Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 94 (2002)
Heft: 7-8

Artikel: Rätselhafte Welt der Blitze
Autor: Walker, Andreas
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-939643

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

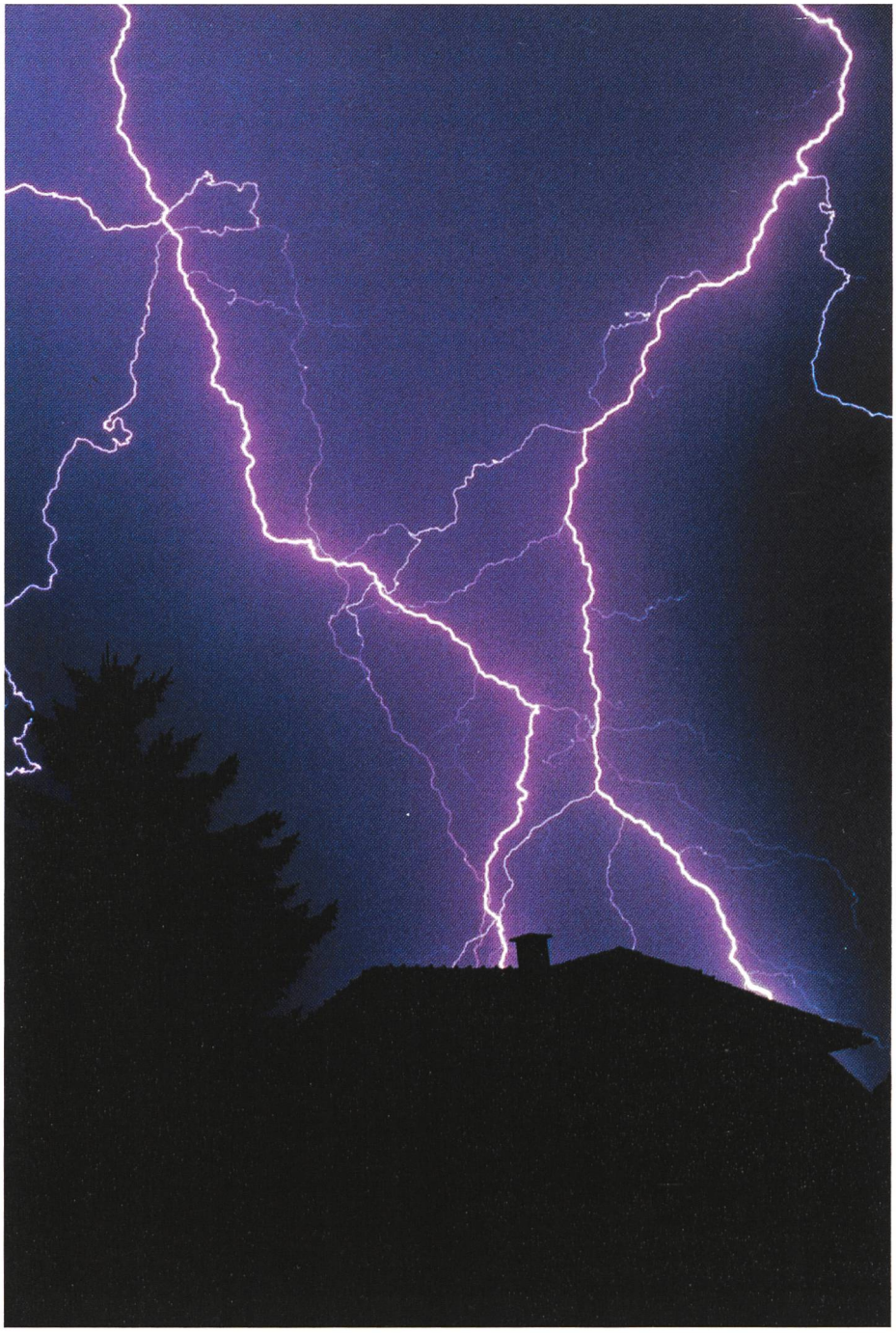
Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 02.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Rätselhafte Welt der Blitze

Andreas Walker



Blitze sind typische Phänomene von Sommergewittern – sie entstehen infolge ungleicher Ladungsverteilung zwischen Gewitterwolken und Erde.

Im Gegensatz zu den «normalen» Blitzen, geben Blitze, die von der Gewitterwolke in den Weltraum schiessen, den Forschern immer noch Rätsel auf.

Durch die Aufwinde und die ungleiche Eis-Wasser-Verteilung in der Gewitterwolke entstehen Gebiete mit verschiedenen elektrischen Ladungen. Der obere, eisige Teil der Wolke ist meistens positiv geladen, der untere Teil meistens negativ. Zwischen den verschiedenen Ladungen entsteht eine Spannung. Wird ein gewisser Wert überschritten, erfolgt ein Ladungsausgleich zwischen zwei entgegengesetzt geladenen Gebieten (Wolke-Wolke, Wolke-Boden oder umgekehrt) – es blitzt.

Blitze sind jedoch nicht nur zwischen den Wolken und der Erde vorhanden. In der hohen Atmosphäre existieren seltsame Leuchterscheinungen, die schon von Flugzeugpiloten gesichtet wurden. Diese schwer erklärbaren Phänomene tauchen wie ein Spuk auf und verschwinden sehr schnell wieder. Die Wissenschaftler bezeichnen sie deshalb als Elfen und Kobolde. Die Elfen treten oberhalb der Gewitterwolke als flächig ausgedehntes, rötliches Leuchten in einer Höhe von 50 bis 90 Kilometern auf. Die Kobolde hingegen sind schmale senkrecht leuchtende Streifen, die für das menschliche Auge gerade noch erkennbar sind. Elfen und Kobolde erscheinen nur, wenn sich ein sehr starker Blitz zwischen Gewitterwolke und Erde entlädt. Dies geschieht nur etwa bei jedem zweihundertsten Blitz, der dann auch ein charakteristisches Muster von Radiowellen erzeugt, wie Steven Reising von der University of Massachusetts feststellte.

Während «normale Blitze» sich zwischen dem unteren negativ geladenen Wolkenteil und der Erde entladen, gehen die besonders starken Blitze vom oberen positiv geladenen Wolkenrand zur Erde. Bei diesen starken Blitzen entstehen Radiowellen, die sich kugelförmig ausbreiten. In einer Höhe von 50 bis 90 Kilometern treffen die Radiowellen auf eine Schicht mit höherer Elektronendichte. Die Radiowellen beschleunigen diese Elektronen und treiben sie mit hoher Geschwindigkeit vor sich her. Durch eine Wechselwirkung zwischen den energiereichen Elektronen und der hohen Atmosphäre beginnen die Luftmoleküle zu leuchten – es erscheinen für Millisekunden Kobolde und Elfen.

Doch gibt es noch rätselhaftere Erscheinungen, blaue Jets, die aus dem oberen Rand einer Gewitterwolke fast senkrecht in die Höhe schiessen und sich mit Geschwindigkeiten von etwa 100 Kilometern pro Sekunde ausbreiten. Als Piloten früher solche Phänomene schilderten, glaubte man ihnen nicht. Dank Satellitenmessungen und Space-Shuttle-Flügen werden diese Phänomene jetzt endlich mess- und beobachtbar. Es existieren tatsächlich viel mehr Dinge zwischen Himmel und Erde, als sich der Mensch vorstellen kann.

Anschrift des Verfassers
Dr. *Andreas Walker*, Rebenhübel 255, CH-5705 Hallwil, Telefon 062 777 50 77, E-Mail-Adresse: andreaswalker@gmx.ch

Wasserstands- und Abflussvorhersagen für den Rhein

■ *Therese Bürgi*

Zusammenfassung

Seit über 15 Jahren betreibt die Landeshydrologie (LH) des Bundesamtes für Wasser und Geologie (BWG) hydrologische Vorhersagemodelle für das alpine Einzugsgebiet des Rheins bei Rheinfelden. Ihre ersten Erfahrungen gewann sie mit einem statistischen Verfahren. Heute arbeitet sie unter Verwendung der Daten von numerischen Wettervorhersagemodellen mit dem konzeptionellen Niederschlag-Abfluss-Modell HBV3-ETHZ. Zudem wird zurzeit in Zusammenarbeit mit dem Institut für Inland Water Management and Waste Water Treatment (RIZA, NL) ein neues Vorhersagesystem entwickelt.

Wegen seiner Komplexität bietet der Alpenraum den Forschenden der Disziplinen Meteorologie und Hydrologie interessante Herausforderungen für die Entwicklung von Vorhersagemodellen. Bedingt durch die eher kleinräumige und steile Topografie sind die Meteorologen gefordert, numerische Wettervorhersagemodelle zu entwickeln, die sowohl die grossskaligen Zirkulationen wie auch die z.T. sehr lokalen Phänomene erfassen und für beide Skalen die Ereignisse räumlich und zeitlich präzise voraussagen. Für die Hydrologen und Hydrologinnen bedeutet es, bei der Entwicklung ihrer Modelle und vor allem im operationellen Betrieb zu beachten, dass die Gewässer der kleinen steilen Einzugsgebiete der Gebirge wegen der geringen Speicherkapazität des Bodens insbesondere auf Niederschläge äusserst sensitiv reagieren. Die Verzögerung des Pegelanstiegs auf den Niederschlag ist kurz. Es gilt daher, sowohl die steilen Pegelanstiege wie auch die scharfen Hochwasserspitzen zu erfassen und exakt vorherzusagen.

Für beide Disziplinen bieten die Wintermonate im schweizerischen Mittelland eine weitere Herausforderung. Unter dem Einfluss einer Warmfront, verbunden mit ergiebigen Niederschlägen, kann die Schneedecke innert kurzer Zeit abschmelzen. Um den Ablauf eines solchen Ereignisses hydrologisch präzise vorherzusagen, ist es entscheidend, exakte Vorhersagen der Lufttemperatur, der Nullgradgrenze und der Niederschlagsmenge zur Verfügung zu haben. Wegen dieser Kopplung zwischen Hydrologie und Meteorologie, ist eine enge Zusammenarbeit zwischen den beiden Disziplinen gefordert. Besonderes Interesse liegt bei der Weiterentwicklung der numerischen Wettervorhersagemodelle und der Verbesserung der Niederschlagsmessung (Niederschlagsradar).

Nebst den natürlichen Gegebenheiten muss ein hydrologisches Vorhersagesystem für den alpinen Raum auch die menschlichen Einflüsse berücksichtigen. Zu erwähnen sind dazu die Bewirtschaftung der Wasserressourcen sowie die Regulierung des Wasserstandes der Alpenrandseen.

Gelingt es, gemeinsam mit der Forschung, all diese Merkmale des Alpenraums in ein operationelles hydrologisches Vorhersagesystem für das Einzugsgebiet des Rheins zu packen und damit zufrieden stellende Resultate zu erzielen, öffnet sich die Perspektive, solche Systeme auch für die schweizerischen Flussgebiete der Alpensüdseite zu entwickeln.

1. Entwicklung des operationellen Dienstes und des Kundenkreises

Schon seit den Vierzigerjahren betreibt die Schweiz an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich (ETHZ) Forschungen und Entwicklungen für hydrologische Vorhersagemodelle. Dank dieser Forschungstätigkeit ist es möglich, dass seit 1960 operationelle Kurzfristvorhersagen erarbeitet werden (Schädler, 1993). Damit sich die ETHZ vermehrt auf die Forschung und Weiterentwicklung konzentrieren kann, wird 1986 vereinbart, die operationelle Tätigkeit der Vorhersageerstellung an die Abteilung Landeshydrologie (LH) des Bundesamtes für Wasser und Geologie (BWG) zu überführen. Seither erarbeitet das BWG an allen Arbeitstagen eine hydrologische Vorhersage für den Rhein bei Rheinfelden. Diese Vorhersagen erstrecken sich vom aktuellen Ausgabezeitpunkt bis zur Stunde 24 des übernächsten Tages. Im Hochwasserfall werden jeweils auch an Sonn- und allgemeinen Feiertagen sowie mehrmals täglich Vorhersagen gerechnet. Während des Anstiegs von extremen Hochwassern kann der Berechnungsrhythmus bis hin zum 2-Stunden-Intervall verkürzt werden.

Der Impuls zu hydrologischen Vorhersagen kam ursprünglich von Seiten der Wirtschaft. Insbesondere die Betreiber von Flusskraftwerken, die Rheinschifffahrt und die angrenzenden Rheinanliegerstaaten hegten damals wie heute grosses Interesse an Abflussvorhersagen für den Rhein bis Rheinfelden. Hydrologische Vorhersagen sind daher noch heute eine wichtige Grundlage für die Planung der Bewirtschaftung des Abflusses zur Stromerzeugung sowie der Organisation von Transporten wichtiger Versorgungsgüter auf dem Rhein. Für die flussabwärts liegenden Staaten sind die Resultate der schweizerischen Vorhersagen wichtige Eingangsgrössen in ihre eigenen Vorhersagemodelle.

Im Laufe der Zeit erweiterte sich der Kundenkreis. Vor allem während Hochwassersituationen zählen heute die Krisenstäbe der regionalen Behörden, private Unternehmen wie auch die Medien zu den Abnehmern von hydrologischen Vorhersagen. Dank der Liberalisierung des Strommarktes stieg in den letzten Jahren in diesem Wirtschaftssektor das Interesse an den täglichen Vorhersagen, sodass seit jüngster Zeit auch Börsenmakler des Strommarktes zum Kundenkreis zählen. Heute bietet das BWG im Rahmen des Service public den Kunden über Internet u.a. eine Vielzahl aktuellster Messdaten und die hydrologischen Vorhersagen unentgeltlich an.

2. Anforderungen an ein Vorhersagesystem für den schweizerischen Alpenraum

Das Einzugsgebiet des Rheins bis Basel umfasst etwa 36 000 km^2 und bedeckt damit den grössten Teil der nördlichen Schweiz. Hydrografisch lässt sich das Rheingebiet in die Einzugsgebiete der Hauptzuflüsse Aare (11 750 km^2), Reuss (3380 km^2), Limmat (2400 km^2) und Thur (1700 km^2) unterteilen. Mit Ausnahme desjenigen der Thur weisen die Zuflüsse in den Rhein einen deutlich ausgebildeten Jahresverlauf des Abflusses auf. Geprägt von der Schnee- und Gletscherschmelze weist dieser die höchsten Abflüsse während der Sommermonate und die niedrigsten während der Wintermonate auf. Ein weiteres charakteristisches Merkmal bilden die Alpenrandseen. Dank diesen Retentionsräumen werden Hochwasserabflüsse aus dem Alpeninnern gedämpft und zurückgehalten, womit die hohen Abflussspitzen vermindert werden. Einzig das Gebiet der Thur besitzt keinen See. Eine Hochwasserwelle

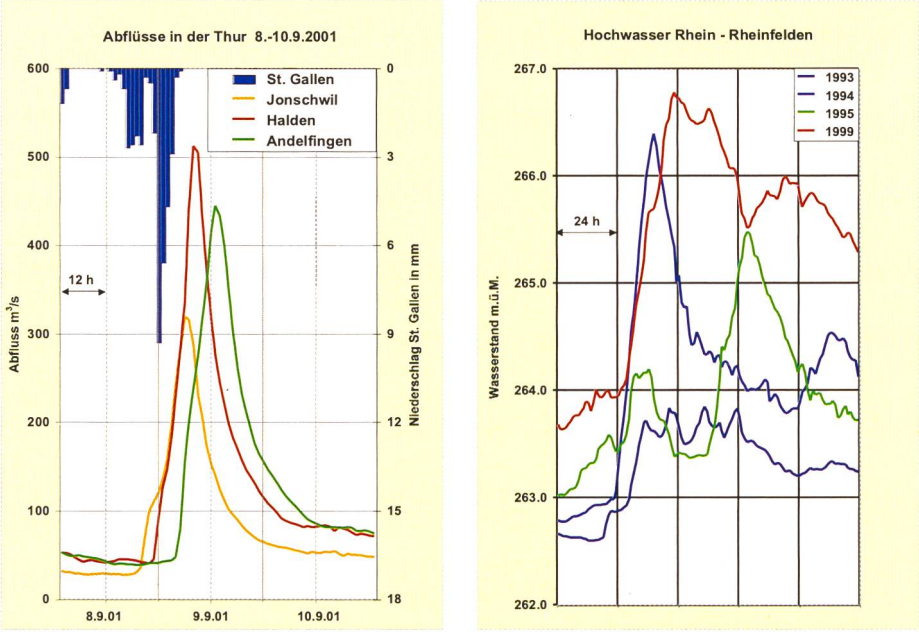


Bild 1. Ablauf ausgewählter Hochwasserereignisse des Rheins bei Rheinfelden (rechts) und im Einzugsgebiet der Thur bei Jonschwil, Halden und Andelfingen (links).

aus diesem Gebiet bewegt sich daher ohne Verzögerung und nur mit geringer Abflachung in den Rhein.

Die Anforderungen an ein hydrologisches Vorhersagemodell für das Einzugsgebiet des Rheins in der Schweiz lassen sich, auf Grund seiner natürlichen und anthropogenen Merkmale, in drei Schwerpunkte gliedern:

1) Das Vorhersagesystem soll einen schnellen Pegelanstieg und -rückgang sowie die Höhe und den Zeitpunkt der Hochwasserspitze exakt erfassen bzw. vorhersagen. Dies ist deshalb wichtig, weil wegen der Steilheit der Einzugsgebiete der eher kleineren Gebietsflächen sowie der kurzen Laufzeiten (4–10 h) Hochwasserereignisse sehr schnell ablaufen (Bild 1).
2) Das Vorhersagesystem soll winterliche Hochwasser des Mittellandes, die sich in Kombination von Schneeschmelze und ergiebigen Niederschlägen ereignen, richtig erfassen bzw. vorhersagen. Dies ist deshalb wichtig, weil unter dem Einfluss einer Warmluftadvektion und damit verbunden verbreiteten ergiebigen Niederschlägen eine durchgehende Schneedecke im Mittelland innerhalb weniger Stunden vollständig abschmelzen kann. Diese Kombination von verbreitet hohen Niederschlagsmengen und grossen Wassermengen aus der Schneeschmelze kann zu schnell und hoch ansteigenden Wasserständen führen.
3) Das Vorhersagesystem soll die anthropogenen Beeinflussungen der Flussgebiete und die daraus resultierenden Einflüsse auf das Abflussverhalten der Gewässer berücksichtigen. Insbesondere kennt das System die Reglemente für die Regulierung der Wasserstände der Alpenrandseen und berechnet in geeigneter Weise den Wasserrückhalt in den Stauseen sowie die verzögerte und gesteuerte Wasserrückgabe in den Flusslauf während späterer Tage und Monate.

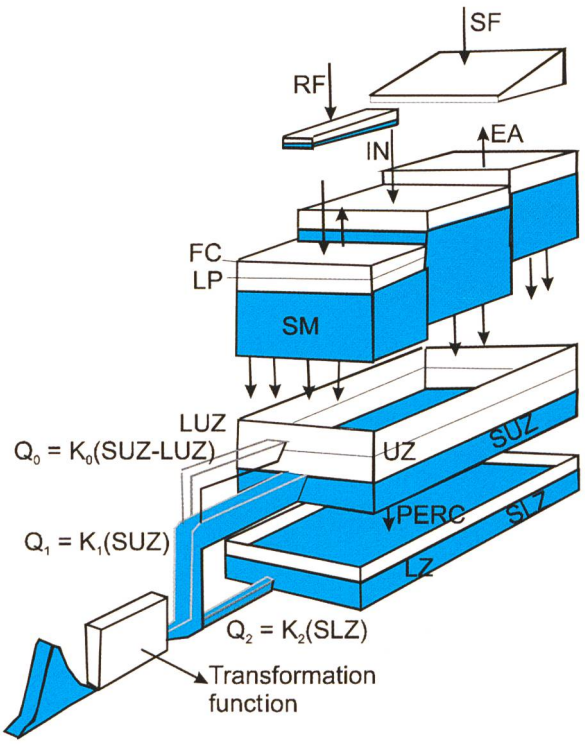
3. Die Modelle

3.1 Das statistische Modell

Das erste operationelle System beim BWG rechnete hydrologische Vorhersagen für das Gebiet unterhalb der Alpenrandseen bis zum Rhein bei Rheinfelden (Lang et al., 1987). Das Gebiet ist unterteilt in 11 Teileinzugsgebiete. Die Datenbasis des Systems, das von 1986 bis 1999 in Betrieb stand, besteht aus drei Elementen: Von 18 Messstationen des BWG werden via Telefonnetz alle zwei Stunden die Momentanwerte des Wasserstandes übertragen. Von rund 70 Stationen des automatischen Messnetzes der MeteoSchweiz erhält das BWG per Telex die stündlichen Niederschlagssummen, die Lufttemperatur sowie im Winter zweimal täglich die Schneehöhen. Jeweils einmal pro Tag liefert die MeteoSchweiz ebenfalls per Telex eine speziell auf die Bedürfnisse des BWG zugeschnittene Niederschlags- und Temperaturvorhersage. Ein statistisches Modell – eine Kombination multipler Regressionen – berechnet mit den beobachteten und vorhergesagten meteorologischen Daten sowie den in Abflusswerte umgerechneten Wasserstandsangaben eine Vorhersage für den Rhein bei Rheinfelden.

3.2 Das konzeptionelle Modell

Parallel zum Betrieb des operationellen Systems wurde an der ETHZ ein neues Verfahren entwickelt und löste Ende 1999 das alte ab. Die Wahl des hydrologischen Modells fällt auf das HBV, da die einfache Struktur dieses konzeptionellen Modells (Bild 2) die wichtigsten Elemente der Abflussbildung beinhaltet. Das Modell basiert auf homogenen Einzugsgebieten, die in verschiedene Höhenstufen unterteilt sind. Mittels der Methode der «optimalen Interpolation» (Kap. 4.1) berech-



Schneeroutine
SF = Schnee
RF = Regen
Bodenfeuchte
IN = Infiltration
EA = Aktuelle Evapotranspiration
FC = max. Gehalt der Bodenfeuchte
LP = Grenzwert für potenzielle Evapotranspiration
SM = Bodenfeuchte
Antwortfunktion
UZ = obere Zone
SUZ = Speicherkapazität der oberen Zone
LUZ = Grenzwert für den schnellen Ausfluss aus der oberen Zone
LZ = untere Zone
SLZ = Speicherkapazität der unteren Zone
PERC = Perkolation
K_x = Rezessionskoeffizienten
Lineare Transformation

Bild 2. Modell HBV-ETHZ, angepasst nach Lindström et al. (1997).

net das System aus den Punktmessungen der meteorologischen Grössen die Gebietsniederschläge und die Temperaturen für die verschiedenen Höhenstufen. Mit der Schnee-Routine, dem kombinierten Energiebilanz- und Temperatur-Index-Verfahren (Kap. 4.2), wird für jede Höhenstufe der Auf- bzw. Abbau der Schneedecke gerechnet. Die Bodenfeuchte-Routine berechnet die aktuelle Verdunstung als Funktion der modellierten Bodenfeuchte und der potenziellen Verdunstung. Schliesslich besteht die Antwortfunktion aus einem einfachen Kaskadensystem von zwei aufeinander folgenden Speichern zur Abbildung des schnellen und langsamen Ausflusses aus einem Gebiet. Mit einem Filter wird der generierte Speicherausfluss in Abfluss umgerechnet. Eine statistisch ermittelte lineare Transferfunktion rechnet schliesslich die einzelnen Gebietsabflüsse bis Rheinfelden. Wegen der kleinen Einzugsgebiete und der kurzen Laufzeiten ist für das Routing der Abflüsse in schweizerischen Gebieten kein hydraulischer Ansatz notwendig.

Auch das heutige System berechnet die Vorhersagen nur für das Gebiet unterhalb der Alpenrandseen. Einzig im Einzugsgebiet der Aare erfolgt eine Gebietsausdehnung um die Zuflussgebiete zum Bieler-, Murten- und Neuenburgersee (Bild 3). Der vorauszusagende Zufluss aus den übrigen Seen wird ausgehend von gemessenen Abflusswerten abgeschätzt. Neu ist die Unterteilung in rund 40 Teileinzugsgebiete. Diese Einteilung ist an das automatische Messnetz des BWG der 90er-Jahre angepasst.

Die Datenbasis bilden die gemessenen Stundenmittelwerte der Abflüsse, die gemessenen Stundenwerte von Temperatur und Niederschlag des automatischen Messnetzes der MeteoSchweiz sowie für die Vorhersageperiode die stündlichen Daten der hochauflösenden numerischen Wettervorhersagemodelle. Erstmals wird damit ein operationelles Abflussvorhersagemodell mit einem numerischen Wettervorhersagemodell gekoppelt.

Bild 4 zeigt die einzelnen Schritte des operationellen Ablaufs bei der Erstellung einer Vorhersage vom Einlesen der Daten bis zur Aufbereitung des Vorhersagebulletins. Da in das Modell automatisch gemessene und via Modem übermittelte Rohdaten einfliessen, ist es notwendig, diese im Hinblick auf Lücken und unrealistische Werte hin zu prüfen. Dazu müssen die eingelesenen Daten innerhalb statistisch ermittelten weichen (höchster/tiefster je gemessener Wert) und harten Limiten (weiche Limite + bzw. – 20%) liegen. Fragwürdige Werte oder Messlücken sind zu korrigieren bzw. zu ergänzen. Im aktuellen Modell nur ansatzweise implementiert ist die Berücksichtigung der Seeregulierungen. Ein solches Reglement ist nur für die Berechnung des Ausflusses aus dem Bielersee eingebaut.

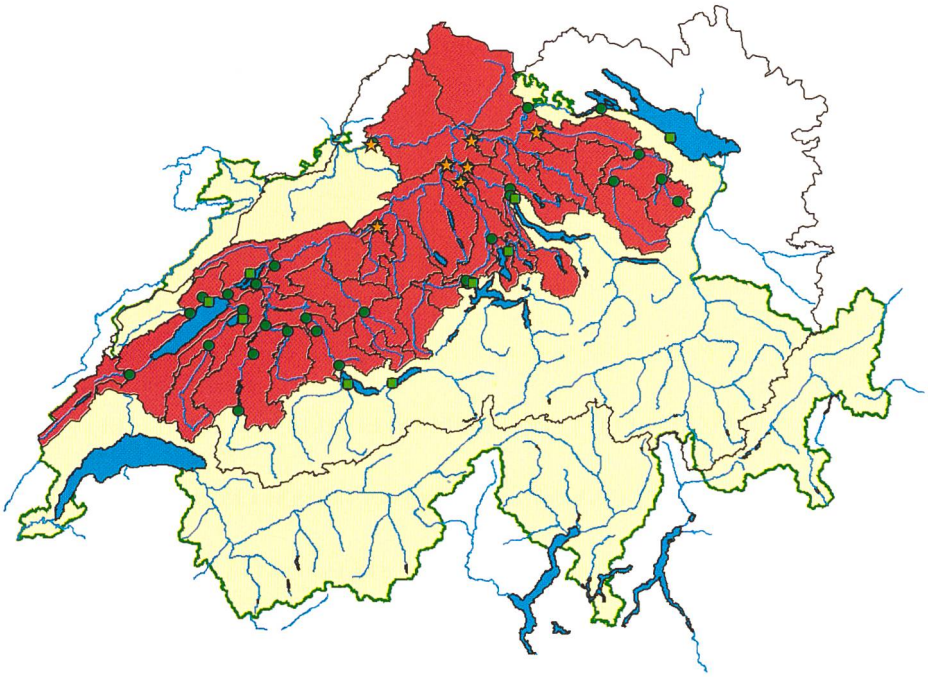


Bild 3. Einzugsgebiet des Rheins (schwarze Linie), im Vorhersagemodell berücksichtigte Gebiete (rot), Abflussstationen (Punkte), Seepegel (Quadrate) sowie die Stationen (Sterne), für welche Vorhersagen publiziert werden.

4. Möglichkeiten und Grenzen der hydrologischen Vorhersagen

4.1 Gemessener Niederschlag und Niederschlagsvorhersagen

Da der Hochwasserabfluss im alpinen Raum hauptsächlich von den Niederschlagsereignissen geprägt ist, kommt der Aufbereitung des Niederschlages im Vorhersagesystem eine bedeutende Rolle zu. Ein Niederschlag-Abfluss-Modell basiert auf Einzugsgebieten und damit auf den Berechnungen von Gebietsdaten. Somit müssen die meteorologischen Daten, in der Regel Punktmessungen, sowie die Rasterdaten der numerischen Wettervorhersagemodelle entsprechend der Gebietseinteilung zu Gebietswerten interpoliert werden. Das BWG verwendet dazu die «Kriging»-Methode auch «optimale Interpolation» genannt (Jensen, 1989). In der Annahme, dass sich der Ereignisniederschlag nur in der horizontalen, nicht aber in der verti-

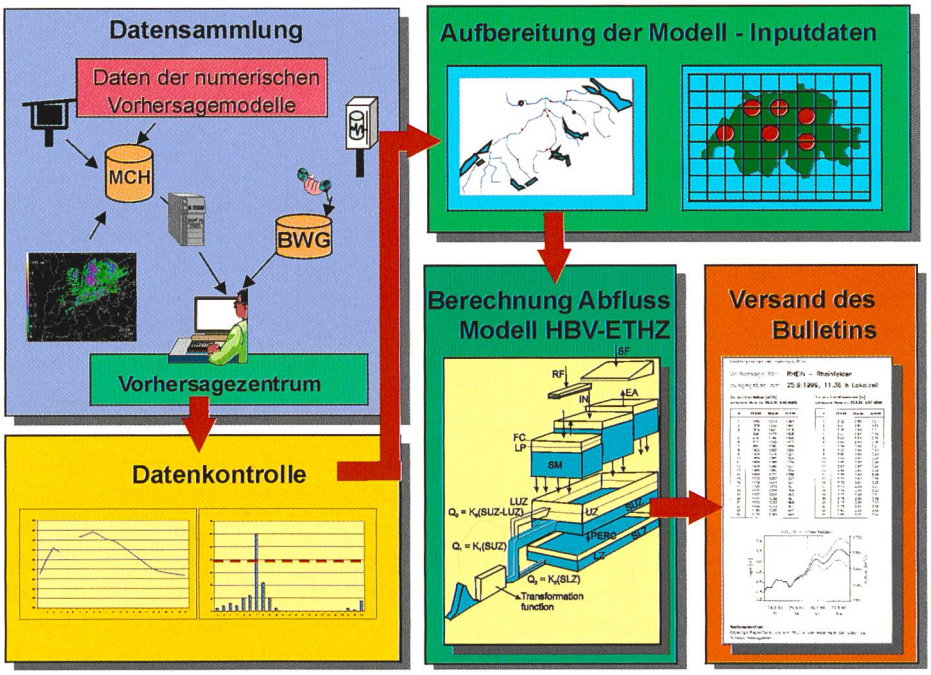


Bild 4. Schritte des Ablaufs im operationellen Betrieb.

kalen Richtung verändert, werden die Niederschlagswerte distanzgewichtet zwischen den Stationen (Messwerte) bzw. den Rasterpunkten (Wettervorhersagemodelle) im 2-dimensionalen Raum auf die Einzugsgebiete interpoliert.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass dieser Ansatz für die Gebiete des Mittellandes dank einer grossen Stationsdichte gute Gebietswerte liefert. In gebirgigen Lagen nimmt diese Dichte jedoch stark ab. Dazu kommt, dass die meisten Messstandorte in den Talböden zu finden sind. Eine differenzierte Erfassung der Niederschlagsverteilung in horizontaler Ausdehnung wie auch mit zunehmender Höhe ist wegen der heterogenen Verteilung der Niederschlagsstationen schwierig. Für die Interpolation stehen daher zu wenig Messstandorte und Daten zur Verfügung. Dies hat zur Folge, dass die berechneten Gebietsniederschläge im alpinen Raum deutlich unterschätzt werden und daher in geeigneter Weise korrigiert werden müssen.

Dem gegenüber stehen die Vorhersagedaten der hochauflösenden numerischen Wettermodelle. Aus den 7-km-Rasterdaten lassen sich zwar gute Gebietswerte berechnen, doch gibt es immer wieder Konstellationen, für welche die Wettermodelle die Intensität und die räumliche und zeitliche Verteilung der Niederschlagsfelder nur ungenügend exakt zu berechnen vermögen. Solche Fehler wirken sich wegen der engen Koppelung von Niederschlag und Abfluss im Alpenraum deutlich auf die hydrologischen Vorhersagen aus. Dazu ein Beispiel (Bild 5) vom Dezember 2001 für die Station Andelfingen an der Thur.

Der stündlich vorhergesagte Niederschlag für die Station Tänikon (rote Säulen) – hergeleitet aus dem numerischen Modell Local Model (LM) von MeteoSchweiz – unterscheidet sich sowohl in der Intensität wie auch in der zeitlichen Auflösung markant von den tatsächlich in Tänikon gefallenen stündlichen Regenmengen. Auf Grund der numerischen Vorhersagen kann in diesem Fall keine zufrieden stellend exakte Vorhersage des Abflusses berechnet werden, was die blaue und die roten Linien deutlich zeigen. Erkennt der Vorhersagedienst die Diskrepanz zwischen vorhergesagten und tatsächlich eintretenden Niederschlagsmengen, so erstellt er im Laufe des Tages eine weitere Vorhersage. Damit kann die erste Vorhersage insofern etwas verbessert werden, als dass bei der zweiten Vorhersage die schon gefallenen Regenmengen ins Modell einfliessen und damit der Pegelanstieg besser erfasst wird. Stimmen die vorhergesagten Niederschläge mit den tatsächlich fallenden einigermassen gut überein, so lassen sich gute hydrologische Vorhersagen erstellen. Wie das Beispiel der Vorhersagen für den Rhein bei Rheinfelden vom 14. bis 17. Juli 2001 (Bild 6) zeigt.

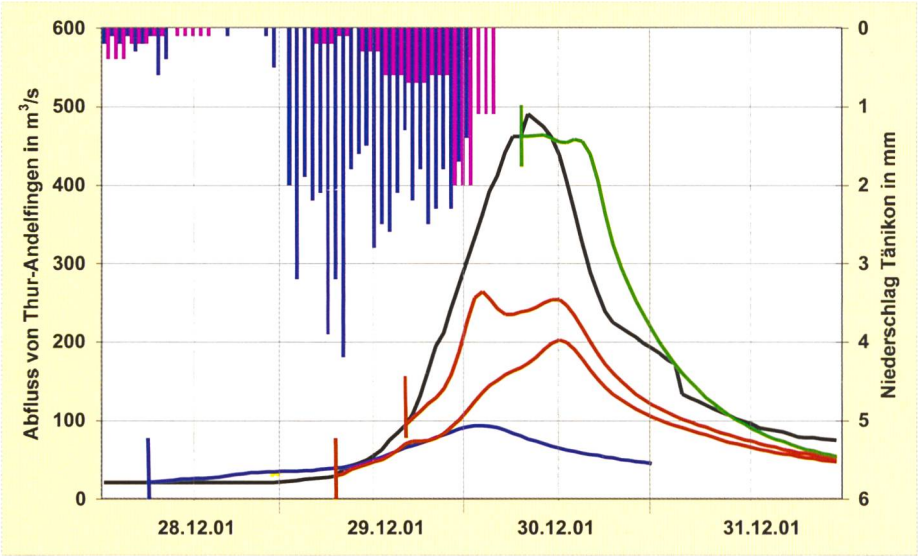


Bild 5. Hydrologische Vorhersage für die Thur bei Andelfingen vom 28. bis 30.12.2001 (farbige Linien mit senkrechter Linie als Vorhersagezeitpunkt), gemessener Abfluss bei Andelfingen (schwarze Linie). Stündlicher vorhergesagter Niederschlag für die Station Tänikon (rote Säulen), gemessene Stundenwerte des Niederschlags (blaue Säulen).

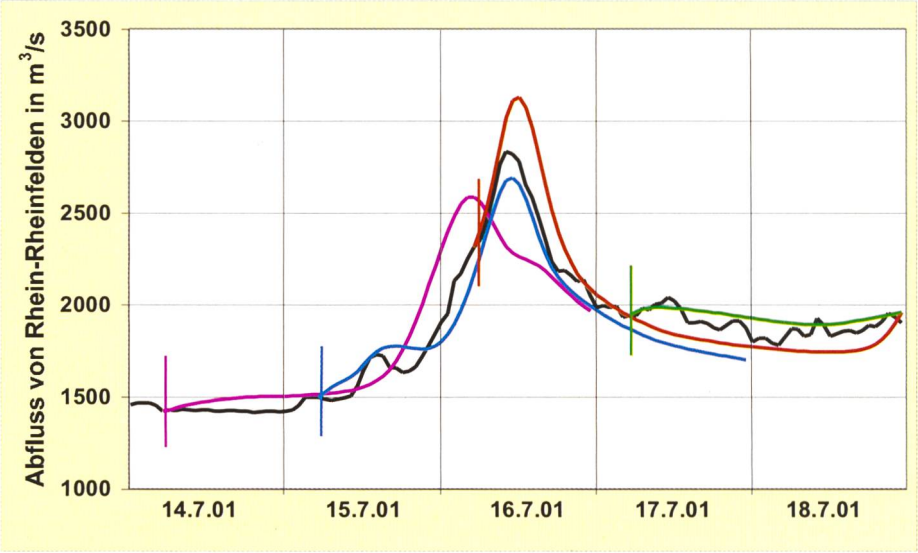


Bild 6. Vorhersage Rhein-Rheinfelden 14. bis 17.7.2001 (farbige Linie mit senkrechter Linie als Vorhersagezeitpunkt), gemessener Abfluss (schwarze Linie).

Die MeteoSchweiz betreibt drei Niederschlagsradare. Diese Daten, die quasi online auch beim BWG zur Verfügung stehen, werden heute nur qualitativ genutzt. Sie dienen dem Vorhersagedienst dazu, sich ein Bild über das aktuelle Niederschlagsgeschehen in der Schweiz zu verschaffen sowie etwas über die Geschwindigkeit bzw. die Zugrichtung der vorhandenen Niederschlagsfelder zu erfahren. Gelingt es, diese Daten quantitativ auszuwerten, stehen gemessene Gebietsniederschläge in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung zur Verfügung. Gleichzeitig könnten diese gemessenen Daten über die nächsten 3 bis 6 Stunden extrapoliert werden und als so genanntes Now-casting in das hydrologische Modell einfliessen. Mit dem Einbezug dieser Radardaten könnten daher einerseits die Ausgangslage für das hydrologische Modell und andererseits die Vorhersagen der ersten paar Stunden wesentlich verbessert werden.

4.2 Das Schneeschmelzmodell

Es hat sich gezeigt, dass das häufig verwendete Gradtag-Verfahren den witterungsbedingten schnellen und vollständigen Schneedeckenabbau im Mittelland nur ungenügend berechnen kann (Braun, 1985). Ein solches Abschmelzen der Schneedecke erfolgt unter dem Einfluss einer Warmfront, verbunden mit verbreiteten Niederschlägen und starken Winden. Der vom Wind verursachte turbulente Energieaustausch wird im Gradtag-Verfahren jedoch nicht berücksichtigt. Um die-

sen einbeziehen zu können, verwendet das BWG das kombinierte Energiebilanz- und Temperatur-Index-Verfahren von Anderson und Braun (Braun, 1985). Dabei wird bei schönem und trockenem Wetter das Gradtag-Verfahren und bei Regenwetter das Energiebilanz-Verfahren eingesetzt. Im Energiebilanz-Verfahren setzt sich die Schneeschmelze zusammen aus der Summe der Strahlungswärme, der fühlbaren Wärme, der latenten Wärme und der Wärme des Regens. Bei der Berechnung der fühlbaren wie auch bei jener der latenten Wärme spielt der Wind eine entscheidende Rolle.

Ein einfaches Rechenbeispiel im Flussgebiet der Aare soll die Bedeutung der Schneeschmelze gekoppelt mit ergiebigem Niederschlag veranschaulichen. Es wird angenommen, dass das ganze Gebiet der Aare unter einer Schneedecke liegt, dass die Nullgradgrenze laut Wettervorhersagemodell bei rund 450 m ü.M. liegt und dass für die nächsten 24 Stunden 10 mm Regen vorausgesagt werden. Das bedeutet, dass auf einer Fläche von rund 2600 km^2 die Schneedecke abschmilzt. Unter der Annahme eines Gradtag-Faktors von 5 [mm/Grad] fallen somit aus der Schneeschmelze rund 13 Mio. m^3 Wasser an. Der vorhergesagte Beitrag des Regens beträgt ca. 26 Mio. m^3 Wasser. Zusammengezählt ergibt dies eine Wassermenge von 39 Mio. m^3 oder einen Abfluss von 450 m^3/s. Ist die Temperaturvorhersage jedoch nur um 1–2 °C falsch und liegt daher die Nullgradgrenze nicht bei 450 m ü.M., sondern bei 600 m ü.M., so ist die von der Schneeschmelze betroffene Fläche doppelt so gross. Regnet es zudem statt der vorgesehenen 10 mm 20 mm in 24 Stunden, so bedeutet dies, dass sowohl aus der Schneeschmelze wie auch aus der Regenmenge je doppelt so viel Wasser anfällt als vorhergesagt ist. Mit andern Worten beträgt der Abfluss statt der vorgesehenen 450 m^3/s nun 900 m^3/s. Dies entspricht etwa einem 5-jährlichen Hochwasser der Aare bei Brugg.

4.3 Ressourcen: Technik und Personal

Dank der rasanten Entwicklung der Technik ist es heute möglich, von einer zentralen Stelle her das Abfluss- und Niederschlagsgeschehen in entfernten Regionen der Schweiz gewissermassen online zu verfolgen. Sowohl die MeteoSchweiz wie auch das BWG betreiben dichte Messnetze mit automatischer Datenübertragung. Diese schnellen Kommunikationswege sowie geschultes und erfahrenes Personal bei MeteoSchweiz und dem BWG ermöglichen es, auf sich rasch ändernde Situationen zu reagieren und bezüglich der hydrologischen Vorhersagen allenfalls die Intervalle zwischen zwei Berechnungen zu verkürzen. Die eingespielte und enge Zusammenarbeit der operationellen Dienste der beiden Ämter, insbesondere während niederschlagsreicher Tage, ermöglicht eine bessere Interpretation der Lage, der Vorhersageergebnisse wie auch eine umfassendere Auskunftsmöglichkeit gegenüber der Kundschaft.

Die grosse Abhängigkeit des Systems von der elektronischen Datenübertragung der Rohdaten zwischen den Stationen und dem Vorhersagezentrum wie auch jener der Resultate zur Kundschaft weist auch Schwächen auf. Ein Ausfall einer oder mehrerer Komponenten innerhalb der vernetzten Datenübertragung (Rechner, Telefonverbindungen, Datenleitungen usw.) erschwert oder verunmöglicht die Erstellung einer Vorhersage.

Eine weitere Grenze bildet die personelle Grösse des Vorhersagedienstes beim BWG. Das BWG ist heute mit 4 Personen nicht in der Lage, einen 7 × 24-Stunden-Service anzubieten. Der Vorhersagedienst ist daher in erster Linie während der offiziellen Bürozeiten optimal gewährleistet. Ausserhalb dieser Zeiten besteht ein Pikettdienst, welcher die momentane Wetter- und Abflusssituation verfolgt und gegebenenfalls den Vorhersagedienst aufnimmt. Zusätzlich versucht der Vorhersagedienst während des Anstiegs von extremen Hochwassern, also zeitlich limitiert, einen 24-Stunden-Service zu gewährleisten.

5. Was steht im Hochwasserfall zur Verfügung

Trotz ihren Grenzen sind hydrologische Vorhersagen heute ein wertvolles Instrument bei der Planung von kurzfristigen Hochwasserschutzmassnahmen. Dank der Entwicklung im Bereich des Internets bilden sie jedoch nicht die einzige nützliche Informationsquelle. An dieser Stelle werden einige Dienstleistungen v.a. aus dem Bereich Hydrologie zusammengetragen, die den Verantwortlichen des Hochwasserschutzes, oder z.T. auch den Betroffenen und Interessierten vor und während eines Hochwassers zur Verfügung stehen. Die Liste ist nicht abschliessend, und sie wird sich dank der neuen Technologien ständig erweitern.

5.1 Vorwarnung/Vorhersagen

Im Bereich der Warnungen ist zu unterscheiden zwischen Frühwarnungen, Warnungen und Alarmen. Frühwarnungen erfolgen in der Regel einige Tage, Warnungen ca. 24 Stunden zum Voraus. Dazu gehören die Warnungen der MeteoSchweiz, aber auch die hydrologischen Vorhersagen. Alarme erfolgen beim Erreichen eines bestimmten vordefinierten Alarmwertes.

WARN: Im Rahmen des Projektes WARN hat die MeteoSchweiz in Zusammenarbeit mit den Kantonen für verschiedene Wetterphänomene Warnschwellen festgelegt. Unter anderem hat sie vereinbart, dass ein WARN-Bulletin per Fax an die Kantone verschickt wird, wenn in den nächsten 24 Stunden Regenmengen von 50 und mehr Millimetern zu erwarten sind. Jene Kantone, die von den grösseren Regenmengen betroffen sind, sowie das BWG erhalten dann jeweils das spezielle Bulletin. Damit ist auch gewährleistet, dass der Dienst des BWG seinen Arbeitsrhythmus den gegebenen Umständen anpasst.

Hydrologische Vorhersage: Alle vom BWG erarbeiteten Wasserstands- und Abflussvorhersagen der grösseren Flüsse der Alpennordseite stehen seit Anfang 2002 je nach Hochwassergefahr mehrmals täglich, aber mindestens von Montag bis Freitag ab ca. 8.30 Uhr im Internet unentgeltlich und frei zugänglich zur Verfügung. Gleichzeitig besteht die Möglichkeit, ein so genanntes Hochwasser-Abonnement zu abonnieren. Dieses beinhaltet eine per Fax verteilte Vorwarnung – eine Art Weckruf –, sobald ein im Abonnement vereinbarter Schwellenwert in der Vorhersage überschritten wird. Je nach Abonnement verfolgen die Kunden anschliessend das Abflussgeschehen selbständig am Internet oder sie erhalten alle während eines Hochwassers erstellten Vorhersagen.

Hochwasser-Alarmstationen: Die Messstationen des BWG können so konfiguriert werden, dass der Datenlogger bei Erreichen eines vordefinierten Pegels einen Alarm auslöst, der an die betroffenen Kunden übermittelt wird. Ein derartiges Alarmsystem ist beispielsweise im Thurgebiet eingerichtet. Im Gegensatz zu der Dienstleistung WARN der MeteoSchweiz und den hydrologischen Vorhersagen ist dieses System nicht vorausschauend, sondern übermittelt nur einen einzelnen aktuellen Pegelmesswert – den Alarmwert und den Eintretenszeitpunkt. Es kann kein Verlauf des in den letzten Stunden gemessenen Wasserstandes an die Kunden übermittelt werden. Die alarmierte Instanz muss nach Erhalten der Alarmmeldung auf Grund von Erfahrungen und der Witterung in kurzer Zeit entscheiden, ob Hochwasserschutzmassnahmen zu treffen sind oder nicht. Obwohl eine solche Alarmorganisation abhängig von der Alarmschwelle unter Umständen mit kurzen Reaktionszeiten funktionieren muss, ist sie insbesondere für kleinere und alpine Einzugsgebiete die einzige zuverlässige Alarmmöglichkeit.

5.2 Informationsmöglichkeiten während eines Hochwassers

In den letzten Jahren hat die Bedeutung des Internets als Möglichkeit zur Verbreitung von Dienstleistungen auch in der Verwaltung stark zugenommen. So bieten heute verschiedene private, kantonale und nationale Behörden ein grosses Datenangebot bezüglich Hydrologie und Meteorologie im Internet an. Damit ist es möglich, sich während einer Hochwassersituation über die aktuelle Lage zu informieren bzw. zeitgleich einen Hochwasserabfluss am Bildschirm mitzuverfolgen. Deshalb sollen an dieser Stelle einige Adressen, die während eines Hochwassers nützlich sein können, erwähnt werden. Es ist anzunehmen, dass in Zukunft auch dieses Angebot noch weiter ausgebaut wird.

Wasserstände: Das BWG bietet heute die aktuellsten Daten von rund 150 Stationen im Internet an. Im Normalfall werden ewa alle vier Stunden die neusten Werte auf dem Internet publiziert. Während eines Hochwassers kann der Erneuerungsrhythmus für die betroffene Region bis auf eine Stunde verkürzt werden. Ähnliche Internetseiten bieten heute auch diverse Kantone an.

Nebst den aktuellen Wasserständen können auch die hydrologischen Vorhersagen des BWG auf dem Internet abgerufen werden.

- aktuelle Daten des BWG: http://www.bwg.admin.ch/service/hydrolog/d/index.htm
- aktuelle Daten des Kantons BE: http://www.be.ch/bve/wea/messwerte/index_d.html
- aktuelle Daten des Kantons ZH: http://www.hochwasser.zh.ch/
- aktuelle Daten des Kantons TI: http://www.ist.supsi.ch/ital/hydrodata.htm
- hydrologische Vorhersagen: http://www.bwg.admin.ch/service/hydro/d/previsi1.htm

Niederschlag: Ebenso wie die Abflüsse stehen heute auch auf verschiedenen Webseiten Niederschlagsdaten und Vorhersagen mit unterschiedlicher zeitlicher Auflösung und unterschiedlich aufgearbeitet dem breiten Publikum zur Verfügung:

- 10-Minuten-Summen: http://www.meteoschweiz.ch/de/Prognosen/Vorhersagen/IndexVorhersagen.shtml
- Stundensummen: http://www.meteotest.ch/prog/index.html
- Radarbilder: http://www.sfdrs.ch/sendungen/meteo/karten/radar.html http://www.nzz.ch/wetter/radar_grossbild_aktuell.html
- Niederschlagsvorhersagen: http://www.landi.ch/ger/index5.asp?file=niedprog.asp http://www.espace.ch/wetter/index.asp#

6. Ausblick: Entwicklung des Vorhersagesystems 3. Generation

Im Winter 1999 wurde im Rahmen des «Aktionsplans Hochwasser» der Internationalen Kommission zum Schutze des Rheins (IKSR, 1998) die internationale Zusammenarbeit für die Entwicklung des Flood Early Warning Systems Rhine (FEWS-Rhine) zwischen den Auftraggebern BWG und RIZA mit den Auftragnehmern WLIDelft Hydraulics (WL) und dem Schwedischen Meteorologischen und Hydrologischen Institut (SMHI) eingeläutet. In diesem Auftrag entwickelt die WL das eigentliche Vorhersagewerkzeug FEWS-System, und das SMHI passt das HBV-96 (Holst et al., 1996) den neusten Kundenbedürfnissen an.

Das neue Modell FEWS-Rhine Schweiz besitzt künftig folgende Eigenschaften: Das Berechnungsgebiet des Vorhersagemodells erstreckt sich über das gesamte Einzugsgebiet des Rheins in der Schweiz. Somit wird das heutige System im Süden um die Zuflüsse zu den Alpenrandseen, im Norden um die Zuflüsse aus dem süddeutschen Raum und um die Verlängerung der Rheinstrecke bis Basel erweitert. Das Gebiet ist möglichst homogen in rund 60 Teileinzugsgebiete unterteilt. Die Datengrundlage entspricht jener des heutigen Systems: Von rund 60 Abflussmessstationen des BWG und rund einem halben Dutzend Stationen der Nachbarländer fliessen die stündlichen Abflusswerte sowie von rund 10 Schweizer Seen die stündlichen Wasserstände ins Modell ein. Die MeteoSchweiz liefert zusätzlich zu den stündlichen Messdaten von Niederschlag und Temperatur auch jene der Windgeschwindigkeit und, zur Berechnung des Wasserdampfdruckes, jene der Taupunkttemperatur. Für die Vorhersageperiode – nach wie vor bis zur Stunde 24 des übernächsten Tages – werden ebenfalls die obigen Messgrössen in stündlicher Auflösung aus dem hoch aufgelösten Wettervorhersagemodell (Lokalmodell) der MeteoSchweiz und dem Global Model des Deutschen Wetterdienstes eingehen. Das neue System ist derart aufgebaut, dass künftig neue Datentypen, wie beispielsweise Daten der Niederschlagsradare, mit wenig Aufwand implementiert werden können.

Über eine einfach gehaltene Oberfläche (Bild 7) wird der Benutzer bzw. die Benutzerin mit klar definierten Schritten durch den Prozess der Vorhersageerstellung geführt. Zudem bietet sich bei jedem Prozessschritt die Möglichkeit, sich über eine interaktive Karte oder über die Auswahl einer Stations- bzw. Messgrössenliste einen grafischen oder tabellarischen Überblick über die Daten und damit über die vorliegende Situation zu verschaffen.

Mit der Hinzunahme der Zuflussgebiete oberhalb der Alpenrandseen in die Berechnungen der Vorhersage werden stark anthropogen beeinflusste alpine Gebiete ins Modell einbezogen. Das zukünftige Modell berechnet ein mittleres tägliches Abflussvolumen aus diesen Gebieten in die Alpenrandseen, deren Wasserstandsänderung und die Ausflüsse aus diesen zum grössten Teil regulierten Seen.

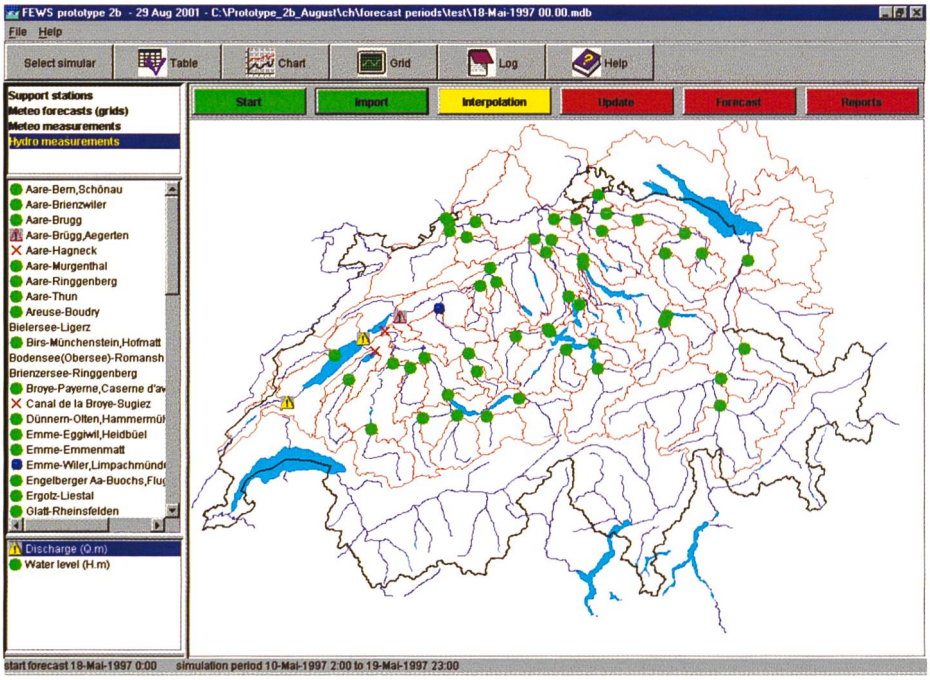


Bild 7. FEWS-Benutzeroberfläche, Gebiete des Modells sowie hydrologische Stationen.

Das hydrologische Modell wird mit den Daten von 1989 bis 1999 geeicht. Das System FEWS-Rhine Schweiz wird im Laufe des Jahres 2002 in den Testbetrieb überführt.

Mit der Entwicklung des Vorhersagesystems FEWS-Rhine Schweiz wird das Einzugsgebiet des Rheins bis Basel in seiner gesamten Ausdehnung und Komplexität erfasst. Sein natürlicher alpiner Charakter und seine künstlich geschaffenen Eigenschaften sind damit in einem System vereint. Gelingt es, zufrieden stellende Resultate zu erzielen, so steht in Zukunft ein hydrologisches Modell und ein umfangreiches Vorhersagewerkzeug zur Verfügung, das mit relativ geringem Aufwand in andere schweizerische alpine Flussgebiete übertragen werden könnte.

7. Schlussfolgerungen

Die Erfahrungen, die der Vorhersagedienst der Schweiz seit den 80er-Jahren gemacht hat, zeigen, dass präzise hydrologische Vorhersagen wesentlich von meteorologischen Niederschlagsvorhersagen abhängig sind. Wegen der Kleinräumigkeit der Einzugsgebiete, deren Topografie und der schnellen Reaktionszeit der Gewässer ist es notwendig, dass Niederschlagsereignisse räumlich und zeitlich, aber auch in deren Intensität möglichst genau vorhergesagt werden. Dank der intensiven Zusammenarbeit zwischen dem BWG und MeteoSchweiz werden die hydrologischen Modelle jeweils dem neusten Entwicklungsstand der numerischen Wettervorhersagemodelle angepasst.

Die grosse räumliche Variabilität des Niederschlags im Alpenraum ist schwierig zu erfassen. Insbesondere kann der Gebietsniederschlag mit Regenmessern, deren räumliche Verteilung sehr heterogen ist, nur ungenügend bestimmt werden. Das BWG setzt daher grosse Hoffnungen in die Forschung bezüglich der Niederschlagsmessung mit Radar. Gelingt dies für den Alpenraum zufrieden stellend, so wird es in Zukunft möglich sein, nebst den hochauflösenden numerischen Wettervorhersagemodellen für die Vorhersageperiode ebenso hochauflösende gemessene Gebietsniederschläge in die Modelle einfliessen zu lassen. Entsprechende Projekte für die Zusammenarbeit der Hydrologie mit der Meteorologie sind angelaufen (COST 717). Damit würde sich der Weg öffnen, auch das Radar-Nowcasting in die Modelle einzubauen. Diese Kurzfrist-Niederschlagsvorhersagen basieren auf den Radarmessungen der letzten Stunden und sind eine zeitliche Extrapolation der erfassten Niederschlagsfelder und deren Zugrichtung. Die Kopplung der hydrologischen Modelle mit dem Radar-Nowcasting brächte den Vorteil, dass auch sich in der Intensität und der Bewegungsrichtung rasch ändernde bzw. sich neu bildende Niederschlagsfelder sofort in der hydrologischen Vorhersage erfasst werden können. Damit wären gute Grundlagen geschaffen, eine Verbesserung der hydrologischen Vorhersagen, insbesondere in kleineren Einzugsgebieten des Alpenraumes, zu erzielen.

In den letzten Jahren ist bei den Behörden und der Bevölkerung die Kenntnis der Existenz von hydrologischen Vorhersagen stark gewachsen. Gleichzeitig ist mit den Hochwasserereignissen der letzten Jahre auch das Bedürfnis nach präzisen hydrologischen Vorhersagen im Alpenraum gestiegen. Es ist daher abzusehen, dass die Forderung nach Vorhersagemodellen in den Flusseinzugsgebieten der Rhone und des Tessins zunehmend lauter wird. Umso wichtiger ist es, heute ein umfassendes, flexibles und modular aufgebautes System für hydrologische Vorhersagen zu entwickeln, welches später ohne riesigen Aufwand in den neuen Gebieten eingesetzt werden könnte. Dieses Ziel versucht das BWG mit der Entwicklung von FEWS-Rhine Schweiz zu erreichen. Das System soll einerseits benutzerfreundlich sein und den Anforderungen eines operationellen Betriebes genügen und andererseits die wichtigsten hydrologischen Elemente des Alpenraumes abbilden. Dazu gehören die Ausdehnung des Vorhersagegebietes auf das ganze Einzugsgebiet des Rheins in der Schweiz, die Berechnung der Gebietsniederschläge mit der Methode der Optimalen Interpolation, die Berechnung des Auf- und Abbaus der Schneedecke mit der Anderson/Braun-Methode, die Berücksichtigung der Reglemente für die Wasserstände der Alpenrandseen und die Berücksichtigung der Bewirtschaftung der Stauseen in den Alpentälern.

Literatur

Bergström, S. (1976): Development and Application of a Conceptual Runoff Model for Scandinavian Catchments. Dept. of Water Resources Engineering, Lund Inst. of Tech./Univ. of Lund, Bulletin Series A No. 52, 134 p.

Braun, L. (1985): Simulation of Snowmelt-Runoff in Lowland and Lower Alpine Regions of Switzerland. Zürcher Geographische Schriften Nr. 21, Zürich.

COST – European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research: Use of radar observation in hydrological and NWP models. Action No. 717.

IKSR (1998): Aktionsplan Hochwasser. Internationale Kommission zum Schutze des Rheins, Koblenz.

Jensen, H. (1989): Räumliche Interpolation der Stundenwerte von Niederschlag, Temperatur und Schneehöhe. Zürcher Geographische Schriften Nr. 35, Zürich.

Holst, B. et al. (1996): Development and Verification of the Distributed HBV-96 Inflow Forecasting model. Published at the Conference: Modelling, Testing & Monitoring for Hydro Powerplants – II, 8–11 July 1996 Lausanne, Switzerland.

Lang, H. et al. (1987): Short-range runoff forecasting for the River Rhine at Rheinfelden: experiences and present problems. Hydrological Sciences Journal 32, 3, 9.

Lindström, G. et al. (1997): Development and test of the distributed HBV-96 hydrological Model. In: Journal of Hydrology 201, p. 272–288, Elsevier.

Schädler, B. (1993): Operationelle Abflussvorhersage für Rhein-Rheinfelden – Grenzen und Möglichkeiten. In: D. Grebner (ed): Aktuelle Aspekte in der Hydrologie, Zürcher Geographische Schriften, Heft 53, pp. 213–222. Geographisches Institut ETH Zürich.

Dank

Hydrologische Vorhersagen, wie sie heute vom BWG erstellt werden, sind ohne Daten nicht realisierbar. Mein Dank richtet sich deshalb an alle Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Abteilung Landeshydrologie, die um eine gute Datenqualität sowie deren hohe Verfügbarkeit bestrebt sind. Gleichermassen danke ich den Mitarbeitenden der Prozesse Meteo Zürich und Modelle bei MeteoSchweiz für die langjährige gute Zusammenarbeit.

Anschrift der Verfasserin

Therese Bürgi, Bundesamt für Wasser und Geologie, CH-3003 Bern-Ittigen.