

Advanced Flood Forecasting for Switzerland

Erweiterte Hochwasservorhersagen für die Schweiz

Karsten Jasper¹; Martin Ebel¹

ABSTRACT

Over the last few years the Federal Office for the Environment FOEN has put considerable effort into improving the quality and the range of their operational flood forecasts. Today the FOEN not only provides hydrological forecasts for the rivers and lakes of the Swiss Rhine catchment. It also produces and disseminates forecasts for the river systems of Rhone and Ticino. The underlying data basis has been significantly improved. This allows the implementation of detailed water balance models, yielding a higher modelling quality especially when modelling smaller and hydrologically complex catchments. Moreover different hydrological models are implemented in FOEN's forecasting system for a growing number of river basins. Hydrological forecasts thus can not only be compared on the basis of different numerical weather forecasts, but it is also possible to evaluate forecasts of up to 3 different hydrological models for several catchments. The use of these hydrological model ensembles will allow the comparison of the different modelling approaches and a calculation of the predictive uncertainty of a current forecast.

ZUSAMMENFASSUNG

In den letzten Jahren unternahm das Bundesamt für Umwelt (BAFU) erhebliche Anstrengungen, um den Umfang und die Qualität seiner operationellen Hochwasservorhersagen zu verbessern. Heute stellt das BAFU nicht nur für die Gewässer des schweizerischen Rhein-Einzugsgebietes hydrologische Vorhersagen zur Verfügung, sondern auch für die Gewässersysteme von Rhone und Ticino. Die Nutzung von verbesserten Datengrundlagen und der zunehmende Einsatz von detaillierten Flussgebietsmodellen führten zu einer allgemein höheren Qualität der hydrologischen Modellierung, insbesondere in komplexen oder kleineren Einzugsgebieten. Für immer mehr Flussgebiete werden am BAFU inzwischen nicht mehr nur meteorologische sondern auch hydrologische Modell-Ensembles gerechnet. Damit können im Einzelfall die Ergebnisse von bis zu drei verschiedenen Abflussmodellen miteinander verglichen und daraus ein Mass für die hydrologische Modellunsicherheit gewonnen werden. Aktuell werden regelmässig für mehr als 150 Flussabschnitte und Seen hydrologische Vorhersagen mit einem Vorhersagehorizont von bis zu 10 Tagen verbreitet.

KEYWORDS

operational flood forecasting; hydrological models

¹ Federal Office for the Environment FOEN, Ittigen, SWITZERLAND, karsten.jasper@bafu.admin.ch

EINFÜHRUNG

Operationelle Abfluss- und Wasserstandvorhersagen werden vom Bund seit Mitte der 80er Jahre durchgeführt. Bis vor wenigen Jahren waren diese Vorhersagen auf die Hauptgewässer im Einzugsgebiet des Rheins bis Rheinfelden beschränkt. Mit der operationellen Nutzbarmachung des Vorhersagesystems Delft-FEWS (Werner et al., 2013) und dem darin integrierten semi-distributiven Modell HBV-96 (Lindström et al., 1997) erweiterten sich jedoch in 2007 die Möglichkeiten der Vorhersage am Bundesamt für Umwelt (BAFU). Von nun an waren am BAFU, dem hydrologischen Vorhersagezentrum der Schweiz, operationelle modellgestützte Vorhersagen für das gesamte Rhein-Gebiet bis Basel (etwa 36'000 km²) möglich. Die im HBV-96 verwendete Gebietsstruktur unterteilt das Vorhersagegebiet in mehr als 60 Teilgebiete mit Flächengrößen zwischen 100 und 3'300 km² (Bürgi, 2008). Abflussvorhersagen sind jeweils für den Auslass eines jeden Teilgebietes möglich. Die Erfahrungen im operationellen Vorhersagebetrieb zeigten, dass mit dem eingesetzten Modell vor allem für grössere Flussgebiete qualitativ gute Abflussvorhersagen erreicht werden können. Für viele der mittleren und kleineren Zuflüsse waren hingegen oft keine zufriedenstellenden Vorhersagen möglich. Grund dafür sind vor allem modelltechnische Vereinfachungen in der Beschreibung von komplexen Einzugsgebieten. Hierzu gehören insbesondere eine zu geringe räumliche Auflösung der alpinen Gebiete und die Verwendung von stark vereinfachten Modellansätzen, z.B. zur Berechnung von Bodenfeuchte sowie von Schnee- und Gletscherschmelze. Im Rahmen des schweizerischen Aktionsplanes zur Optimierung von Warnung und Alarmierung vor Naturgefahren (OWARNA) wurden daher mit Sicht auf den hydrologischen Vorhersagebetrieb zwei Hauptziele formuliert: (a) Steigerung der Vorhersagequalität durch Berücksichtigung von verbesserten Datengrundlagen und dem Einsatz von detaillierten Flussgebietsmodellen sowie (b) Ausdehnung der hydrologischen Vorhersagen auf die mittleren und grösseren Gewässer der gesamten Schweiz (Hess, 2010). Mit der Inkraftsetzung der Alarmierungsverordnung (AV) in 2011 wurde zudem der gesetzliche Rahmen für die Arbeiten zur Zielerreichung gesetzt (Amiguet et al., 2016).

RÄUMLICHE AUSDEHNUNG DER HYDROLOGISCHEN VORHERSAGEN

Die «hydrologische Schweiz» umfasst unter Berücksichtigung ihrer ausländischen Gebietsanteile eine Gesamtfläche von knapp 58'000 km². Sie übertrifft damit die Schweizer Landesfläche um mehr als 40%. Das Rhein-Gebiet stellt mit etwa 63% den grössten Flächenanteil dar. Ihm folgen die Flussgebiete Rhone (18%) und Ticino (11%). Weniger als 8% der Gesamtfläche entfallen auf die restlichen Flussgebiete (Inn, Doubs, Adda, Etsch).

Das Vorgehen für den weiteren modellgestützten Ausbau der Hochwasservorhersage orientierte sich an der Grösse des bisher noch nicht erfassten Gebietes, aber auch an dessen Gefahrenpotenzial bei Hochwasser. Folgerichtig wurden nach der operationellen Inbetriebnahme des HBV-96 Rhein-Modells im Jahr 2007 vorrangig Vorhersagelösungen für die Flussgebiete von Rhone und Ticino erarbeitet.

Das entwickelte Vorhersagemodell für die schweizerische Rhone deckt nicht dessen gesamtes Einzugsgebiet ab (bis zum Pegel Chancy), sondern zunächst nur den Bereich bis zum Genfersee (Fläche ca. 5'500 km²). Es basiert auf dem deterministischen, flächendifferenzierten Wasserhaushaltsmodell WaSiM (Schulla, 2015) und liefert seit 2012 operationelle Abflussvorhersagen für 13 Pegelstandorte. Das Modell berücksichtigt alle wesentlichen Einflussfaktoren, wie z.B. den Betrieb der zahlreichen Stauanlagen oder eine flächendetaillierte Schnee- und Gletscherschmelze. Neben dem am BAFU verwendeten Rhone-Modell existiert auch ein modellgestütztes regionales Vorhersagesystem, welches vom Kanton Wallis betrieben wird (Garcia Hernandez et al., 2014).

Das für die Vorhersagen berücksichtigte Einzugsgebiet für den Ticino erstreckt sich bis zum Ausflussbereich des Lago Maggiore (Ticino bei Sesto Calende). Es umfasst eine Einzugsgebietsfläche von insgesamt 6'600 km² und berücksichtigt auch die italienischen Zuflüsse zum Lago Maggiore, wie z.B. den Toce. Die hydrologischen Vorhersagen werden im Ticino-Gebiet durch eine kombinierte Anwendung zweier Modelle erhalten: Zunächst wird das hochauflösende, hydrotop-basierte Wasserhaushaltsmodell PREVAH (Viviroli et al., 2009) für die Berechnung der Abflussbildung verwendet. Anschliessend werden die von PREVAH simulierten Teilgebietsabflüsse an das Modell RS3.0 übergeben und mit diesem Gerinneabflüsse und Seewasserstände berechnet. RS3.0, dessen grundlegender Aufbau in García Hernández et al. (2007) beschrieben ist, berücksichtigt alle relevanten Daten und Strukturen zur Steuerung der Tessiner Speicheranlagen. Im Zusammenspiel mit Delft-FEWS bietet es darüber hinaus die Möglichkeit der Berechnung von Szenarien für die Seensteuerung im Hochwasserfall. Das gekoppelte Modellsystem wurde in enger Zusammenarbeit mit dem Kanton Tessin erstellt und löst das bisherige kantonal genutzte Modellsystem ab. Es wird in den operationellen Vorhersagebetrieb am BAFU überführt und dann regelmässig Wasserstands- und Abflussvorhersagen für mehr als 20 verschiedene Pegelstandorte liefern.

EINSATZ VON DETAILLIERTEN FLUSSGEBIETSMODELLEN

Parallel zur räumlichen Ausdehnung der hydrologischen Vorhersagen wird am BAFU fortlaufend in die Verbesserung der Vorhersagequalität investiert. Entsprechend wurde in den letzten Jahren die Abflussvorhersage zunehmend mit Modellen erweitert, welche das hydrologische Prozessgeschehen im Schweizer Alpenraum adäquat abbilden können. Die Anforderungen an die eingesetzten Modelle für den operationellen Vorhersagebetrieb sind hoch: Die Modelle müssen unterschiedlichste Gebietseigenschaften (z.B. mit und ohne Gletschereinfluss) und relevante Eingriffe auf den Abfluss- und Wasserhaushalt in geeigneter Weise berücksichtigen können (z.B. Seeregulierung, Speicherbetrieb durch Kraftwerke, Zu- oder Ableitungen). Im Weiteren müssen sie auch in der Lage sein, die aktuell verfügbaren Datengrundlagen optimal im Vorhersagebetrieb einzubinden. Die Modelle müssen für operationelle Anwendungen optimiert sein, aber dennoch die komplexen hydrologischen Prozesse in der Schweiz abbilden können.

Vor diesem Hintergrund wurde am BAFU in 2010 damit begonnen, das bisher genutzte konzeptionelle Vorhersagemodell für den Rhein (HBV-96) schrittweise durch detailliertere Modelle zu ergänzen. Hierzu wurden einerseits bestehende operationelle Modellanwendungen in das BAFU-Vorhersagesystem integriert, wie z.B. das im Kanton Zürich betriebene Modellsystem PREVAH-Sihl (Zappa et al., 2010) oder das in der Hochwasservorhersagezentrale von Baden-Württemberg (LUBW) eingesetzte Modell LARSIM (Bremicker, 2010). Andererseits wurden auch neue regionale Vorhersagemodelle entwickelt, wie z.B. WaSiM-Alpenrhein (Schulla, 2013). Einen Überblick über die flächendetaillierten Regionalmodelle, welche derzeit im BAFU-Vorhersagesystem Verwendung finden, geben Tabelle 1 und Abbildung 1. Die Operationalisierung von weiteren prozessorientierten Flussgebietsmodellen ist vorgesehen, um vorhandene Lücken in der hydrologischen Vorhersagelandschaft zu schliessen und die Güte der Vorhersagen, insbesondere in kleineren und mittleren Flussgebieten, zu steigern.

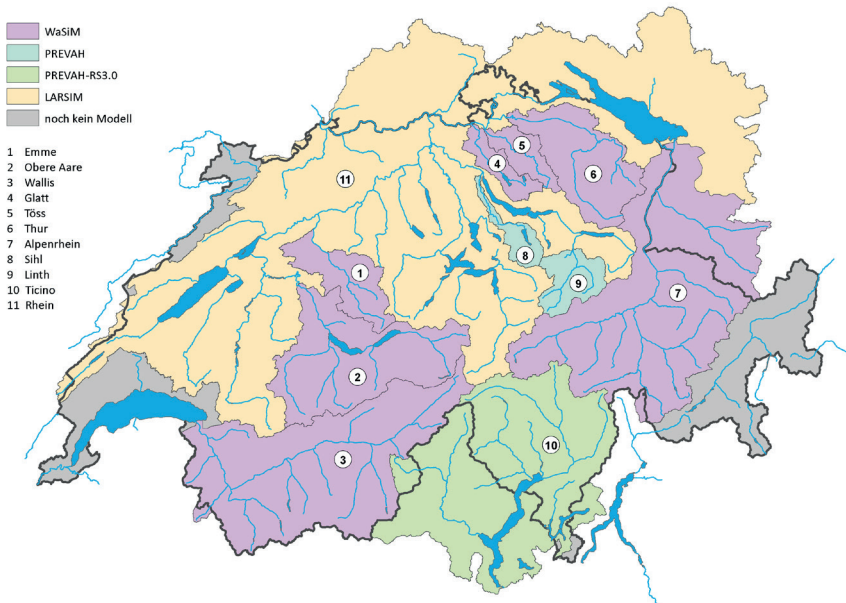


Abbildung 1: Aktuelle Abdeckung der Schweiz mit flächendetaillierten Vorhersagemodellen

MODELLSTRATEGIE FÜR DIE HYDROLOGISCHE VORHERSAGE

Die Vorhersagestrategie am BAFU sieht mittelfristig die Gesamtabdeckung der Schweiz mit regionalen WaSiM-Modellen vor. Damit läge praktisch ein Vorhersagemodell gleichen Typs flächendeckend in 500 x 500 m Auflösung für alle Flussgebiete der hydrologischen Schweiz vor. Zusätzlich werden im Sinne eines hydrologischen Multi-Modell-Ansatzes für mehrere Einzugsgebiete (insbesondere für Hot-Spot-Regionen) weitere Flussgebietsmodelle im

Tabelle 1: Aktuelle flächendetaillierte Modellanwendungen in der hydrologischen Vorhersage am BAFU

Modell	Pegeleinzugsgebiet (Fläche)	Jahr der Inbetriebnahme
PREVAH	Sihl bis Sihlhölzli (336 km ²)	2010
	Linth bis Mollis (600 km ²)	2010
WaSiM	Emme bis Wiler (940 km ²)	2010
	Rhone bis Genfersee (5'350 km ² , geschätzt)	2012
	Alpenrhein bis Bodensee (6'700 km ² , geschätzt)	2014
	Aare bis Bern (2'945 km ²)	2015
	Thur bis Andelfingen (1'696 km ²)	2015
	Töss bis zum Rhein (425 km ² , geschätzt)	2016
	Glatt bis Rheinsfelden (416 km ²)	2016
PREVAH + RS3.0	Ticino bis Sesto Calende (6'600 km ²)	2016
LARSIM	Rhein bis Basel (35'897 km ²)	2016

Vorhersagesystem am BAFU nutzbar sein. Die Abflussvorhersagen der verschiedenen Modelle helfen dem Prognostiker bei der Abschätzung der aktuellen hydrologischen Modellunsicherheit. Im Bedarfsfall kann für ausgewählte Einzugsgebiete von den Ergebnissen des Hauptmodells abgewichen und auf die Vorhersagen eines Alternativmodells zurückgegriffen werden. Das Vorhersagesystem Delft-FEWS wurde und wird im Auftrag des BAFU so weiterentwickelt, dass es den Prognostiker bei diesem Entscheidungsprozess sowie bei allfälligen Szenario-Rechnungen durch dafür massgeschneiderte Tools optimal unterstützt. Das beschriebene Vorgehen zur parallelen Anwendung von mehreren Modellen (hydrologisches Modell-Ensemble) steht im Einklang mit dem seit vielen Jahren verwendeten meteorologischen Multi-Modell-Ansatz. Seit dem Jahr 2007 bilden die Resultate von vier verschiedenen Wettervorhersagemodellen die Grundlage für die operationellen Abflussvorhersagen am BAFU. Die berücksichtigten numerischen Wettermodelle haben räumliche Auflösungen zwischen 2 und 16 km und Vorhersagelängen von 33 bis 240 Stunden. Sie liefern entweder deterministische Vorhersagen (COSMO-2, COSMO-7, ECMWF) oder stellen Ensemble-Vorhersagen bereit (COSMO-LEPS). Ab 2016 werden Daten von verfeinerten Wettermodellen für die Wasserstands- und Abflussvorhersagen verfügbar sein, und zwar von einem deterministischen 1.1km-Modell (COSMO-1) und von einem 2.2km-Ensemble-Modell (COSMO-E).

VERBESSERTE DATENLAGE

In den letzten Jahren wurden grosse Fortschritte in der zeitnahen Bereitstellung von meteorologischen Daten der Bodenmessnetze gemacht. Die Automatisierung von Messstationen der MeteoSchweiz wie auch die zunehmende Nutzarmachung von Daten anderer Messnetzbetreiber (kantonale Fachstellen, Institutionen, Private, ausländische Dienste und

Behörden, etc.) führte zu einer markanten Erhöhung der operationell verfügbaren Datendichte, insbesondere im Bereich der Niederschlagsmessungen. Insgesamt werden derzeit die Messdaten von mehr als 800 meteorologischen Stationen in das Vorhersagesystem am BAFU eingespeist, darunter von etwa 260 Stationen, welche von der MeteoSchweiz betrieben werden (automatische Stationen vom SwissMetNet sowie automatisierte Niederschlagsstationen). Im Vergleich zu 2007 vervielfachte sich damit die Anzahl der für die hydrologische Vorhersage nutzbaren Wetterstationen, und zwar über alle Höhenbänder. Eine erhöhte meteorologische Stationsdichte, insbesondere bei den Niederschlagsmessungen, ist aus Sicht der hydrologischen Vorhersage extrem wertvoll, da sie die Interpolationen der punktuellen Messwerte in die Fläche zu verbessern hilft. Werden die meteorologischen Messdaten realistischer interpoliert, dann sind auch genauere hydrologische Modellnachführungen möglich. Die Initialbedingungen für die anschliessenden Vorhersagesimulationen verbessern sich entsprechend (genauere Systemzustände).

Aber nicht nur die Anzahl der verfügbaren Messstationen hat Einfluss auf die Interpolationsgüte und damit auf die Wertigkeit einer meteorologischen Station im Vorhersagesystem. Weitere wichtige Einflussfaktoren sind deren Datenqualität, deren geographische Lage, deren Intervall der Datenlieferung oder deren Parameterauswahl. Die Anforderungen der am BAFU verwendeten Vorhersagemodelle an die meteorologischen Eingangsdaten sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Benötigte meteorologische Eingangsgrößen für die am BAFU verwendeten Vorhersagemodelle; Niederschlag (N), Lufttemperatur (LT), Windgeschwindigkeit (W), relative Luftfeuchtigkeit (RF), Taupunkttemperatur (TD), Globalstrahlung (GS), relative Sonnenscheindauer (SSD), Luftdruck (LD)

Modell	P	T	W	RF	TD	GS	SSD	LD
HBV	x	x	x	-	x	-	-	-
PREVAH	x	x	x	x	-	x	x	-
WaSiM	x	x	x	x	-	x	x	-
LARSIM	x	x	x	x	-	x	-	x

In Anbetracht der Bedeutung des Niederschlages für die Abflussvorhersage werden im BAFU-Vorhersagesystem nicht nur stationsbezogene Niederschlagsmessungen verarbeitet, sondern auch vorprozessierte Kombinationsprodukte, welche aus Echtzeit-Messungen vom Niederschlagsradar und Bodenstationen bestehen (Sideris et al., 2013). Diese als CombiPrecip bezeichneten Flächenprodukte des Niederschlages stellen attraktive Ergänzungen zur klassischen stationsbezogenen Niederschlagsinterpolation dar. Aktuelle Untersuchungen zeigen, dass mit Hilfe von CombiPrecip die Simulation von Hochwassern in Einzelfällen deutlich verbessert werden kann. Die Verbesserung gegenüber der klassischen Interpolation von Punktmessungen ist bisher jedoch nicht systematisch, sondern offenbar von der

betrachteten Region und vom Ereignistyp abhängig. Insofern kann CombiPrecip bis auf weiteres nur eine Ergänzungsrolle in der hydrologischen Vorhersage am BAFU einnehmen. Die Aufnahme von neuen flächendetaillierten Flussgebietsmodellen ging einher mit der Berücksichtigung einer erhöhten Anzahl an hydrologischen Messstationen, vor allem in den komplexen und oft schwierig zu modellierenden Zuflussgebieten. Allein für das Rhein-Gebiet werden heute die Abflüsse und Wasserstände von etwa 120 Stationen für die Nachführung der hydrologischen Vorhersagemodelle genutzt. Diese Stationsanzahl liegt deutlich über derjenigen von 2007 (HBV-Rhein mit 70 Stationen). Die verwendeten Stationen gehören überwiegend zum Messnetz des BAFU. Inzwischen werden aber auch zunehmend kantonale und ausländische Stationen sowie Stationen von Kraftwerksbetreibern in die Vorhersagen einbezogen. Ein dichteres Messnetz an Abfluss- und Wasserstandsmessungen bedeutet in erster Linie mehr Kontrollpunkte für die Modellrechnungen, was sich insbesondere im Hochwasserfall positiv auf die Güte der Abflusssimulation und damit der Vorhersage auswirkt.

Neben modellrelevanten Verbesserungen bei den zeitbezogenen Daten gab es im Rahmen des Modellausbaus auch Fortschritte in der Nutzung von raumbezogenen Daten. Prozessorientierte Vorhersagemodelle haben hier naturgemäss grosse Vorteile gegenüber vereinfachten Modellen. Sie sind wesentlich besser in der Lage, die für die hydrologische Modellierung allgemein verfügbaren Datengrundlagen auszunutzen. Die neuen Flussgebietsmodelle am BAFU verwenden jeweils hochauflösende Flächendaten zur Orographie, zur Landnutzung, zum Boden und zur Hydrogeologie, um daraus modellrelevante Parameter, wie z.B. die Speicher- und Leitfähigkeiten im Untergrund, abzuleiten. Ausserdem berücksichtigen sie möglichst detailliert Gerinnetdaten (Geometrie, Rauigkeiten) sowie Betriebsregeln zur Seen- und Speichersteuerung.

ERGEBNISSE

Die Vorteile von detaillierten gegenüber einfachen Modellen zeigen sich oft bei Abflusssimulationen in sogenannten Kopfgebieten, d.h. in Gebieten ohne gemessene Zuflüsse. Im vorliegenden Beitrag ist dies beispielhaft für ein Hochwasserereignis im Einzugsgebiet der oberen Emme (124 km²) illustriert, welches im Mai 2015 durch Starkregen ausgelöst wurde. Die im ersten Vorhersageabschnitt (bis +30h) weitgehend zutreffenden Niederschlagsvorhersagen der Wettermodelle COSMO-2 und COSMO-7 resultieren hier nur beim detaillierten Modell (WaSiM) in qualitativ hochstehende Abflussvorhersagen (vgl. Abb. 2 und 3). Weniger gute Vorhersagen werden im aktuellen Beispiel durch die Daten des ECMWF-Wettermodells erzielt. Die Ergebnisse zeigen erwartungsgemäss, dass die Qualität einer Abflussvorhersage, insbesondere in kleineren Einzugsgebieten, entscheidend von der Güte der Niederschlagsvorhersage abhängt.

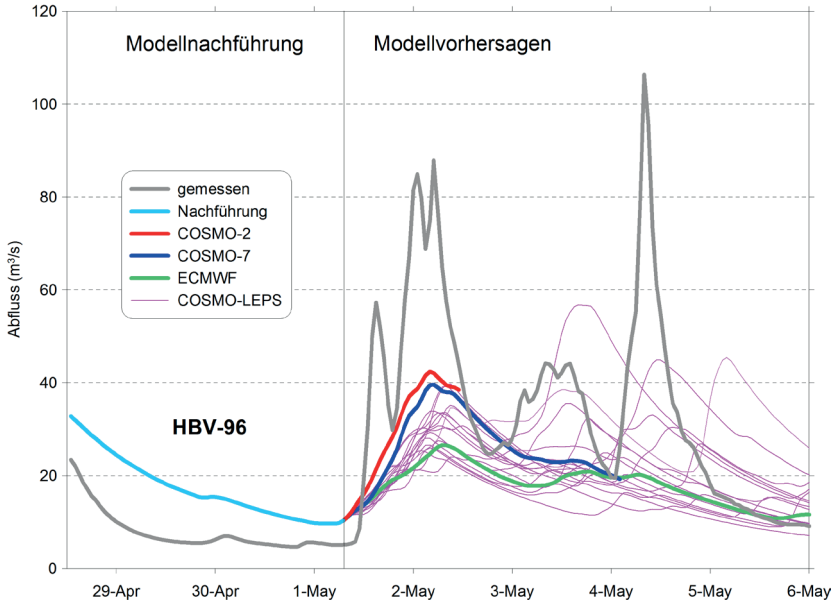


Abbildung 2: Operationelle Hochwasservorhersagen mit dem Modell HBV-96 für den Pegel Emme-Eggiwil am 01.05.2015 (06 Uhr)

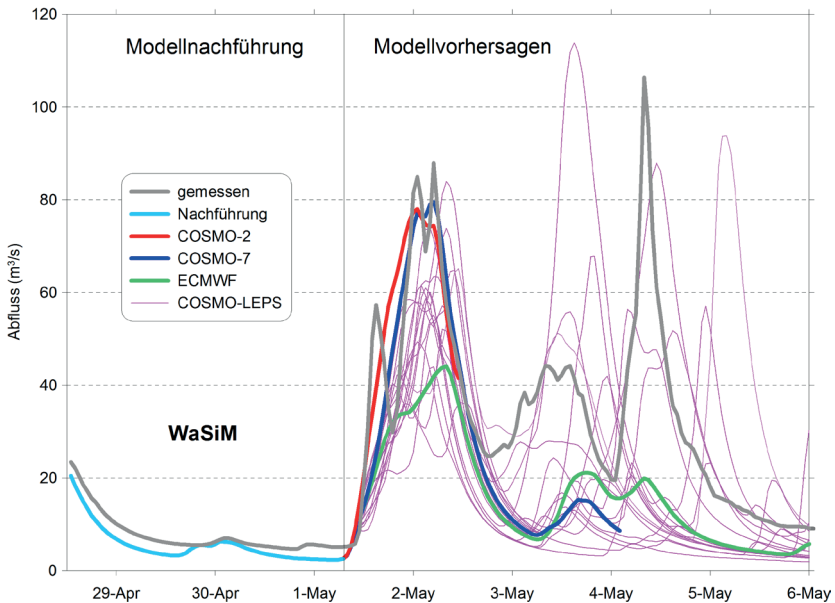


Abbildung 3: Operationelle Hochwasservorhersagen mit dem Modell WaSiM für den Pegel Emme-Eggiwil am 01.05.2015 (06 Uhr)

FAZIT

In den letzten Jahren hat die Hochwasservorhersage am BAFU die Qualität und den Umfang ihrer bereitgestellten Abflussvorhersagen deutlich gesteigert. Dazu trugen neben einer verbesserten Daten- und Modellsituation auch Weiterentwicklungen im Bereich der Vorhersageplattform Delft-FEWS bei. Insgesamt ist das BAFU seinem Ziel der Gesamtdeckung der Schweiz mit modellgestützten hydrologischen Vorhersagen einen grossen Schritt näher gekommen. Der zunehmende Einsatz von detaillierten Flussgebietsmodellen ermöglicht verbesserte Abflusssimulationen und trägt damit zu einer Erhöhung der Vorhersagegenauigkeit bei, insbesondere in komplexen Einzugsgebieten. Die Nutzung von meteorologischen und hydrologischen Modell-Ensembles hilft, die Vorhersageunsicherheit besser abzuschätzen.

LITERATUR

- Amiguet C., Bürgi T., Murer D., Schmutz C., Volken D. (2016): Warnungen der Bundesfachstellen der Schweiz vor Unwetter und Hochwasser. Interpraevent 2016
- Bremicker M. (2010): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 11, 119 S.
- Bürgi T. (2002): Operational flood forecasting in mountainous areas - an interdisciplinary challenge. In: Spreafico M. and Weingartner R. (eds.). International Conference in Flood Estimation. CHR Report II-17: 397–406. Bern
- Bürgi T. (2008): Operationelle Hochwasservorhersagen für das Einzugsgebiet des Rheins in der Schweiz. Interpraevent 2008. Conference Proceedings, Vol. 1, 51-62
- García Hernández J., Jordan F., Dubois J., Boillat J.-L. (2007). Routing System II: Flow modelling in hydraulic systems. In A. Schleiss (ed.), Communication 32 du Laboratoire de Constructions Hydrauliques. Lausanne: EPFL
- García Hernández J., Claude A., Paredes Arquiola J., Roquier, B., Boillat J.-L. (2014): Integrated flood forecasting and management system in a complex catchment area in the Alps: Implementation of the MINERVE project in the Canton of Valais. In A. Schleiss, J. Speerli, R. Pfammatter (eds.), Swiss Competences in River Engineering and Restoration. London. ISBN 978-1-138-02676-6
- Hess J. (2010): OWARNA Folgebericht. 53 S.
- Lindström G., Johansson B., Persson M., Gardelin M., Bergström S. (1997): Development and test of the distributed HBV-96 hydrological Model. Journal of Hydrology 201: 272-288
- Schulla J. (2013): Modellaufbau WaSiM-Alpenrhein. Interner Bericht. BAFU. 216 S.
- Schulla J. (2015): Model Description WaSiM. 335 S. (verfügbar auf www.wasim.ch)
- Sideris IV., Gabella M., Erdin R., Germann U. (2013): Real-time radar-rain-gauge merging using spatio-temporal co-kriging with external drift in the alpine terrain of Switzerland. O.J.R. Meteorol. Soc.. doi: 10.1002/qj.2188

- Viviroli D., Zappa M., Gurtz J., Weingartner R. (2009): An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing tools. *Environmental Modelling & Software* 24: 1209–1222
- Werner M., Schellekens J., Gijbers P., van Dijk M., van den Akker O., Heynert K. (2013): The Delft-FEWS flow forecasting system. *Environmental Modelling & Software* 40: 65-77
- Zappa M., Jaun S., Badoux A., Schwanbeck J. und weitere Autoren (2010): IFKIS-Hydro Sihl: Ein operationelles Hochwasservorhersagesystem für die Stadt Zürich und das Sihltal. *Wasser Energie Luft*, Heft 3: 238-248