Anstieg schneller.

Beratungsgruppe «Vorabsenkung Sihlsee»

Über eine allfällige Vorabsenkung des Stausees wird in kritischen Situationen im Rahmen der Beratungsgruppe «Vorabsenkung Sihlsee» diskutiert. Diese setzt sich aus jeweils einem Vertreter der nachfolgend aufgelisteten Organisationen zusammen.

- SBB Durchmesserlinie
- SBB Etzelwerk AG
- igzalo (Basler&Hofmann/Pöyry Infra): Bauleitung/Projektverfasser
- igzalo (Basler&Hofmann/Pöyry Infra): Wasserbau
- Eidg. Forschungsanstalt WSL
- Vertreter Bezirk Einsiedeln
- Bauplatzversicherung der SBB

Die Beratungsgruppe wird durch die Ver-

Einzugsgebiet	Fläche	WS1	WS2	WS3	Einheit
Sihlsee (gesamter Zufluss)	155.5 km^2	60	120	240	$m^3 s^{-1}$
Sihlsee, Anstieg Pegel	155.5 km^2	1	2	4	cm (30 min)$^{-1}$
Sihlsee, Pegelstand	155.5 km^2	888.70	889.00	889.34	m ü.M.
Alp, Einsiedeln	46.6 km^2	21	49	116	$m^3 s^{-1}$
Biber, Biberbrugg	31.9 km^2	16	22	36	$m^3 s^{-1}$
Sihl, Blattwag	257.5 km^2	40	100	200	$m^3 s^{-1}$
Sihl, Sihlhölzli Zürich	336 km^2	60	100	200	$m^3 s^{-1}$

Tabelle 2. Warnstufen (WS) für ausgewählte Kontrollpunkte im Einzugsgebiet der Sihl.

Bild 5. Fluttore unterstrom (links): Spundwandbohlen im Wechsel mit Betonelementen. Im Rahmen einer Baustellenflutung werden diese Elemente mittels Seilbagger hochgezogen (rechts) (Quelle: igzalo).

treter Wasserbau/Hydrologie der igzalo einberufen, wenn aufgrund des operationellen Modells die Eintretenswahrscheinlichkeit eines bedrohlichen Abflusses von mehr als 300 m^3 s^{-1} der Sihl am Zürcher HB zwischen 5 und 20% liegt. Im Ernstfall trifft sich die Beratungsgruppe «Vorabsenkung Sihlsee» am Standort Hauptbahnhof Zürich. In der Gruppe nicht direkt vertreten ist die MeteoSchweiz, welche jedoch bei Bedarf via 24-Stunden-Hotline jederzeit eine Spezialberatung liefern kann. Die SBB-Durchmesserlinie in ihrer Funktion als Bauherrin leitet die Besprechungen der Beratungsgruppe, trägt die Verantwortung über jegliche Entscheide (Mehrheitsbeschluss sämtlicher Vertreter) und löst die Vorabsenkung Sihlsee oder die Korrektur einer bereits laufenden Vorabsenkung aus. Ebenso beendet oder reduziert die SBB-Durchmesserlinie die Vorabsenkung auf der Basis von vordefinierten Niederschlags- und Abflusskriterien. Der Beschluss wird der Hochwasserfachstelle des Kantons und der Kantonspolizei mitgeteilt. Diese können in Ausnahmesituationen die Führung für die Steuerung des Sihlsees übernehmen. Das Bundesamt für Umwelt BAFU ist für Abflussprognosen im Einzugsgebiet der Limmat verantwortlich. Aus diesem Grund können Experten der Sektion Analysen und Vorhersagen des BAFU jederzeit konsultiert werden, falls Entscheidungen der Beratungsgruppe die unterliegenden Regionen massgeblich betreffen würden.

Das Vorgehen im Rahmen der Besprechungen der Beratungsgruppe ist gemäss einem detaillierten Protokoll geregelt. Sämtliche Beschlüsse und Wege der Entscheidungsfindung werden durch die Bauleitung schriftlich protokolliert, um eine Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten.

4.2 Alarmorganisation zur kontrollierten Räumung und Flutung der Baustelle

Ziel der Alarmorganisation ist die Durchführung einer kontrollierten Flutung der Baustelle. Diese Massnahme wird dann zentral, wenn die Vorabsenkung Sihlsee nicht oder nur unzureichend ausgeführt werden konnte und im Zeitraum von 24 Stunden ein Hochwasserabfluss von mehr als 300 m^3 s^{-1} erwartet wird. Bevor die Baustelle geflutet werden kann, müssen innerhalb dieser 24 Stunden die Durchlässe geräumt und flutungssicher gemacht werden, was je nach Bauphase mit unterschiedlich grossem Aufwand verbunden ist. Die Baustellenflutung selbst wird unterstromseitig durch Ziehen von im Wechsel angeordneten Spundwandbohlen und Betonelementen mittels Seilbagger *(Bild 5)* und oberstromseitig durch Heben von Fluttoren mittels Hydraulikantrieb ausgeführt. Dabei werden die abgeschotteten Durchlässe jeweils zuerst unterstromseitig und darauf oberstromseitig geöffnet, damit die Bildung einer Flutwelle vermieden werden kann. Diese Prozedur alleine dauert gut zwei Stunden. Die Alarmorganisation ist in verschiedene Phasen unterteilt und basiert auf dem prognostizierten Abfluss der Sihl für den Standort Zürich Sihlhölzli sowie auf dem gemessenen Abfluss in der Blattwag *(Tabelle 3)*. Die wichtigsten Phasen sind nachfolgend kurz zusammengefasst:

- Phase «Ständige Überwachung»: Tägliche Konsultation von Niederschlags- und Abflussprognosen durch Berater WSL und igzalo (Basler&Hofmann/Pöyry Infra) bei tiefen bis mässigen Abflüssen der Sihl. Ab einem gemessenen Abfluss in der Blattwag von 40 m^3 s^{-1} werden alle Materialien entfernt und Bauarbeiter müssen den offenen Flussraum verlassen (gilt nicht im Bereich der durch Fluttore abgeschotteten Durchlässe).
- Phase «Bereitschaft»: Ab den entsprechenden Grenzwerten wird die Koordinationsgruppe Baustelle einberufen und erste Massnahmen zur Gewährleistung der Hochwassersicherheit eingeleitet (z.B. Entfernung von Schwemmholz).
- Phase «Baustellenflutung»: Erreichen die Abflüsse in der Sihl sehr hohe Werte bzw. sind solche prognostiziert, wird durch Beschluss der Koordinationsgruppe Baustelle die kontrollierte Baustellenflutung ausgelöst und durchgeführt.

Die gültigen Grenzwerte für die operationelle Bestimmung der vorherrschenden Phase sind in *Tabelle 3* aufgeführt. Eine kontrollierte Flutung der Baustelle kann innerhalb von sechs bis zwölf Stunden durchgeführt werden. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass bereits bei den ersten Anzeichen eines Hochwassers auf der Baustelle mit Vorbereitungs- und Räumungsmassnahmen begonnen wird. Über eine allfällige Flutung muss demnach mindestens 24 Stunden vor dem Erreichen eines kritischen Abflusses beraten werden.

Messgrösse	Einheit	Phase Überwachung	Phase Bereitschaft	Phase Baustellenflutung		
				a	b	c
Abfluss gemessen, Sihl, Blattwag	$m^3 s^{-1}$	< 65	≥ 100	≥ 150	≥ 200	≥ 250
Abfluss prognostiziert, Sihl, Zürich Sihlhölzli	$m^3 s^{-1}$	< 150	> 150	> 360	> 300	> 300
Diff. gemessener Abfluss (Δ Sihlhölzli - Blattwag)	$m^3 s^{-1}$	–	–	–	> 50	< 10

Tabelle 3. Grenzwerte für die operationelle Bestimmung der vorherrschenden Phase der Alarmorganisation. Die Bedingungen für eine Baustellenflutung sind in drei Varianten (a) bis (c) definiert.

Koordinationsgruppe der Alarmorganisation

In der Koordinationsgruppe der Alarmorganisation sind der Bauunternehmer, der Bauherr, die Bauleitung/Projektverfasser igzalo, die Vertreter Wasserbau/Hydrologie der igzalo und bei Bedarf die Versicherung der SBB vertreten. In diesem Organ werden sämtliche Fragen betreffend Hochwassersicherheit auf der Baustelle besprochen und gegebenenfalls die kontrollierte Baustellenflutung ausgelöst. Als Betreiber des Vorhersagesystems wirkt die WSL bei einer Einberufung der Koordinationsgruppe beratend mit. Ab prognostizierten Abflüssen am Zürcher Hauptbahnhof von mehr als 200 $m^3 s^{-1}$ erfolgt die Koordination mit den zuständigen kantonalen Stellen.

Überlegungen zum Verhältnis von Kosten und Nutzen

Die Kosten, die mit einer Flutung der Baustelle zusammenhängen, sind weitgehend auf den Unterbruch der Arbeiten und somit die Verzögerung des Arbeitsprozesses zurückzuführen. Sie hängen daher stark von der Situation der Baustelle zum Zeitpunkt der Flutung sowie von dessen Dauer und den darauf folgenden Aufräumarbeiten ab. Es wird davon ausgegangen, dass bestenfalls eine Verzögerung von drei Arbeitstagen verursacht wird.

Gemäss igzalo (2008) wird der Schaden infolge einer Baustellenflutung auf rund 1.7 Mio. CHF geschätzt. Die Folgekosten infolge Bauverzögerungen könnten eine weitere Million Franken betragen. Das Restrisiko eines sehr grossen Hochwasserereignisses (Wiederkehrperiode von 300–500 Jahren) beziffert sich unter der Annahme eines Schadenpotenzials von mindestens 500 Mio. CHF bei der Flutung des HB-Areals (direkte Schadenskosten und Infrastruktur sowie volkswirtschaftliche Folgekosten) und einer Bauzeit von rund drei Jahren auf mindestens 3.75 Mio. CHF (igzalo, 2008). Berücksichtigt man ein volks- bzw. betriebswirtschaftlich anzustrebendes Verhältnis von verhinderten Schäden zu den Kosten der Prävention von 4/1 bis 2/1, dann lohnt es sich, Vorabsenkungskosten in der Grössenordnung von 1.5 bis 3 Mio. CHF in Betracht zu ziehen. Selbstverständlich wird die Koordinationsgruppe der Alarmorganisation vor einem zu fällenden Entscheid aktuelle Schätzungen zu den Kosten einer Baustellenflutung beiziehen.

Gemäss Vorgabe der Etzelwerk AG werden pro 10 Mio. m^3 Vorabsenkung (entspricht in etwa 1 m Stauhöhe Sihlsee) Folgekosten von rund 1.25 Mio. CHF in Rechnung gestellt. Bei dieser Abschätzung handelt es sich allerdings um Richtkosten. Effektiv sind die Einkommensausfälle nur zu zahlen, falls das präventiv entlastete Wasser durch die Auffüllung des Sihlsees während dem Niederschlagsereignis nicht vollständig kompensiert wird. Fällt ein Niederschlagsereignis gegenüber dessen Prognose abgeschwächt aus, so entstehen Teilkosten. Abschliessend lässt sich somit sagen, dass die tatsächlichen Kosten für den Kraftwerkbetreiber in den meisten Fällen tiefer ausfallen dürften als die zum Zeitpunkt der Entscheidung für eine Vorabsenkung berechneten Ausfallkosten.

4.3 Kommunikation

Interne Kommunikation:

Die WSL und die igzalo (Wasserbau/Hydrologie) führen wöchentlich (jeweils freitags) eine Lagebeurteilung der hydrologischen Situation im Einzugsgebiet der Sihl durch und stellen diese allen Personen der Beratungsgruppe «Vorabsenkung Sihlsee», einer Koordinationsgruppe Baustelle sowie der kantonalen Hochwasserfachstelle zu. Die Lagebeurteilung bezieht sich auf das folgende Wochenende und gibt ein Statement über die Wahrscheinlichkeit einer Einberufung der Beratungsgruppe und/oder der Koordinationsgruppe ab. Dementsprechend wird den beteiligten Verantwortlichen eine Empfehlung darüber abgegeben, ob sie den Grossraum Zürich verlassen können oder dies vermeiden sollten.

Externe Kommunikation im Rahmen der Vorabsenkung Sihlsee:

Über die Einberufung der Beratungsgruppe «Vorabsenkung Sihlsee» werden die Verantwortlichen der SBB, des Kantons Zürich sowie zwei Kraftwerkbetreiber an der Sihl im näheren Bereich des Sihlsees per Email, Fax und/oder Mobiltelefon informiert. Wird eine Vorabsenkung des Sihlsees ausgeführt, bestellt die Beratungsgruppe bei der Etzelwerk AG per Fax den notwendigen Entlastungsabfluss ($m^3 s^{-1}$) für die erforderliche resp. noch mögliche Entlastungsdauer (h). Anschliessend werden, nebst den Verantwortlichen seitens SBB und Kanton Zürich, sämtliche Anstössergemeinden der Sihl, sämtliche Kraftwerkbetreiber entlang der Sihl und der Limmat und zahlreiche weitere «feste Sihlanstösser» per Email oder Fax über die Durchführung der Vorabsenkung informiert. Die Kommunikation der «mobilen Sihlanstösser», insbesondere der Erholungssuchenden geschieht a) durch mehr als 100 Warntafeln entlang der Sihl zwischen Zürich und Schindellegi und b) durch das bereits erwähnte langsame Hochfahren des Abflusses aus dem Sihlsee. Zudem werden die Medien über die Vorabsenkung informiert.

5. Interpretation der Modellierungen und Anwendungsbeispiele

5.1 Interpretation der Grafiken auf der Web-Plattform

In *Bild 4* ist beispielhaft der grafische Output der PREVAH/FLORIS Simulation vom 15. Juli 2009 dargestellt. Die y-Achse stellt die Abflusswerte in $m^3 s^{-1}$ dar, während auf der x-Achse die Zeit abgebildet ist. Die Abflussmessungen sind mit einer blauen Linie dargestellt und enden zum Zeitpunkt, an dem die Grafik erstellt wurde. Die hellgrüne Kurve stellt den anhand gemessener Niederschlagswerte simulierten Abfluss (auch Nowcasting genannt) dar. Die verschiedenen Kurven, die auf der Zeitachse rechts vom aktuellen Zeitpunkt liegen, sind Prognosedaten, die auf der Basis von meteorologischen Vorhersagedaten berechnet wurden. Sie sind alle durch rötliche Farbtöne gekennzeichnet.

Je nach verwendetem meteorologischem Modell ist der Zeitraum der Vorhersage unterschiedlich lang (vgl. Abschnitt 3.2). Hier wenden wir uns hydrologischen Vorhersagen zu, die auf Daten von COSMO-LEPS basieren. Anhand der Ensemble-Vorhersage mit 16 Varianten (Membern) der Witterungsentwicklung

modelliert PREVAH 16 entsprechende Abflussganglinien, welche in *Bild 4* violett gekennzeichnet sind. Die einzelne dunkelrote Kurve stellt dabei den Median der Ensemble-Member dar. Der interquartile Bereich (25–75%) ist hellrosa hinterlegt. Er enthält per Definition zu jedem Zeitpunkt die Hälfte aller Member. Gemäss hydrologischer Prognose wird sich der Abfluss zum Zeitpunkt t mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% innerhalb dieser Fläche befinden. Der interquantile Bereich von 33–66% ist mit einer etwas dunkleren Farbe hinterlegt (mittleres Drittel).

Die Unsicherheit einer Wettervorhersage ist umso grösser, je weiter der Vorhersagezeitpunkt in der Zukunft liegt. Diese Unsicherheit wird dem hydrologischen Modell vererbt. Die Member stellen die möglichen Entwicklungen des Abflusses dar und drücken auf diese Weise die Unsicherheit in der Wettervorhersage aus. Es ist von Wichtigkeit, die einzelnen Member nicht separat zu betrachten, sondern das Ensemble der Abflussvorhersage immer als Einheit zu interpretieren.

5.2 Die Peak-Flow-Box

Als Interpretationshilfe dienen bei prognostizierten Hochwasserereignissen zwei verschachtelte blaue Rechtecke mit einem gemeinsamen Fadenkreuz (*Bilder 4, 6* und *7*). Diese so genannte Peak-Flow-Box besteht aus vier Elementen, deren Bedeutung nachfolgend erläutert wird.

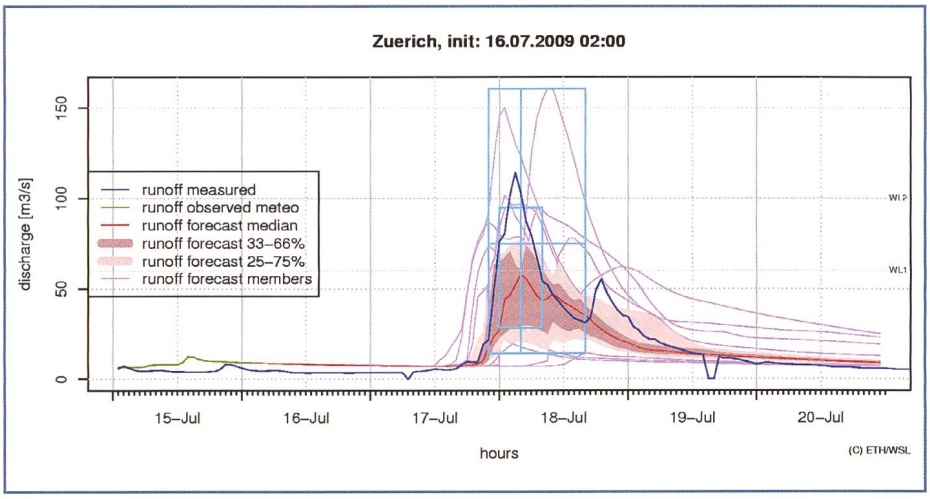
- Das äussere Rechteck weist zwei wichtige Punkte auf. Die linke untere Ecke wird durch den Zeitpunkt *t0* (früheste Auftretenszeit der Abflussspitze eines Members, dessen Wert das WL1 überschreitet) und den Abfluss *p0* (tiefster prognostizierter Spitzenwert eines Members während dem Ereignis) definiert. Die rechte obere Ecke ist analog definiert. Sie stellt den spätesten Zeitpunkt (*t100*) und den maximalen Abfluss (*p100*) des Ensembles dar.
- Das innere Rechteck hat als linke untere Koordinate die 25% Quartile der Spitzenabflusszeit (*t25*) und die 25% Quartile des Spitzenabflusses (*p25*) aller Member der gesamten Vorhersageperiode. Für die rechte obere Ecke sind entsprechend die 75% Quartile (*t75* und *p75*) ausschlaggebend. Das innere Rechteck enthält 25% aller Spitzenabflüsse des Ensembles.
- Die horizontale Linie des Fadenkreuzes reicht von *p0* bis *p100* und repräsentiert den Ensemble-Median des Spitzenabflusses (*p50*). Die vertikale Linie des Fadenkreuzes reicht von *t0* bis *t100* und repräsentiert den Ensemble-Median der Spitzenabflusszeit (*t50*).

In den folgenden beiden Abschnitten werden zwei verschiedene Hochwassersituationen aus dem Jahr 2009 präsentiert. Diese wurden durch lang andauernde bzw. durch gewittrige Niederschläge ausgelöst und geben bestehende Probleme bei der Hochwasservorhersage wieder.

5.3 Ereignis vom 17. Juli 2009 – Markante Kaltfront

Am Freitag, 17. Juli 2009 ging eine markante Kaltfront über die Schweiz hinweg. Eine detaillierte Ereignis-Dokumentation ist in MeteoSchweiz (2009a) gegeben. Insgesamt brachte die Kaltfront beträchtliche Niederschlagsmengen. Vom 17. Juli 18 Uhr bis zum nächsten Morgen um 6 Uhr fielen von den östlichen Alpen bis zum Bodenseeraum verbreitet zwischen 40 und 70 mm Niederschlag. In den östlichen Voralpen kamen Mengen von über 100 mm zustande. Diese Starkniederschläge führten in weiten Teilen der Schweiz zu erhöhten Pegelständen in Bächen und Flüssen. Der Abfluss der Sihl im Sihlhölzli erreichte am 18. Juli um 4:20 Uhr ein maximales Stundenmittel von 117 $m^3 s^{-1}$.

In den *Bildern 4* und *6* sind die Vorhersagen des Modellsystems PREVAH/FLORIS für den Abfluss der Sihl beim Hauptbahnhof drei Tage *(Bild 4)*, zwei Tage und einen Tag *(Bild 6)* vor dem tatsächlichen Hochwasserereignis dargestellt. Die Unsicherheit im Timing der Abflussspitze beträgt in der Prognose vom 15. Juli knapp mehr als einen Tag (*Bild 4*, äusseres Rechteck der Peak-Flow-Box), wobei das Ensemble den Spitzenwert am 18. Juli mittags andeutet. In der Vorhersage vom 16. Juli hat sich diese Unsicherheit bezüglich des Timings der Abflussspitze verringert und beträgt noch 18 Stunden *(Bild 6, oben)*. Der Median des Zeitpunktes der Spitzen aller Member befindet sich genau



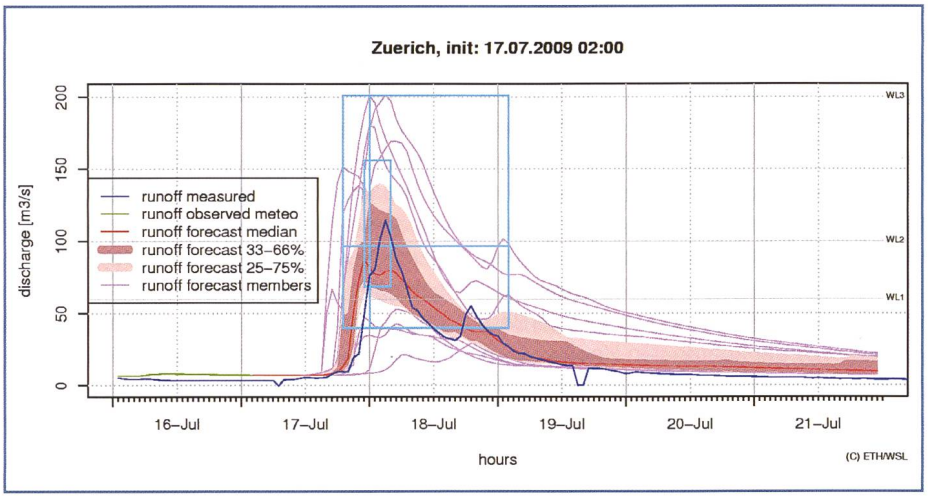


Bild 6. Das Abflussereignis vom 17./18. Juli 2009. Vorhersagen des Modellsystems PREVAH/FLORIS für den Abfluss der Sihl beim Hauptbahnhof rund 36 Stunden (Prognose vom 16. Juli; Grafik oben) und zwölf Stunden (Prognose vom 17. Juli; Grafik unten) vor dem Beginn des Ereignisses. Meteorologische Datengrundlage COSMO-LEPS. Die beobachteten Abflüsse (Stundenmittel, blaue Linie) wurden zu Auswertungszwecken nachträglich jeweils für den gesamten dargestellten Zeitraum angegeben; in der Abflussprognose endet sie zum Zeitpunkt der Modellrechnung (vgl. Bild 4).

bei 4 Uhr, der Auftretenszeit der tatsächlich gemessenen Abflussspitze.

Die Vorhersageunsicherheit der Spitzenabflusswerte ist für die Prognosen vom 15. und 16. Juli sehr hoch. Die einzelnen Ensemble-Member zeigen drei Tage vor dem Ereignis Spitzenwerte zwischen 10 und 280 $m^3 s^{-1}$ *(Bild 4)* und zwei Tage vor dem Ereignis zwischen 15 und 160 $m^3 s^{-1}$ *(Bild 6, oben)*. Anhand des inneren Rechteckes der Peak-Flow-Box lässt sich der zu erwartende Spitzenwert etwas besser einordnen. Die entsprechenden Ensemble-Mediane betragen 70 $m^3 s^{-1}$ bzw. 75 $m^3 s^{-1}$ und deuten klar auf ein Abflussereignis mit Spitzenwert über der WS1 hin.

Trotz leichter Zunahme der Prognoseunsicherheit gegenüber dem Vortag stimmt die Vorhersage vom 17. Juli 2009 sowohl im Timing, als auch im Abflussvolumen relativ gut mit der gemessenen Abflusskurve überein *(Bild 6, unten)*. Die beobachtete Spitze kommt dabei knapp im inneren Rechteck der Peak-Flow-Box zu liegen, und weicht nur wenig vom Fadenkreuz der Peak-Flow-Box ab. Das beobachtete Maximum von 117 $m^3 s^{-1}$ liegt rund 20 $m^3 s^{-1}$ über dem Ensemble-Median des Spitzenabflusses (97 $m^3 s^{-1}$) und wurde etwas nach 4 Uhr erreicht, was einer zeitlichen Abweichung vom Ensemble-Median der Spitzenabflusszeit von 4 Stunden entspricht. Bei der Interpretation einer Prognose darf das Fadenkreuz der Peak-Flow-Box jedoch nicht als deterministische Prognose betrachtet werden. Die Peak-Flow-Box stellt lediglich eine Hilfe zur Interpretation der Ensemble-Vorhersage dar.

In der Lagebeurteilung vom 17. Juli (9:40 Uhr) fassten die verantwortlichen Berater der WSL und igzalo die Situation wie folgt zusammen: «Im Einzugsgebiet der Sihl ist zwischen Freitagmittag und Samstagmittag mit zwischen 40 und 60 mm allenfalls bis gegen 80 mm [Niederschlag] zu rechnen. Zusammen mit der von den Vorregen vorhandenen Vorfeuchte lässt dies ein Überschreiten der 2. Warnstufe an den meisten Abflussmessstellen als wahrscheinlich erscheinen [vgl. *Tabelle 2*]. An der Sihl in Zürich sind Abflüsse zwischen 70 und 130 $m^3 s^{-1}$ wahrscheinlich, ein deutliches Überschreiten der Schwelle von 200 $m^3 s^{-1}$ ist nach keiner der vorliegenden Vorhersagen zu erwarten [*Bild 6, unten*]. Falls wegen deutlich höherer Niederschläge als erwartet mehr Wasser aus dem Sihlsee entlastet werden muss, sind höhere Abflüsse aber nicht völlig ausgeschlossen.»

Insgesamt darf von einer erfolgreichen Prognose gesprochen werden, die auch gut interpretiert wurde. Die Berater teilten eine Spannweite möglicher Spitzenabflüsse mit. Die für die Sicherheit der Baustelle und der Stadt verantwortlichen Personen wurden zudem gebeten, sich bis Samstagmittag für einen allfälligen Einsatz bereit zu halten. Schliesslich mussten jedoch keine weiteren Massnahmen eingeleitet werden.

5.4 Ereignis vom 8. August 2009 – Gewittriger Starkregen

Am Samstag, 8. August 2009 haben sich auf der Alpennordseite mehrere, teils heftige gewittrige Regenfälle entladen (MeteoSchweiz, 2009b). Wegen der schwachen südwestlichen Höhenwinde blieben die Niederschlagszonen länger ortsfest und sorgten stellenweise für beträchtliche Niederschlagsmengen. Ein lokales Maximum trat dabei in der Region zwischen Luzern und dem Zürichsee auf. So wurde beispielsweise Wädenswil am frühen Nachmittag von einer Gewitterzelle getroffen. Das Messgerät der MeteoSchweiz Station lag dabei nicht direkt unter dem maximalen Radarecho, trotzdem wurden innert kurzer Zeit fast 53 mm registriert. 40.5 mm fielen allein innerhalb einer Stunde, was gemäss statistischer Auswertung einem Ereignis mit einer Wiederkehrdauer von 18 Jahren entspricht (MeteoSchweiz, 2009b). Die Teileinzugsgebiete des Sihlsees sowie die stark Abfluss bildenden Flyschböden im hinteren Alptal waren am 8. August nur am Rande von den Gewitterzellen betroffen. Trotzdem erreichte die resultierende Abflussspitze der Sihl (Sihlhölzli) einen Wert von über 100 $m^3 s^{-1}$ (5-min-Mittel). Die Besonderheit bei diesem Ereignis war der rasche Anstieg des Wasserspiegels, welcher in der Blattwag in fünf Minuten um 1.4 m bzw. 110 $m^3 s^{-1}$ und dreieinhalb Stunden später beim Sihlhölzli in 20 Minuten um 0.9 m bzw. 110 $m^3 s^{-1}$ anstieg.

In *Bild 7* sind die entsprechenden

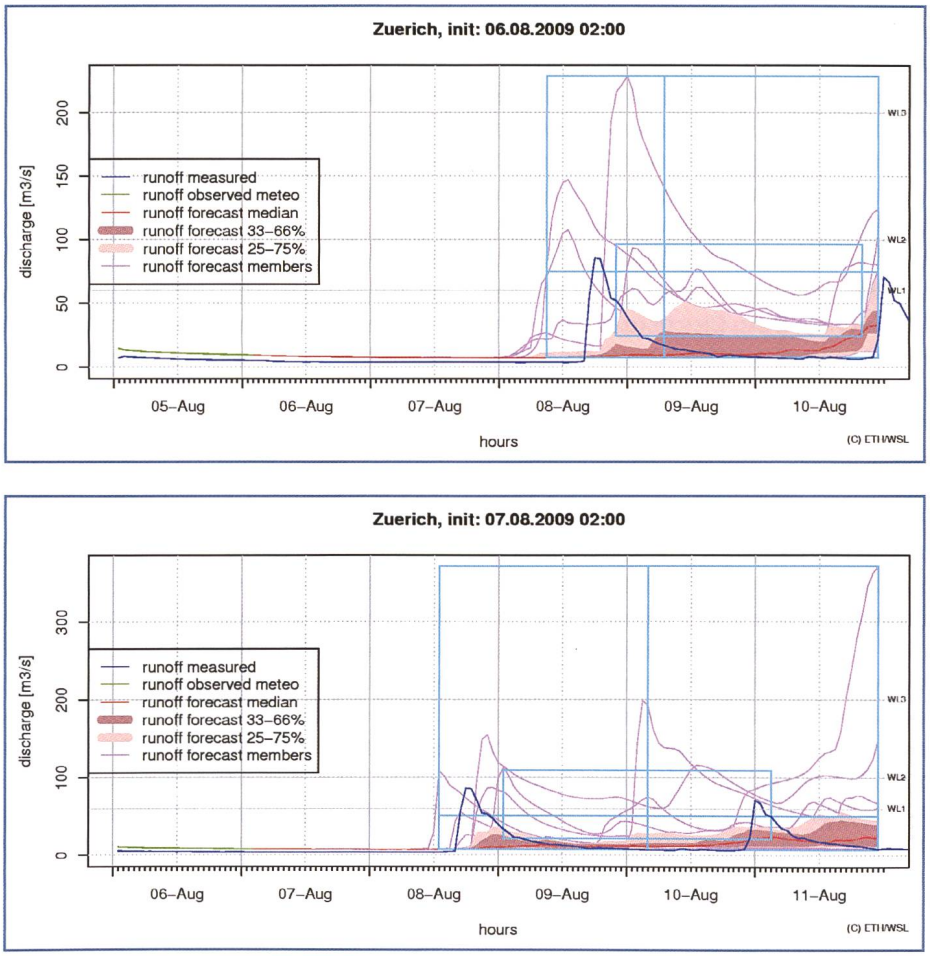


Bild 7. Das Abflussereignis vom 8./9. August 2009. Vorhersagen des Modellsystems PREVAH/FLORIS für den Abfluss der Sihl beim Hauptbahnhof rund 60 Stunden (Prognose vom 6. August; Grafik oben) und 36 Stunden (Prognose vom 7. August; Grafik unten) vor dem Beginn des Ereignisses. Meteorologische Datengrundlage COSMO-LEPS. Die beobachteten Abflüsse (Stundenmittel, blaue Linie) wurden zu Auswertungszwecken nachträglich jeweils für den gesamten dargestellten Zeitraum angegeben; in der Abflussprognose endet sie zum Zeitpunkt der Modellrechnung (vgl. Bild 4).

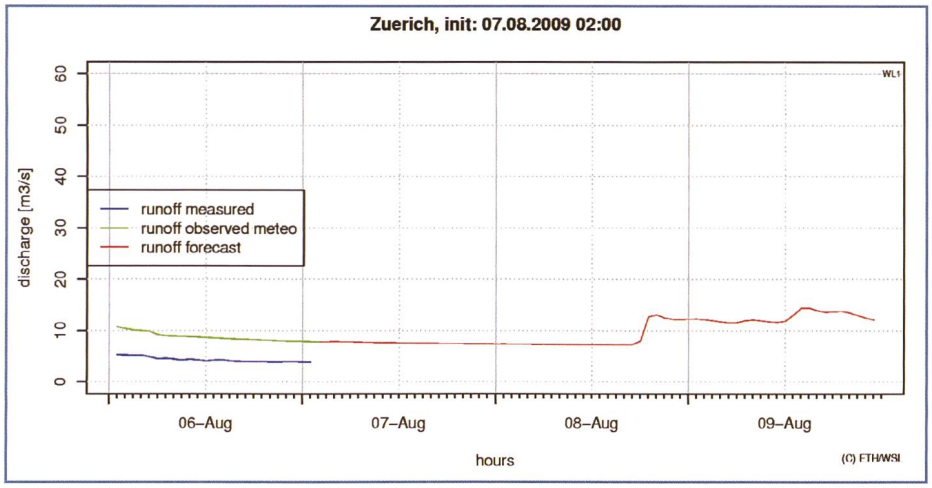


Bild 8. Das Hochwasserereignis vom 8./9. August 2009. PREVAH/FLORIS Vorhersage des 7. August. Meteorologische Datengrundlage: COSMO-7.

Vorhersagen für den Abfluss der Sihl beim Hauptbahnhof zwei Tage und einen Tag vor dem tatsächlichen Ereignis dargestellt. Die Unsicherheit im Timing der Abflussspitze ist für beide Prognosen sehr gross und widerspiegelt die entsprechende Unsicherheit des Wettermodells in der Beschreibung von Gewitterlagen. Es ist vor allem ein grosser zeitlicher Abstand zwischen dem frühest- und spätestmöglichen Zeitpunkt des Spitzenabflusses zu beobachten. Im Gegensatz zum in Abschnitt 5.3 beschriebenen Ereignis vom 17. Juli 2009 ist die von der Peak-Flow-Box dargestellte Zeitspanne viel grösser und beträgt zwei bis drei Tage (äussere Box) bzw. zwei Tage (innere Box). Dies bereitete Schwierigkeiten für die Interpretation der Abflussentwicklung der Sihl für die folgenden zwei bis drei Tage und wurde zudem durch die beträchtliche Spannweite der möglichen Werte des Spitzenabflusses akzentuiert *(Bild 7)*.

Die einzelnen Ensemble-Member zeigen zwei Tage vor dem Ereignis Spitzenwerte zwischen 10 und 230 $m^3 s^{-1}$ *(Bild 7, oben)*. Sechs Member weisen für das Wochenende auf Abflussspitzen über dem Wert der WS1. 24 Stunden später deutet die Vorhersage auf Spitzenwerte zwischen 10 und 200 $m^3 s^{-1}$ *(Bild 7, unten)* für die Stunden bis zum darauf folgenden Montag, 10. August 2009. Sechs Member weisen dabei auf Abflussspitzen über dem Wert der WS1 und vier davon deuten auf ein Ereignis im Verlaufe des Samstagnachmittags und -abends hin.

In der Lagebeurteilung vom 7. August (9:15 Uhr) beschrieben die verantwortlichen Berater der WSL und igzalo unter Einbeziehung beider Vorhersagen und der Niederschlagsprognose der MeteoSchweiz die Situation schliesslich wie folgt: «Die aktuellen Niederschlagsprognosen mit COSMO-LEPS weisen auf einen ziemlich unsicheren Verlauf und [eine unsichere] Menge der zu erwartenden Niederschläge. Bis Sonntagabend sind 20 bis 50 mm Niederschlag zu erwarten. COSMO-7 meldet Regenmengen zwischen 25 mm (unteres Teileinzugsgebiet) und 30 mm (Sihlsee-Region) mit einem Schauer am späten Samstagnachmittag. Starke Schauer sind nicht auszuschliessen. Gemäss hydrologischen Modellberechnungen *[Bild 7]* wird die Sihl am Standort Zürich erhöhte Abflüsse aufweisen. Je nach Intensität und Standort der möglichen Regenschauer, könnte sich in der Nacht auf Sonntag ein Spitzenabfluss von über 40 $m^3 s^{-1}$ ereignen. Nach dem aktuellen Wissensstand sollten für die Baustelle Löwenstrasse keine bedrohlichen Abflussmengen entstehen. Der Stand des Sihlsees könnte dabei das 889 m ü.M.-Niveau überschreiten. Es ist jedoch unwahrscheinlich, dass das Betriebsreglement angesprochen wird.»

Eine kritische Interpretation der Prognose anhand des tatsächlichen Verlaufes des Ereignisses zeigt, dass der resultierende Spitzenabfluss von über 100 $m^3 s^{-1}$ laut der Vorhersage (COSMO-LEPS) erkennbar gewesen wäre. Die auf COSMO-7 beruhende Abflussvorhersage für Zürich HB *(Bild 8)* bestätigte jedoch solch hohe Werte bei weitem nicht. Aus diesem Grund wurde in der Lagebeurteilung die zurückhaltende Formulierung «Spitzenabfluss von über 40 $m^3 s^{-1}$» verwendet.

Die Prognose lieferte kaum Hinweise darauf, dass für die Stadt Zürich und die Baustelle eine brisante Situation hätte entstehen können. Aus diesem Grund wurde eine Einberufung der Beratungsgruppe (Vorabsenkung Sihlsee) als unwahrscheinlich eingestuft. Den Beratern war aber bewusst, dass sich Gewitterlagen rasch ungünstig entwickeln können, wie dies etwa im Juni 2007 erfolgte, als nach sehr intensiven, konvektiven Niederschlägen schwere Schäden in der Region Einsiedeln entstanden (Liechti, 2008; Hilker et al., 2008). Dies war der Ausschlag dafür, dass die beteiligten Verantwortlichen der Koordinationsgruppe (Alarmorganisation) gebeten wurden, den Grossraum Zürich vorerst nicht zu verlassen. Die beratenden Hydrologen beurteilten die Lage während des Ereignisses mehrmals pro Tag neu, mussten aber nicht über ungünstige Entwicklungen informieren, die zu weiteren Massnahmen gemäss Ausführungen in Abschnitt 4 hätten führen können.

6. Schlussfolgerungen und Ausblick

Das im Auftrag des AWEL implementierte Regionalmodul zur Hochwasservorhersage IFKIS-Hydro Sihl wird in der Pionierphase des Projektes «Durchmesserlinie (DML) SBB» bislang erfolgreich eingesetzt. Es muss allerdings erwähnt werden, dass seit Baubeginn und bis Ende Juni 2010 glücklicherweise grössere Abflussereignisse in der Sihl ausgeblieben sind. Die seit der Reduktion des Abflussquerschnittes maximale Abflussmenge von 147 $m^3 s^{-1}$ wurde am 15. August 2008 registriert. Dies hat zur Folge, dass in den vergangenen zweieinhalb Jahren nur sehr wenige Situationen beurteilt werden mussten, aus denen sich ernste Hochwasserereignisse hätten entwickeln können. Insbesondere kam es selten vor, dass aufgrund eines hohen Pegelstandes im Sihlsee eine Kopplung der beiden Hauptteile des Gesamteinzugsgebietes (Einzugsgebiet des Sihlsees inkl. obere Sihl und Minster; unteres Einzugsgebiet inkl. Alp und Biber) zu befürchten gewesen wäre.

Trotzdem wurden seit Beginn der Anwendung des Vorhersagesystems im Frühjahr 2008 einige wichtige Erkenntnisse gewonnen. Die verschiedenen Produkte der atmosphärischen Modelle (COSMO-LEPS, COSMO-7, COSMO-2) liefern nicht immer einheitliche Resultate, was sich selbstverständlich auch in den Ausgabedaten des hydrologisch/hydraulischen Modellsystems widerspiegelt. Dies erschwert die Interpretation der Modellresultate sowie die Abgabe einer Empfehlung für den Endbenutzer. Die objektive Verifikation zeigt, dass das jeweils höher aufgelöste atmosphärische Modell statistisch bessere Niederschlagsvorhersagen gibt. Es ist dennoch wichtig, dass die Endbenutzer gut geschult sind, um die

Unsicherheiten im Modelloutput verstehen und kommunizieren zu können. Die Problematik bei der Interpretation einer hydrologischen Abflusssituation ist zudem beträchtlich vom Typ des zugrunde liegenden Niederschlagsereignisses abhängig. Aufgrund der grösseren räumlichen und zeitlichen Unsicherheiten bei der Vorhersage von gewittrigen Starkniederschlägen, zeichnet sich auch eine problematischere Abflussvorhersage ab. In diesem Fall ist ein enger Kontakt zwischen dem Endbenutzer und Meteorologen der MeteoSchweiz noch wichtiger als bei lang andauernden Niederschlägen wie sie Frontsysteme in der Regel hervorbringen. Besonders kritische Situationen für die Abflussvorhersage können entstehen, wenn während lang andauernden Niederschlagsereignissen markante Starkniederschlagszellen eingelagert sind. Dazu kommt, dass stärkere Niederschläge (>10 mm pro 12 h) im Sommerhalbjahr von COSMO-7 deutlich unterschätzt werden. Umso wichtiger sind in diesem Kontext die Überlegungen, was zu tun ist, wenn die Entwicklung des Wettergeschehens anders verläuft als prognostiziert.

Ein Warnsystem besteht aus einer ganzen Kette von Elementen, für welche Aufgaben, Kompetenzen und Verantwortungen definiert sein müssen. Als eines der Elemente einer solchen Warnkette liefert die operationelle Abflussvorhersageplattform für die Sihl innovative Produkte zur Entscheidungshilfe. Dies bedingt, wie bereits weiter oben aufgezeigt, eine intensive Interpretation durch geschulte Endbenutzer (bestenfalls erfahrene Naturgefahrenspezialisten oder -berater). Diese müssen die komplexen Vorhersagen des hydrologisch/hydraulischen Modellsystems verstehen, deuten und in eine Warnung umsetzen können. Für das konkrete Beispiel der Sihl in Zürich beobachten die beratenden Hydrologen den Ist-Zustand des Einzugsgebietes und klären die mögliche Entwicklung der Lage ab. Bei Bedarf informieren sie die Bauleitung und leiten die vorgesehenen organisatorischen Massnahmen ein. In der Folge müssen die beteiligten Spezialisten aus verschiedenen Institutionen gemeinsam eine von drei möglichen Entscheidungen treffen: (a) Vorabsenkung des Sihlsees; (b) Räumung/Flutung der Baustelle im Abschnitt Bahnhof Löwenstrasse der Durchmesserlinie; oder (c) weitere Beobachtung der Lage ohne sofortige Massnahme.

Momentan werden die Resultate der Modelle PREVAH und FLORIS bereits in der gemeinsamen Informationsplattform Naturgefahren des Bundes (GIN) dargestellt. Parallel zum aktuellen Betrieb der Modellkette PREVAH/FLORIS und der Plattform IFKIS-Hydro Sihl läuft die Integration der Sihl-Abflussvorhersage in FEWS (Flood Early Warning System), dem Abflussvorhersagesystem des BAFU. Zu einem späteren Zeitpunkt soll GIN direkt von FEWS mit operationellen Ergebnissen versorgt werden. Somit wird künftig die Visualisierungsplattform gänzlich durch GIN abgelöst. Der aktuelle Parallelbetrieb dauert voraussichtlich noch bis 2011/2012 an. Danach wird IFKIS-Hydro Sihl in dieser Form nicht mehr weiter betrieben (allenfalls noch zu Forschungszwecken). Der sehr frühe Einbezug der Bundesbehörden in den Entscheidungsprozess und die Sicherstellung der Kompatibilität mit den Systemen des Bundes vereinfachen diesen Übergang beträchtlich. Mit dem Abschluss der Bauarbeiten in den Durchlässen der Sihl unter dem Hauptbahnhof per Ende 2010 wird die Alarmorganisation des Projektes DML SBB für Hochwasser in der Sihl aufgehoben. Sie wird durch die Alarmorganisation des Kantons Zürich abgelöst, da die Verantwortung für die Hochwassersicherheit am Standort Hauptbahnhof Zürich am 1. Januar 2011 an diesen zurückgeht.

Danksagung

Wir bedanken uns bei allen an diesem Projekt beteiligten Personen. Besonderer Dank geht an das Geographische Institut der Universität Bern und an das Büro TK Consult für die Grundlagenarbeiten am Modellsystem. Zudem danken wir Nadine Hilker für die kritische Durchsicht des Manuskriptes.

Literatur

Barredo, J.I. (2009): Normalised flood losses in Europe: 1970–2006. Natural Hazards and Earth System Sciences, 9: 97–104.

Berz, G., Kron, W., Loster, T., Rauch, E., Schimetschek, J., Schmieder, J., Siebert, A., Smolka, A., Wirtz, A. (2001): World Map of Natural Hazards – A Global View of the Distribution and Intensity of Significant Exposures. Natural Hazards, 23: 443–465.

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.

Bründl, M., Etter, H.J., Steiniger, M., Klingler, C., Rhyner, J., Amman, W.J. (2004): IFKIS – a basis for managing avalanche risk in settlements and on roads in Switzerland. Natural Hazards and Earth System Sciences, 4: 309–313.

BWG (Ed.) (2000): Hochwasser 1999, Analyse der Ereignisse. Studienbericht Nr. 10/2000. Bundesamt für Wasser und Geologie BWG, Bern.

Guzzetti, F., Stark, C.P., Salvati, P. (2005): Evaluation of Flood and Landslide Risk to the Population of Italy. Environmental Management, 36(1): 15–36.

Heil, B., Petzold, I., Romang, H., Hess, J. (2010): The Common Information Platform for Natural Hazards in Switzerland. Natural Hazards (published online), doi:10.1007/s11069-010-9606-6.

Hilker, N., Badoux, A., Hegg, C. (2008): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 2007. «Wasser Energie Luft», 100(2): 115–123.

Hilker, N., Badoux, A., Hegg, C. (2009): The Swiss flood and landslide damage database 1972–2007. Natural Hazards and Earth System Sciences, 9: 913–925.

igzalo (2008): Technischer Bericht Vorabsenkung Sihlsee. Bericht zu Handen des Amtes für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) des Kantons Zürich und der Schweizerischen Bundesbahnen SBB, Esslingen (unveröffentlicht).

Jonkman, S.N., Vrijling, J.K. (2008): Loss of life due to floods. Flood Risk Management, 1: 43–56.

Kreibich, H., Thieken, A.H. (2009): Coping with floods in the city of Dresden, Germany. Natural Hazards, 51(3): 423–436.

Kunreuther, K. (2006): Disaster Mitigation and Insurance: Learning from Katrina. The ANNALS of the American Academy of Political and Social Science, 604(1): 208–227.

Liechti, K. (2008): Starke Gewitter im Juni 2007 – Einordnung und hydrologische Modellierung für die Regionen Huttwil (BE) und Einsiedeln (SZ). Masterarbeit an der Universität Zürich.

Merz, B., Kreibich, H., Thieken, A., Schmidtke, R. (2004): Estimation uncertainty of direct monetary flood damage to buildings. Natural Hazards and Earth System Sciences, 4: 153–163.

MeteoSchweiz (2009a): Markante Kaltfront vom Freitag 17.07.2009. http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/wetter/wetterereignisse/markante_kaltfront.html [Juli 2010].

MeteoSchweiz (2009b): Gewittriger Starkregen am 8. August 2009. http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/wetter/wetterereignisse/Gewittriger_Starkregen_080809.html [Juli 2010].

Morandini, R. (1967): Hochwasser in Florenz und im Arnogebiet. In: Symposion Interpraevent 1967 – Klagenfurt. Tagungspublikation: 25–29. http://www.interpraevent.at/palm-cms/upload_files/Publikationen/Tagungsbeitraege/1967_25.pdf [März 2010].

Romang, H., Hegg, C., Gerber, M., Hilker, N., Dufour, F., Rhyner, J. (2007): IFKIS-Hydro: Informations- und Warnsystem für hydrologische Naturgefahren. «Wasser Energie Luft», 99(2): 129–132.

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.

Schatzmann, M., Inderwildi, A., Angehrn, P., Lüthi, M., Weiss, H. (2008): Bau unterirdischer Bahnhof Löwenstrasse: Massnahmen zur Minimierung des Hochwasserrisikos der Sihl am Hauptbahnhof Zürich. In: Minor, H.-E. (Ed.) Neue Anforderungen an den Wasserbau, Internationales Symposium vom 11. bis 12. September 2008, Zürich. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Nr. 208 (Band 2): 667–678.

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).

Vischer, D.L. (2003): Die Geschichte des Hochwasserschutzes in der Schweiz. Berichte des BWG, Serie Wasser, Nr. 5. Bundesamt für Wasser und Geologie BWG, Biel

Walther, P., Gräfe, H., Schmid, F., Hegg, C. (2004): Augusthochwasser 2002 in den Nebenflüssen der Oberen Elbe – Ereignisanalyse. In: Internationales Symposion Interpraevent 2004 – Riva del Garda. Tagungspublikation Band 1 (I): 133-144. http://www.interpraevent.at/palm-cms/upload_files/Publikationen/Tagungsbeitraege/2004_1_I-133.pdf [März 2010].

Zappa, M., Jaun, S., Badoux, A., Schwanbeck, J., Addor, N., Liechti, K., Roeser, I., Walser, A., Viviroli, D., Vogt, S., Gerber, M., Trösch, J., Weingartner, R., Oplatka, M., Bezzola, G.R., Rhyner, J. (2010): IFKIS-Hydro Sihl: Ein operationelles Hochwasservorhersagesystem für die Stadt Zürich und das Sihltal. «Wasser Energie Luft», 102(3): 238–248.

Anschrift der Verfasser

A. Badoux [1], *M. Zappa* [1], *M. Schatzmann* [2], *M. Oplatka* [3], *M. Bösch* [4], *S. Jaun* [1, 5], *M. Gross* [6], *P. Steiner* [7], *C. Hegg* [1], *J. Rhyner* [8]

[1] {Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf}

[2] {Basler&Hofmann, Ingenieure, Planer und Berater, Zürich}

[3] {AWEL, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Zürich}

[4] {SBB, Schweizerische Bundesbahnen, Zürich}

[5] {BAFU, Bundesamt für Umwelt, Bern}

[6] {AXA-Winterthur Versicherungen, Winterthur}

[7] {MeteoSchweiz, Zürich}

[8] {WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Davos}