

27  
09

# > Ereignisanalyse Hochwasser August 2007

*Analyse der Meteo- und Abflussvorhersagen;  
vertiefte Analyse der Hochwasserregulierung der Jurarandgewässer*



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU



27  
09

# > Ereignisanalyse Hochwasser August 2007

*Analyse der Meteo- und Abflussvorhersagen;  
vertiefte Analyse der Hochwasserregulierung der Jurarandgewässer*

*Avec résumé en français*

## Impressum

### Herausgeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU)  
Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

### Projektleitung

Dr. Gian Reto Bezzola, BAFU, Abteilung Gefahrenprävention  
Dr. Wolfgang Ruf, BAFU, Abteilung Gefahrenprävention

### Redaktion

Dr. Gian Reto Bezzola, BAFU, Abteilung Gefahrenprävention  
Dr. Wolfgang Ruf, BAFU, Abteilung Gefahrenprävention  
Dr. Adrian Jakob, BAFU, Abteilung Hydrologie

### Autoren

beffa tognacca gmbh, Wasserwirtschaft und Flussbau, 6431 Schwyz:  
Dr. Cornel Beffa

Bundesamt für Umwelt, 3003 Bern:  
Dr. Gian Reto Bezzola, Andreas Helbling, Caroline Kan,  
Dr. Wolfgang Ruf, Beat Sigrist

Eidg. Forschungsanstalt WSL, 8903 Birmensdorf:  
Dr. Alexandre Badoux, Dr. Christoph Hegg, Nadine Hilker

MeteoSchweiz, 8044 Zürich:  
Dr. Marco Arpagaus, Lorenzo Clementi, PD Dr. Christoph Frei,  
Dr. Sophie Fukutome, Dr. Urs Germann, Dr. Daniel Leuenberger,  
Dr. Mark Liniger, Felix Schacher, Dr. Christoph Schmutz, Marco  
Stoll, Dr. André Walser

Petrascheck Wasserwirtschaftsberatung, 5408 Ennetbaden:  
Dr. Armin Petrascheck

TK Consult AG, 8008 Zürich:  
Ines Röser, Jürg Trösch

### Begleitgruppe

#### Regulierung der Jurarandgewässer bei Hochwasser

Direction de l'aménagement, de l'environnement et des constructions,  
Service des ponts et chaussées, Canton de Fribourg:  
Dr. Christophe Joerin

Département de la sécurité et de l'environnement, Service des eaux,  
sols et assainissement (SESA), Canton de Vaud:  
Philippe Hohl

Département de la gestion du territoire, Service des ponts et  
chaussées, Canton de Neuchâtel:  
Yves-Alain Meister, Elisenda Bardina

Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion des Kantons Bern, AWA Amt für  
Wasser und Abfall:  
Bernhard Schudel

Baudepartement des Kantons Solothurn, Amt für Umwelt:  
Paul G. Dändliker

Departement Bau, Verkehr und Umwelt des Kantons Aargau,  
Abt. Landschaft und Gewässer:  
Pierre-Yves Christen, Urs Egloff

Bundesamt für Umwelt, Abteilung Gefahrenprävention:  
Hans Peter Willi, Olivier Overney, Otto Naef

## Zitierung

Bezzola Gian Reto, Ruf Wolfgang (Ed.) 2009: Ereignisanalyse Hochwasser August 2007. Analyse der Meteo- und Abflussvorhersagen; vertiefte Analyse der Hochwasserregulierung der Jurarandgewässer. Umwelt-Wissen Nr. 0927. Bundesamt für Umwelt, Bern: 209 S.

## Gestaltung

Ursula Nöthiger-Koch, 4813 Uerkheim

## Titelfoto

Unterwasser des Regulierwehrs Port am 13.08.2007 bei einem Abfluss von rund 720 m<sup>3</sup>/s, AWA Amt für Wasser und Abfall des Kantons Bern

## Bezug

Download PDF  
[www.umwelt-schweiz.ch/uw-0927-d](http://www.umwelt-schweiz.ch/uw-0927-d)  
(eine gedruckte Fassung ist nicht erhältlich)  
Code: UW-0927-D

© BAFU 2009

# > Inhalt

<b>Abstracts</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>Hydrologische Analyse des Ereignisses</b>	<b>67</b>
<b>Vorwort</b>	<b>7</b>	3.1	Übersicht über das Hochwassergeschehen	67
<b>Zusammenfassung</b>	<b>9</b>	3.2	Datenerhebung	70
<b>Résumé</b>	<b>17</b>	3.2.1	Messbetrieb und Abflussbestimmung	70
<b>Einleitung</b>	<b>25</b>	3.2.2	Bestimmung der Spitzenabflüsse	70
		3.2.3	Alarmer aus Messstationen	71
		3.3	Statistische Einordnung des Ereignisses	72
<b>1 Hochwasserschäden 2007</b>	<b>29</b>	3.3.1	Standardmässige statistische Auswertungen	72
<b>unter besonderer Berücksichtigung</b>		3.3.2	Vergleich mit den Hochwasserereignissen	
<b>des Ereignisses vom 8./9. August</b>			1999 und 2005	74
1.1 Einführung	29	3.4	Erkenntnisse	75
1.2 Hochwasserschäden in der Schweiz		3.5	Ausblick	76
im Jahr 2007	30			
1.2.1 Übersicht	30	<b>4 Abflussvorhersage</b>	<b>77</b>	
1.2.2 Das Hochwasser vom 8./9. August 2007	32	4.1 Einleitung	77	
1.2.3 Weitere Hochwasserereignisse		4.1.1 Vorhersagesystem FEWS	77	
im Jahr 2007	35	4.1.2 Vorhersagen im Rahmen		
1.3 Einordnung der Schäden des Hochwassers		von MAP D-PHASE	78	
vom 8./9. August 2007	36	4.1.3 Für die Analysen verwendete		
		hydrologische Daten	79	
<b>2 Meteorologische und klimatologische</b>	<b>39</b>	4.2 Vorhersagetätigkeit	80	
<b>Analyse des Ereignisses</b>		4.3 Güte der operationellen Vorhersage	82	
2.1 Einleitung und Gliederung	39	4.4 Analyse der operationellen Vorhersagen		
2.2 Synoptische Entwicklung	40	für die Emme und die Aare	84	
2.3 Niederschlagsverlauf	41	4.4.1 Meteorologische Messdaten für die		
2.4 Niederschlagssummen	46	Nachrechnung der Abflussvorhersagen	85	
2.5 Klimatologische Einordnung des Ereignisses	48	4.4.2 Emme – Emmenmatt	87	
2.5.1 Methode	48	4.4.3 Aare – Murgenthal	89	
2.5.2 Analyse der Tagesniederschläge	49	4.5 Erfahrungen mit den Abflussvorhersagen		
2.5.3 2- und 4-Tagesniederschlag	50	im Rahmen von MAP D-PHASE	92	
2.6 Modellvorhersagen	52	4.5.1 Nutzen von verschiedenen Modellen	92	
2.6.1 Deterministische COSMO-Vorhersagen	52	4.5.2 Nutzen von Mittelfristvorhersagen	93	
2.6.2 Probabilistische COSMO-Vorhersagen	57	4.5.3 Nutzen eines häufig aktualisierten		
2.7 Ablauf der Unwetterwarnungen	62	Wettermodells	94	
2.7.1 Die Unwetterwarnungen der MeteoSchweiz	62	4.5.4 Vergleich der verschiedenen Modelle	95	
2.7.2 Beurteilung der Warnungen	64	4.6 Erkenntnisse und Ausblick	97	
2.8 Erkenntnisse	64			
2.9 Ausblick	65			

<b>5</b>	<b>Regulierung der Jurarandgewässer bei Hochwasser</b>	<b>99</b>	<b>Anhang</b>	<b>171</b>
5.1	Einleitung	99	A1 Neue Produkte und Instrumente aus dem Projekt MAP D-PHASE	171
5.2	Das System der Jurarandseen und der unterliegenden Aare	101	A2 Niederschlagsdatensätze der MeteoSchweiz	177
5.2.1	Einzugsgebiet und Abflussregime	101	A3 Spitzenabflüsse und automatische Hochwasseralarme	179
5.2.2	Die Juragewässerkorrekturen	104	A4 Regulier- und Reglerkonzepte	187
5.3	Die Regulierung der Jurarandseen	111	A5 Sensitivität der Prognoseregulierung bezüglich Unschärfen in der Vorhersage	191
5.3.1	Reguliertvorschriften und Regulierdiagramm	112	A6 Umsetzung der Prognoseregulierung	197
5.3.2	Hochwasserregulierung der Aare	115	A7 Abfluss-Abfluss-Modellsystem für die Aare bei Murgenthal	203
5.3.3	Funktionsweise der JGK	118		
5.4	Das Hochwasser vom 8./9. August 2007	123		
5.4.1	Rekonstruktion des Hochwasserereignisses mit Hilfe von Simulationsrechnungen	124		
5.4.2	Analyse der Hochwasserregulierung und ihrer Grundlagen	129	<b>Verzeichnisse</b>	<b>205</b>
5.4.3	Einordnung hinsichtlich der Zuflüsse zu den Jurarandseen	132	Abbildungen	205
5.4.4	Einordnung hinsichtlich der Zuflüsse aus dem Zwischeneinzugsgebiet	135	Tabellen	209
5.5	Verbesserungsmassnahmen	138		
5.5.1	Mögliche Massnahmen	138		
5.5.2	Handlungsfeld Jurarandseen – Prognoseregulierung	140		
5.5.3	Umsetzung der Prognoseregulierung	148		
5.5.4	Handlungsfeld Zwischeneinzugsgebiet	151		
5.6	Erkenntnisse	155		
<b>6</b>	<b>Fazit</b>	<b>161</b>		
6.1	Einführung	161		
6.2	Einordnung des Ereignisses	161		
6.3	Vorhersagbarkeit des Hochwassers	162		
6.4	Konsequenzen für den Umgang mit Vorhersagen und Warnungen	163		
6.5	Verbesserung des Hochwasserschutzes im System der Jurarandgewässer	164		
6.6	Ganzheitliches Hochwassermanagement unter Einbezug der regulierten Seen	165		
6.7	Massnahmen	165		
6.7.1	Erforderliche Massnahmen	166		
6.7.2	Eingeleitete Massnahmen	166		
6.7.3	Weitere zu ergreifende Massnahmen	168		
6.8	Ausblick	169		

---

## > Abstracts

Thanks to improved meteorological and discharge forecasts, floods can now be detected earlier. The uncertainties associated with forecasts remain considerable, however. Because of this, forecasts must be commented on by the organisations that provide them and require interpretation and fine-tuning on the basis of local observations and experience. The limited nature of forecast lead times necessitates the minimisation of response times through comprehensive, up-to-date and tried-and-tested emergency and intervention planning.

The capacity of the regulated system of the Jura lakes (Lake Neuchâtel, Lake Biènné and Lake Morat) and the lower-lying river Aare was clearly exceeded in August 2007. The integration of discharge forecasts enables the optimisation of flood regulation within this system.

Hochwasser lassen sich heute dank verbesserter Meteo- und Abflussvorhersagen früher erkennen. Die mit Vorhersagen verbundenen Unsicherheiten sind aber nach wie vor beträchtlich. Vorhersagen sind deshalb durch die sie herausgebenden Fachstellen zu kommentieren und müssen vor Ort unter Berücksichtigung lokaler Beobachtungen und Erfahrungen interpretiert und präzisiert werden. Die begrenzten Vorwarnzeiten bedingen eine Minimierung der Reaktionszeiten durch umfassende, aktuelle und eingeübte Notfall- und Einsatzplanungen.

Das regulierte System der Jurarandseen und der unterliegenden Aare wurde im August 2007 deutlich überlastet. Der Einbezug von Zuflussvorhersagen erlaubt eine Optimierung der Hochwasserregulierung dieses Systems.

Aujourd'hui, l'amélioration des prévisions relatives aux précipitations et aux débits permet de mieux anticiper les crues. Mais les prévisions restent entachées d'incertitudes considérables. C'est pourquoi les prévisions doivent être commentées par leurs auteurs, puis interprétées et précisées sur place en tenant compte de l'expérience et des observations locales. La brièveté du délai d'alerte impose de réduire le temps de réaction au minimum. Cela passe par l'élaboration et la mise en pratique de plans d'urgence et d'intervention exhaustifs et à jour.

En août 2007, les lacs du Pied du Jura et l'Aar en aval du lac de Biènné ont été largement surchargés. Or leur régulation peut être optimisée grâce aux prévisions de débits.

Keywords:

Flood  
Meteorological and discharge forecasts  
Lake regulation  
Jura lakes

Stichwörter:

Hochwasser  
Meteo- und Abflussvorhersagen  
Seeregulierung  
Jurarandgewässer

Mots-clés:

Crues  
Prévisions météorologiques et de débits  
Régulation des lacs  
Eaux du pied du Jura

Grazie al miglioramento delle previsioni meteorologiche e di portata è oggi possibile riconoscere in anticipo l'arrivo delle piene. Tuttavia, le previsioni comportano ancora un notevole margine d'incertezza. Le previsioni devono pertanto essere commentate dai servizi che le pubblicano e vanno interpretate e precisate sul posto tenendo conto di osservazioni ed esperienze locali. I brevi tempi di preallarme richiedono una riduzione al minimo dei tempi di reazione mediante l'adozione di piani d'intervento e d'emergenza completi, aggiornati e collaudati.

Nell'agosto del 2007, il sistema regolato dei laghi ai margini del Giura e del corso dell'Aare a valle dei laghi era chiaramente sovraccarico. La presa in considerazione delle previsioni di portata degli affluenti permette di ottimizzare la regolazione del sistema.

Parole chiave:

piene

previsioni meteorologiche e alla portata delle piene

regolazione dei laghi

laghi ai margini del Giura

---

## > Vorwort

Das Hochwasser vom August 2007 war nach dem Hochwasser vom August 2005 ein weiteres Grossereignis, das weite Teile der Schweiz betraf. Das besondere Merkmal des Hochwassers 2007 war die deutliche Überlastung des seit der zweiten Juragewässerserkorrektion als hochwassersicher geltenden Systems der Jurarandseen und der unterliegenden Aare. Ohne die dämpfende Wirkung dieses Systems wären die Folgen des Ereignisses bedeutend gravierender gewesen. Diese positive Wirkung der beiden Juragewässerserkorrekturen ist ein weiterer Beweis dafür, dass sich Prävention lohnt.

Nicht zuletzt wegen der globalen Erwärmung muss künftig vermehrt mit Naturereignissen gerechnet werden, die zur Überlastung bestehender Schutzsysteme führen. Die Anstrengungen zur Umsetzung des integralen Risikomanagements müssen deshalb konsequent weitergeführt werden. Es gilt alle planerischen, baulichen und organisatorischen Möglichkeiten zur Minimierung der Folgen von extremen Ereignissen auszuschöpfen.

Das Schwergewicht der Analyse des Hochwassers vom August 2007 lag – den Besonderheiten des Ereignisses entsprechend – bei der Vorhersage und der Regulierung. Die Analyse bestätigt, dass sich die aufgrund der Erkenntnisse aus dem Hochwasser 2005 getroffenen Massnahmen positiv ausgewirkt haben, und zeigt weitere konkrete Verbesserungsmöglichkeiten auf.

Der partnerschaftliche Geist bei der Durchführung der vorliegenden Analyse hat sich positiv auf die Weiterentwicklung des schweizerischen Hochwasserschutzes ausgewirkt. Ich danke allen, die in irgendeiner Art zur Ereignisanalyse des Hochwassers vom August 2007 und zur raschen Umsetzung der daraus gewonnenen Erkenntnisse beigetragen haben.

Andreas Götz  
Vizedirektor  
Bundesamt für Umwelt (BAFU)



## > Zusammenfassung

Im Jahr 2007 war die Schweiz im Bereich Naturgefahren vor allem durch Hochwasser betroffen. Das bedeutendste Ereignis war das Hochwasser vom 8./9. August, welches weite Teile des Mittellands und des Schweizer Jura betraf. Besonders kritisch waren die Verhältnisse infolge der grossen Abflüsse entlang der Birs im Laufental sowie im Bereich der Jurarandseen und der unterliegenden Aare. Der Bielersee erreichte einen seit der zweiten Juragewässerkorrektion nicht mehr verzeichneten Höchststand. Auch der Abfluss der unterliegenden Aare erreichte einen neuen Rekordwert. Der rasche Anstieg und die grossen Abflüsse führten zur Überlastung des mit dem Wehr Port am Bielerseeausfluss regulierten Systems der Jurarandgewässer.

Ausgangslage

Das mit der zweiten Juragewässerkorrektion angestrebte Ziel, die Seeanstösler der Jurarandseen und Unterlieger entlang der Aare vor Überschwemmungen zu schützen, wurde im August 2007 nicht erreicht. Aufgrund dieses Umstands beschlossen die zuständigen Fachstellen des Bundes, der Juragewässerkantone Freiburg, Waadt, Neuenburg, Bern und Solothurn sowie der ebenfalls betroffene Kanton Aargau am 17. August 2007, das Hochwasser zu untersuchen. Der Fokus lag dabei auf der Analyse der Vorhersagen und der Qualitätsprüfung der eingesetzten Vorhersagemodelle sowie auf der vertieften Analyse der Hochwasserregulierung der Jurarandseen und des Hochwasserabflusses in der unterliegenden Aare. Darauf basierend waren anschliessend betriebliche Verbesserungen des ganzen Regulierungssystems zu prüfen.

Motivation und Ziele der Ereignisanalyse

### **Hochwasserschäden 2007 unter besonderer Berücksichtigung des Ereignisses vom 8./9. August**

Die durchschnittlichen Schäden durch Naturereignisse belaufen sich für die Periode 1972 bis 2008 auf 350 Mio. CHF pro Jahr (teuerungsbereinigt, Preisbasis 2007). Das Jahr 2007 kann mit Unwetterschäden von insgesamt 710 Mio. CHF somit als schadenreich bezeichnet werden. Von den Gesamtschäden entfallen 685 Mio. CHF auf Schäden durch Hochwasser- und Murgänge. Der Anteil an privaten Schäden lag 2007 bei etwa 75 %, derjenigen der öffentlichen Hand bei rund 25 %. Mehr als ein Fünftel der schweizerischen Gemeinden war durch das Hochwasser betroffen. Die Hochwasser des Jahres 2007 forderten vier Todesopfer.

Schadenreiches  
Hochwasserjahr 2007

Geprägt wurde das Jahr vor allem durch vier Grossereignisse:

- > Vom 7. bis 9. Juni forderten heftige Gewitter in der Region Huttwil BE drei Todesopfer und verursachten Sachschäden von mehr als 85 Mio. CHF.
- > Am 20./21. Juni verursachten Gewitter schweizweit Schäden von rund 140 Mio. CHF. Besonders betroffen waren dabei die Kantone Schwyz und Bern.
- > Das durch ausgedehnte und anhaltende Regenfälle ausgelöste Hochwasser vom 8. und 9. August verursachte Schäden von insgesamt rund 380 Mio. CHF und war diesbezüglich das schwerste Unwetterereignis des Jahres.

- > Am 29. August ereignete sich ein starkes Gewitter, das vor allem im nördlichen Teil des Kantons Bern Schäden verursachte und durch das die Gemeinde Lyss zum dritten Mal im gleichen Jahr betroffen wurde.

Das Hochwasser vom 8./9. August 2007 forderte ein Todesopfer und verursachte insbesondere grosse Schäden am Bielersee, entlang der unterliegenden Aare sowie im Laufental entlang der Birs. Über 50% der Hochwasserschäden des Jahres 2007 sind allein auf dieses Ereignis zurückzuführen. Bezüglich der Schadenssummen waren die Kantone Aargau, Solothurn und Basel-Landschaft am stärksten betroffen. Hinsichtlich der durch ein Einzelereignis hervorgerufenen Schäden nimmt das Hochwasser seit Beginn der systematischen Erhebung der Unwetterschäden im Jahr 1972 den 8. Rang ein.

Hochwasser vom 8./9. August verursachte 50% der Jahresschäden

#### Meteorologische und klimatologische Analyse des Ereignisses

Die Niederschläge, welche das Hochwasser vom 8./9. August 2007 verursachten, erstreckten sich über insgesamt vier Tage, von Montag, 6. bis Donnerstag, 9. August. Zu Beginn des Niederschlagsereignisses waren vor allem konvektive Niederschläge im Zusammenhang mit einer Kaltfront prägend. Im weiteren Verlauf wurden durch die Bildung eines Höhentiefs westlich des Alpenraums warmfeuchte Luftmassen mit einem hohes Feuchte- und Niederschlagspotenzial aus Südwesten herangeführt. Das Aufgleiten dieser Luftmassen auf die kühlere Luft führte zu ergiebigen, grossflächigen Niederschlägen.

Niederschläge erstreckten sich über vier Tage

Auf der ganzen Alpennordseite fielen während des gesamten Niederschlagsereignisses zwischen dem 6. und 9. August verbreitet mehr als 100 mm bis 120 mm Regen. Lokal wurden auch mehr als 160 mm Niederschlag gemessen. Die vom Ereignis betroffene Region umfasste den östlichen Teil des Juras, die Freiburger und Berner Voralpen sowie die Kantone Aargau und Zürich. Grosse Mengen sind gemäss der Analyse aber auch in den östlichen Hochalpen der Kantone Bern und Wallis gefallen. In diesen Höhenlagen sind aufgrund der Lage der Schneefallgrenze die Niederschläge grösstenteils als Schnee gefallen und trugen somit nicht unmittelbar zur Abflussbildung bei. Das Ereignis ist durch eine gleichmässige räumliche Verteilung der Niederschlagssummen gekennzeichnet.

Mehr als 100 bis 120 mm Niederschlag auf der gesamten Alpennordseite

Aus der statistischen Analyse der Tagesniederschläge während des Hauptereignisses am 8. August resultieren für die in der Nordwestschweiz gelegenen Stationen verbreitet Wiederkehrperioden von 20 bis 100 Jahren. Entlang der Aare und im westlichen Mittelland sowie für einige Stationen in den Kantonen Aargau und Zürich ergeben sich Wiederkehrperioden von 20 bis 50 Jahren. Die Wiederkehrperioden der 2- und 4-Tages-Niederschläge (7.–8. bzw. 6.–9. August) sind generell kleiner.

Niederschlagsereignis als Ganzes nicht ausserordentlich

Erste Signale für ein grossräumiges Ereignis mit grösseren Niederschlagsmengen zeigten sich in den meteorologischen Modellen am Mittag des 6. August 2007 – also rund 60 bis 72 Stunden vor dem Auftreten der Hochwasserspitzen in den betroffenen grösseren Fließgewässern. Bis zu den frühen Morgenstunden des 8. August unterschieden sich jedoch die Ergebnisse der Modellrechnungen von Lauf zu Lauf hinsicht-

Frühe Anzeichen für grosse Niederschlagsmengen

lich räumlicher Ausdehnung und Menge der Niederschläge und erschwerten so eine Beurteilung sowie genauere quantitative Aussagen.

Die erste Warnung vor grösseren Niederschlagsmengen auf der Alpennordseite, Nord- und Mittelbünden und insbesondere am Alpennordhang erfolgte durch MeteoSchweiz bereits am Montag, 6. August 2007 gegen 11:00 Uhr und somit rund 60 Stunden vor dem Erreichen der Spitzenabflüsse.

### Hydrologische Analyse des Ereignisses

Am Abend des 8. August wurden rund um das Aare-Massiv die ersten Hochwasserabflüsse registriert. In rascher Folge verzeichneten danach, verteilt über die ganze Alpennordseite, weitere Abflussmessstationen Hochwasser. Das Ereignis lief innerhalb von rund 24 Stunden ab, mit Ausnahme der Seeausflüsse, bei welchen sich aufgrund der Seeretention das Abflussmaximum verzögert einstellte.

Rasch ablaufendes Hochwasser –  
Dämpfung durch Alpenrandseen

Für das hier besonders betrachtete System der Jurarandgewässer ergab sich in der Nacht vom 8. zum 9. August eine markante Erhöhung des Zuflusses durch den Anstieg der Abflüsse von Aare und Saane. Zu diesem Zeitpunkt war der Ausfluss aus dem Bielersee wegen des hohen Abflusses der Emme bereits stark gedrosselt. Der grosse Zufluss der Aare durch den Hagneck-Kanal, verbunden mit der Drosselung des Ausflusses aus dem Bielersee beim Wehr Port, führte zu einem schnellen Anstieg des Bielersees, welcher die Hochwassergrenze um 53 cm überschritt. Trotz gedrosseltem Bielerseeausfluss wurde in der Aare bei Murgenthal mit 1262 m<sup>3</sup>/s ein Abfluss beobachtet, der rund 25 % über dem bisherigen Maximalwert aus dem Jahre 1981 liegt.

Trotz Drosselung des Bielersee-  
ausflusses Rekordabfluss in  
unterliegender Aare

Rund die Hälfte der knapp 200 eidgenössischen Stationen registrierte Hochwasserabflüsse mit Wiederkehrperioden von mindestens 2 Jahren. Der Schwerpunkt des Hochwassers lag dabei im zentralen Mittelland und in der Nordwestschweiz. Bei 14 Stationen wurde ein neues Maximum seit Messbeginn registriert. Diese Stationen liegen vorwiegend unterhalb der Alpenrandseen oder im Schweizer Jura. Besonders grosse Veränderungen der bisherigen Höchstwerte wurden im Unterlauf der Emme, an der Aare unterhalb der Emmemündung sowie im Einzugsgebiet der Birs verzeichnet.

Knapp die Hälfte der eidgenös-  
sischen hydrometrischen  
Stationen betroffen

Aus Sicht der Extremwertstatistik konzentriert sich das Ereignis auf das zentrale Mittelland und die Nordwestschweiz. An 10 Stationen wird der Spitzenabfluss als 100-jährlich oder seltener eingestuft, bei den Stationen Emme – Wiler, Aare – Murgenthal und Birs – Moutier sogar als 200-jährlich oder seltener. In der Emme haben sich allerdings zwischen 1908 und 1917, also vor Beginn der Messungen bei Wiler im Jahr 1922, mehrere grössere Hochwasser ereignet. Wird dieser Umstand berücksichtigt, resultiert für den Spitzenabfluss vom August 2007 eine Wiederkehrperiode von etwas über 100 Jahren.

Abflüsse an 10 Stationen  
über 100-jährlich

An den Stationen des eidgenössischen hydrometrischen Messnetzes waren im August 2007 kaum Schäden zu verzeichnen. Die Datenerfassung und -übermittlung funktionierte während des Ereignisses praktisch einwandfrei. Dies zeigt, dass sich die nach 1999 eingeleiteten Massnahmen zur hochwassersicheren Ausgestaltung dieser für

Hydrometrisches Messnetz hat  
sich im August 2007 bewährt

die Lagebeurteilung und die Vorhersage zentralen Infrastrukturen auszahlt und konsequent weiterzuführen ist.

Die automatischen Alarme beim Überschreiten von zuvor mit den Kunden festgesetzten Wasserstands- und Abflusswerten wurden korrekt ausgelöst und übermittelt.

#### Abflussvorhersagen

Das BAFU erstellte Hochwasservorhersagen für das Rheineinzugsgebiet über einen Vorhersagezeitraum von 3 Tagen mit dem seit Juni 2007 operationell eingesetzten System FEWS (Flood Early Warning System). Die Abflussvorhersagen wurden im August 2007 im Internet publiziert und – entsprechend der speziellen Situation – mit einem Kommentar versehen. Dieser enthielt die Einschätzung der Niederschlagsvorhersage sowie eine darauf basierende Interpretation der Abflussvorhersage. Während im Normalfall die Vorhersagen von Montag bis Freitag jeweils einmal pro Tag (gegen 08:30 Uhr) erstellt werden, wurde während des Hochwassers 2007 – erstmals in der 20-jährigen Vorhersagetätigkeit – auf einen 24-Stunden-Betrieb umgestellt.

Erstmals 24-Stunden-Betrieb bei der Abflussvorhersage

Die mit der meteorologischen Modellierung verbundenen Unsicherheiten übertragen sich in die Abflussvorhersage. Diese basiert auf einer hydrologischen Modellierung, welche ihrerseits mit Unsicherheiten verbunden ist. Die operationellen Abflussvorhersagen lieferten im August 2007 erst rund 12 bis 24 Stunden vor dem Eintreten der Spitzenabflüsse ein einigermaßen zuverlässiges Bild der Entwicklung des Ereignisses. Die zu erwartenden Spitzenabflüsse sowie der Zeitpunkt ihres Eintretens liessen sich mit den verwendeten Modellen selbst am Abend des 8. August, bei bereits ansteigendem Hochwasser, nicht exakt vorhersagen. So überschätzte die Vorhersage die maximalen Abflüsse von Aare, Limmat, Thur und Rhein um bis zu 20%. Zudem stellte sich der maximale Abfluss teilweise mehrere Stunden früher ein als vorhergesagt. Noch problematischer präsentierte sich die Situation bezüglich der Abflussvorhersage für die Emme. Dies deutet auf Schwächen in der hydrologischen Modellierung hin, die es zu verbessern gilt.

Zuverlässigere Abflussvorhersagen erst bei ansteigendem Hochwasser

Ein zusätzliches Problem für die Vorhersage des Abflusses der Aare unterhalb des Bielersees besteht darin, dass die Abflüsse von der Regulierung beim Wehr Port abhängig sind. Im Hochwasserfall richtet sich diese nach dem beobachteten Hochwasserabfluss in der Emme bei Emmenmatt, so dass bei der Erstellung der Vorhersage eine relativ grosse Unsicherheit bezüglich des Bielerseeausflusses vorhanden ist.

Seeregulierung interagiert mit Abflussvorhersage

#### Regulierung der Jurarandgewässer bei Hochwasser

Das Hochwasser vom August 2007 konnte im System der Jurarandseen und der unterliegenden Aare nicht schadlos abgeführt werden, obwohl die Wiederkehrperioden der Zuflüsse zu den Jurarandseen unter 50 Jahren liegen. Die Besonderheit des Hochwassers vom August 2007 ist aber die Kombination grosser Zuflüsse mit den für diese Jahreszeit charakteristischen hohen Seeständen sowie der aussergewöhnlich grosse Zufluss aus dem Zwischeneinzugsgebiet der Aare zwischen dem Bielersee und Murgenthal.

Hochwasserregulierung der Jurarandgewässer im August 2007

Die Analyse der Hochwasserregulierung zeigt, dass bereits aufgrund der grossen und ausserordentlich rasch ansteigenden Zuflüsse aus dem Zwischeneinzugsgebiet die Begrenzung des Abflusses der Aare bei Murgenthal auf  $850 \text{ m}^3/\text{s}$  (so genannte Murgenthalerbedingung) nicht möglich war. Das Hochwasser 2007 zeigte aber auch Grenzen hinsichtlich der Grundlagen, auf die sich die Hochwasserregulierung stützt. Das Hochwasser der Emme wurde zu spät erkannt. Das der Hochwasserregulierung zugrunde liegende Verfahren zur Berechnung des Abflusses der Aare bei Murgenthal vermochte den zeitlichen Verlauf des Hochwassers nur teilweise vorherzusagen. Ausserdem ist durch die Reguliervorschriften die zeitliche Änderung des Abflusses am Wehr Port begrenzt. Dadurch war im August 2007 der Handlungsspielraum der Regulierung eingeschränkt.

Die Analyse der möglichen Massnahmen zur Verbesserung der Hochwassersicherheit im System der Jurarandgewässer zeigt, dass der Spielraum begrenzt ist und sich primär auf folgende Handlungsfelder beschränkt:

- > Vergrösserung des Rückhaltevolumens der Jurarandseen durch Absenkung der Seespiegel im Vorfeld grosser Ereignisse (Prognoseregulierung);
- > Optimierung des bestehenden Rückhaltevolumens der Jurarandseen durch Erweiterung des Zihlkanals für einen rascheren Ausgleich zwischen dem Bielersee und dem Neuenburgersee;
- > Erhöhung der Abflusskapazität der unterliegenden Aare;
- > Verbesserung der Früherkennung und der Vorhersage grosser Zuflüsse aus dem Zwischeneinzugsgebiet unterhalb des Bielersees für eine Optimierung der Hochwasserregulierung.

Bauliche Massnahmen bedingen vertiefte Untersuchungen, die im Rahmen einer Ereignisanalyse nicht möglich sind und deshalb Gegenstand entsprechender Folgeprojekte sein müssen. Aus diesem Grund fokussiert die Ereignisanalyse auf die rascher umsetzbaren Massnahmen im Bereich der Regulierung, zeigt aber auch das Potenzial der übrigen Massnahmen auf.

Die für die Jurarandseen entwickelte Prognoseregulierung basiert auf dem Einbezug von Abflussvorhersagen. Ist aufgrund der vorhergesagten Zuflüsse zu den Jurarandseen ein übermässiger Anstieg der Seestände zu erwarten, wird der Ausfluss beim Wehr Port frühzeitig vergrössert. Dadurch wird insbesondere der Pegel des rascher reagierenden Bielersees abgesenkt und somit im Vorfeld des potenziellen Ereignisses zusätzliches Rückhaltevolumen geschaffen. Die Wirksamkeit dieser Massnahme wurde mittels Simulationsrechnungen für verschiedene Zuflussszenarien geprüft. Diese orientieren sich an bedeutenden historischen Ereignissen und umfassen auch ein extremes Hochwasserszenario. Die Prognoseregulierung führt bei allen betrachteten Szenarien zu einer signifikanten Minderung der Seehöchststände. Für die Hochwasser von 2005 und 2007 ergibt sich beispielsweise eine Reduktion der Höchststände von 35 bis 40 cm am Bielersee und von knapp 30 cm am Neuenburgersee.

Mögliche Verbesserungs-  
massnahmen im System  
der Jurarandgewässer

Einbezug von Vorhersagen zur  
Vergrösserung des Hochwasser-  
rückhalts der Jurarandseen

Die Prognoseregulierung reagiert auch auf grössere Unschärfen in den Vorhersagen wenig sensitiv. Sogar bei Fehlprognosen verhält sich das System der Jurarandseen «robust»:

- > Wird ein Ereignis vorhergesagt, welches anschliessend nicht eintritt, so sind Dauer und Mass der in diesem Fall irrtümlich eingeleiteten Vorabsenkung beschränkt. Der ursprüngliche Seestand stellt sich innerhalb weniger Tage wieder ein.
- > Tritt ein Ereignis ein, das nicht vorhergesagt wurde, und konnte deshalb keine Vorabsenkung eingeleitet werden, so entspricht dies dem Zustand ohne Prognoseregulierung. Die Prognoseregulierung führt in diesem Fall also zu keiner Verschlechterung der bisherigen Situation.

Aufgrund der positiven Ergebnisse und angesichts der Tatsache, dass alle Voraussetzungen für eine Umsetzung der Prognoseregulierung gegeben waren, wurde diese Massnahme bereits Ende 2008 operationell umgesetzt. Die Prognoseregulierung ergänzt das bestehende Regulierreglement. Die Elemente und Vorteile des bestehenden Reglements bleiben somit erhalten. Die mit der Prognoseregulierung erzielbaren Verbesserungen konzentrieren sich auf das Vorfeld potenzieller Ereignisse. Begleitet wird die Prognoseregulierung durch eine Beobachtung der meteorologischen Situation im Zwischeneinzugsgebiet der Aare unterhalb des Bielersees. Dadurch wird sichergestellt, dass bei einem sich abzeichnenden Hochwasser, insbesondere der Emme, der Abfluss gedrosselt wird.

Rasche Umsetzung der Prognoseregulierung Ende 2008

Die Prognoseregulierung ist generell wirksamer als eine Erhöhung der Kapazität des Zihlkanals. Optimal ist eine Kombination der beiden Massnahmen. Die Wirkung einer Erweiterung des Zihlkanals ist jedoch für eine erweiterte Szenarienpalette detaillierter zu untersuchen, da sich eine Vergrösserung der Durchflusskapazität in gewissen Fällen auch nachteilig auswirken könnte. Die technische Machbarkeit, die Kosten sowie der Nutzen dieser Massnahme müssen im Rahmen eines Folgeprojekts vertieft geprüft werden.

Erweiterung des Zihlkanals

Bei einer Erhöhung des maximal zulässigen Abflusses beim Wehr Port reduziert sich das Volumen, das in den Jurarandseen zurückgehalten werden muss. Im Ereignisfall steigen dadurch die Seen weniger hoch an. Diese Massnahme wirkt vor allem bei kurzen Ereignissen mit grossen Zuflussspitzen. Ihr Potenzial liegt damit primär bei Ereignissen, die im Sommer in Kombination mit den für diese Jahreszeit charakteristischen hohen Seeständen auftreten. Voraussetzung für eine Erhöhung des Abflusses beim Wehr Port ist eine entsprechende Abflusskapazität der unterliegenden Aare. Diese Massnahme bedingt daher eine umfassende Prüfung und – wo nötig – Anpassungen der Kapazitätsverhältnisse an der Aare unterhalb des Bielersees.

Erhöhung des maximal zulässigen Abflusses beim Regulierwehr Port

Eine verbesserte Drosselung des Bielerseeausflusses im Fall eines Emmehochwassers erfordert eine bessere Früherkennung potenzieller Ereignisse, eine raschere Reduktion des Abflusses am Wehr Port sowie generell verbesserte Abflussvorhersagen für das Zwischeneinzugsgebiet.

Optimierung der Hochwasserregulierung

Eine frühere Erkennung kritischer Situationen bedingt den Einbezug von Niederschlagsdaten. Im Vordergrund steht dabei der Niederschlagsradar, der – im Gegensatz zu Niederschlagsstationen – flächige Informationen liefert.

Derartige Verbesserungen im Bereich des Nowcastings bedingen die Erarbeitung von Grundlagen und Neuentwicklungen, welche im Rahmen der Ereignisanalyse nicht möglich waren und deshalb in Folgeprojekten angegangen werden müssen. Um aber bereits heute bei einem Hochwasser der Emme rascher reagieren zu können, wurde im Rahmen der Umsetzung der Prognoseregulierung der Grenzwert für die maximale Drosselungsgeschwindigkeit am Wehr Port von maximal 50 m<sup>3</sup>/s pro Stunde auf 100 m<sup>3</sup>/s pro Stunde erhöht.

### Fazit

Neue Vorhersageprodukte und die mit den Vorhersagen verbundenen Unsicherheiten stellen hohe Ansprüche an die Modellierer, die Prognostiker und die Empfänger der Vorhersagen. Bei Gefahrensituationen, die mehrere Fachstellen des Bundes betreffen, ist eine ganzheitliche Beurteilung der Lage und deren Entwicklung im Fachbereich notwendig. Dazu gehören die gemeinsame Interpretation der Erkenntnisse sowie eine gegenseitig abgestimmte Gesamtbeurteilung. Zudem muss sichergestellt werden, dass Empfänger derart interpretierter und kommentierter Informationen bei Bedarf jederzeit rückfragen können. Auf Stufe Bund sollen 2010 mit der Schaffung eines Fachstabs Naturgefahren, welcher die Fachstellen des Bundes im Ereignisfall vereint, die hierfür notwendigen Voraussetzungen geschaffen werden.

Schaffung des Fachstabs  
Naturgefahren auf Stufe Bund

Auf der Seite der Empfänger muss das entsprechende Fachwissen vorhanden sein, damit – ausgehend von den überregionalen Vorhersagen – eine regionale bzw. lokale Interpretation und Präzisierung der verfügbaren Informationen erfolgen kann. Dabei sind insbesondere auch die lokalen Erfahrungen sowie aktuelle Beobachtungen vor Ort zu integrieren. Auf lokaler bzw. regionaler Stufe müssen hierzu entsprechende Fachkräfte rekrutiert bzw. ausgebildet werden. Unter Federführung des BAFU wird derzeit eine Ausbildung von lokalen Naturgefahrenberatern vorbereitet. Damit soll die Fachunterstützung regionaler und lokaler Führungsstäbe bei der Notfallplanung und bei der Bewältigung von Ereignissen sichergestellt werden.

Ausbildung  
zusätzlicher Fachkräfte

Zeitgerechte Entscheidungen bedingen umfassende und aktuelle Entscheidungsgrundlagen. Deshalb wurde die nach dem Hochwasser 2005 eingeleitete Entwicklung der gemeinsamen Informationsplattform Naturgefahren (GIN) beschleunigt. Dabei wird aufgrund der Erkenntnisse aus der Analyse des Hochwassers 2007 insbesondere auch den Bedürfnissen der Seeregulierungen Rechnung getragen. Ab Frühling 2010 steht die Plattform zunächst den Fachdiensten der Kantone, nach ihrem weiteren Ausbau dann den lokalen Fachdiensten und später auch der Öffentlichkeit zur Verfügung.

Gemeinsame Informations-  
plattform Naturgefahren (GIN)

Vorhersagen erlauben, Ereignisse im Voraus zu erkennen. Vorwarnzeiten werden aber immer beschränkt sein. Es gilt deshalb, ausgehend von einer permanenten Interpretation und Beurteilung der Messdaten und Vorhersageergebnisse, erste Anzeichen für Ereignisse konsequent für eine Erhöhung der Bereitschaft zu nutzen sowie die Reakti-

Notfallplanungen  
erstellen und testen

onszeiten zu minimieren. Dies bedingt umfassende und aktuelle Notfall- und Einsatzplanungen und vor allem das Einüben von Abläufen und Einsätzen.

Der Einbezug von Zuflussvorhersagen für die Seeregulierung stellt – wie das Beispiel der Jurarandseen zeigt – ein Potenzial dar, welches es zu nutzen gilt. Die als Ergänzung der bisherigen Regulierung der Jurarandseen entwickelte Prognoseregulierung trägt den mit den Vorhersagen verbundenen Unsicherheiten Rechnung.

Optimierung  
von Reguliervorschriften

Die Jurarandgewässer sind Teil eines übergeordneten Systems. Deshalb sind die Regulierung der Jurarandseen, des Vierwaldstättersees und des Zürichsees bei Hochwasser aufeinander abzustimmen und in Richtung eines ganzheitlichen Hochwassermanagements weiterzuentwickeln. Ziel eines solchen Managements unter Einbezug der regulierten Seen muss sein, bei künftigen Ereignissen den Schaden innerhalb des Gesamtsystems zu minimieren. Die hierfür notwendigen Arbeiten umfassen:

Hochwassermanagement  
auf Stufe Einzugsgebiet

- > die Vervollständigung von Grundlagen wie die durchgehende Erhebung der Schadenpotenziale an den Seen und entlang der unterliegenden Flussläufe;
- > die Entwicklung geeigneter Modelle zur Simulation der Auswirkungen unterschiedlicher Regulierstrategien im Ereignisfall;
- > organisatorische Massnahmen wie die Institutionalisierung von Absprachen zwischen den Fachstellen des Bundes und der betroffenen Kantone.

Bezüglich der Jurarandgewässer zeigt die Ereignisanalyse weiteres Optimierungspotenzial auf, das im Rahmen entsprechender Folgeprojekte vertieft zu prüfen ist. Die zu behandelnden Fragestellungen sind:

Erforderliche Folgeprojekte

- > die Optimierung der Hochwasserregulierung durch Verbesserung der zugrundeliegenden Prognoserechnung bzw. durch eine verbesserte Abflussvorhersage für die Emme sowie die übrigen Zuflüsse zur Aare unterhalb des Bielersees;
- > die vertiefte Prüfung der Wirkung sowie der Wirtschaftlichkeit einer Kapazitätserhöhung des Zihlkanals und der unterliegenden Aare;
- > die Prüfung der Abflusskapazität und der Retentionsmöglichkeiten entlang der Aare unter Berücksichtigung der Aarekraftwerke.

*Hochwasser lassen sich durch eine frühere und raschere Reaktion auf der Basis von Vorhersagen und einer optimierten Regulierung der Alpenrandseen besser bewältigen. Verhindern lassen sich aber sowohl Hochwasser als auch die Überlastung von Schutzbauten bei Grossereignissen auch künftig nicht. Umfassende und vollständige Gefahregrundlagen, eine umfassende und aktuelle Notfallplanung, die Sicherstellung der zeitgerechten Warnung der Führungs- und Interventionskräfte sowie die rechtzeitige Alarmierung der Bevölkerung sind deshalb unerlässliche Voraussetzungen zur Begrenzung der Schäden in solchen Situationen.*

## > Résumé

En 2007, ce sont les crues qui, parmi tous les dangers naturels, ont le plus affecté la Suisse. La plus importante s'est produite entre le 8 et le 9 août. Elle a touché de vastes secteurs du Plateau et du Jura suisses. Les débits considérables qui se sont écoulés dans la Birse le long de la vallée de Laufon, dans la région des lacs du Pied du Jura et dans l'Aar en aval du lac de Bienne ont rendu la situation particulièrement critique. Les eaux du lac de Bienne ont atteint un niveau jamais enregistré depuis la deuxième correction des eaux du Jura. Le débit de l'Aar en aval du lac a aussi atteint un nouveau record. La montée rapide des eaux et les débits considérables ont surchargé le réseau hydrologique du Pied du Jura, régulé au barrage de Port, à l'exutoire du lac de Bienne.

Etat des lieux

Le but de la deuxième correction des eaux du Jura, destinée à protéger les riverains des lacs du Pied du Jura et de l'Aar en aval du lac de Bienne contre les inondations, n'a pas été atteint en août 2007. C'est pourquoi les services compétents de la Confédération et des cantons de Fribourg, Vaud, Neuchâtel, Berne, Soleure et d'Argovie ont décidé le 17 août 2007 d'étudier cet événement. L'analyse de la crue consistait principalement à examiner les prévisions, vérifier la qualité des modèles prévisionnels appliqués et étudier en détail le système de régulation des crues des lacs du Pied du Jura et les débits de pointe de l'Aar en aval du lac de Bienne. Sur la base de cette analyse, des améliorations de la gestion de l'ensemble du système de régulation ont été étudiées.

Analyse de la crue: motifs et buts

### **Dégâts de crues en 2007 essentiellement imputables à l'événement des 8 et 9 août**

Entre 1972 et 2008, les dommages causés par les événements naturels se sont élevés en moyenne à 350 millions de francs par an (montant corrigé de l'inflation, prix de base 2007). Avec une facture totale de 710 millions de francs les intempéries de l'année 2007 ont été particulièrement dévastatrices. L'impact financier des crues et des laves torrentielles s'est monté à 685 millions de francs. Trois quarts des dommages ont touché le domaine privé et un quart le domaine public. Plus d'un cinquième des communes suisses a été affecté par les crues de 2007, qui ont fait quatre victimes.

Les crues de 2007 ont causé d'importants dommages

L'année 2007 a été marquée par quatre événements majeurs:

- > du 7 au 9 juin, de violents orages ont fait trois victimes et les dégâts matériels se sont élevés à plus de 85 millions de francs dans la région de Huttwil (BE);
- > les 20 et 21 juin, des orages ont causé des dommages de l'ordre de 140 millions de francs dans toute la Suisse. Les cantons de Schwytz et de Berne ont été particulièrement touchés;
- > les 8 et 9 août, une crue provoquée par des précipitations persistantes qui se sont abattues sur de vastes régions a causé pour 380 millions de francs de dommages, ce qui en fait le plus grave événement dû aux intempéries de l'année, en terme de dommages matériels;

> le 29 août, un violent orage a causé des dommages, principalement dans le nord du canton de Berne, et touché la commune de Lyss pour la troisième fois au cours de la même année.

La crue des 8 et 9 août 2007 a fait une victime et causé d'importants dommages, en particulier sur les rives du lac de Biemme, de l'Aar en aval du lac et de la Birse dans la vallée de Laufon. Elle est responsable de plus de la moitié des dommages dus aux crues de 2007. Ce sont les cantons d'Argovie, de Soleure et de Bâle-Campagne qui ont payé la facture la plus lourde. Si on considère les dommages causés par un événement unique, la crue d'août 2007 occupe le huitième rang depuis le début du recensement systématique des dégâts d'intempéries en 1972.

### Analyse météo-climatique de l'événement

Les précipitations à l'origine de la crue des 8 et 9 août 2007 ont duré quatre jours, du lundi 6 au jeudi 9 août. L'épisode a commencé par des précipitations convectives liées à un front froid. Puis la formation d'une dépression à l'ouest de l'arc alpin a entraîné des masses d'air chaud chargé d'humidité depuis le sud-ouest. Le glissement de cet air humide sur l'air froid a provoqué d'abondantes précipitations sur de vastes régions.

Plus de 100 à 120 mm de pluie sont tombés sur tout le nord des Alpes pendant l'épisode pluvieux du 6 au 9 août. On a même relevé localement un niveau de précipitations supérieur à 160 mm. Cet événement a touché la partie orientale du Jura, les Préalpes fribourgeoises et bernoises, ainsi que les cantons d'Argovie et de Zurich. Mais l'analyse a aussi révélé d'importantes précipitations à l'est des Alpes bernoises et valaisannes. Compte tenu de la limite des chutes de neige à ces altitudes, ces précipitations sont essentiellement tombées sous forme neigeuse, si bien qu'elles n'ont pas gonflé immédiatement les cours d'eau. La distribution spatiale des précipitations totales était homogène.

Statistiquement, les précipitations journalières relevées le 8 août, au plus fort de l'événement, correspondaient à une période de retour de 20 à 100 ans pour les stations de mesure situées au nord-ouest de la Suisse. Elle était de 20 à 50 ans le long de l'Aar, à l'ouest du Plateau et dans quelques stations argoviennes et zurichoises. Les périodes de retour des précipitations cumulées sur deux et quatre jours (7–8 août et 6–9 août) étaient généralement plus courtes.

Au matin du 6 août 2007, soit 60 à 72 heures avant que les pointes de crue n'atteignent les grands cours d'eau touchés, les modèles météorologiques ont fourni les premières indications d'un événement de fortes précipitations à grande échelle. Mais l'extension spatiale et la quantité de précipitations calculées par les modèles différaient selon les simulations jusqu'aux premières heures du 8 août, ce qui a compliqué l'évaluation de la situation et empêché d'émettre des avis précis.

Le premier avis de précipitations importantes au nord des Alpes, dans le nord et le centre des Grisons et surtout sur le versant nord des Alpes a été émis par MétéoSuisse

La crue des 8 et 9 août a causé la moitié des dommages de 2007

Les précipitations ont duré quatre jours

Des précipitations supérieures à 100–120 mm sur tout le nord des Alpes

Des précipitations dans l'ensemble pas exceptionnelles

Des signes avant-coureurs d'importantes précipitations

le lundi 6 août 2007 vers onze heures déjà, soit une soixantaine d'heures avant l'arrivée des pointes de débit.

### Analyse hydrologique de l'événement

Au soir du 8 août, les premiers débits de crue ont été enregistrés autour du massif de l'Aar. Puis d'autres stations débimétriques, réparties sur tout le nord des Alpes, ont observé des crues successives. L'événement s'est déroulé dans un intervalle de 24 heures, sauf à la sortie des lacs, où les débits maximaux ont été retardés par l'effet de rétention des plans d'eau.

Une progression rapide de la crue, amortie par les lacs périalpins

Durant la nuit du 8 au 9 août, l'alimentation du réseau hydrologique du Pied du Jura a augmenté considérablement en raison de l'élévation des niveaux de l'Aar et de la Sarine. A ce moment, le débit sortant du lac de Biemme était déjà fortement diminué en raison du niveau d'eau élevé de l'Emme en aval. L'apport important de l'Aar via le canal de Hagneck, combiné avec la modération de débit au barrage de Port, a provoqué une élévation rapide du niveau du lac de Biemme, qui a dépassé le seuil de crue de 53 cm. Malgré la régulation du lac, un débit de 1262 m<sup>3</sup>/s, dépassant d'un quart l'ancien maximum de 1981, a été mesuré dans l'Aar à Murgenthal.

Un débit record dans l'Aar malgré la régulation à l'exutoire du lac de Biemme

Près de la moitié des quelque 200 stations fédérales ont enregistré des pointes de débit dont la période de retour est supérieure ou égale à deux ans. La crue a surtout affecté le centre du Plateau et le nord-ouest de la Suisse. Quatorze stations, situées pour la plupart en aval des lacs périalpins et dans le Jura suisse, ont enregistré la valeur la plus élevée depuis le début des mesures. Le débit maximum a particulièrement augmenté dans le cours inférieur de l'Emme, sur l'Aar en aval de l'embouchure de l'Emme et dans le bassin versant de la Birse.

Près de la moitié des stations hydrométriques fédérales touchées

Si on considère les valeurs extrêmes, l'événement s'est concentré sur le centre du Plateau et le nord-ouest de la Suisse. Il est jugé centennal ou plus rare dans dix stations et bicentennal ou plus rare aux stations de Wiler sur l'Emme, Murgenthal sur l'Aar et Moutier sur la Birse. Cependant l'Emme a déjà subi plusieurs crues supérieures entre 1908 et 1917, soit avant le début des mesures à Wiler, en 1922. Si on en tient compte, le débit de pointe d'août 2007 a une période de retour légèrement supérieure à 100 ans.

Un débit plus que centennal dans dix stations

Les stations du réseau hydrométrique fédéral ont subi des dégâts minimes en 2007. L'enregistrement et la transmission des données ont fonctionné quasi parfaitement pendant l'événement. Ainsi, les mesures de sécurisation contre les crues prises après 1999 afin de protéger ces infrastructures essentielles pour évaluer la situation et pour émettre des prévisions ont prouvé leur utilité et doivent être poursuivies systématiquement.

Le réseau hydrométrique a fait ses preuves en août 2007

L'alarme automatique en cas de dépassement des niveaux d'eau ou des débits fixés préalablement avec les clients a été déclenchée et transmise correctement.

### Prévision des débits

L'OFEV émet des prévisions sur les crues à trois jours concernant le bassin versant du Rhin grâce au système FEWS (Flood Early Warning System), opérationnel depuis juin 2007. En août 2007, les prévisions des débits ont été publiées sur Internet et commentées en fonction des situations particulières. Le commentaire comprenait une estimation des précipitations prévues ainsi qu'une interprétation en termes de débits attendus. Alors que les prévisions sont émises une fois par jour (vers 08 h 30) du lundi au vendredi en temps normal, ce service a été assuré 24 heures sur 24 pendant la crue de 2007, pour la première fois en 20 ans de service de prévision hydrologique.

Des prévisions de débits émises pour la première fois 24 heures sur 24

Les incertitudes liées aux modèles météorologiques se répercutent sur les prévisions des débits. Ces dernières se basent sur des modèles hydrologiques également entachés d'incertitudes. En août 2007, les prévisions des débits opérationnelles ont fourni une image relativement fiable de l'évolution de l'événement 12 à 24 heures seulement avant l'arrivée des pointes de crue. Mais même au soir du 8 août, alors que les eaux montaient déjà, les débits de pointe et le moment de leur arrivée n'étaient pas encore prévus précisément. Les prévisions ont sous-estimé les débits maximaux de l'Aar, de la Limmat, de la Thur et du Rhin jusqu'à 20%. De plus, ils sont parfois survenus plusieurs heures plus tôt que prévu. La prévision des débits de l'Emme fut encore plus problématique. Tout cela indique que les modèles hydrologiques souffrent de déficiences, qu'il faut pallier.

Des prévisions de débits fiables seulement lorsque les eaux montent

La prévision des débits de l'Aar en aval du lac de Bienne est aussi compliquée par le fait qu'ils dépendent de la régulation du lac au barrage de Port. En cas de hautes eaux, l'écoulement est réglé en fonction du débit de crue observé dans l'Emme à Emmenmatt, si bien que la prévision est pénalisée par l'incertitude relativement grande concernant les débits sortant du lac de Bienne.

La régulation du lac interfère avec la prévision des débits

### Régulation du réseau hydrologique du Pied du Jura en cas de crue

La crue qui a touché le système composé des lacs du Pied du Jura et de l'Aar en aval au mois d'août 2007 n'a pas pu être évacuée sans dommages, bien que la période de retour des apports dans les lacs ait été inférieure à 50 ans. La particularité de la crue d'août 2007 réside dans la combinaison d'apports importants, dans des lacs bien remplis conformément à la saison, et d'apports exceptionnels du bassin versant intermédiaire de l'Aar entre le lac de Bienne et Murgenthal.

La régulation du réseau hydrologique du Pied du Jura en août 2007

L'analyse de la régulation de la crue indique que l'augmentation considérable et extrêmement rapide des apports du bassin intermédiaire de l'Aar a empêché à elle seule de limiter le débit de la rivière à 850 m<sup>3</sup>/s à Murgenthal («convention de Murgenthal»). Mais l'événement d'août 2007 a aussi souligné les limites des principes de régulation. La crue de l'Emme a été identifiée trop tardivement. Et la méthode de calcul du débit de l'Aar à Murgenthal, appliquée pour réguler ses crues, n'a permis de prévoir que partiellement l'évolution de celle de 2007. De plus, les modifications de l'écoulement au barrage de Port sont limitées par un règlement. Ainsi, la marge de régulation était restreinte en août 2007.

L'analyse des mesures applicables pour améliorer la sécurité en cas de crues dans le système des lacs du Pied du Jura montre que la marge de manœuvre est restreinte et limitée aux actions suivantes:

- > augmenter le volume de rétention des lacs du Pied du Jura, en abaissant leur niveau lorsqu'une grande crue est annoncée (régulation sur prévisions);
- > optimiser le volume de rétention actuel des lacs du Pied du Jura, en agrandissant le canal de la Thielle pour égaliser plus rapidement les niveaux des lacs de Neuchâtel et de Bienne;
- > augmenter la capacité d'écoulement de l'Aar en aval du lac de Bienne;
- > optimiser la régulation des crues, en améliorant la détection précoce et la prévision des grands débits provenant du bassin versant intermédiaire de l'Aar en aval du lac de Bienne.

La réalisation d'ouvrage nécessite des investigations poussées, qui ne peuvent pas être réalisées dans le cadre d'une analyse des événements. Elles doivent faire l'objet de projets consécutifs. C'est pourquoi la présente analyse met l'accent sur les mesures rapidement applicables dans le domaine de la régulation. Mais elle indique aussi les possibilités offertes par les autres mesures.

La régulation des crues développée pour les lacs du Pied du Jura se base sur des prévisions de débits. Si les apports prévus font craindre une élévation excessive du niveau des lacs, le débit sortant au barrage de Port est augmenté préventivement. Cela permet notamment d'abaisser le niveau du lac de Bienne, qui réagit le plus rapidement et, ainsi, de créer un volume de rétention supplémentaire avant l'arrivée d'une éventuelle crue. L'efficacité de cette mesure a été vérifiée au moyen de simulations numériques pour différents scénarios d'afflux d'eau, fondés sur des événements historiques importants incluant une crue extrême. Dans tous les cas examinés, la régulation sur prévisions a permis d'abaisser significativement le niveau maximum des lacs. Pour les crues de 2005 et 2007, il a par exemple été diminué de 35 à 40 cm dans le lac de Bienne et de près de 30 cm dans le lac de Neuchâtel.

La régulation sur prévisions est peu sensible à l'imprécision des prévisions. Le système des lacs du Pied du Jura est «robuste» même lorsque les prévisions sont inexactes:

- > si un événement annoncé ne se produit pas, la durée et l'ampleur de l'abaissement préventif généré par erreur sont limitées. Le niveau initial du lac se rétablit en quelques jours;
- > si un événement non annoncé se produit, le niveau du lac n'aura pas été abaissé et on se retrouve dans la configuration sans régulation sur prévisions. Dans ce cas, la régulation sur prévisions n'aggrave pas la situation actuelle.

Compte tenu de ces résultats positifs, la régulation sur prévisions a été mise en œuvre à fin 2008 déjà, car toutes les conditions nécessaires étaient remplies. Elle complète le règlement de régulation existant, ce qui permet d'en conserver les éléments et les avantages. Les améliorations attendues grâce à cette nouvelle méthode concernent essentiellement la phase précédant les crues potentielles. La régulation sur prévisions est

Améliorations possibles dans le réseau hydrologique du Pied du Jura

Utilisation de prévisions pour améliorer la rétention des crues dans les lacs du Pied du Jura

Mise en œuvre rapide de la régulation sur prévisions à fin 2008

accompagnée d'une observation de la situation météorologique dans le bassin versant intermédiaire de l'Aar en aval du lac de Biemme. Les débits sont ainsi étalés lorsqu'une crue se prépare, en particulier dans l'Emme.

Il est en général plus efficace de réguler les débits sur prévisions plutôt que d'augmenter la capacité du canal de la Thielle. La solution optimale consisterait à combiner les deux. Mais l'effet d'un élargissement du canal doit être examiné en détail, pour un éventail de scénarios plus étoffé, car une augmentation de sa capacité d'écoulement pourrait avoir des effets négatifs dans certains cas. C'est pourquoi la faisabilité technique, le coût et l'utilité de cette mesure doivent être étudiés en détail dans le cadre d'un projet consécutif.

Agrandissement  
du canal de la Thielle

En augmentant le débit maximal admissible au barrage de Port, on diminue le volume qui doit être retenu dans les lacs du Pied du Jura. Ainsi, leur niveau monte moins lors d'un événement. Cette mesure agit surtout sur les crues de brève durée comportant des pointes de débit marquées. Elle s'applique donc essentiellement aux événements qui se produisent en été, lorsque le niveau des lacs est élevé. Pour pouvoir augmenter le débit au barrage de Port, il faut que l'Aar ait une capacité d'écoulement suffisante en aval de l'ouvrage. Cette mesure nécessite donc une étude exhaustive et certaines adaptations de la capacité d'écoulement de l'Aar en aval du lac de Biemme.

Augmentation du débit maximal  
admissible au barrage de  
régulation de Port

Pour limiter plus judicieusement le débit à la sortie du lac de Biemme en cas de crue de l'Emme, il faut perfectionner la détection précoce des événements potentiels, réduire plus rapidement l'écoulement au barrage de Port et améliorer les prévisions des débits dans le bassin versant intermédiaire de l'Aar.

Optimisation  
de la régulation des crues

La détection précoce des situations critiques nécessite des données pluviométriques. L'instrument le plus utile est le radar de précipitations, qui fournit des informations surfaciques, contrairement aux stations pluviométriques ponctuelles.

Ces améliorations des prévisions à court terme nécessitent de nouvelles bases et de nouveaux développements, qui n'ont pas pu être réalisés dans le cadre de la présente analyse. Ils doivent faire l'objet de projets consécutifs. Mais pour permettre de réagir plus rapidement aux crues de l'Emme dès maintenant, la vitesse maximale de réduction du débit au barrage de Port a été portée de 50 m<sup>3</sup>/s par heure à 100 m<sup>3</sup>/s par heure dans le cadre de la mise en œuvre de la régulation sur prévisions.

## Conclusions

Les nouveaux produits et les incertitudes en matière de prévisions imposent des exigences élevées aux concepteurs de modèles ainsi qu'aux auteurs et aux destinataires des prévisions. En cas de danger impliquant plusieurs services de la Confédération, il est nécessaire que des spécialistes évaluent l'ensemble de la situation et son évolution. Ils doivent interpréter conjointement les informations et s'accorder sur une appréciation globale. Il faut aussi que les intéressés puissent obtenir à tout moment des informations interprétées et commentées utilement. A l'échelon de la Confédération, les conditions nécessaires doivent être réunies en 2010, avec l'instauration d'un état-major

Création d'un état-major  
Dangers naturels à l'échelon  
de la Confédération

spécialisé dans les dangers naturels qui réunira les services fédéraux concernés en cas d'événement.

Les destinataires doivent disposer des connaissances nécessaires pour interpréter et préciser les prévisions suprarégionales à l'échelle régionale ou locale. Pour cela, il faut notamment intégrer l'expérience locale et les observations faites sur place. Cela implique de recruter et de former des spécialistes aux échelons local et régional. Une formation de conseiller local en matière de dangers naturels est actuellement mise au point sous la houlette de l'OFEV. Les états-majors de conduite régionaux et locaux chargés d'établir des plans d'urgence et de maîtriser les événements bénéficieront ainsi d'un soutien spécialisé.

Formation de nouveaux spécialistes

Pour qu'une décision puisse être prise à temps, il faut pouvoir disposer de bases exhaustives et à jour. C'est pourquoi la mise sur pied de la plate-forme d'information commune Dangers naturels (GIN), lancée après la crue de 2005, a été accélérée. Elle tient notamment compte des contraintes de la régulation des lacs, conformément aux conclusions de l'analyse de la crue de 2007. Cette plate-forme sera mise à la disposition des services cantonaux compétents au printemps 2010, puis agrandie pour être accessible aux services locaux et enfin proposée à la collectivité.

Instauration d'une plate-forme d'information commune Dangers naturels (GIN)

Les prévisions permettent d'anticiper les crues, mais les délais d'alerte resteront toujours brefs. Il faut donc exploiter systématiquement les signes avant-coureurs d'un événement pour augmenter le degré de préparation et réduire le temps de réaction, en interprétant et en évaluant constamment les mesures et les prévisions. Cela implique d'élaborer des plans d'urgence et d'intervention exhaustifs et à jour et, surtout, de les exercer.

Elaboration et mise en pratique de plans d'urgence

La régulation des lacs doit exploiter les possibilités offertes par la prévision des débits, à l'exemple des lacs du Pied du Jura. La régulation sur prévisions développée pour compléter leur gestion actuelle tient compte des incertitudes entachant les prévisions.

Optimisation des règlements de régulation

Les eaux du Pied du Jura font partie d'un système plus vaste. La régulation des lacs du Pied du Jura, des Quatre-Cantons et de Zurich doit donc être harmonisée en cas de crue, et développée en visant une gestion globale des crues. L'objectif de cette gestion incluant les lacs régulés est de limiter les dommages dans l'ensemble du système lors d'un événement futur. Pour cela, il faut:

Gestion des crues à l'échelle du bassin versant

- > compléter les documents de base, notamment en inventoriant continuellement les dommages potentiels sur les rives des lacs et le long des cours d'eau situés à l'aval;
- > développer des modèles permettant de simuler l'incidence de diverses stratégies de régulation en cas d'événement;
- > prendre des mesures d'organisation, notamment en institutionnalisant les concertations entre les services de la Confédération et des cantons touchés.

L'analyse des événements indique que la gestion des eaux du Pied du Jura peut encore être améliorée. Les options doivent être examinées en détail dans le cadre de projets consécutifs, qui viseront à:

Des projets subséquents s'imposent

- > optimiser la régulation des crues, en améliorant les prévisions numériques sur lesquelles elle se base et les prévisions des débits de l'Emme et des autres affluents de l'Aar en aval du lac de Biemme;
- > examiner en détail les effets et la rentabilité d'une augmentation de la capacité du canal de la Thielle et de l'Aar en aval du lac de Biemme;
- > examiner la capacité d'écoulement et les possibilités de rétention de l'Aar, en tenant compte des centrales électriques situées le long de la rivière.

*Les crues peuvent être mieux maîtrisées en réagissant plus tôt et plus vite en fonction de prévisions et en optimisant la régulation des lacs périalpins. Mais nous ne pourrions empêcher ni les crues ni la surcharge des ouvrages de protection lors d'un événement majeur. C'est pourquoi il faut impérativement établir une documentation complète sur les dangers, élaborer des plans d'urgence exhaustifs et à jour, alerter les organes de conduite et les unités d'intervention en temps utile et alarmer la population à temps pour limiter les dommages dans ces situations.*

## > Einleitung

Gian Reto Bezzola, Wolfgang Ruf

Hochwasser, Murgänge, Rutschungen und Sturzprozesse forderten 2007 insgesamt 4 Todesopfer und verursachten Gesamtschäden von 710 Mio. CHF. Die 4 Todesopfer sowie Schäden in der Höhe von rund 685 Mio. CHF sind dabei auf Hochwasser und Murgänge zurückzuführen, während Rutschungen und Sturzprozesse Sachschäden von knapp 25 Mio. CHF verursachten. Seit 1972, dem Beginn der systematischen Erhebung der Unwetterschäden, belaufen sich die mittleren Schäden durch Hochwasser und Murgänge auf 325 Mio. CHF pro Jahr (teuerungsbereinigt, Preisbasis 2007). Bezüglich dieser Prozesse stellt somit das Jahr 2007 ein überdurchschnittliches Schadenjahr dar, das vor allem durch vier Grossereignisse geprägt war:

- > heftige Gewitter, die vom 7. bis 9. Juni zu Hochwasser in der Langete und zu schweren Schäden im Raum Huttwil BE führten;
- > heftige Gewitter, welche am 20. und 21. Juni im gesamten Mittelland zu Schäden führten und insbesondere die Kantone Schwyz und Bern betrafen;
- > das durch anhaltende Niederschläge ausgelöste Hochwasserereignis vom 8./9. August, das weite Teile des Mittellands in Mitleidenschaft zog und durch welches schwergewichtig die Aare unterhalb des Bielersees sowie die Birs betroffen waren;
- > das Gewitter vom 29. August, das hauptsächlich im nördlichen Teil des Kantons Bern Schäden anrichtete.

Mehr als die Hälfte der 2007 entstandenen Schäden ist dabei allein auf das Hochwasser vom 8./9. August zurückzuführen. Ausgelöst wurde dieses Ereignis durch anhaltende Niederschläge, welche die gesamte Alpennordseite sowie die westlichen und zentralen Alpen betrafen. Die Kombination dieser Regenfälle mit der hohen Sättigung der Böden durch vorangegangene Niederschläge führte zu ausserordentlichen Abflüssen. Weite Teile des Mittellandes wurden in Mitleidenschaft gezogen. Der Wasserstand des Bielersees überschritt die Hochwassergrenze und erreichte in den frühen Stunden des 10. August 2007 einen neuen Höchststand seit Abschluss der zweiten Juragewässerkorrektion im Jahr 1973. Auch der Abfluss in der unterliegenden Aare erreichte einen neuen Rekordwert. Bei Murgenthal, wo der Abfluss der Aare seit 1916 beobachtet wird, wurde mit 1262 m<sup>3</sup>/s ein Abfluss registriert, der deutlich über dem bisherigen Maximum von 1020 m<sup>3</sup>/s aus dem Jahre 1981 liegt. Der hohe Abfluss der Aare ist insbesondere auch auf die grossen Zuflüsse unterhalb des Bielersees zurückzuführen. Allein der Zufluss aus der Emme stieg innerhalb von nur drei Stunden von rund 50 m<sup>3</sup>/s auf 663 m<sup>3</sup>/s an. Auch hier wurde der bisherige Höchstwert von 583 m<sup>3</sup>/s aus dem Jahre 2005 deutlich übertroffen. Die Aare verursachte Überschwemmungen vor allem zwischen Olten SO und Aarau AG sowie bei Döttingen AG. Im Laufental entstanden durch das Hochwasser der Birs massive Schäden. Mit rund 380 m<sup>3</sup>/s erreichte die Birs bei Münchenstein den höchsten seit Beginn der Messungen im Jahre 1917 registrierten Abflusswert. Durch ausufernde Bäche wurden die Ortschaften Lyss BE,

Durch 4 Grossereignisse  
geprägtes überdurchschnittliches  
Schadenjahr 2007

Hochwasser  
vom 8./9. August 2007

Roche VD und Laufen BL verwüstet. Auch in Delémont JU war die Hochwassersituation kritisch.

Die Kantone Aargau, Solothurn, Basel-Landschaft, Bern und Waadt waren mit Schäden von jeweils über 50 Mio. CHF durch das Hochwasser vom 8./9. August 2007 besonders stark betroffen. Schäden von jeweils über 10 Mio. CHF entstanden in den Kantonen Jura, Freiburg, Luzern und Zürich. In 13 weiteren Kantonen entstanden mit insgesamt weniger als 9 Mio. CHF deutlich geringere Schäden.

Betroffene Kantone

Der Neuenburger-, Bieler- und Murtensee, ihre Verbindungskanäle (Zihl- und Broye-kanal) sowie ihre Zu- und Ausflüsse bilden ein grossräumiges wasserwirtschaftliches System überregionaler Bedeutung. Dieses ist in seiner heutigen Form durch die beiden Juragewässerkorrekturen von 1868–1891 und 1962–1973 geprägt und stellt ein Gemeinschaftswerk des Bundes, der Kantone Freiburg, Waadt, Neuenburg, Bern und Solothurn dar. Beim Hochwasser vom 8./9. August 2007 wurde das regulierte System der Jurarandseen und der unterliegenden Aare deutlich überlastet. Die primären Ziele der Regulierung der Jurarandseen, nämlich die Verhinderung von Seehöchstständen zum Schutz der Anlieger sowie die Begrenzung des Abflusses in der unterliegenden Aare zum Schutz der Unterlieger, konnten im August 2007 nicht erreicht werden.

Verbesserung des Hochwasserschutzes an den Jurarandseen und der unterliegenden Aare

Aus diesem Grund beschlossen die Fachstellen des Bundes, der Juragewässerkantone und des durch das Hochwasser betroffenen Unterliegerkantons Aargau am 17. August 2007 folgende Massnahmen:

> *Verbesserung des Krisenmanagements*

In kritischen Situationen finden künftig institutionalisierte Konferenzgespräche unter den direkt involvierten Kantonen und dem BAFU statt. Dies erfolgte bis anhin ad hoc. Diese Gespräche dienen der gemeinsamen Lagebeurteilung und sind die Grundlage für Entscheide zur Seeregulierung in kritischen Situationen. Jeder Partner kann eine solche Konferenz einberufen.

> *Optimierung der Regulierung*

Die Regulierung des Abflusses der Aare während des Hochwassers vom 8./9. August wird unter der Federführung des BAFU vertieft analysiert. Basierend darauf sollen betriebliche Verbesserungen des ganzen Regulierungssystems geprüft werden.

> *Verbesserung der Vorhersagen*

Aufgrund der Analyse des Hochwassers 2005 hatte der Bundesrat im Mai 2007 Aufträge zur Optimierung der Warnung und Alarmierung bei Naturgefahren erteilt. Diese werden nun priorisiert; so sollen beispielsweise die Vorhersagen in den oberen Einzugsgebieten der Aare und der Saane überprüft und verbessert werden.

> *Verbesserung von Warnung und Notfallplanung*

Ereignisse wie jenes vom 8./9. August, das zu einer Überschreitung der Systemgrenzen der Jurarandseen und der unterliegenden Aare führte, werden auch künftig eintreten. Es braucht deshalb sowohl für die Seeanstösler als auch die Unterlieger eine verbesserte Notfallplanung, damit im Ereignisfall die Schäden begrenzt werden können. Dies erfordert eine frühzeitige Warnung der potenziell Betroffenen.

---

Die Analyse des Hochwassers vom 8./9. August 2007 fokussiert einerseits auf das System der Jurarandgewässer und andererseits auf zwei spezifische Themenbereiche:

- > Analyse der Meteo- und Abflussvorhersagen sowie Qualitätsprüfung der eingesetzten Vorhersagemodelle (Teilprojekt in Zusammenarbeit mit MeteoSchweiz)
- > Vertiefte Analyse der Hochwasserregulierung der Juragewässerkorrektion und des Hochwasserabflusses in der Aare. Basierend darauf sollen betriebliche Verbesserungen des ganzen Reguliersystems geprüft werden (Teilprojekt unter Einbezug privater Büros)

Der vorliegende Bericht präsentiert die Ergebnisse der Ereignisanalyse 2007. Er gibt zunächst eine Übersicht der Hochwasserschäden 2007 unter besonderer Berücksichtigung des Ereignisses vom 8./9. August. Es folgen die Ergebnisse der meteorologischen und klimatologischen Analysen des Ereignisses. Dabei wird die synoptische Lage dargestellt, die räumliche und zeitliche Verteilung der Niederschläge und deren klimatologische Einordnung diskutiert sowie auf die Niederschlagsprognosen und den Warnablauf eingegangen. Daran schliesst die Beschreibung des Ereignisses aus hydrologischer Sicht an, ergänzt mit einer Beurteilung der Güte der Abflussmessungen sowie einer statistischen Einordnung der beobachteten Spitzenabflüsse. Ein eigenes Kapitel ist den Abflussvorhersagen gewidmet. Auf den Beschrieb der Prognosetätigkeit ab dem 6. August 2007 folgt eine Beurteilung der Vorhersagegüte, wobei speziell auf die Situation in der Aare und der Emme eingegangen wird und die eingesetzten Modelle verglichen werden. Anschliessend wird die Analyse der Hochwasserregulierung der Juragewässerkorrektion und des Hochwasserabflusses in der Aare beschrieben. Auf der Basis der Analyse werden verschiedene Verbesserungsmassnahmen diskutiert und ihre Wirksamkeit mit Hilfe numerischer Simulationsrechnungen geprüft. Aufgrund der daraus gewonnenen Erkenntnisse werden konkrete Verbesserungsmassnahmen vorgeschlagen, deren Umsetzung abschliessend beschrieben wird.

Der zweite Schwerpunkt des Ereignisses vom 8./9. August 2007, das Hochwasser an der Birs, wurde parallel dazu im Rahmen einer unter Federführung des Kantons Basel-Landschaft durchgeführten Ereignisanalyse vertieft untersucht (Tiefbauamt des Kantons Basel-Landschaft 2008, Kantonaler Krisenstab Basel-Landschaft 2008/2009). Auch in weiteren Kantonen und für weitere Ereignisse des Jahres 2007 fanden auf kantonaler Ebene vertiefte Untersuchungen statt. Verwiesen sei an dieser Stelle zum Beispiel auf die Analyse des Ereignisses vom 8./9. August in den Kantonen Aargau (Aargauische Gebäudeversicherung, Stadt Aarau und Departement Bau, Verkehr und Umwelt des Kantons Aargau 2008) und Zürich (Baudirektion Kanton Zürich 2009), auf die Analyse des Hochwassers an der Langete vom 7. bis 9. Juni des Kantons Bern (Tiefbauamt des Kantons Bern 2008a) und auf die Analyse der Unwetter des Sommers 2007 am Lyssbach (Tiefbauamt des Kantons Bern 2008b).

Fragestellungen und Organisation der Ereignisanalyse 2007

Dokumentation der Ergebnisse

Weitere Ereignisanalysen

**Zitierte Berichte**

Aargauische Gebäudeversicherung (AGV) zusammen mit der Stadt Aarau und dem Departement Bau, Verkehr und Umwelt (BVU) des Kantons Aargau «Wasserbauliches Gutachten zu den Ursachen der Überschwemmungen im Einzugsgebiet des Kraftwerks Rüchlig während des Hochwassers im August 2007», Universität Karlsruhe (TH), Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Karlsruhe, August 2008.

Baudirektion Kanton Zürich, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft AWEL, Zürich «Hochwasser vom 8./9. August 2007 im Kanton Zürich, Auswertung und Dokumentation des Ereignisses – Kurzfassung», Basler&Hofmann, Ingenieure und Planer AG, Zürich, Mai 2009 ([www.hochwasser.zh.ch/internet/bd/awel/wb/hw/de/hochwasser/hw\\_ereignisse.html](http://www.hochwasser.zh.ch/internet/bd/awel/wb/hw/de/hochwasser/hw_ereignisse.html), abgefragt am 19.08.2009).

Kantonaler Krisenstab KKS Basel-Landschaft «Bericht vom 16.9.2008/22.1.2009 über das Hochwasser vom 8./9. August 2007», Liestal, September 2008 / Januar 2009.

Tiefbauamt des Kantons Basel-Landschaft, Geschäftsbereich Wasserbau «Hochwasser vom 8./9. August im Kt. BL aus Sicht des Hochwasserschutzes, Übergeordneter Bericht / Synthesebericht», Scherrer AG, Hydrologie und Hochwasserschutz, Reinach, Juni 2008.

Tiefbauamt des Kantons Bern, Fachstelle Hochwasserschutz «Regionale, lösungsorientierte Ereignisanalyse Langete (Eriswil, Wyssachen, Huttwil, Kleindietwil, Rohrbach)», geo7 Geowissenschaftliches Büro, Bern, und Flussbau AG SAH, Bern, März 2008a.

Tiefbauamt des Kantons Bern, Obergeringenieurkreis III «Gesamtbericht Unwetter Lyssbach Sommer 2007», Bericht Nr. 07376.1 GEOTEST AG und Scherrer AG, Hydrologie und Hochwasserschutz, Zollikofen und Reinach, April 2008b.

# 1 > Hochwasserschäden 2007 unter besonderer Berücksichtigung des Ereignisses vom 8./9. August

Nadine Hilker, Christoph Hegg, Alexandre Badoux

*Die Schäden durch Hochwasser und Murgänge im Jahr 2007 belaufen sich auf rund 685 Mio. CHF und liegen damit deutlich über dem langjährigen Mittel seit 1972 von 325 Mio. CHF pro Jahr. Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die wichtigsten Hochwasserereignisse und die daraus resultierenden Schäden im Jahr 2007 mit besonderer Berücksichtigung des Ereignisses vom 8./9. August.*

## 1.1 Einführung

Seit 1972 sammelt die Eidgenössische Forschungsanstalt WSL im Auftrag des BAFU systematisch Daten zu den *Unwetterschäden* in der Schweiz (Schmid et al. 2004, Hilker et al. 2009a). Dabei werden die Prozesse *Hochwasser*, *Murgang*, *Rutschung* sowie (seit 2002) *Steinschlag* und *Felssturz* berücksichtigt. Die Erhebungen basieren hauptsächlich auf Meldungen von etwa 3000 Schweizer Zeitungen und Zeitschriften sowie – bei grösseren Ereignissen – auf Angaben von Kantonen und Versicherungsgesellschaften. Erfasst werden die verfügbaren Informationen über die abgelaufenen Naturereignisse und die damit verbundenen Schäden, welche – soweit möglich – den betroffenen Gemeinden sowie den verursachenden Prozessen zugeordnet werden. Seit 1977 erscheint jährlich ein Bericht über die Unwetterschäden in der Schweiz. Die nachfolgenden Ausführungen stützen sich auf den entsprechenden Bericht zum Jahr 2007 (Hilker et al. 2008).

Systematische Erfassung von  
Schadeneignissen seit 1972

Im vorliegenden Kapitel wird zunächst ein Überblick der Schäden im Jahr 2007 gegeben. Hinsichtlich der verursachten Schadenskosten und deren räumlichen Ausdehnung sticht das Hochwasserereignis vom 8./9. August besonders heraus, weshalb ihm ein eigener Abschnitt gewidmet wird. Anschliessend wird auf die Schäden der übrigen Hochwasserereignisse des Jahres 2007 eingegangen. Schliesslich wird das Ereignis vom 8./9. August 2007 mit dem seit Beginn der systematischen Erhebung der Unwetterschäden bedeutendsten Hochwasser vom 21./22. August 2005 verglichen sowie eine Einordnung bezüglich der Schäden seit 1972 vorgenommen.

Inhalt

Das Jahr 2007 kann mit *Unwetterschäden* von gesamthaft rund 710 Mio. CHF als schadenreich bezeichnet werden, da die durchschnittliche Schadenssumme der Jahre 1972 bis 2008 rund 350 Mio. CHF beträgt (teuerungsbereinigt, Preisbasis 2007).

Unwetterschäden 2007

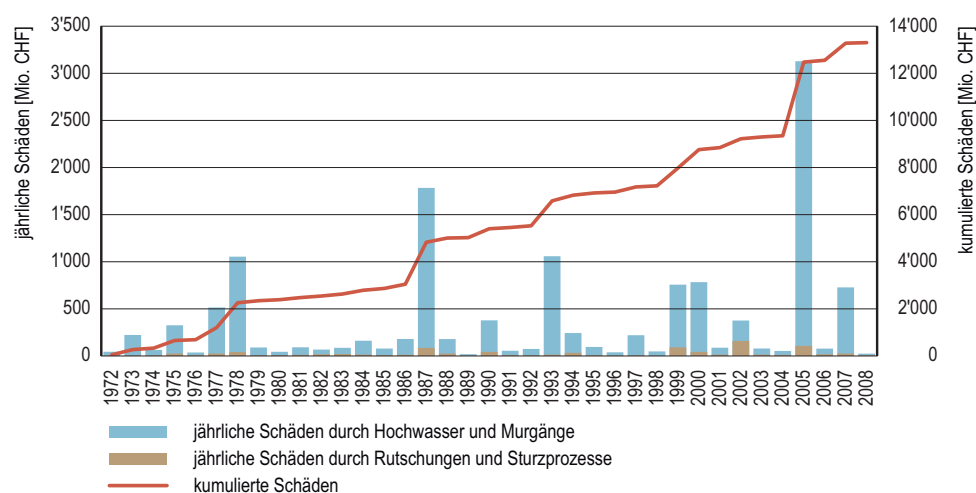
## 1.2 Hochwasserschäden in der Schweiz im Jahr 2007

### 1.2.1 Übersicht

Von den 710 Mio. CHF Gesamtschäden wurden rund 685 Mio. CHF durch Hochwasser- und Murgänge verursacht. Ähnlich hohe Schadenskosten durch Wasserprozesse waren in den Jahren 1999 und 2000 zu verzeichnen (Abb. 1.1), als jeweils ein Grossereignis dominierte (BWG, 2000; BWG 2002). Noch höher waren die Schäden 1978, 1987, 1993 und mit knapp 3 Mrd. CHF insbesondere 2005 (Hilker et al. 2007). Neben den finanziellen Schäden waren 2007 auch vier Todesfälle zu verzeichnen.

Schadenssumme 2007

Abb. 1.1 > Entwicklung der Unwetterschäden 1972–2008 (teuerungsbereinigt, Preisbasis 2007)



Geprägt wurde das Jahr vor allem durch vier Grossereignisse.

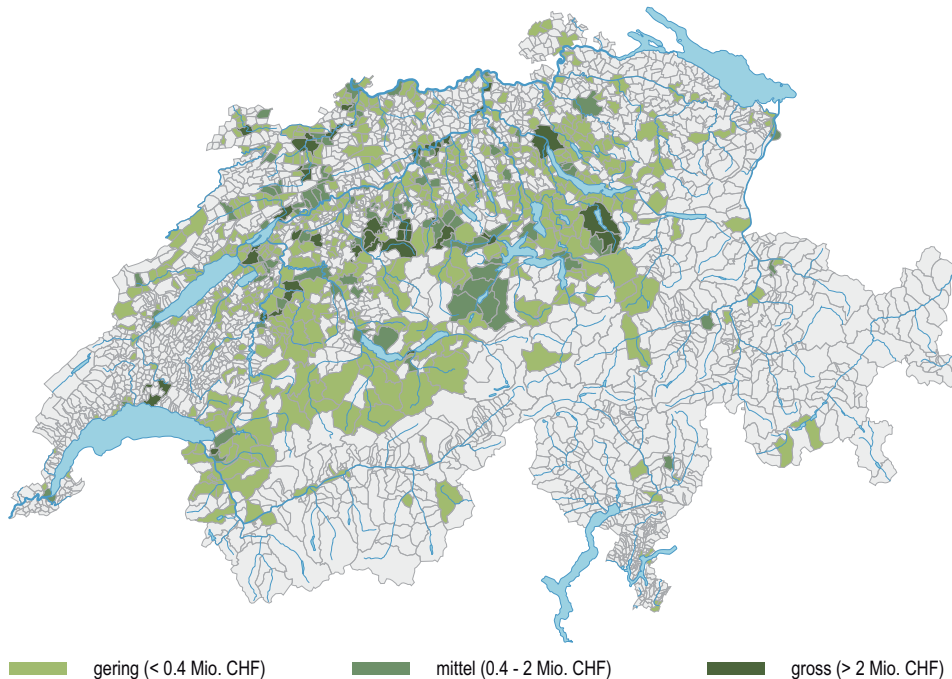
Vier Grossereignisse

- > Vom 7. bis 9. Juni führten heftige Gewitter hauptsächlich in der Region Huttwil BE zu grossen Schäden. Dabei verloren drei Personen in den Fluten der Langete ihr Leben und es entstanden Sachschäden von mehr als 85 Mio. CHF.
- > Am 20./21. Juni waren besonders die Kantone Schwyz und Bern von Gewittern betroffen. Die Gewitterfront zog über das gesamte Mittelland und führte schweizweit zu Schäden von rund 140 Mio. CHF.
- > Die anhaltenden Regenfälle vom 8./9. August stellen mit daraus resultierenden Schäden von etwa 380 Mio. CHF das schwerste Unwetterereignis des Jahres dar. Dabei wurden weite Teile des Mittellandes in Mitleidenschaft gezogen. Die Ortschaften Laufen BL, Roche VD und Lyss BE wurden durch ausufernde Bäche verwüstet. Die Aare überschwemmte primär die Gebiete zwischen Olten SO und Aarau sowie Döttingen AG, und der Bielersee trat über seine Ufer. Ein Mann starb in Heimswil BE indirekt an den Folgen des Unwetters.
- > Schliesslich ereignete sich am 29. August ein Gewitter, das hauptsächlich im nördlichen Teil des Kantons Bern – namentlich in Lyss – Schäden anrichtete.

Abb. 1.2 zeigt die räumliche Verteilung der Unwetterschäden im Jahr 2007 auf Gemeindeebene. Da – wie Abb. 1.1 zeigt – die nicht durch Hochwasser und Murgänge verursachten Schäden einen geringen Anteil an den Unwetterschäden haben, wurde dabei auf eine differenziertere Darstellung nach Art des Prozesses verzichtet.

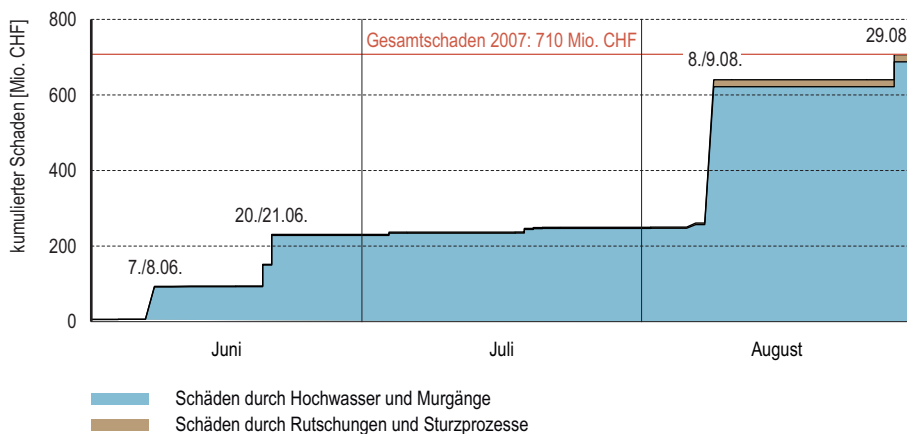
Räumliche Verteilung

**Abb. 1.2 > Ausmass der Unwetterschäden im gesamten Jahr 2007 auf Gemeindeebene**



Kartengrundlage: BFS GEOSTAT / Bundesamt für Landestopographie; Stand der Gemeindegrenzen: 1996

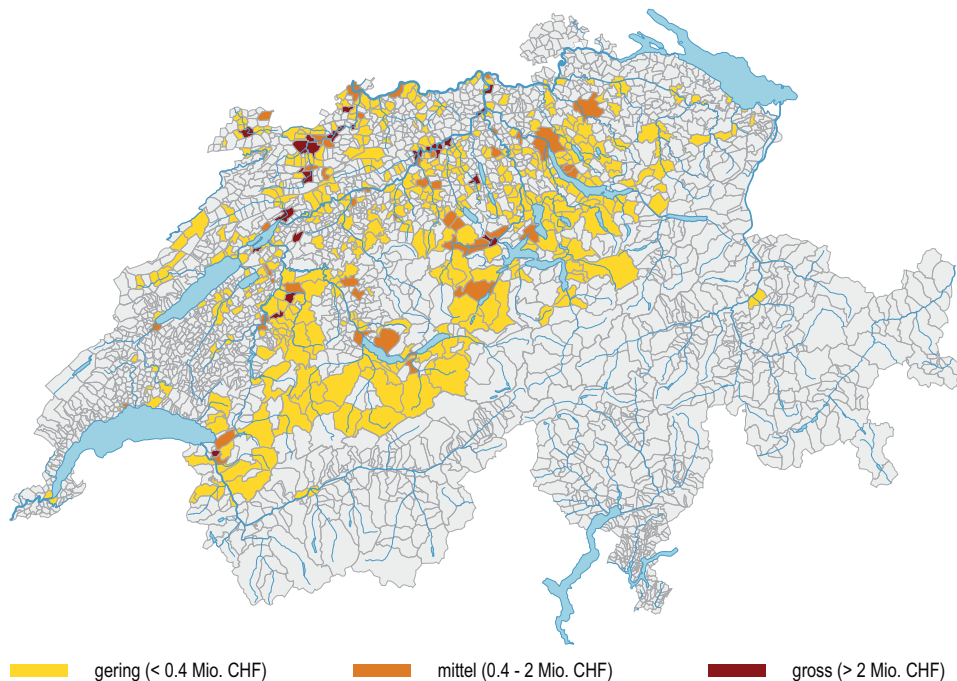
**Abb. 1.3 > Zeitliche Verteilung der Schäden durch Hochwasser und Murgänge sowie durch Rutschungen und Sturzprozesse von Juni bis August 2007**



Knapp 65 % der gesamten Hochwasserschäden im Jahr 2007 sind im August und mehr als 30 % im Juni entstanden (Abb. 1.3). In den Monaten Januar, Februar, Oktober, November und Dezember wurden keine Hochwasserschäden, sondern nur solche durch Sturzprozesse oder Rutschungen, registriert.

Jahreszeitliche Verteilung

**Abb. 1.4 > Ausmass der Unwetterschäden vom 8./9. August 2007 auf Gemeindeebene**



Kartengrundlage: BFS GEOSTAT / Bundesamt für Landestopographie; Stand der Gemeindegrenzen: 1996

### 1.2.2 Das Hochwasser vom 8./9. August 2007

Die anhaltenden Niederschläge vom 8./9. August und die damit verbundenen Naturereignisse verursachten Schäden von rund 380 Mio. CHF. Während der Anteil der durch Wasserprozesse verursachten Schäden bei 96 % lag, betrug jener durch Massenbewegungen lediglich 4%. Die räumliche Verteilung der Schäden ist aus Abb. 1.4 ersichtlich, wobei wiederum auf eine differenziertere Darstellung nach Art des Prozesses verzichtet wurde. Die Kantone Aargau, Solothurn, Basel-Landschaft, Bern und Waadt waren mit Schäden von je 50 bis 70 Mio. CHF stark betroffen. Jeweils über 10 Mio. CHF Schadenskosten wiesen ausserdem die Kantone Jura, Freiburg, Luzern und Zürich auf. In 13 weiteren Kantonen entstanden mit insgesamt weniger als 9 Mio. CHF geringere Schäden.

Überblick

Im Kanton Aargau war Aarau deutlich am stärksten betroffen. Dort überschwemmte die Aare das Gebiet des Schachens mitsamt Pferderennbahn, Leichtathletikstadion und Schwimmbad (Abb. 1.5). Beim Kraftwerk Rüchlig kam es zu einem Rückstau, woraufhin sich das Wasser über einen Damm ins anliegende Quartier ergoss (Abb. 1.6). Das

Aargau

Kraftwerk selbst verzeichnete hohen Sachschaden und ein Teil der Zurlindeninsel wurde weggespült, wodurch eine Hochspannungsleitung stark beschädigt wurde. Beim Aareschulhaus wurde das Untergeschoss überflutet. Wasser, das in der Stadt in Wohnungen und Tiefgaragen drang, kam teilweise auch aus der überlasteten Kanalisation. Weiter flussabwärts, in Döttingen, überströmte die Aare einen weiteren Damm und setzte Teile des Dorfes unter Wasser. 50 Personen wurden evakuiert. Das überschwemmte Aarecenter mit zahlreichen Geschäften verzeichnete hohen Sachschaden. Auch das Schwimmbad, mehrere Wohnhäuser, Parkplätze und Landwirtschaftsland wurden überflutet. Um das Klingnauer Wohngebiet zu schützen, wurde ein provisorischer Damm aufgeschüttet. In Koblenz wurden Personen unterhalb des Kraftwerkes Klingnau evakuiert. In Brugg wurden durch die Aare Wohn- und Industriegebäude sowie die Badeanstalt, das Stadion und die Militäranlage in Mitleidenschaft gezogen. In Aarburg, im Bereich der Wiggerrmündung in die Aare, mussten einige Personen evakuiert werden.

**Abb. 1.5** > Aarauer Schachen und Pferderennbahn am 9. August 2007 um 18 Uhr



Foto Kantonspolizei AG

**Abb. 1.6** > Mühlemattstrasse Aarau am 9. August 2007 um 8.10 Uhr



Foto Thomas Pfister, Stadtbauamt Aarau

Im Kanton Solothurn waren vorwiegend Schönenwerd, Niedergösgen, Gretzenbach und Olten, wo Quartiere entlang der Aare überflutet wurden, betroffen. Besonders grosse Schäden erlitten das Pfahlbaudorf in Schönenwerd sowie jeweils zwei Firmen in Gretzenbach und Schönenwerd. Aber auch unzählige Wohngebäude wurden in Mitleidenschaft gezogen. In der Schützenmatt in Olten stand das Wasser der Aare bis zu 1.5 m hoch und zerstörte Chilbi-Bahnen. Dünnern und Aare überfluteten schliesslich neben Gewerbebetrieben, Kellern, Tiefgaragen und Strassen auch die Badeanstalt. In Obergösgen standen ganze Einfamilienhausreihen unter Wasser.

Solothurn

Im Kanton Basel-Landschaft entstanden massive Schäden vor allem entlang der Birs im Laufental (Abb. 1.7 und 1.8). In Liesberg haben die Fluten etliche Liegenschaften überschwemmt sowie einen grossen Firmenöltank umgestossen. Das ausgelaufene Öl richtete grossen Schaden an Land und Mobiliar an. Eindeutig am stärksten betroffen war die Gemeinde Laufen. Die Birs drang dort durch die Strassen, wodurch sämtliche Häuser in der Altstadt unter Wasser standen. Hinzu kamen Schäden durch Grundwasser und ausgelaufenem Heizöl. Über 1000 Bewohner waren in ihren Wohnungen eingeschlossen und wurden per Boot mit dem Nötigsten versorgt. Rund 40 Geschäfte erlitten hohen Sach- oder sogar Totalschaden. Das Wasser der Birs drang bis ins Quartier Norimatt. Das Zentrum von Zwingen war wegen dem Hochwasser der Birs ebenfalls unpassierbar. Die Abwässer von Zwingen flossen eine Zeit lang ungereinigt in die Birs, weil neben Gebäuden auch die Kläranlage überflutet wurde. Rund um das Kraftwerk "Moos" der Papierfabrik in Grellingen hat der Fluss mehrere Anlagen weggeschwemmt und Keller überflutet.

Basel-Landschaft

**Abb. 1.7 > Überschwemmung des Städtchens Laufen am 9. August 2007**



Foto Kantonalen Krisenstab KKS BL

**Abb. 1.8 > Ausuferung der Birs oberhalb von Zwingen am 9. August 2007 um 14 Uhr**



Foto Kantonalen Krisenstab KKS BL

Im Kanton Bern war Lyss, wo der Lyssbach die angrenzenden Quartiere überflutete, weitaus am stärksten betroffen. Das Wasser gelangte in Einstellhallen, Geschäfte und Restaurants. Der Schaden rund um den Bielersee, wo Campingplätze und zahlreiche Häuser überflutet wurden, war grösser als jener durch das Hochwasser vom August 2005 (Abb. 1.9). Im Berner Jura war die Bahnlinie Moutier – Court unterbrochen und die Birs überschwemmte zahlreiche Gebäude in Moutier und Roches. In den seenahen Quartieren Thuns wurden Gebäude überflutet. In Heimiswil kam es indirekt zu einem Todesfall, als ein Mann wegen einer Überschwemmung nicht bemerkte, dass die Abdeckung einer Jauchegrube weggespült worden war und hineinfiel.

Bern

**Abb. 1.9 > Kleinboothafen und überschwemmte Strandpromenade in Biel am Morgen des 10. August 2007 um 06:30 Uhr**



Foto Jörg Bucher, TBA Bern, OIK III

Im Kanton Waadt wurde unter anderem das Dorf Roche von den Wasser- und Geröllmassen der Eau Froide verwüstet. 1000 m<sup>3</sup> Geschiebe wurden auf den Strassen abgelagert und das Wasser beschädigte Gebäude und Mobiliar.

Waadt

### 1.2.3 Weitere Hochwasserereignisse im Jahr 2007

Im Folgenden werden die wichtigsten übrigen Hochwasserereignisse des Jahres 2007 aufgeführt. Die Sachschäden pro Einzelereignis beliefen sich dabei jeweils unter 150 Mio. CHF (Abb. 1.3).

Starke Niederschläge haben in der Nacht auf den 2. März vor allem in den Berner Regionen Seeland, Jura, Bern, Langenthal und Burgdorf zu überschwemmten Kellern und Hangrutschen geführt. Ende April kam es immer wieder zu lokal starken Gewitterregen, welche z. B. am 29. in Sainte-Croix VD Keller überfluteten. Gewitter verursachten auch am 21. und 23. Mai Schäden in den Kantonen Bern, Jura und Waadt bzw. Neuenburg und Schwyz.

März bis Mai

Der Grossteil der Gesamtschäden von rund 230 Mio. CHF im Juni ist auf die beiden heftigen Gewitterereignisse vom 7./8. und 20./21. zurückzuführen. Ersteres zog das Berner Gebiet Huttwil – Eriswil – Wasen, wo es neben hohem Sachschaden auch drei Todesopfer zu beklagen gab, am stärksten in Mitleidenschaft. In Eriswil konnte eine Frau nicht mehr rechtzeitig aus ihrem Haus flüchten und ertrank. Die grössten Schäden entstanden bei der Einmündung des Schwändibachs in die Langete. Im Dorfzentrum drohten vier Gebäude einzustürzen und eine Schreinerei wurde zerstört. Bäche schwemmten ihr Geschiebe durch das Dorf Wyssachen, wo sämtliche Keller unter

Juni

Wasser standen. In Huttwil starb ein Ehepaar in den Fluten der Langete. Die Bahnstrecke Huttwil – Wolhusen LU war wegen unterspülten Geleisen mehrere Tage unterbrochen. Neben weiteren Schäden im Kanton Bern kam es auch in den Kantonen Luzern und Solothurn zu grossen Schäden. Am 20. Juni wurden Teile des Kantons Schwyz von einem schweren Gewitter heimgesucht. Am stärksten betroffen waren die Gemeinden Unteriberg und Einsiedeln. Minster und Nidlaubach traten über die Ufer und überfluteten Strassen und Gebäude. In Gross bei Einsiedeln riss der Grossbach ein Haus mit, zerstörte einen Teil der Strasse und setzte zahlreiche Wohnhäuser, Geschäfte und Garagen unter Wasser. Auch in den Gemeinden Oberiberg und Alpthal entstanden beträchtliche Schäden durch Hochwasser, Murgänge und Rutschungen. Am nächsten Tag wurde die Schweiz von einer Gewitterfront von Westen her durchquert. Besonders betroffen war der Kanton Bern. In Lyss und Heimiswil beschädigten Bäche Liegenschaften und Strassenabschnitte.

Ergiebige Regenfälle führten am 3./4. Juli vor allem in den Kantonen Waadt, Wallis und Freiburg zu Schäden. Vom 18. bis 23. Juli führten abendliche Gewitter vielerorts zu Überschwemmungen. Am 18. Juli kam es z. B. im Kanton Uri und in Brienz BE zu überfluteten Kellern. Am Tag darauf entstanden die grössten Schäden in den Regionen Interlaken BE und Biel BE sowie im Kanton Obwalden. Zwischen Interlaken BE und Sachseln OW gab es Unterbrüche auf der A8, der Brünigstrasse und der Zentralbahnstrecke. Am 20. Juli war diese Region auf ähnliche Art und Weise wie am Vortag betroffen. Bei einem Gewitter am 21. Juli gab es Schäden in einigen Berner und Luzerner Gemeinden. Am 23. Juli gingen im Kanton Freiburg heftige Gewitter nieder, so dass Bäche über die Ufer traten und Hänge rutschten.

Juli

Heftige Gewitterregen vom 6. bis 8. August verursachten Schäden im Gebiet zwischen den Kantonen Waadt und Schwyz. Es folgte das Unwetter vom 8./9. August, das Gegenstand dieser Ereignisanalyse ist und im vorherigen Abschnitt bereits beschrieben worden ist. Gewitterniederschläge vom 29. führten gesamtschweizerisch zu Schäden von über 65 Mio. CHF, wobei besonders der nördliche Teil des Kantons Bern betroffen war. Lyss wurde zum dritten Mal im Jahr 2007 äusserst stark in Mitleidenschaft gezogen. Dieses Mal hat der Lyssbach fast einen Drittel des Siedlungsgebietes überflutet. Des Weiteren waren auch die Kantone Solothurn und Neuenburg stark betroffen.

August

Am 3. und 4. September fielen im Osten grössere Regenmengen durch Gewitter, wodurch es im mittleren Rheintal SG zu überfluteten Kellern und Tiefgaragen kam.

September

### 1.3 Einordnung der Schäden des Hochwassers vom 8./9. August 2007

Mit dem Unwetter vom 8./9. August 2007 ereignete sich knapp zwei Jahre nach jenem vom 21./22. August 2005 (Bezzola und Hegg 2007) erneut ein schadenreiches Hochwasser auf Grund von Dauerregen. Mit 380 Mio. CHF lagen die Schäden 2007 jedoch fast acht Mal tiefer als 2005 (rund 3 Mrd. CHF). Bei beiden Ereignissen betragen die Anteile der privaten Schäden etwa 75 %, jene der öffentlichen Hand rund 25 %. Die Aufteilung auf die schadenverursachenden Prozesse ist ebenfalls sehr ähnlich: Wasser-

prozesse führten 2005 zu rund 95 %, 2007 zu rund 96 % der Schadenskosten. Der Rest wurde durch Rutschungen hervorgerufen. Während 2005 über 900 Gemeinden betroffen waren, waren es 2007 über 500 – was gut einem Fünftel aller Schweizer Gemeinden entspricht (Stand der Gemeinden 1996). Das Schadensgebiet erstreckte sich 2005 vor allem über die nördlichen Voralpen und die Zentralschweiz sowie entlang grosser Flüsse im Mittelland. Die Kantone Bern, Luzern und Uri wiesen die höchsten Schadenssummen auf. Beim Hochwasser im August 2007 lag das Schadensgebiet weiter nördlich (Abb. 1.4). In Mitleidenschaft gezogen wurden primär das Mittelland und der Jura, wo Birs und Aare zu grossen Schäden führten. Die höchsten Schadenskosten waren in den Kantonen Aargau, Solothurn und Basel-Landschaft zu verzeichnen. Bei beiden Grossereignissen war die Alpensüdseite kaum oder gar nicht betroffen. Während das Unwetter vom August 2005 sechs Menschenleben gefordert hat, kam es bei jenem im August 2007 zu einem Todesfall.

Mit Sachschäden von rund 380 Mio. CHF liegt das Hochwasser vom 8./9. August 2007 bezüglich der seit 1972 durch Einzelereignisse verursachten Schäden an 8. Stelle. Es ist somit hinsichtlich seiner Auswirkungen als gross, jedoch nicht als aussergewöhnlich einzustufen.

Werden die Unwetterschäden der Periode von 1972–2008 betrachtet (Abb. 1.1), so ist ersichtlich, dass ein Grossteil der Sachschäden mit Hochwasserprozessen verbunden ist. Nicht ganz so eindeutig sieht es jedoch hinsichtlich der Todesfälle aus. So forderten in der Periode 1972–2008 Hochwasser 46 Todesopfer, Rutschungen deren 32 und Murgänge deren 24 (Hilker et al. 2009a, Hilker et al. 2009b). Bezüglich der Todesfälle durch Hochwasser liegt das Jahr 2007 mit 4 Toten deutlich über dem Durchschnitt, ist aber – angesichts der hohen Variabilität der Anzahl Todesfälle von Jahr zu Jahr – nicht aussergewöhnlich. Der Umstand, dass das Ereignis vom 8./9. August nicht mehr als 1 Todesopfer forderte, dürfte durch die massgeblichen Prozesse begründet sein. Ausuferungen von Seen und grossen Flüssen verursachen eher statische Überschwemmungen und stellen damit im Vergleich zu dynamischen Überflutungen eine eher geringere Bedrohung für Menschenleben dar.

#### Literatur

Bezzola G.R., Hegg Ch. (Ed.) 2007: Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0707, Bern: 215 S.

BWG 2000: Hochwasser 1999 – Analyse der Ereignisse. Studienbericht Nr. 10, BBL/EDMZ, Bern: 166 S.

BWG 2002: Hochwasser 2000 – Ereignisanalyse/ Fallbeispiele. Berichte des BWG, Serie Wasser Nr. 2, BBL, Bern, 248 S.

Hilker N., Jeisy M., Badoux A., Hegg, Ch. 2007: Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 2005. Wasser Energie Luft, 99. Jg., Heft 1: S. 31–41.

Hilker N., Badoux A., Hegg, Ch. 2008: Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 2007. Wasser Energie Luft, 100. Jg., Heft 2: S. 115–123.

Hilker N., Badoux A., Hegg, Ch. 2009a: The Swiss flood and landslide damage database 1972–2007. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 9: 913–925.

Hilker N., Badoux A., Hegg, Ch. 2009b: Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 2008. Wasser Energie Luft, 101. Jg., Heft 2: S. 95–100.

Schmid F., Fraefel M., Hegg, Ch. 2004: Unwetterschäden in der Schweiz 1972–2002: Verteilung, Ursachen, Entwicklung. Wasser Energie Luft, 96. Jg., Heft 1/2: 21–28.



## 2 > Meteorologische und klimatologische Analyse des Ereignisses

Christoph Schmutz, Marco Arpagaus, Lorenzo Clementi, Christoph Frei, Sophie Fukutome, Urs Germann, Daniel Leuenberger, Mark Liniger, Felix Schacher, Marco Stoll, André Walser

*Die Niederschläge, welche das Hochwasser 2007 verursachten, erstreckten sich zwischen dem 6. und 9. August 2007 über vier Tage. Die ersten zwei Tage waren durch konvektive Niederschläge im Zusammenhang mit einem Kaltluftvorstoss aus Nordwesten geprägt. Ein Höhentief westlich des Alpenraums und später über Norditalien führte sehr feuchte Luftmassen erst aus Südwesten später aus Südosten zur Alpennordseite. Diese glitten auf der potenziell kühleren Luft auf, welche in Bodennähe aus Nordwesten einfluss. Das Hauptereignis vom 8./9. August auf der Alpennordseite war deshalb durch grossflächigen und intensiven Dauerregen geprägt. Die klimatologische Einordnung der Niederschläge vom 8. August ergab für die Nordwestschweiz die grössten Jährlichkeiten zwischen 20 und 100 Jahren. Für das ganze Ereignis liegen die Jährlichkeiten deutlich tiefer. Die erste Unwetterwarnung wurde am 6. August ausgegeben. Als besondere Herausforderung erwiesen sich die unterschiedlichen Ergebnisse der Modellrechnungen bezüglich der exakten räumlichen und zeitlichen Ausprägung der Niederschlagsereignisse.*

### 2.1 Einleitung und Gliederung

Einleitend wird die synoptische Wetterlage unmittelbar vor und während des Niederschlagsereignisses dargestellt (Kap. 2.2). Die registrierten Niederschlagssummen, die räumliche Verteilung und die zeitliche Dynamik während des Ereignisses werden anhand spezifisch aufbereiteter Analysen aus den Daten der Niederschlags- und Radarnetze diskutiert (Kap. 2.3 und 2.4). In Kapitel 2.5 werden die Niederschläge klimatologisch eingeordnet. Das Kapitel 2.6 gibt Aufschluss über die Modellvorhersagen des Wettervorhersagemodells COSMO. Die Beschreibung des Warnablaufs (Kap. 2.7) in der Zeit vom 6. bis zum 9. August zeigt auf, dass die MeteoSchweiz insgesamt 16 Unwetterwarnungen wegen Starkniederschlag erstellt hat (inkl. Entwarnungen am 9. August). Die wichtigsten Erkenntnisse werden in Kapitel 2.8 zusammengefasst und in Kapitel 2.9 wird ein Ausblick getätigt. Für Fragen im Zusammenhang mit methodischen Aspekten und dem Datenbezug für das Ereignis sei zudem auf MeteoSchweiz (2006 und 2008) verwiesen.

Überblick

## 2.2

**Synoptische Entwicklung**

Über das Wochenende vom 4./5. August war die Wetterlage durch ein kräftiges Hochdruckgebiet über Mitteleuropa geprägt. Am Samstag lag dessen Zentrum in Mitteleuropa, am Sonntag weiter nördlich über Polen. Auf der Höhenwetterkarte zeigte sich ein Hochdruckrücken vom Mittelmeer bis nach Skandinavien. Durch einen Kaltluftausbruch in Richtung Britische Inseln und Biskaya begann sich westlich davon ein Trog auszubilden. In der Folge drehten die Winde im zentralen Alpenraum auf Südwest. Von Südfrankreich her wurde sehr warme und vorerst noch trockene Luft in unsere Breiten geführt.

Vorgeschichte,  
4. bis 5. August

Zu Wochenbeginn wurde die Druckverteilung über Mitteleuropa flach und damit die Schichtung der Luftmasse zunehmend instabiler. Der Trog kam am Montag (6. August) weiter nach Süden und Osten voran und wies einen abgeschlossenen Kern über den Britischen Inseln auf. In der Folge lagen die Alpen im so genannten «Sattelpunkt» mit grosser Hebung und starker Gewitteraktivität. Vor allem in den zentralen und westlichen Teilen der Schweiz entstanden gewittrige Schauer, welche zu lokalen Überschwemmungen und Erdbeben führten und vielerorts die ohnehin schon feuchten Böden weiter ansättigten. Die Temperaturen erreichten in den Niederungen verbreitet 28 bis 30 Grad, und selbst in Höhenlagen von über 1500 Metern wurde die 20 Grad-Marke übertroffen. Entsprechend hoch lag bei Niederschlagseinsatz die Schneefallgrenze, im Mittel bei etwa 3500 Metern.

Wetterentwicklung,  
6. bis 7. August

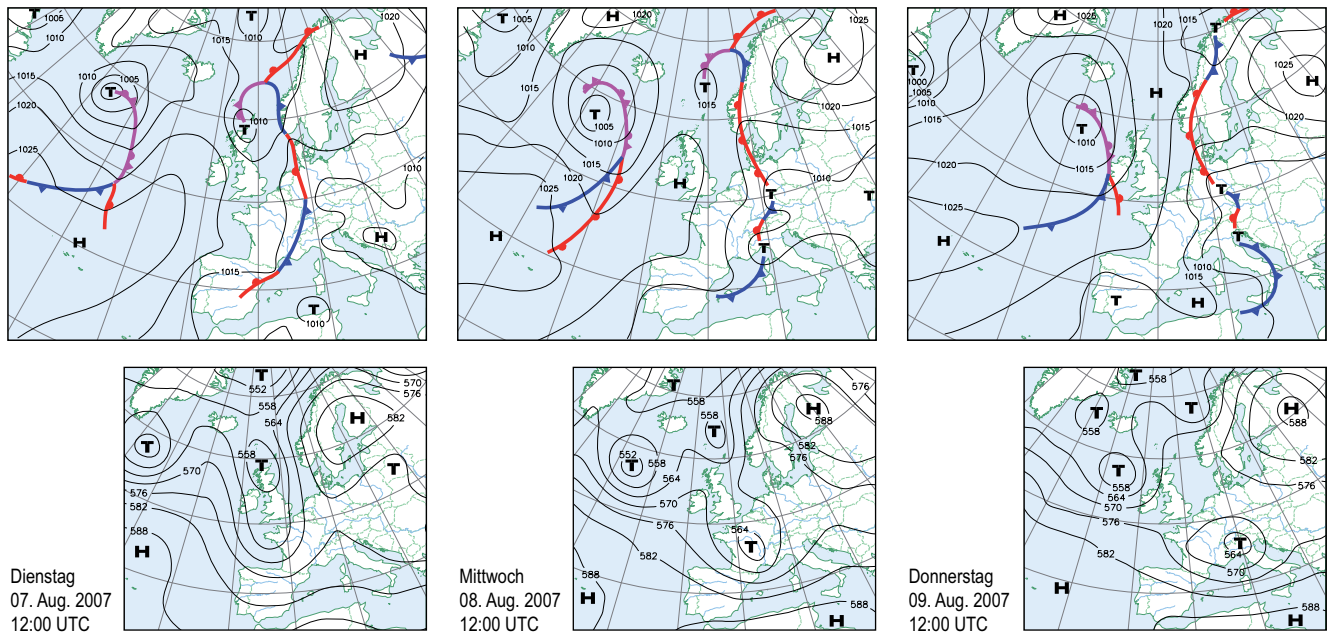
Am Dienstag früh (7. August) erfasste die wetteraktive Kaltfront die Schweiz und kam bis zum Abend knapp östlich des Bodensees über Süddeutschland zum Stillstand (Abb. 2.1). Die Tagestemperaturen gingen im Mittelland auf 18 bis 22 Grad zurück. In 1500 Metern Höhe betrug der Temperaturrückgang 3–5 Grad. Die Schneefallgrenze sank im Laufe des Tages unter die 3000 Meter-Marke.

Schliesslich kam es am Mittwoch (8. August) zum eigentlichen Hauptereignis, als sich ein abgeschlossenes Höhentief westlich des Alpenraums bildete (Abb. 2.1). Dieses Höhentief führte während der Phase der intensivsten Niederschläge in der Höhe erneut sehr feuchte Luftmassen aus südwestlicher, später südöstlicher Richtung in unsere Breiten. Diese Luft glitt auf die potenziell kühlere Luft auf, welche mit nordwestlichen Winden in Bodennähe auf der Alpennordseite einfluss. Die Tagesmitteltemperaturen gingen im Mittel auf rund 15 Grad zurück, in Höhenlagen von 1500 Metern wurden noch knapp 10 Grad gemessen. Die Schneefallgrenze sank generell unter 2500 Meter. Es folgten dabei zwei intensive Niederschlagsphasen innerhalb von wenig mehr als 12 Stunden.

Wetterentwicklung  
am 8. August

**Abb. 2.1 > Wetterübersicht für den 7., 8. und 9. August 2007, 12 UTC**

Die oberen Karten zeigen jeweils die Bodendruckfelder mit eingezeichneten Fronten. Auf den unteren Karten sind die Höhendruckfelder bei 500 hPa dargestellt.



MeteoSchweiz 2007

Am Donnerstag liessen die dynamischen Aufgleitprozesse über der Schweiz mit der Verschiebung des Höhentiefs über Italien nach Osten (Abb. 2.1) nach. Die Winddrehung auf Nord in den unteren Luftschichten bewirkte, dass die herangeführte Luft an den Alpen gestaut wurde. Allerdings war die Kaltluft deutlich weniger feucht und die Niederschlagsmengen geringer. Die aktiveren Niederschlagszonen über Süddeutschland wurden mit der Ostströmung in der Höhe im Norden des Juras nach Frankreich geführt. Unterstützt durch den Effekt der Niederschlagsabkühlung sank die Schneefallgrenze vorübergehend bis auf 2000 Meter ab, die Tagestemperaturen verharrten im Mittelland unter 15 Grad, und in Höhenlagen von 1500 Metern wurden 4 bis 8 Grad verzeichnet.

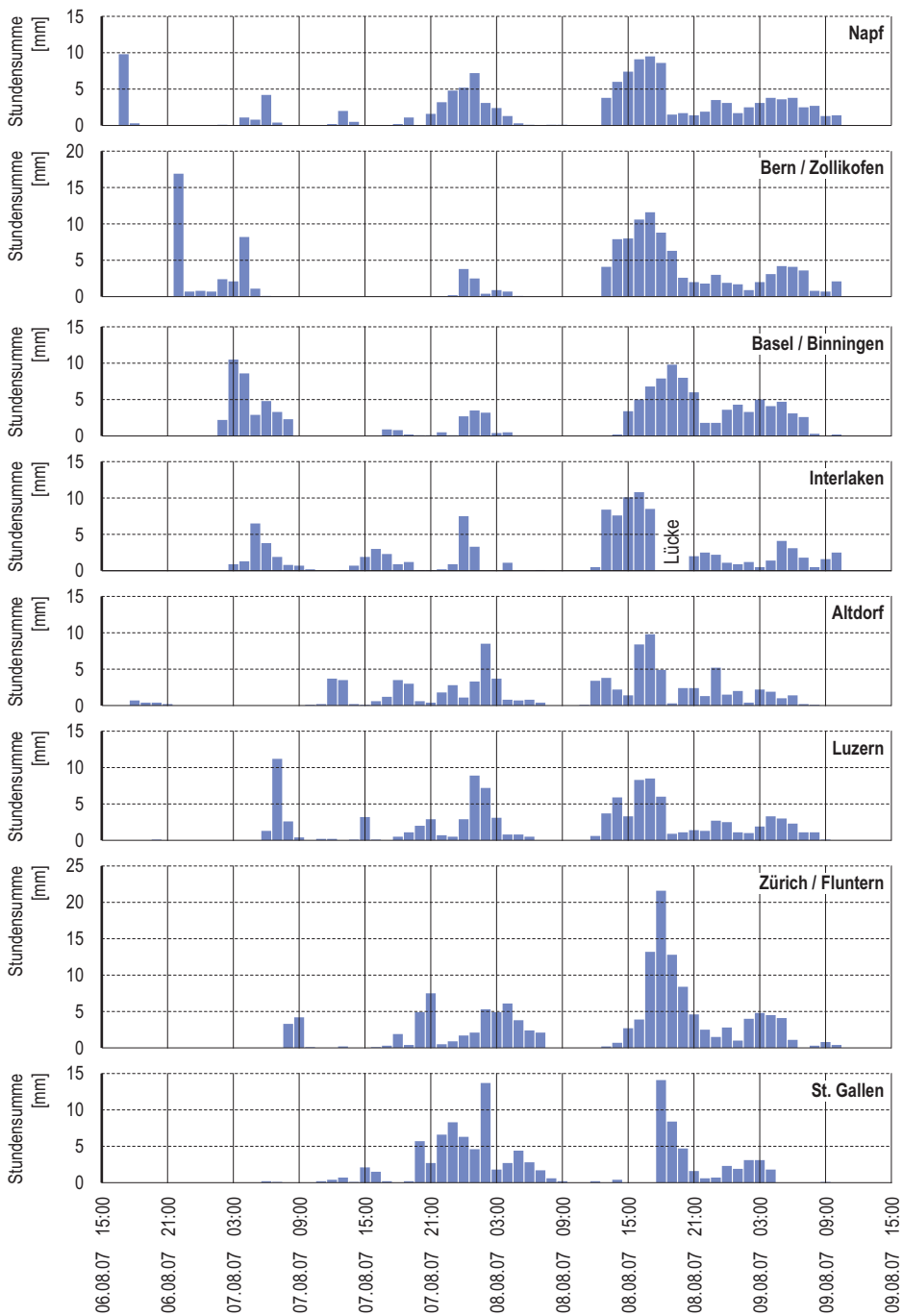
Wetterentwicklung  
am 9. August

## 2.3 Niederschlagsverlauf

In den 4 Tagen vom 6. bis 9. August 2007 sind in der Schweiz zusammengefasst während drei Phasen intensive Niederschläge gefallen (vgl. Abb. 2.2). Im Folgenden wird der Niederschlagsverlauf anhand von ausgewählten Radarmessungen illustriert, und zwar sowohl anhand der Niederschlagsintensität (Abb. 2.3) als auch anhand der täglichen Niederschlagssummen (Abb. 2.4).

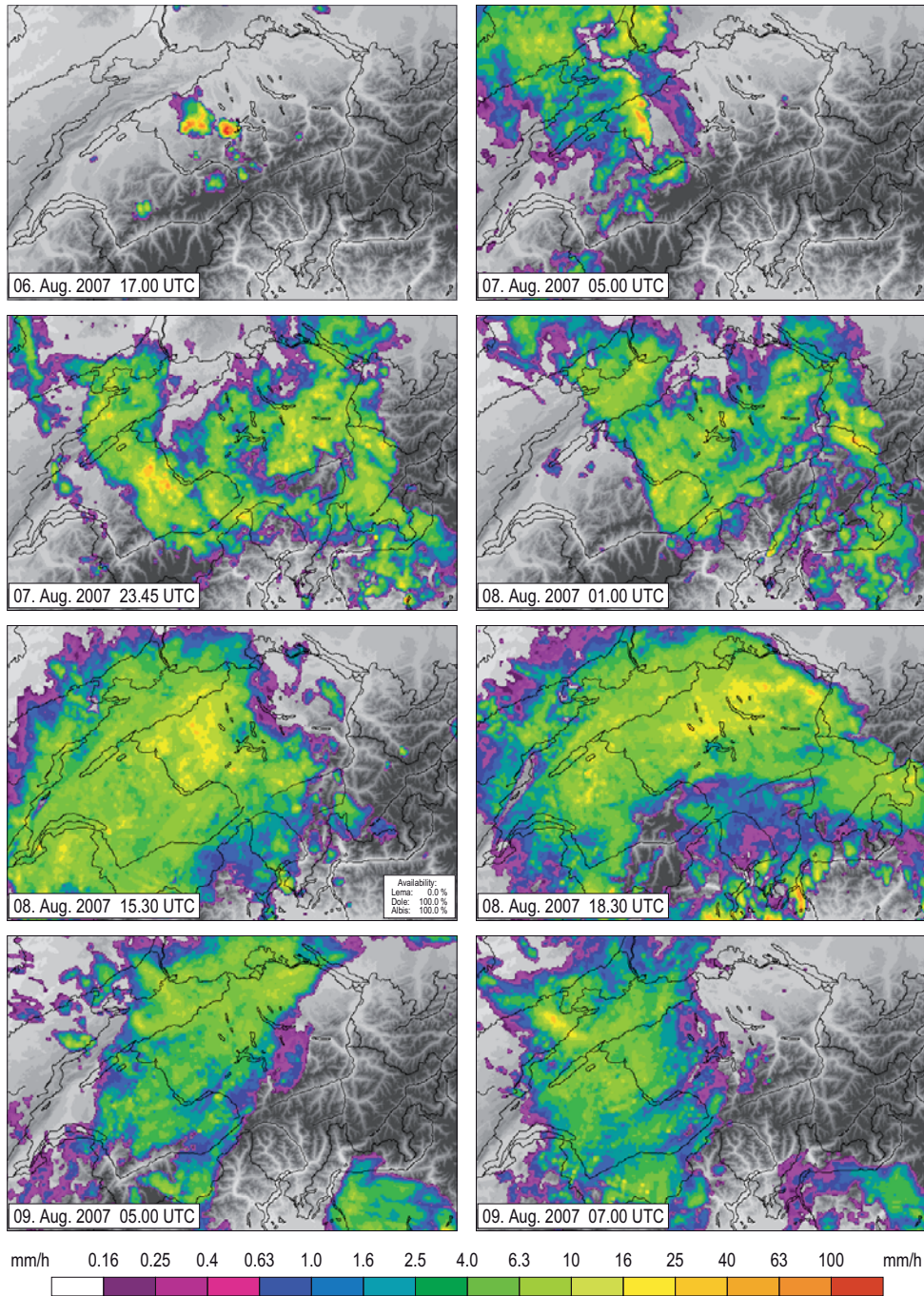
**Abb. 2.2 > Niederschlagsverlauf an diversen SMN-Stationen vom 6.8.2007 bis 9.8.2007**

*Zeitlicher Niederschlagsverlauf. Gemessene Stundensummen vom 6.8.07, 15 UTC bis 9.8.07, 15 UTC der Stationen Napf, Bern, Basel, Interlaken, Altdorf, Luzern, Zürich und St. Gallen. Augenfällig sind bei den Stationen Napf und Bern die ersten starken Gewitter am 6.8. Bei den weiter östlich gelegenen Stationen sind die 2 Phasen am 7.8 und 8.8. jeweils gegen Abend gut sichtbar.*

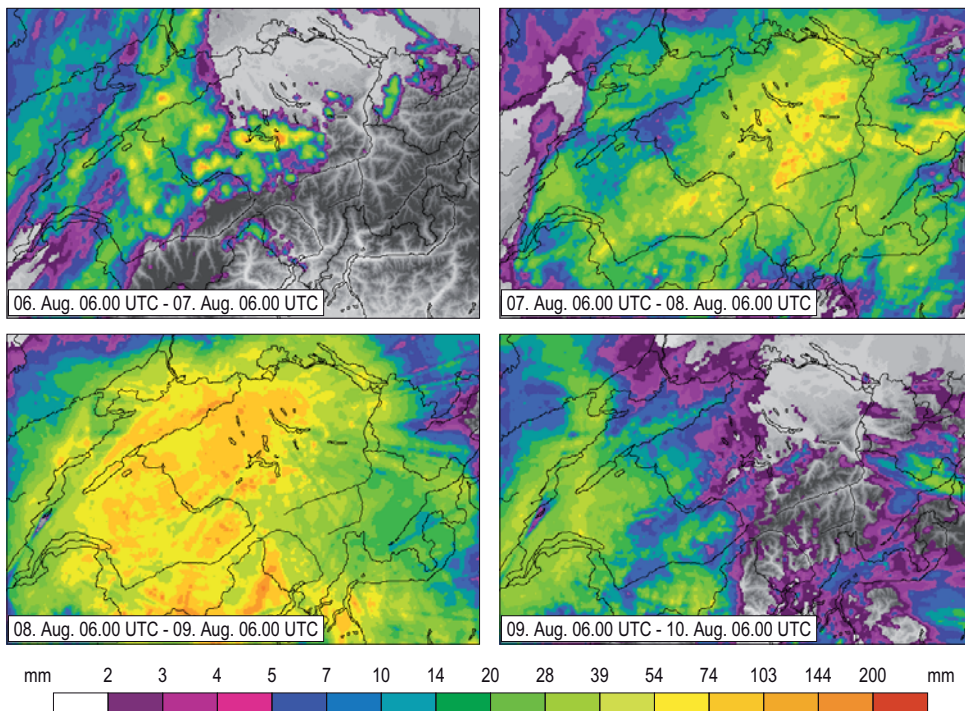


**Abb. 2.3 > Niederschlagsablauf vom 6. bis 9. August 2007**

*Niederschlagsintensität (mm pro Stunde) aus dem Schweizer Radarnetz für ausgewählte Zeitpunkte.*



**Abb. 2.4 > Tägliche Niederschlagssumme aus der Radaranalyse (berechnet jeden Tag um 06:00 UTC), 6.–9. August 2007**



In einer ersten Phase entwickelte sich am Nachmittag des 6. August im Jura ein kompakter Gewitter-Komplex, der anschliessend über das Napfgebiet in die Innerschweiz und die Glarner Alpen zog. In der Nacht auf den 7. August zogen weitere Gewitter schnell über die westlichen Landesteile (Abb. 2.3). Diese erreichten vor allem im Jura und im westlichen Mittelland höhere Intensitäten. Insgesamt sind in dieser Phase in Teilen der Westschweiz sowie in der Innerschweiz 10–35 mm Regen gefallen (siehe Abb. 2.5 für die aus Bodenmessungen und Abb. 2.4 für die aus Radarmessungen berechnete Summe).

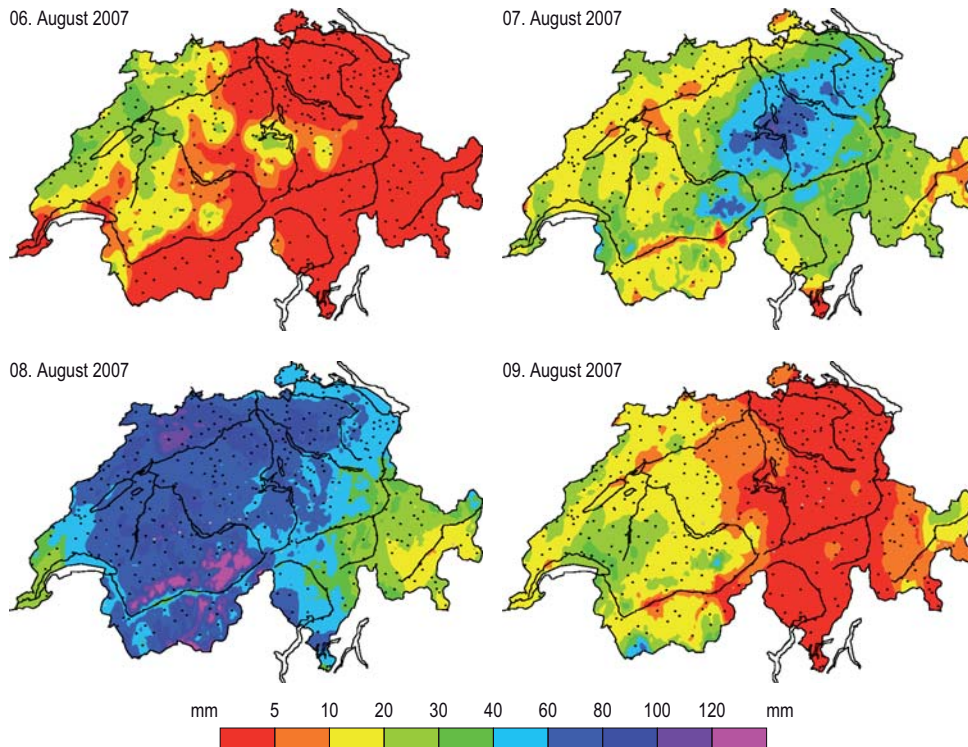
6. August

Im Laufe des 7. August fiel auf der Alpennordseite und teilweise in den Alpen weiterhin Regen, dieser erreichte aber kaum bemerkenswerte Intensitäten. Erst am Abend (Beginn ca. 20:30 UTC) wurde die Schweiz von einem grossflächigen Niederschlags-system erfasst, welches vor allem in den zentralen und östlichen Voralpen anhaltend intensiven Regen brachte (Ende ca. 06:30 UTC am 8. August; siehe Abb. 2.3). Während dieser zweiten Phase sind vom Entlebuch / Vierwaldstättersee bis zum Zürichsee verbreitet mehr als 60 mm Regen gefallen (Abb. 2.4 und 2.5). Lokal wurden sogar Werte von mehr als 80 mm gemessen (Stationen Zugerberg, Gersau und Küsnacht am Rigi).

7. August

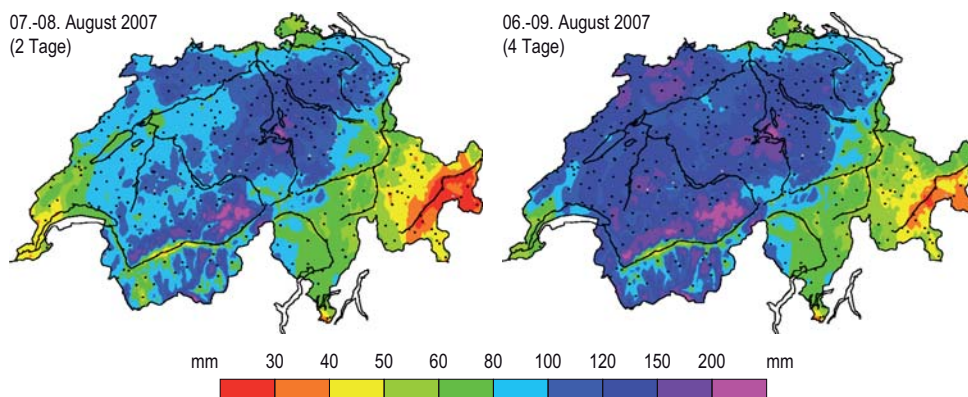
**Abb. 2.5 > Tägliche Niederschlagssummen vom 6.–9. August 2007, jeweils für den Zeitraum von 06:00 bis 06:00 UTC am Folgetag**

*Punkte: In der räumlichen Analyse berücksichtigte Niederschlagsstationen der MeteoSchweiz (schwarz) und des SLF (IMIS, grau).*



**Abb. 2.6 > Mehrtages-Niederschlagssummen**

*Links: 48-Stunden Summe 7.–9. August 06–06 UTC. Rechts: 96-Stunden Summe 6.–10. August 06–06 UTC. Die Farbskala unterscheidet sich von derjenigen in den Abb. 2.3, 2.4 und 2.5.*



Das eigentliche Hauptereignis setzte am frühen Nachmittag des 8. August ein. Von Süden her, über das Wallis und die Berner Alpen, breiteten sich schnell grossflächige intensive Niederschläge aus. Diese erreichten zuerst das zentrale und westliche Mittelland, später auch die Ostschweiz. Während mehrerer Stunden fiel über der ganzen Alpennordseite, sowie in den Berner und Walliser Alpen grossflächiger Dauerregen mit Intensitäten von 10 mm pro Stunde und mehr (Abb. 2.3). Am späten Abend liess der Regen vorübergehend an Intensität nach, bis am Morgen des 9. August schliesslich eine letzte Welle intensiver Regenfälle von Ost nach West über die Alpennordseite zog (Abb. 2.3). Bis zum Mittag nahm der Regen auch in der Westschweiz ein Ende.

8./9. August

Während des Hauptereignisses sind auf der gesamten Alpennordseite sowie in den westlichen und zentralen Alpen 60–100 mm Niederschlag gefallen (8. August, 2.5). An einigen Stationen wurde die 100 mm-Marke auch überschritten (Grand St. Bernhard (VS): 119 mm, Mervelier (JU): 104 mm, Eptingen (SO): 104 mm, Nesselboden (SO): 103 mm, Barmelweid (AG): 100 mm). Nördlich des Alpenhauptkamms waren vor allem der östliche Teil des Juras, die Freiburger und Berner Voralpen sowie die Kantone Aargau und Zürich betroffen. Grosse Niederschlagsmengen dürften gemäss Analyse aber auch in den Hochalpen der Kantone Bern und Wallis gefallen sein. (Werte von mehr als 120 mm wurden zwar an keiner Station gemessen. Die hohen Schätzungen beruhen auf der Berücksichtigung der Topographie in der räumlichen Analyse.) In diesen Höhenlagen sind die Niederschläge aber primär als Schnee gefallen und deshalb nicht direkt zum Abfluss gekommen.

2.4

## Niederschlagssummen

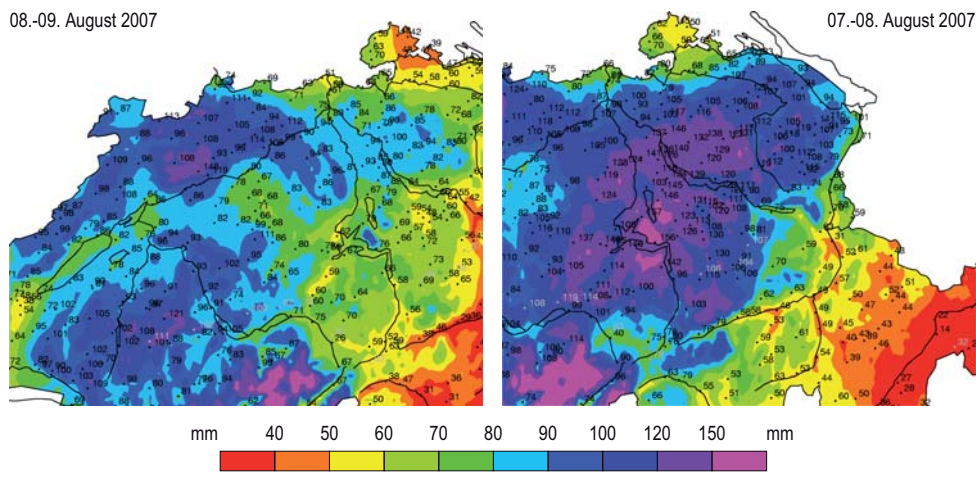
Die Wetterereignisse von Anfang August 2007 haben der ganzen Schweiz – mit Ausnahme vom Engadin – erhebliche Niederschlagsmengen gebracht. In der intensivsten Phase 7./8. August (48 Stunden, Abb. 2.6 und 2.7) sind in der Zentral- und Ostschweiz, sowie in der Nordwestschweiz mehr als 120 mm Regen gefallen. Lokal wurden sogar Werte über 150 mm gemessen (Küsnacht am Rigi: 157 mm, Gersau: 156 mm). Die in 2.5 und 2.6 dargestellten hohen Niederschlagssummen in den hochalpinen Gebieten der Berner und Walliser Alpen sind nicht explizit durch Stations-Messungen nachgewiesen, sie beruhen auf einer Extrapolation von Messungen in tieferen Meereshöhen. Zudem zeigen die Radaranalysen in der Abb. 2.4 ähnlich hohe Werte.

Niederschlagsmengen

Zählt man die Gewitter vom 6. August sowie den Ausklang am Morgen des 9. August zum Ereignis dazu (4-Tages Summe, Abb. 2.6, rechts, 2-Tages Summe, Abb. 2.7, links), wurden im westlichen Mittelland (Einzugsgebiete der Saane und der Aare sowie im Jura) Niederschlagssummen erreicht, welche mit den hohen 2-Tageswerten in der Zentralschweiz und im Kanton Zürich vergleichbar sind. An 6 Stationen wurden Werte von mehr als 160 mm gemessen (Stans (NW): 176 mm, Küsnacht am Rigi (SZ): 170 mm, Gersau (SZ): 170 mm, Isenthal (UR): 169 mm, Eigenthal (LU): 168 mm, Kurzeneialp (BE): 165 mm).

**Abb. 2.7 > 2-Tages-Niederschlagssummen**

Niederschlagssummen mit gemessenen Stationswerten. Jeweils die grösste 2-Tages Summe für die Westschweiz (links, 8.–9. August) und die Ostschweiz (rechts, 7.–8. August). Schwarz: Stationen der MeteoSchweiz, Grau: berücksichtigte IMIS-Stationen. (Die Farbskala unterscheidet sich von derjenigen in den 2.5 und 2.6.)



Im Vergleich zu anderen Starkniederschlägen der jüngeren Vergangenheit zeichnet sich das Ereignis vom August 2007 durch eine ausgesprochen gleichmässige Niederschlagsverteilung aus (Abb. 2.6 und 2.7). Die Messwerte in der näheren Umgebung einer Station variieren in der Regel um weniger als 10%. (Ausnahmen können durch topographische Expositionen erklärt werden.) Im August 2005 wurden massiv grössere Variationen auf kleinen Raumskalen beobachtet (Rotach et al. 2007; MeteoSchweiz 2006).

Synoptische Beurteilung  
Niederschlag

Dennoch sind Vorgeschichte, Entwicklung und Wetterlage beider Ereignisse vergleichbar. Es sind kräftige Höhentiefs, welche auf einer Zugbahn von den Britischen Inseln über Frankreich, Oberitalien und die Adria und dann weiter nach Nordosten ziehen.

Im Vorfeld wird aus Südwesten feuchtwarme Subtropenluft, die ein hohes Feuchte- und Niederschlagspotential hat, in unsere Breiten geführt. In ihr werden die ersten kräftigen Gewitter mit lokal hohen Niederschlagsmengen initialisiert (vgl. Abb. 2.1).

Mit der Drehung des Höhenwindes auf S bis SE wird die Luftmasse im Alpenraum blockiert. Es folgt das erste Hauptniederschlagsereignis (vgl. Abb. 2.1 und 2.2).

Nach dem Einsickern der Kaltluft im Mittelland folgt in der Höhe aus SE das Aufgleiten der feuchtwarmen Mittelmeerluft, welche das zweite Starkniederschlagsereignis bewirkt. In der abschliessenden Nordstauphase klingen die Regenmengen ab.

Hohe Temperaturen und entsprechend eine hohe Schneefallgrenze im Vorfeld des Hauptniederschlagsereignisses führen zu hohen Abflüssen aus den Alpen. Zusätzlich führt eine hohe Nullgradgrenze zu einer starken Schnee- und Gletscherschmelze.

Temperatur

Generell werden die Wetterlage und die Entwicklung von den numerischen Modellen gut erfasst. Erfahrungsgemäss haben diese Modelle allerdings die Tendenz, die Tiefdruckgebiete etwas zu schnell wandern zu lassen. Damit wird das vorhergesagte Niederschlagsereignis gekürzt.

Modellgüte

Zudem treten von Modellauf zu Modellauf oft nur kleinräumige Unterschiede auf, was die Vorhersage von Extremereignissen stark erschwert. So waren beispielsweise im Frühjahr 2009 bei der Lage des tatsächlichen Niederschlagsereignisses nur wenige Dutzend Kilometer entscheidend, dass in Österreich erneut Hochwasser auftraten, während unser Land davon verschont blieb.

Dies gibt vielleicht auch einen Hinweis auf die Eintretenswahrscheinlichkeit solcher Extremwetterereignisse. Verschiedene interne klimatologische Untersuchungen zeigen, dass die sogenannten Singularitäten (jährlich regelmässig auftretende Wetterphasen) in den letzten Jahrzehnten geändert haben. So sind etwa die «Eisheiligen» oder die «Schafskälte» weitgehend ausgeblieben. Dafür hat sich regelmässig in der ersten Junihälfte eine Phase mit unbeständiger Witterung eingestellt.

Eintretenswahrscheinlichkeit

## 2.5 Klimatologische Einordnung des Ereignisses

Angesichts der beträchtlichen Mengen an Niederschlag, welche in weiten Teilen der Schweiz gefallen sind, stellt sich die Frage, wie häufig solche Werte auftreten. Durch den Vergleich mit vergangenen Beobachtungen bei den Stationen können mit statistischen Methoden Wiederkehrperioden bzw. Jährlichkeiten und deren Unsicherheit abgeschätzt werden.

Gemessene  
Niederschlagsmengen

### 2.5.1 Methode

Um die Jährlichkeit des Ereignisses zu schätzen, wird für diesen Bericht die Extremwertstatistik angewendet (Coles 2001). Dazu wird die verallgemeinerte Extremwertverteilung an die jährlichen Maxima von Niederschlagssummen über eine bestimmte Zeitperiode (z. B. ein Tag oder vier Tage) angepasst. Die Güte der Schätzung (Goodness-of-Fit, GOF) wird mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test mittels eines parametrischen Randomisierungsverfahren überprüft (Stephens 1970). Bei 92 % der Stationen sind die Daten mit der verallgemeinerten Extremwertverteilung kompatibel. Für die Flächenanalyse wurden alle Stationen berücksichtigt, da die 8 % der Stationen, die der Verteilung weniger gut entsprechen, keinen Einfluss auf die Interpretation der Resultate haben.

Extremwertstatistik

Aus der Extremwertverteilung können Jährlichkeiten von gewählten Niederschlagsmengen berechnet werden. Um das Ereignis räumlich einzuordnen, werden die Wiederkehrperioden zu den beim Ereignis im August 2007 an jeder Station gemessenen Niederschlagsmengen auf einer Karte der Schweiz dargestellt. Es werden qualitätsgeprüfte Daten aus den Niederschlagsstationen verwendet. Für die räumliche Darstellung werden Stationen gewählt mit Beobachtungsreihen von mindestens 40 Jahren seit 1961. Für die Extremwertanalyse an einzelnen Stationen werden – wo dies möglich ist – Beobachtungsreihen ab 1900 verwendet. Angegebene Rekorde sind seit Messbeginn der jeweiligen Station.

Räumliche Einordnung

### 2.5.2 Analyse der Tagesniederschläge

**Abb. 2.8 > Geschätzte Jährlichkeit der 1-Tages-Niederschlagssummen am 6., 7., 8. und 9. August 2007 an den Stationen mit mindestens 40 Jahre langen Beobachtungsreihen seit 1961**

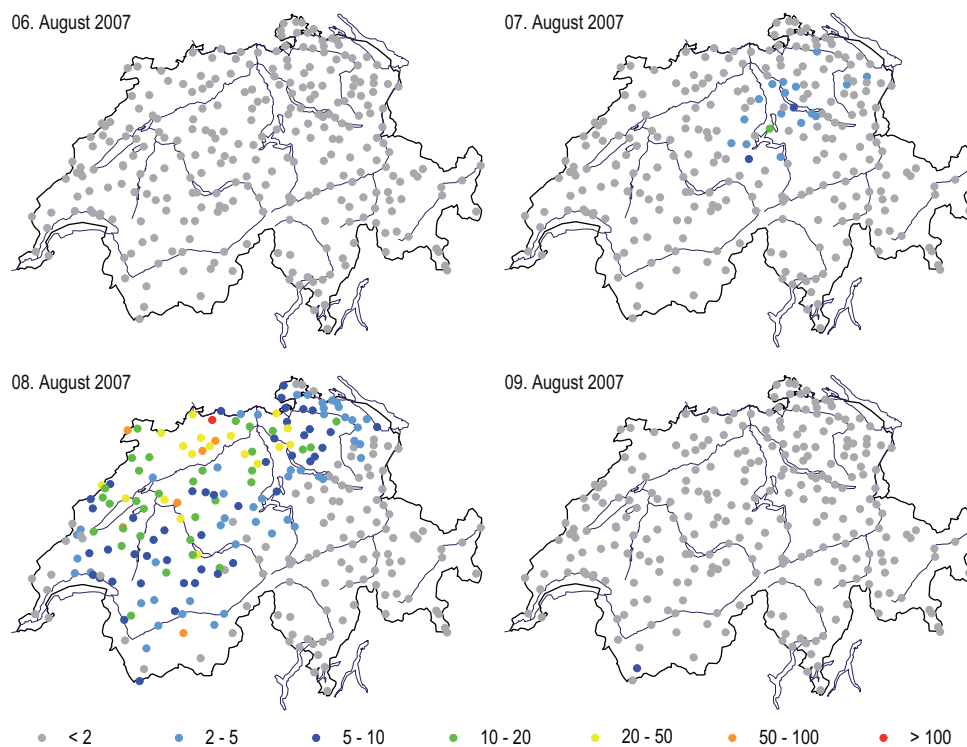


Abb. 2.8 zeigt die Jährlichkeit des 1-Tages-Niederschlags für jeden einzelnen Tag des Ereignisses. Die Niederschlagssummen der Gewitter vom 6. August und in der Nacht zum 7. August im Jura und im westlichen Mittelland haben eine Jährlichkeit von unter 2 Jahren. Auch am 9. August beim Abklingen des Ereignisses sind die Niederschlagsmengen statistisch gesehen nicht ungewöhnlich. Im südöstlichen Teil der Schweiz bleibt die Jährlichkeit während des ganzen Ereignisses unverändert tief. Dies ist angesichts der Häufigkeit von Starkniederschlägen auf der Alpensüdseite keine Überraschung (MeteoSchweiz 2004).

Jährlichkeiten

Der intensive Regen in den zentralen und östlichen Voralpen am 7. August ist klar erkennbar, erreicht aber kaum eine Jährlichkeit von 10–20 Jahren, da es sich um eine Region handelt, die relativ oft von starkem Niederschlag betroffen ist.

7. August

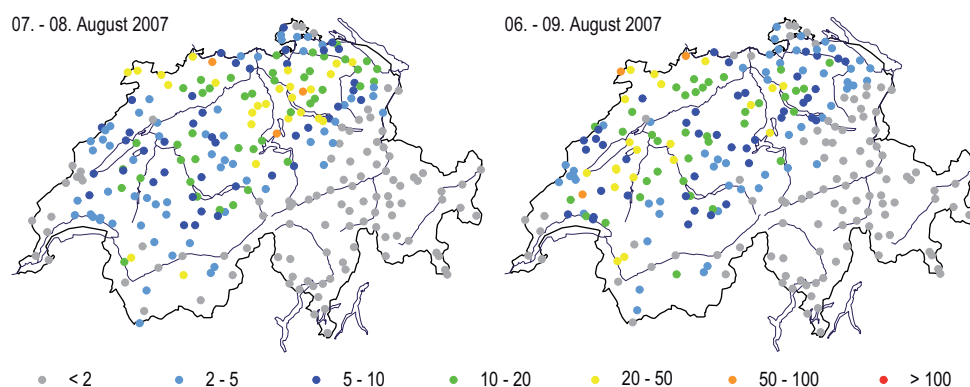
Während des Hauptereignisses am 8. August sind die Regionen mit intensivem Niederschlag sehr gut sichtbar. Die grössten Jährlichkeiten von 20 bis 100 Jahren zeigt die Nordwestschweiz. Neue 1-Tages-Niederschlagsrekorde für den Monat August werden an den Stationen Mervelier (JU), Reigoldswil (SO) und Basel gemessen. In Fahy (JU), Löwenburg (JU), Arisdorf (SO), Barmelweid (AG), Eptingen (SO), Balsthal (SO) und Nesselboden (SO) wurden sogar Jahresrekorde verzeichnet.

8. August

Entlang der Aare im westlichen Mittelland erreichten mehrere Stationen eine Jährlichkeit zwischen 20 und 50 Jahren. Trotz der relativ tiefen Werte in Bern und Belp (81 bzw. 78 mm) sind diese beiden Messungen August Monatsrekorde. Auch einige Stationen in den Kantonen Zürich und Aargau zeigten eine Wiederkehrperiode von 20–50 Jahren mit August Monatsrekorden in Zürich-Fluntern, Zürich-Kloten, Unterkulm (AG) und Aesch (BL). Die Bergstation Grimentz im Wallis hat eine Jährlichkeit zwischen 50 und 100 Jahren. Mit 84 mm wurde ein neuer Jahresrekord verzeichnet.

### 2.5.3 2- und 4-Tagesniederschlag

**Abb. 2.9** > Geschätzte Jährlichkeit der 2- und 4-Tages-Niederschlagssumme vom 7. zum 8., respektive vom 6. zum 9. August 2007 an den Stationen mit mindestens 40 Jahre langen Beobachtungsreihen seit 1961



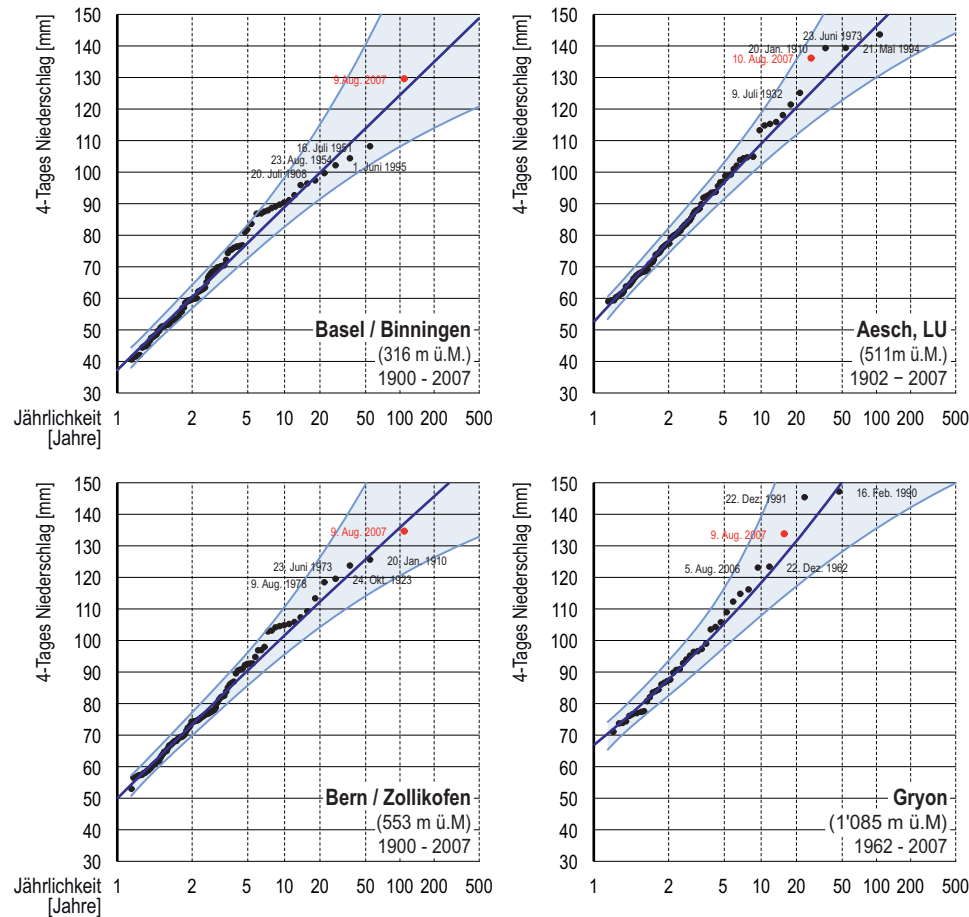
Die Jährlichkeitskarte der 2- und 4-Tages-Niederschlagssumme (resp. 7.–8. und 6.–9. August) zeigt, dass das Ereignis generell nicht ausserordentlich war (Abb. 2.9). Für den grössten Teil der Stationen wird kaum eine Jährlichkeit von 20 erreicht. Allerdings sind die betroffenen Regionen durch Stationen mit Jährlichkeiten über 20 Jahren klar gekennzeichnet. Bei vielen dieser Stationen wird mit diesem Niederschlagsereignis ein neuer August-Rekord für 4-Tages-Niederschlagssummen gesetzt. Für die meisten Stationen, besonders im Jura und in den Berner Alpen liegen die Niederschlagsmaxima über vier Tage aber im Herbst oder im Winter, so dass das Ereignis stark relativiert wird. Werden nur die Sommermonate Juni bis August in der Extremwertanalyse be-

Ganzes Ereignis

rücksichtigt, dann weisen diese Stationen bedeutend höhere Jährlichkeiten auf (nicht gezeigt). Weder das Teilereignis vom 7.–8. noch das gesamte Ereignis vom 6.–9. August 2007 zeigen jedoch die regional klar ausdifferenzierte Struktur und hohe Jährlichkeiten, welche das Ereignis vom 21.–22. August 2005 aufwies (Rotach et al. 2007; MeteoSchweiz 2006).

**Abb. 2.10** > Extremwert-Diagramme für die Stationen Basel-Binningen, Aesch, Bern-Zollikofen, Gryon; Beziehung zwischen 4-Tages Niederschlagssumme und Jährlichkeit

Beste Schätzung der verallgemeinerten Extremwertverteilung (dicke blaue Linie) und 90 %-Konfidenzintervalle (dünne Linien). Die Punkte zeigen die beobachteten Jahresmaximalwerte, die 5 stärksten Ereignisse sind mit dem Datum versehen. Der Goodness-of-Fit Test zeigte, dass die Daten dieser Stationen mit der verallgemeinerten Extremwertverteilung kompatibel sind.



Detaillierte Analysen wurden für eine Auswahl von Stationen aus den Hauptgebieten des Ereignisses durchgeführt. Abb. 2.10 zeigt die Niederschlagsmenge als Funktion der Wiederkehrperiode für den 4-Tages-Niederschlag in Basel-Binningen (BL), Aesch (LU), Bern-Zollikofen (BE) und Gryon (VD). Auf den Abbildungen wird die beste Schätzung der Extremwertverteilung mit den 90 %-Konfidenzintervallen gezeigt. Kürzere Datenbestände haben breitere Konfidenzintervalle, so dass die statistisch gesehen mögliche Wiederkehrperioden zu einem bestimmten Ereignis eine grössere Spannweite aufweisen (siehe z. B. Gryon). In allen Fällen ist das Ereignis vom August 2007 unter den fünf stärksten Ereignissen.

Das Ereignis im August 2007 entspricht in Basel für das 90 %-Konfidenzintervall einer möglichen Jährlichkeit zwischen 30 und mehr als 1000 Jahren, in Bern zwischen 30 und etwa 500 Jahren. Die relativ tiefe Wiederkehrperiode für die Station Aesch, zwischen 20 und 200 Jahren, kann dadurch erklärt werden, dass intensive 4-Tages-Niederschlagsereignisse in der Zentralschweiz recht häufig sind. In Gryon erreicht die Jährlichkeit nur 10 bis 100 Jahre.

## 2.6 Modellvorhersagen

Die Niederschlagsvorhersagen des operationellen, deterministischen numerischen Wettervorhersagemodells COSMO (COntortium for Small-Scale MOdelling), sowie des probabilistischen COSMO-LEPS (Limited area Ensemble Predicted System) Ensemblevorhersagesystems sind Teil der Vorhersageinformationen für die Prognostiker der MeteSchweiz. Sie werden ausserdem vom BAFU als Inputdaten für das hydrologische Vorhersagemodell genutzt.

Nachfolgend werden die deterministischen Modellvorhersagen für den 8.8. und 9.8.2007 analysiert. Auf das Gitter des deterministischen COSMO-Modells interpolierte Niederschlagsanalysen aus den Bodenmessstationen (siehe Kap. 2.3) erlauben einen flächigen Vergleich Modell-Beobachtung. Im folgenden Abschnitt werden die COSMO-LEPS Ensemble-Vorhersagen für die Periode vom 7.8. bis und mit 8.8.2007, in welcher der Hauptteil des Niederschlags auftrat, analysiert.

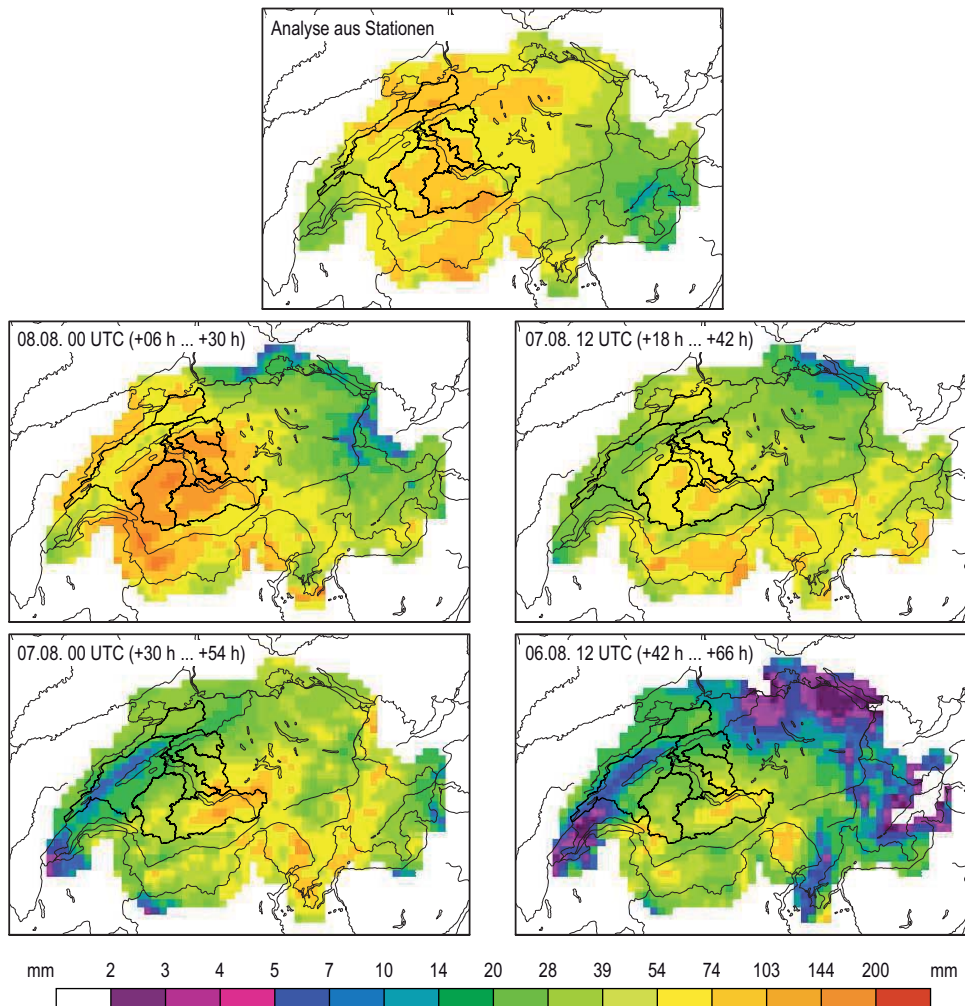
### 2.6.1 Deterministische COSMO-Vorhersagen

Das operationelle COSMO-7 Modell berechnet Vorhersagen für ein Vorhersagegebiet, das West- und Mitteleuropa umfasst, und verwendet eine horizontale Gitterweite von 7 km und 45 geländefolgende Flächen (horizontal übereinander liegende Flächen, die der Erdoberfläche folgen). Zweimal täglich, um 00 UTC und 12 UTC werden Vorhersagen bis +72 h berechnet. Als Antrieb dienen Vorhersagen des globalen Modells des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage ECMWF.

Während MAP D-PHASE (siehe Anhang A1) wurde das neue, hochaufgelöste COSMO-2 (Gitterweite von 2 km) präoperationell betrieben. COSMO-2 berechnete acht Mal pro Tag Vorhersagen bis +24 h für ein Gebiet, das den Alpenbogen abdeckt. Es verwendete ein Rechengitter mit 2.2 km Gitterweite und 60 geländefolgende Flächen.

**Abb. 2.11 > Deterministische, operationelle COSMO-7 Niederschlagsvorhersage für den 8.8.2007**

Dargestellt sind Niederschlags-Tagessummen vom 8.8. 06UTC bis 9.8. 06UTC aus der Stationsanalyse (gleiche Daten wie in Abb. 2.5, interpoliert auf das Rechengitter von COSMO-7) und den vier operationellen COSMO-7 Vorhersagen vom 8.8. 00UTC, 7.8. 12UTC, 7.8. 00UTC und 6.8. 12UTC. Die dunklen, ausgezogenen Linien bezeichnen die für spezielle Abflussanalysen ausgewählten Einzugsgebiete.



Die Abb. 2.11 zeigt die Niederschlagssummen vom 8.8.07 06 UTC bis 9.8.07 06 UTC, hergeleitet aus Stationsanalysen (gleiche Daten wie aus Abb. 2.5) und auf das COSMO-7 Gitter interpoliert, sowie die entsprechenden COSMO-7 Vorhersagen für denselben Zeitraum der Läufe vom 8.8. 00 UTC, 7.8.07 12 UTC, 7.8.07 00 UTC und 6.8.07 12 UTC. Die dunklen, ausgezogenen Linien begrenzen die vom BAFU speziell analysierten Einzugsgebiete. Das beobachtete Maximum der Niederschläge konzentrierte sich an diesem Tag auf das Berner Oberland, den zentralen und östlichen Jura, sowie die Regionen Basel, Aargau, Zürich und das Oberwallis (103–144 mm/24 h). Die COSMO-7 Vorhersagen vom 6.8.07 12 UTC und vom 7.8.07 00 UTC deuteten bereits hohe Werte über dem Berner Oberland an, in den anderen Regionen unterschätzten sie die gemessenen Niederschläge zum Teil deutlich. Die Vorhersage vom 7.8.07 12 UTC erhöhte die Niederschlagsmengen, unterschätzte sie aber immer noch deutlich. Erst die Vorhersage vom 8.8.07 00 UTC simulierte die hohen Intensitäten im Berner Oberland und im Jura annähernd richtig, teilweise überschätzte es die Regenmengen sogar. In den östlichen Landesteilen blieb die Unterschätzung aber bestehen.

COSMO-7-Vorhersagen  
für den 8.8.2007

**Tab. 2.1 > Niederschlags-Gebietsmittel in mm (Tagessummen von 06 UTC bis 06 UTC vom Folgetag) in für spezielle Abflussanalysen ausgewählten Einzugsgebieten**

*Die Berechnungen wurden jeweils für die in den Abbildungen umrissenen Teileinzugsgebiete durchgeführt.*

Datum	Datenquelle	Aare-Thun	Saane	Aare-Hagneck	Aare-Brügg	Emme	Aare-Murgenthal	Birs
08.08.	Analyse aus Stationen auf COSMO-7 Gitter	78.1	77.9	80.3	66.4	73.9	75.1	92.4
	COSMO-7 vom 08.08 00UTC (+ 06h bis + 30h)	100.5	120.0	106.9	74.9	105.2	86.4	71.5
	COSMO-7 vom 07.08 12UTC (+ 18h bis + 42h)	60.6	66.5	66.2	33.4	61.0	45.8	53.1
	COSMO-7 vom 07.08 00UTC (+ 30h bis + 54h)	75.0	37.5	34.6	15.0	49.9	26.2	29.5
	COSMO-7 vom 06.08 12UTC (+ 42h bis + 66h)	54.5	37.9	28.2	13.8	37.3	18.2	18.8
	Analyse aus Stationen auf COSMO-2 Gitter	77.2	77.6	79.3	65.8	74.1	73.8	94.3
	COSMO-2 vom 08.08 06UTC (+ 00h bis + 24h)	102.1	95.7	84.1	65.4	88.4	73.1	88.0
09.08.	Analyse aus Stationen auf COSMO-7 Gitter	14.4	21.7	15.1	17.6	14.7	13.2	14.5
	COSMO-7 vom 09.08 00UTC (+ 06h bis + 30h)	26.4	25.5	14.2	23.8	16.5	9.4	13.4
	COSMO-7 vom 08.08 12UTC (+ 18h bis + 42h)	18.3	24.6	15.4	20.8	14.9	12.4	12.5
	COSMO-7 vom 08.08 00UTC (+ 30h bis + 54h)	28.8	46.8	37.7	25.2	32.1	23.9	15.3
	COSMO-7 vom 07.08 12UTC (+ 42h bis + 66h)	16.4	11.4	14.0	6.0	16.7	12.7	8.8
	Analyse aus Stationen auf COSMO-2 Gitter	14.3	21.9	14.5	17.8	15.2	13.2	14.5
	COSMO-2 vom 09.08 06UTC (+ 00h bis + 24h)	14.9	18.3	10.6	15.7	8.9	7.8	9.0

In Tab. 2.1 sind die Tagessummen des mittleren Gebietsniederschlags für den 8.8. über die für spezielle Abflussanalysen ausgewählten Einzugsgebiete, aufgelistet. Für das Teileinzugsgebiet Aare-Murgenthal nahm die Niederschlagsvorhersage von 18.2 mm/24 h (Vorhersage vom 6.8.07 12 UTC) auf 86.4 mm/24 h (Vorhersage vom 8.8.07 00 UTC) zu. Dies entspricht einer Unterschätzung von 75 %, bzw. einer Überschätzung von 15 %. Für das Einzugsgebiet Emme nahm die Niederschlagsvorhersage von 37.3 mm/24 h (Vorhersage vom 6.8.07 12 UTC) auf 105.2 mm/24 h (Vorhersage vom 8.8.07 00 UTC) zu. Dies entspricht einer Unterschätzung von 50 % bzw. einer Überschätzung von 42 %.

Die Abb. 2.12 zeigt die Niederschlagssumme vom 8.8.07 06 UTC bis 9.8.07 06 UTC, hergeleitet aus Stationsanalysen (gleiche Daten wie Abb. 2.4) und auf das COSMO-2 Gitter interpoliert, sowie die entsprechenden COSMO-2 Vorhersagen vom 8.8.07 06 UTC. Die COSMO-2 Niederschlagsverteilung entspricht in etwa der COSMO-7 Vorhersage vom 8.8.07 00 UTC. Die hohen Intensitäten in der Zentralschweiz wurden dabei leicht besser vorhergesagt als von COSMO-7. Die Unterschätzung im östlichen Mittelland war etwas weniger ausgeprägt, jedoch immer noch deutlich. Insgesamt wurden die Intensitäten aber von COSMO-2 besser vorhergesagt, als von COSMO-7. Dies wird in Tab. 2.1 anhand der mittleren Niederschläge für alle Einzugsgebiete gezeigt. Während COSMO-7 (Vorhersage vom 8.8.07 00 UTC) die Intensität für das Einzugsgebiet Aare-Murgenthal (Emme) um 15 % (42 %) überschätzte, betrug die Abweichung in COSMO-2 nur -1 % (19 %).

COSMO-2-Vorhersage  
für den 8.8.2007

**Abb. 2.12 > Deterministische COSMO-2 Niederschlagsvorhersage für den 8.8.2007**

Dargestellt sind Niederschlags-Tagessummen vom 8.8. 06 UTC bis 9.8.07 06 UTC aus der Stationsanalyse (links, gleiche Daten wie in Abb. 2.5, interpoliert auf das Rechengitter von COSMO-2) und der COSMO-2 Vorhersage vom 8.8.07 06 UTC (rechts). Die dunklen, ausgezogenen Linien bezeichnen die für spezielle Abflussanalysen ausgewählten Einzugsgebiete.

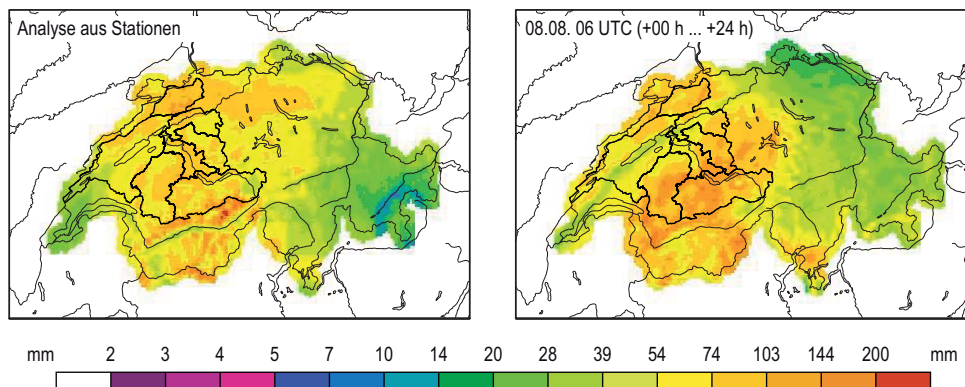
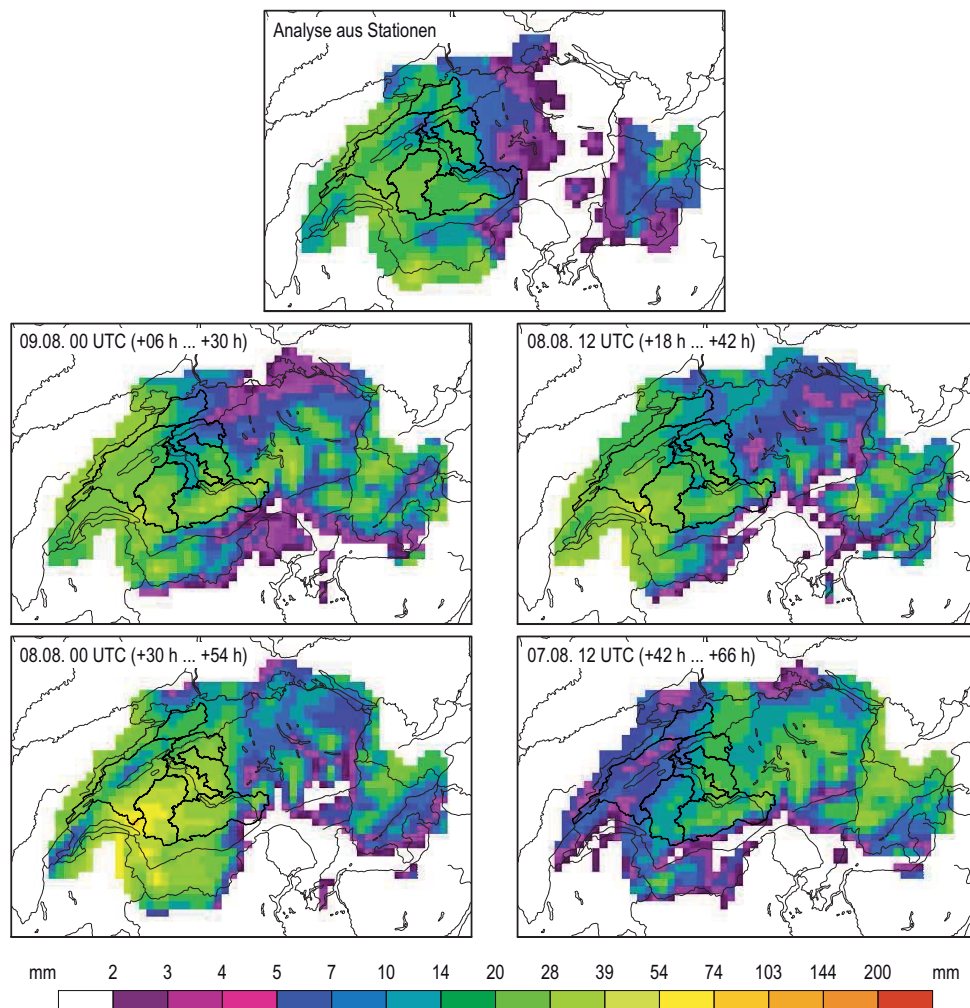


Abb. 2.13 zeigt die Niederschlagssumme vom 9.8.07 06 UTC bis 10.8.07 06 UTC, hergeleitet aus Stationsanalysen und auf das COSMO-7 Gitter interpoliert, sowie die entsprechenden COSMO-7 Vorhersagen vom 9.8. 00 UTC, 8.8.07 12 UTC, 8.8.07 00 UTC und 7.8.07 12 UTC. Das beobachtete Maximum der Niederschläge konzentrierte sich an diesem Tag auf die Westschweiz und den Kanton Bern, die Intensitäten waren aber deutlich geringer als am Vortag (28–39 mm/24 h über dem östlichen Ende des Genfersees und den Berner Alpen). Die COSMO-7 Vorhersagen berechneten die Niederschlagsmaxima geographisch gesehen richtig. Auch die Intensitäten wurden von allen Läufen gut vorhergesagt, mit Ausnahme der Vorhersage vom 7.8.07 12 UTC (8.8.07 00 UTC), die die Intensitäten zum Teil mehr als ein Faktor 2 überschätzte (unterschätzte). Dies ist aus den Gebietsmitteln aus Tab. 2.1 ersichtlich.

COSMO-7-Vorhersagen  
für den 9.8.2007

**Abb. 2.13 > Deterministische, operationelle COSMO-7 Niederschlagsvorhersage für den 9.8.2007**

Dargestellt sind Niederschlags-Tagessummen vom 9.8. 06UTC bis 10.8. 06UTC aus der Stationsanalyse (gleiche Daten wie in Abb. 2.5, interpoliert auf das Rechengitter von COSMO-7) und den vier operationellen COSMO-7 Vorhersagen vom 9.8. 00UTC, 8.8. 12UTC, 8.8. 00UTC und 7.8. 12UTC. Die dunklen, ausgezogenen Linien bezeichnen die für spezielle Abflussanalysen ausgewählten Einzugsgebiete.



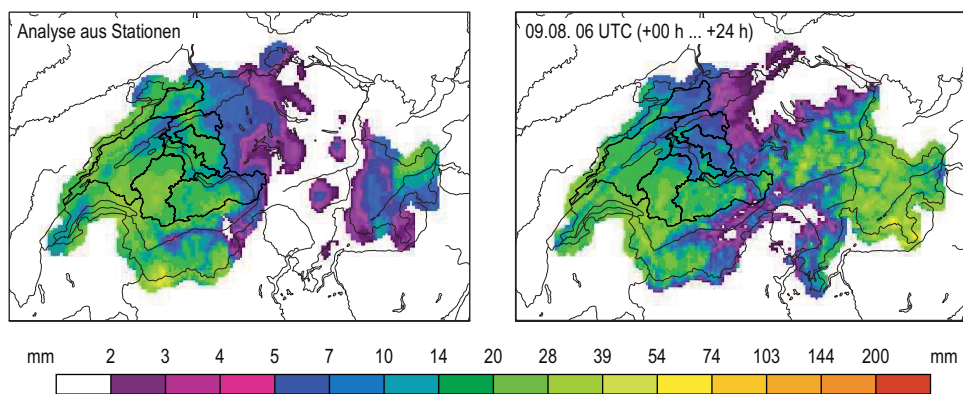
Für das Teileinzugsgebiet Aare-Murgenthal reichten die Abweichungen der Messungen von -28 % (Vorhersage vom 9.8.07 00 UTC) bis +81 % (Vorhersage vom 8.8.07 00 UTC). Für das Einzugsgebiet Emme wurden die Gebietsmittel von allen Läufen sehr gut vorhergesagt (Überschätzungen von maximal 13 %), mit Ausnahme der Vorhersage vom 8.8.07 00 UTC, die das Mittel um 118 % überschätzte.

Abb. 2.14 zeigt die Niederschlagssumme vom 9.8.07 06 UTC bis 10.8.07 06 UTC, hergeleitet aus Stationsanalysen und auf das COSMO-2 Gitter interpoliert, sowie die entsprechenden COSMO-2 Vorhersagen vom 9.8.07 06 UTC. Die COSMO-2-Niederschlagsvorhersagen waren niedriger, als diejenige der COSMO-7-Vorhersage vom 9.8.07 00 UTC. In der Ostschweiz und Westschweiz lag dies näher bei den beobachteten Werten, während im Kanton Bern die gemessenen Werte unterschätzt wurden. Im Teileinzugsgebiet Aare-Murgenthal (Emme) wurden die Intensitäten um 40% (41%) unterschätzt.

COSMO-2-Vorhersage  
für den 9.8.2007

#### Abb. 2.14 > Deterministische COSMO-2 Niederschlagsvorhersage für den 9.8.2007

Dargestellt sind Niederschlags-Tagessummen vom 9.8. 06 UTC bis 10.8.07 06 UTC aus der Stationsanalyse (links, gleiche Daten wie in Abb. 2.5, interpoliert auf das Rechengitter von COSMO-2) und der COSMO-2 Vorhersage vom 9.8.07 06 UTC (rechts). Die dunklen, ausgezogenen Linien bezeichnen die für spezielle Abflussanalysen ausgewählten Einzugsgebiete.



Zusammengefasst lässt sich sagen, dass COSMO-7 die Niederschlagsintensitäten für den 8.8.07 anfangs deutlich unterschätzt hat. Je näher die Startzeiten der Modellberechnungen ans Ereignis rückten, desto besser wurden die Vorhersagen. Dies ist ein häufiges und normales Verhalten des COSMO-Modells. Dies kann einerseits mit den verbesserten Randfeldern des EZMWF-Modells, andererseits mit den zeitlich immer näher beim Ereignis liegenden Beobachtungen, die ins Modell fließen, erklärt werden. Für den 9.8.07 war die Konsistenz zwischen den einzelnen COSMO-7 Vorhersagen höher. Mit dem präoperationellen COSMO-2-Modell wurden die Niederschläge für beide Tage insgesamt besser vorausgesagt als mit COSMO-7. Allerdings liegt die Analysezeit für COSMO-2 6 Stunden nach derjenigen der COSMO-7 Vorhersage von 00 UTC, also bereits näher am Ereignis.

Wertung Vorhersagen

## 2.6.2 Probabilistische COSMO-Vorhersagen

Das Ensemblevorhersagesystem COSMO-LEPS (Marsigli et al. 2005) rechnet täglich Vorhersagen für Zentral- und Südeuropa für die kommenden fünf Tage. Eine Ensemblevorhersage umfasst 16 Modellvorhersagen (Members) mit einer horizontalen Gitterweite von 10 km und 40 Flächen, die mit leicht unterschiedlichen Anfangsbedin-

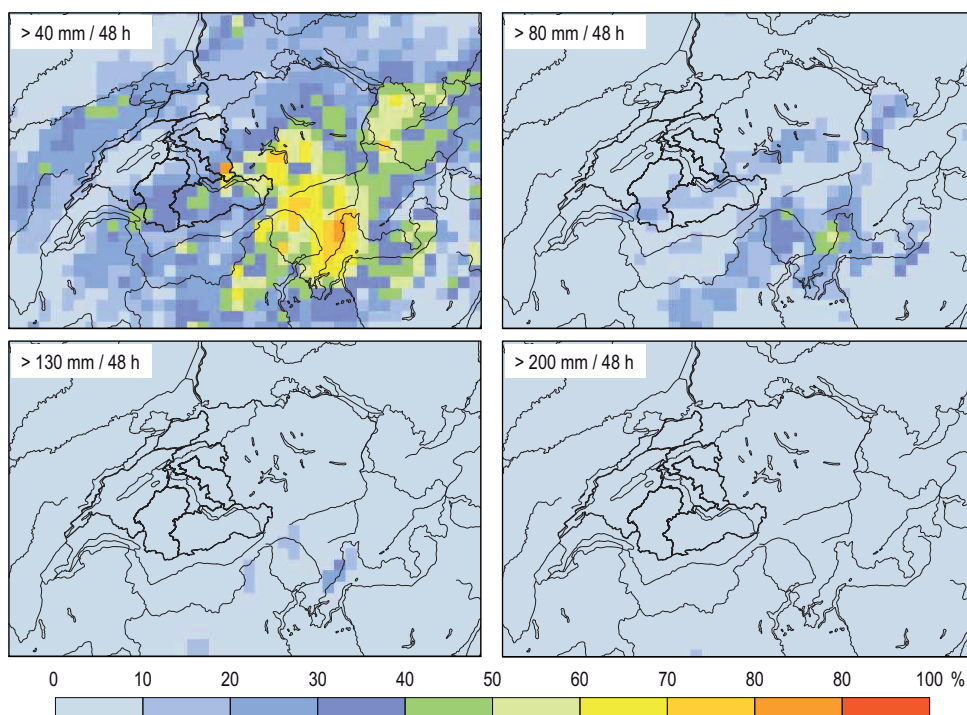
gungen gestartet werden. Sie erlaubt eine Interpretation der Prognosesicherheit einer deterministischen Vorhersage anhand der Spannweite der einzelnen Members und eine Vorhersage der Eintretenswahrscheinlichkeit für das Überschreiten von Schwellwerten. Solche Vorhersagen werden operationell erstellt und nachfolgend für das aktuelle Ereignis analysiert.

Abb. 2.15 zeigt die vorhergesagten Wahrscheinlichkeiten für mehr als 40, 80, 130 und 200 mm Niederschlag vom 7.8. bis zum 9.8.07 (jeweils immer von 06 UTC bis von 06 UTC) aus der COSMO-LEPS Vorhersage vom 5.8.07 12 UTC. Während beinahe in der gesamten Schweiz westlich einer Linie Locarno-Vaduz mehr als 80 mm Niederschlag in dieser Periode fielen und in weiten Teilen mehr als 120 mm (siehe Kap. 2.4 und Abb. 2.6, links), sind die vorhergesagten Wahrscheinlichkeiten für mehr als 80 mm Niederschlag in den meisten Regionen unter 10 %. Nur am Alpennordhang (bis ca. 30 %) und im Tessin (bis ca. 50 %), wurden höhere Wahrscheinlichkeiten vorhergesagt.

COSMO-LEPS Vorhersagen  
für 48h-Niederschlagssumme  
vom 7.8. bis 8.8.

**Abb. 2.15 > COSMO-LEPS Wahrscheinlichkeitsvorhersage vom 5.8.2007 12 UTC für 48h-Niederschlagssummen vom 7.8. 06 UTC bis 9.8. 06 UTC**

Dargestellt sind die vorhergesagten Wahrscheinlichkeiten zur Überschreitung der vier Schwellwerte 40, 80, 130 und 200 mm. Die fettgedruckten schwarzen Linien bezeichnen die für spezielle Abflussanalysen ausgewählten Einzugsgebiete.



Die nächste Vorhersage 24 h später für den gleichen Zeitraum wird in Abb. 2.16 gezeigt. Mit Wahrscheinlichkeiten bis 80 % am Alpennordrand und etwa 30 % in weiten Teilen der Schweiz für mehr als 80 mm Niederschlag sowie bis 30 % für mehr als 130 mm Niederschlag im zentralen Alpennordhang und dem Gotthardgebiet gibt diese Vorhersage vom 6.8.07 12 UTC eine Warnung für ein Starkniederschlagsereignis, wobei das Risiko für die ebenfalls betroffene Nordwest- und Nordschweiz weiterhin als sehr gering vorhergesagt wurde.

**Abb. 2.16** > COSMO-LEPS Wahrscheinlichkeitsvorhersage vom 6.8.2007 12 UTC für 48h-Niederschlagssummen vom 7.8. 06 UTC bis 9.8. 06 UTC

Dargestellt sind die vorhergesagten Wahrscheinlichkeiten zur Überschreitung der vier Schwellwerte 40, 80, 130 und 200 mm. Die fettgedruckten schwarzen Linien bezeichnen die für spezielle Abflussanalysen ausgewählten Einzugsgebiete.

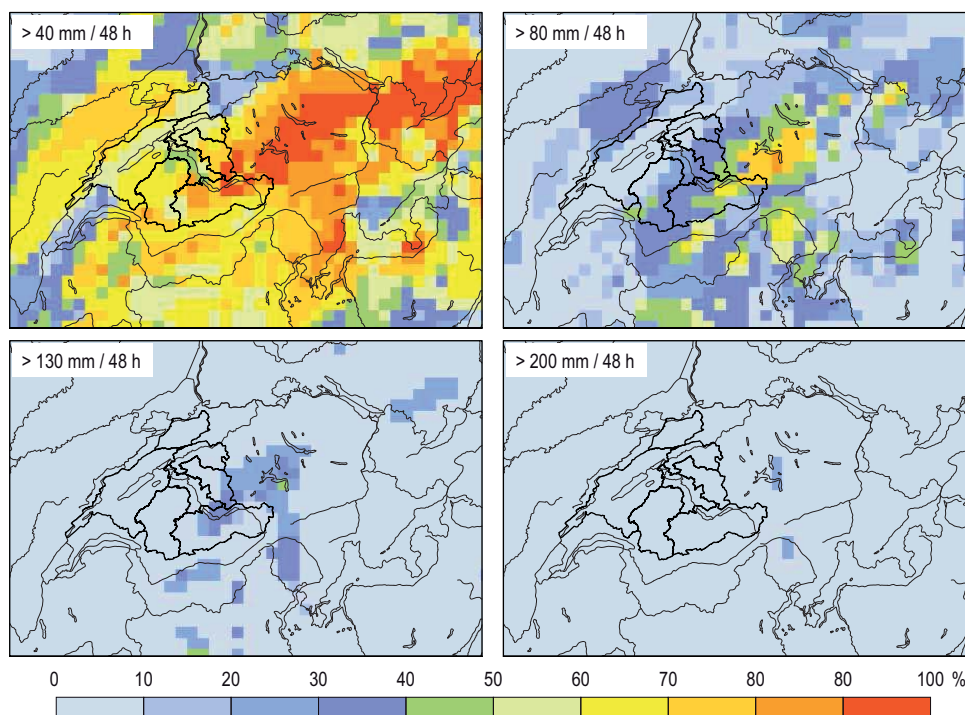
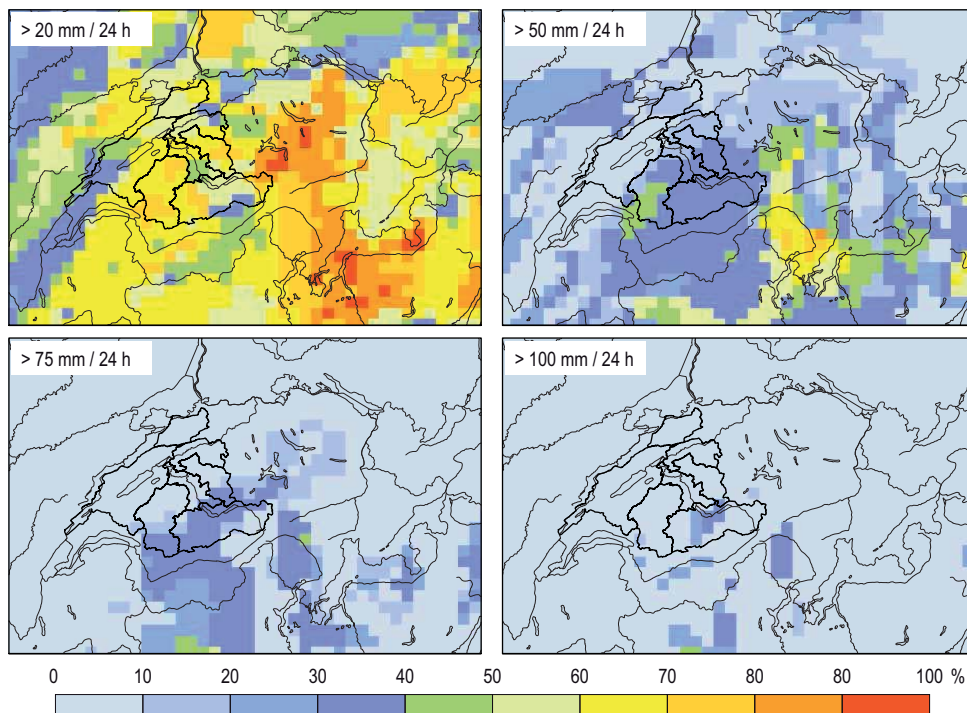


Abb. 2.17 zeigt die vorhergesagten Wahrscheinlichkeiten für mehr als 20, 50, 75 und 100 mm Niederschlag vom 8.8. 6 UTC bis 9.8. 6 UTC aus der COSMO-LEPS Vorhersage vom 6.8.07 12 UTC. In einigen Gebieten des Tessins und in weiten Teilen des Wallis, der West- und insbesondere Nordwestschweiz sowie auch in der Zentral- und Nordschweiz fielen zwischen 60 und 80 mm Niederschlag, teilweise auch mehr (siehe Abb. 2.5, unten links). Die Vorhersage zeigt vor allem für den westlichen Alpennordhang, das Wallis und das westliche Tessin Wahrscheinlichkeiten bis zu 40 % für Starkniederschläge von mehr als 75 mm Niederschlag, aber für den Jura und die Nordschweiz nur ein geringes Risiko, selbst für den 50 mm Schwellwert.

COSMO-LEPS Vorhersagen für 24h-Niederschlagssumme vom 8.8.

**Abb. 2.17 > COSMO-LEPS Wahrscheinlichkeitsvorhersage vom 6.8.2007 12 UTC für 24h-Niederschlagssummen vom 8.8. 06 UTC bis 9.8. 06 UTC**

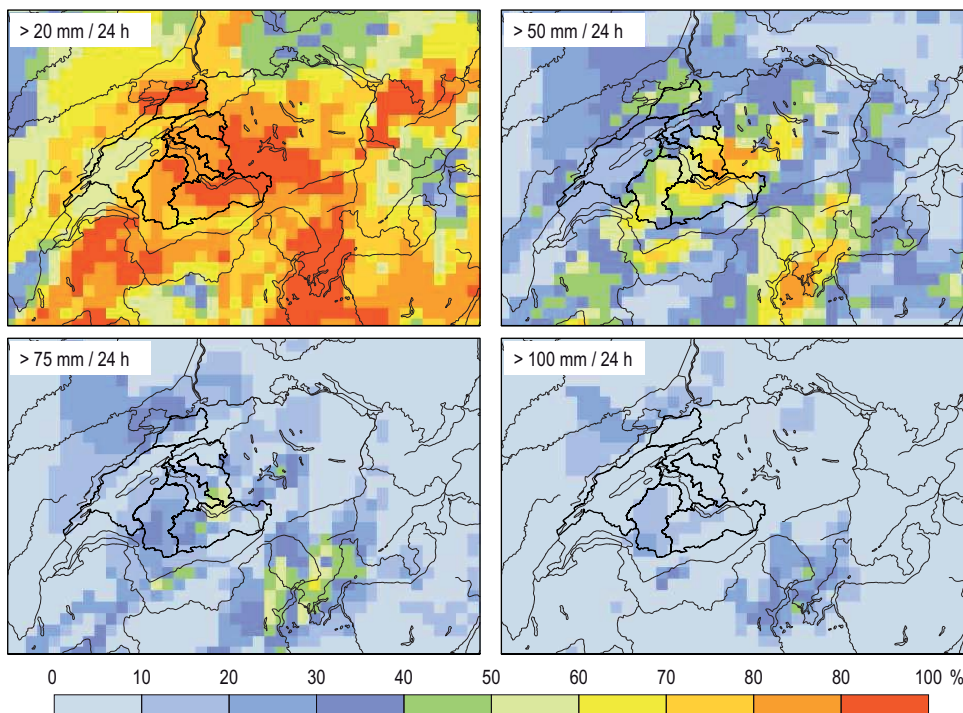
*Dargestellt sind die vorhergesagten Wahrscheinlichkeiten zur Überschreitung der vier Schwellwerte 20, 50, 75 und 100 mm. Die fettgedruckten schwarzen Linien bezeichnen für spezielle Abflussanalysen ausgewählte Einzugsgebiete.*



Die nachfolgende Vorhersage 24 h später (12 h vor dem Ereignis) ist dargestellt in Abb. 2.18. Diese zeigt deutlich höhere Wahrscheinlichkeiten (bis etwa 80 %) für mehr als 50 mm Niederschlag am Alpennordhang während für die nördlichen Landesteilen die Wahrscheinlichkeiten weiterhin moderat bleiben. Beim 75 mm-Schwellwert fallen vor allem die nun höheren Wahrscheinlichkeiten im Tessin auf.

**Abb. 2.18** > COSMO-LEPS Wahrscheinlichkeitsvorhersage vom 7.8.2007 12 UTC für 24h-Niederschlagssummen vom 8.8. 06 UTC bis 9.8. 06 UTC

Dargestellt sind die vorhergesagten Wahrscheinlichkeiten zur Überschreitung der vier Schwellwerte 20, 50, 75 und 100 mm. Die fettgedruckten schwarzen Linien bezeichnen für spezielle Abflussanalysen ausgewählte Einzugsgebiete.



Insgesamt haben die COSMO-LEPS Vorhersagen erst sehr spät Hinweise für ein Starkniederschlagsereignis gegeben und auch kurzfristig keine Warnung für ein Starkniederschlagsereignis mit einer solch grossen räumlichen Ausdehnung geliefert. Insbesondere der Niederschlag in der Nordwest- und Nordschweiz wurde in den meisten Vorhersage-Members jeweils deutlich unterschätzt. Mangels langfristiger Erfahrungen mit COSMO-LEPS kann diese Aussage im Vergleich zu anderen Ereignissen nicht eingeordnet oder bewertet werden.

## 2.7 Ablauf der Unwetterwarnungen

Aufgrund der im Kapitel 2.2 beschriebenen Ausgangswetterlage wurde bei MeteoSchweiz bereits am Wochenende vom 5./6. August die Ausgabe einer Unwetterwarnung in Erwägung gezogen. Die synoptische Situation liess starke Gewitter im Vorfeld und während der Kaltfront erwarten. Zudem gaben die globalen Wettervorhersagemodelle, insbesondere jenes des EZMWF (Europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage) Hinweise darauf, dass die in den Alpenraum vorankommende Störung hier liegen bleiben könnte und damit auch das dazu gehörende Tiefdruckgebiet und Höhentief. Die verfügbaren Modellunterlagen wiesen auf eine äusserst unsichere Wetterentwicklung hin, insbesondere was die Zugbahn, die zeitliche Abfolge, die Ausdehnung und Intensität des Tiefdruckwirbels betraf. Bis und mit Sonntag, 5. August gab es keine genügend starke und konsistente Anzeichen, welche eine Warnung gerechtfertigt hätten.

Einschätzung der Lage

### 2.7.1 Die Unwetterwarnungen der MeteoSchweiz

Bis Montag, 6. August, verdichteten sich die Anzeichen auf anhaltende und ergiebige Niederschläge für die kommenden Tage, so dass um 11 Uhr (Lokalzeit, LT) eine erste Warnung ausgegeben wurde. Die weiteren Warnungen bis hin zur Entwarnung erfolgten aufgrund der jeweiligen synoptischen Betrachtungen, der Hinweise der verschiedenen numerischen Modelle (grossräumige und feinmaschige), als auch im Vergleich zu früheren, analogen Wetterlagen. Der detaillierte Warnablauf ist in Tab. 2.2 aufgelistet. Es werden dort die Ausgabezeit, die Gefahrenstufe, die voraussichtlich vom Unwetter betroffenen Regionen und – in zusammengefasster Form – die Kernaussage über die jeweils erwarteten Niederschlagsmengen dargestellt.

Erste Warnung

Zwei Aspekte zeigen sich:

- > Die Warnungen wurden generell betrachtet vom 6./7. August zum 8./9. August von der Stufe 1 (gelb) auf die Stufen 2 und 3 (orange, rot) angehoben.
- > Die erwarteten Niederschlagsschwerpunkte lagen am 6./7. August eher in Nord- und Mittelbünden sowie am Alpennordhang. Demgegenüber wurden am 8./9. August verstärkt für die Regionen Berner Oberland, Mittelland, Zentralschweiz und Nordwestschweiz Warnungen ausgegeben.

Tab. 2.2 &gt; Warnungen der MeteoSchweiz von Montag 6. bis Donnerstag 9. August

Datum	Zeit (LT)	Gefahrenstufe	Regionen	nähere Angaben
06.08.2007	10:51	1 (gelb)	Alpen Nordseite, Nord- und Mittelbünden, insbesondere Alpennordhang	«... von Dienstag bis Donnerstag sind in 48 Stunden Mengen von 50–90 Liter pro Quadratmeter ...»
07.08.2007	11:15	1 (gelb)	Alpen Nordseite, Nord- und Mittelbünden, insbesondere Alpennordhang	«... Niederschlagsmengen von 60 bis 110 Liter pro Quadratmeter ... Schwerpunkt Alpennordhang ...»
	17:44	1 (gelb)	Alpen Nordseite, Nord- und Mittelbünden, insbesondere Alpennordhang	«... von Dienstagmorgen bis Donnerstagabend 60 bis 110 Liter zu erwarten ...»
08.08.2007	05:35	2 (orange)	Alpen Nordhang vom Berner Oberland über die Zentralschweiz bis zur Alpsteinregion sowie zentrales Mittelland	«... bis Donnerstagabend weitere 60 bis 100 Liter ... Schwergewicht Alpennordhang und Westschweiz, dort 70 bis 120 Liter ...»
	11:29	2 (orange)	Alpen Nordhang vom Berner Oberland über die Zentralschweiz bis zur Alpsteinregion sowie zentrales Mittelland	«... im Berner Mittelland und Teilen des Juras 40 bis 80 Liter gefallen ... bis Freitagvormittag werden 60 bis 100 Liter hinzukommen ... am Alpennordhang bis 120 Liter möglich ...»
	11:32	1 (gelb)	Nordwestschweiz, östliches Mittelland, Nord- und Mittelbünden	«... bis 60 Liter gefallen ... bis Freitagvormittag werden 30 bis 60 Liter hinzukommen, punktuell bis 70 Liter möglich ...»
	17:28	3 (rot)	westlicher und zentraler Alpennordhang	«... 30 bis 50 Liter gefallen ... bis Freitagvormittag weitere 90 bis 140 Liter erwartet ...»
	17:32	2 (orange)	östlicher Alpennordhang sowie zentrales Mittelland	«... 20 bis 30 Liter gefallen, am östlichen Alpennordhang 50 bis 80 Liter ... bis Freitagvormittag nochmals 60 bis 100 Liter erwartet ...»
	17:37	1 (gelb)	Nordwestschweiz, östliches Mittelland, Nord- und Mittelbünden	«... in der Nordwestschweiz 10 bis 20 Liter gefallen, sonst 20 bis 50 mm ... bis Freitagvormittag nochmals 30 bis 60 Liter ...»
09.08.2007	07:46	1 (gelb)	Nord- und Mittelbünden	«... 40 bis 60 Liter gefallen ... bis Freitagmorgen weitere 10 bis 20 Liter ...»
	07:48	2 (orange)	Gesamtes Mittelland, Nordwestschweiz und östliche Voralpen	«... verbreitet 80 bis 100 Liter, in der Region Zürich und östliche Voralpen 140 bis 150 Liter gefallen ... bis Freitagmorgen weitere 30 bis 50 Liter ...»
	07:51	3 (rot)	Berner Oberland und Zentralschweiz	«... verbreitet 90 bis 150 Liter gefallen ... bis Freitagmorgen weitere 20 bis 40 Liter in der Zentralschweiz, im Berner Oberland weitere 30 bis 50 Liter ...»
	11:17	2 (orange)	Berner Oberland und Zentralschweiz	«... insgesamt verbreitet 100 bis 150 Liter gefallen ... bis am Freitagmorgen in der Zentralschweiz weitere 15 bis 40 Liter, im Berner Oberland weitere 20 bis 40 Liter ...»
	11:19 <sup>1</sup>	1 (gelb)	Gesamtes Mittelland, Nordwestschweiz, und östliche Voralpen	«... verbreitet 90 bis 120 Liter, in den Regionen Zürich und Bern 140 bis 150 Liter zusammengekommen ... bis am Freitagmorgen weitere 20 bis 40 Liter ...»
	11:33	Entwarnung	Nord- und Mittelbünden	«... verbreitet 40 bis 60 Liter ... bis Freitagmorgen können noch 10 bis 20 Liter hinzukommen ...»
	17:50	Entwarnung	Ganze Deutschschweiz	«... seit Montag verbreitet über 100 Liter gefallen ... Zürich, Pilatus und Plaffeien über 140 Liter ...»

<sup>1</sup> 11:38 und 12:18 erneut gesendet wegen technischer Probleme

## 2.7.2 Beurteilung der Warnungen

Nach jeder ausgegebenen Unwetterwarnung werden von MeteoSchweiz routinemässig Beurteilungen von den Einsatzzentralen der betroffenen Kantone eingeholt. Die Auswertung zeigt, dass die Warnungen im Allgemeinen als gerechtfertigt, nützlich und in weiten Teilen auch als zutreffend aufgenommen wurden.

In der Detailanalyse stellt sich heraus, dass der Niederschlagsschwerpunkt der präfrontalen Gewitter in der Nacht auf den 7. August nicht wie erwartet in den Voralpen, sondern vor allem im Jura, in der Westschweiz und isoliert in den zentralen Voralpen lag. Ebenso fielen beim Hauptniederschlagsereignis vom 8. August die grössten Regenmengen nicht nur im zentralen Voralpengebiet, sondern auch im Berner Oberland, zentralen Mittelland und in der Nordwestschweiz.

## 2.8 Erkenntnisse

Im Gesamtüberblick war das Ereignis (6.–9. August 2007) vor allem zu Beginn durch konvektive Niederschläge geprägt, später führte die Tiefdruckbildung westlich der Alpen zu Aufgleitprozessen im Alpenraum, welche von ergiebigen grossflächigen Niederschlägen begleitet waren. Eher sekundär erscheinen dabei die Niederschlagsbeiträge, die aus einer Staukomponente an den Alpen resultierten. Die im Vorfeld aus SW herangeführte warmfeuchte Luftmasse wies ein entsprechend hohes Feuchte- und Niederschlagspotential auf.

Wetterlage

Nimmt man alle vier Tage zusammen, so sind auf der ganzen Alpennordseite verbreitet mehr als 100 mm bis 120 mm Regen gefallen, lokal gab es Stationen mit deutlich mehr als 160 mm Niederschlag. Die Regionen mit den grössten Niederschlagsmengen waren die Nordwestschweiz, das westliche Mittelland im Einzugsgebiet der Saane, die Berner Alpen, die Voralpen (insbesondere zentrale Voralpen), das zentrale und östliche Mittelland. Daraus ist ersichtlich, dass eine relativ grosse Fläche vom Ereignis betroffen war. In diesen Gebieten konnte eine ausgesprochen gleichmässige Verteilung der Niederschlagssummen verzeichnet werden.

Betroffene Gebiete

Bei der klimatologischen Einordnung des Ereignisses stellt man fest, dass vor allem am 8. August deutlich erhöhte Jährlichkeiten der Tagesniederschlagssummen verzeichnet wurden. Zieht man das ganze Ereignis (6.–9. August) in Betracht, so erreicht der grösste Teil der Stationen kaum eine Jährlichkeit von 20 Jahren. Einzig in der Nordwestschweiz, im Jura, im Seeland, im zentralen Mittelland, in der Region Bern und im unteren Wallis wiesen Stationen Jährlichkeiten von deutlich über 20 auf.

Klimatologische Einordnung

Die Niederschlagssummen wurden von COSMO-7 anfangs unterschätzt. Je näher die Modellläufe beim Hauptereignis waren, umso besser wurden die Vorhersagen. Vom damals präoperationellen COSMO-2 wurden die Niederschläge besser vorhergesagt als von COSMO-7. Allerdings liegt die Analysezeit für COSMO-2 6 Stunden nach derjenigen des COSMO-7 und damit näher beim Niederschlagsereignis. Die Wahrscheinlichkeitsvorhersagen der Modelle (COSMO-LEPS) lieferten erst spät Hinweise für ein

Modellvorhersagen

Starkniederschlagsereignis mit der beschriebenen grossen räumlichen und zeitlichen Ausdehnung.

Die Unwetterwarnungen der MeteoSchweiz wurden von den Nutzern (Einsatzorganisationen) als gerechtfertigt, nützlich und in weiten Teilen als zutreffend beurteilt. Im Verlaufe des Ereignisses wurden die Warnungen vom 6./7. August zum 8./9. August von der Stufe 1 (gelb) auf die Stufen 2 und 3 (orange, rot) angehoben und der erwartete Niederschlagsschwerpunkt verlagerte sich von Nord- und Mittelländern sowie dem Alpennordhang in die Regionen Berner Oberland, Mittelland, Zentral- und Nordwestschweiz.

Unwetterwarnungen

MAP D-PHASE war – nach Einschätzung der zahlreichen Benutzer – ein grosser Erfolg und hat im Hochwasserereignis vom 8./9. August die Praxistauglichkeit der verwendeten Konzepte eindrücklich unter Beweis gestellt. Die auf MAP D-PHASE dargestellten mit meteorologischen Vorhersagemodellen gekoppelten hydrologischen Vorhersagen haben bereits am Montag (6. August) erste Hinweise auf ein grosses Ereignis gegeben. Die Details dazu finden sich im Anhang A1.

MAP D-PHASE

## 2.9

### Ausblick

Ergänzend zu dieser allgemeinen, grossflächigen Analyse des Ereignisses vom August 2007 sind spezifische Radar-Studien in Arbeit, welche direkt in die Planung von Folge-Projekten einfließen werden. Insbesondere wird untersucht, inwieweit die Radarmessungen in Echtzeit verwendet werden können, um bei kritischen Situationen im Einzugsgebiet der Emme schneller zu reagieren. Dies beinhaltet eine Beurteilung der Qualität der Radarniederschlagsschätzung im Einzugsgebiet Emme, sowie exemplarische Fallstudien mit Schwellwerten auf akkumulierten Niederschlagsfeldern für laufende Zeitfenster mit vordefinierter Periode (1 h, 3 h, 6 h, 12 h, 24 h, 48 h und 72 h).

Radarmessungen

Eine im Rahmen von COST-731 (European Cooperation in Science and Technology – Action: Propagation of Uncertainty in Advanced Meteo-Hydrological Forecast Systems) erstellte Analyse deutet auf eine signifikante Abhängigkeit der orografischen Starkniederschläge von der mesoskaligen Strömung und der Luftmassenstabilität hin (Panziera und Germann 2008). Geplant ist, diese Abhängigkeit für eine operationelle Nowcasting-Applikation nutzbar zu machen, um den Wetterprognostikern und den Einsatzorganen eine zusätzliche Hilfe bei der Abschätzung des Gefahrenpotentials von stationären Starkniederschlagszellen über der Orografie zu bieten.

Starkniederschläge

Obschon die Demonstrationsperiode von MAP D-PHASE vorüber ist, wird auf Wunsch der Endbenutzer die D-PHASE Internetplattform in reduzierter Form und auf experimenteller Basis weiter betrieben. Eine noch ausstehende, detaillierte Auswertung der von Juni bis November 2007 gesammelten Erfahrungen soll bei der Entwicklung der von BAFU, MCH und WSL/SLF geplanten operationellen «Gemeinsamen Informationsplattform Naturgefahren GIN» (siehe [www.gin-info.ch/](http://www.gin-info.ch/)) genutzt werden.

GIN

Im Rahmen der Niederschlagsmessnetz-Konzeption sollen in den nächsten Jahren neben den bereits bestehenden und geplanten 120 automatischen Niederschlagsstationen von MeteoSchweiz noch ca. 130 weitere dazukommen. Diese automatisierten Stationen wurden bezüglich klimatologischen (Klima-Reihen) und hydrologischen (Beurteilung Abflussverhalten) Gesichtspunkten definiert und ersetzen bestehende, manuell betriebene Standorte. Die verbleibenden 200 manuellen Niederschlagsstationen werden mit einer täglichen Online-Übermittlung ausgerüstet.

Niederschlagsmessnetz

Darüber hinaus werden nun laufend automatisch betriebene Messstationen von kantonalen Stellen in die zentrale Datenbank von MeteoSchweiz integriert. Somit stehen in naher Zukunft gegenüber heute deutlich mehr Niederschlagsinformationen in Echtzeit zur Ereignisbewältigung zur Verfügung.

#### Literatur

Coles S. 2001: An introduction to statistical modeling of extreme values. Springer, London: 228 S.

Marsigli C., Boccanera F., Montani A., Paccagnella T. 2005: The COSMO-LEPS mesoscale ensemble system: validation of the methodology and verification. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 12: 527–536.

MeteoSchweiz 2004: Das Schweizer Klima im Trend: Temperatur- und Niederschlagsentwicklung, Veröffentlichung MeteoSchweiz, 68: 48 S. erhältlich unter [www.meteoschweiz.admin.ch](http://www.meteoschweiz.admin.ch)  
>Forschung >Publikationen >Publikationsreihen  
>Veröffentlichungen der MeteoSchweiz.

MeteoSchweiz 2006: Starkniederschlagsereignis August 2005, Arbeitsbericht MeteoSchweiz, 211: 63 S. erhältlich unter [www.meteoschweiz.admin.ch](http://www.meteoschweiz.admin.ch)  
>Forschung >Publikationen >Publikationsreihen  
>Arbeitsberichte der MeteoSchweiz.

MeteoSchweiz 2008: Meteorologische Ereignisanalyse des Hochwassers 8. bis 9. August 2007, Arbeitsbericht 222: 30 S.

erhältlich unter [www.meteoschweiz.admin.ch](http://www.meteoschweiz.admin.ch)  
>Forschung >Publikationen >Publikationsreihen  
>Arbeitsberichte der MeteoSchweiz.

Panziera L., Germann U. 2008: Orographic forcing and Doppler winds, the key for nowcasting heavy precipitation in the mountains. *Proceedings of 13th AMS conference on Mountain Meteorology*, Whistler, 11–15.8.08.

Rotach M., Albisser P., Duding O., Eckert P., Hachler P., Schubiger F., Walser A., Vogt S., Hegg C. 2007: Niederschlags- und Abflussvorhersage. In: Bezzola G.R., Hegg C. (Ed.): *Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schaden und erste Einordnung*. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0707: 107–126.

Stephens M.A. 1970: Use of the Kolmogorov-Smirnov, Cramer-von Mises and related statistics without extensive tables. *J. Roy. Stat. Soc.*, 32B: 115–122.

## 3 > Hydrologische Analyse des Ereignisses

Caroline Kan, Beat Sigrist

*Fast genau zwei Jahre nach dem Hochwasserereignis vom August 2005 waren erneut weite Teile der Alpen-nordseite von grossen Hochwassern tangiert. Auch wenn das Ausmass insgesamt geringer war als im Jahr 2005, so wurden doch einige neue Höchstabflüsse verzeichnet. Insbesondere am Unterlauf der Emme, an der Aare unterhalb der Mündung der Emme sowie im Einzugsgebiet der Birs muss das Ereignis als selten eingestuft werden.*

### 3.1 Übersicht über das Hochwassergeschehen

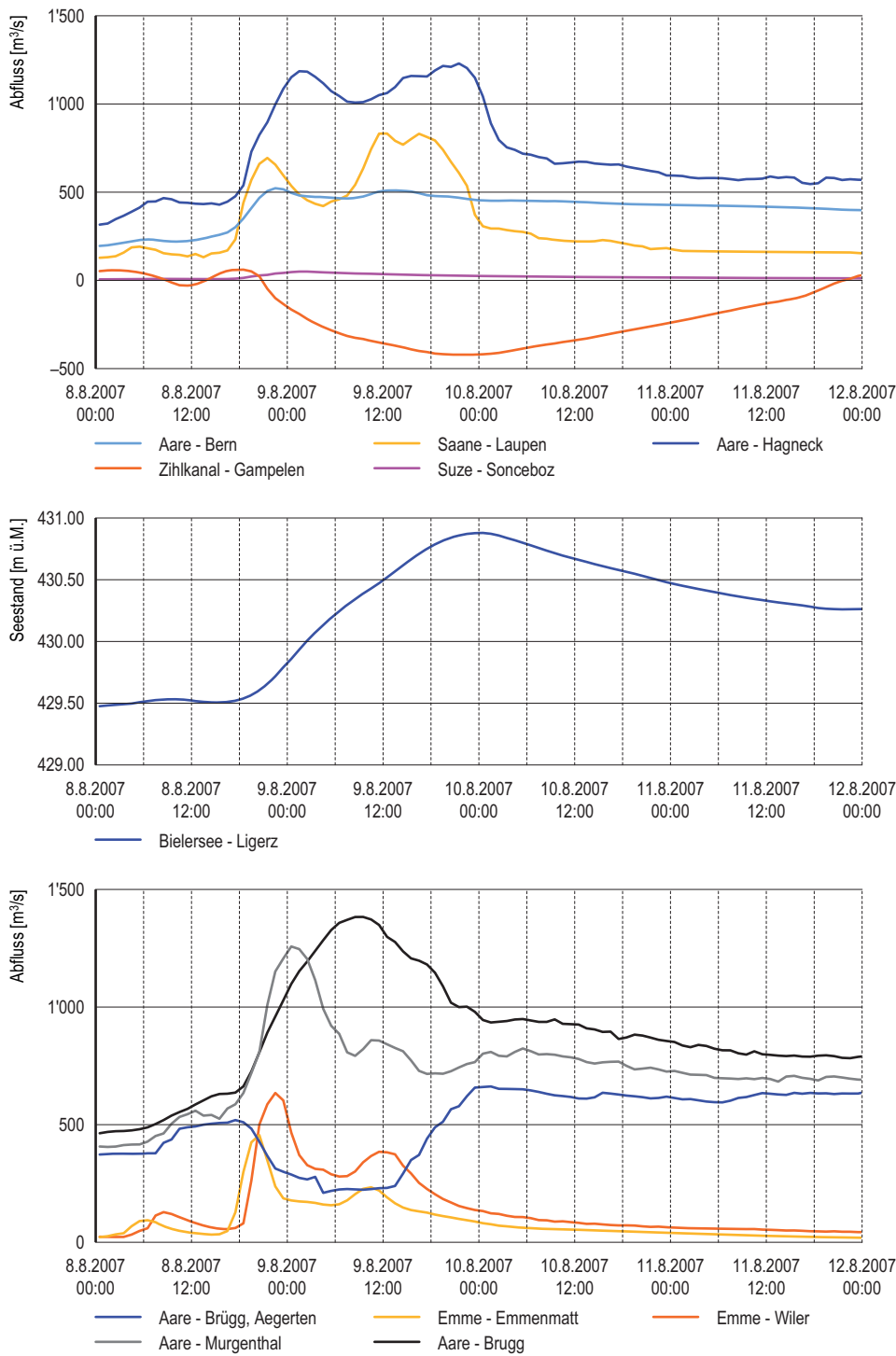
Schon die Monate Mai bis Juli 2007 waren, insbesondere im Westen des Landes, überdurchschnittlich nass und durch zahlreiche lokale Unwetter geprägt (Meteo-Schweiz 2008). Nach örtlich heftigen Gewittern in den Nächten zum 7. und 8. August führten zwei intensive Starkregenphasen innert weniger als 12 Stunden am 8./9. August zum hier beschriebenen Hochwasserereignis.

Die ersten Abflussspitzen wurden im Verlaufe des Vorabends am 8. August rund um das Aaremassiv beobachtet. In rascher Folge verzeichneten danach, verteilt über die ganze Alpennordseite, weitere Abflussmessstationen Hochwasserspitzen. Die registrierten Spitzenabflüsse sind in Tab. A3.3 im Anhang A3 zusammengestellt. Das ganze Ereignis lief innerhalb von rund 24 Stunden ab. Nur einige Stationen an Seeausflüssen wiesen bedingt durch die Seeregulierungen das Abflussmaximum erst im Verlaufe der nächsten Tage auf, als letzte die Aare bei Brügg am Abend des 13. August. Die Abfluss- bzw. Wasserstandsganglinien einiger vom Hochwasser stark betroffener Messstationen sind in Abb. 3.1 und 3.2 dargestellt.

Anhand der Abb. 3.1 kann der zeitliche Ablauf des Hochwasserereignisses an der Aare verfolgt werden. Die erste von zwei Zuflussspitzen der Aare in den Bielersee (Ganglinie Aare – Hagneck) trat am frühen Morgen des 9. August auf, zu einem Zeitpunkt, als der Abfluss aus dem Bielersee beim Wehr in Port (Ganglinie Aare – Brügg) aufgrund der Murgenthalbedingung bereits stark gedrosselt wurde (vgl. Kap. 5.3.2). Dadurch stieg der Pegel des Bielersees – trotz rasch einsetzendem Rückfluss durch den Zihlkanaal in den Neuenburgersee – schnell an. Kurz nach Eintreffen der zweiten, grösseren Hochwasserspitze in Hagneck in der Nacht auf den 10. August erreichte der Bielersee dann seinen Höchststand. Zu diesem Zeitpunkt konnte am Wehr in Port wieder ein Abfluss von über 600 m<sup>3</sup>/s abgelassen werden. Die ausserordentlichen Abflussspitzen in der Aare unterhalb des Zusammenflusses mit der Emme (Ganglinie Aare – Murgenthal) traten bereits in der Nacht auf den bzw. am Morgen des 9. August auf.

Hochwasserverlauf an der Aare

**Abb. 3.1 > Abfluss ausgewählter Stationen im Einzugsgebiet der Aare, einerseits oberhalb und andererseits unterhalb des Bielersees, sowie Pegelstand des Bielersees; Stundenmittelwerte**



**Abb. 3.2 > Abfluss ausgewählter Stationen im Einzugsgebiet des Rheins bis Rheinfelden sowie von Rheinfelden bis Basel; Stundenmittelwerte**

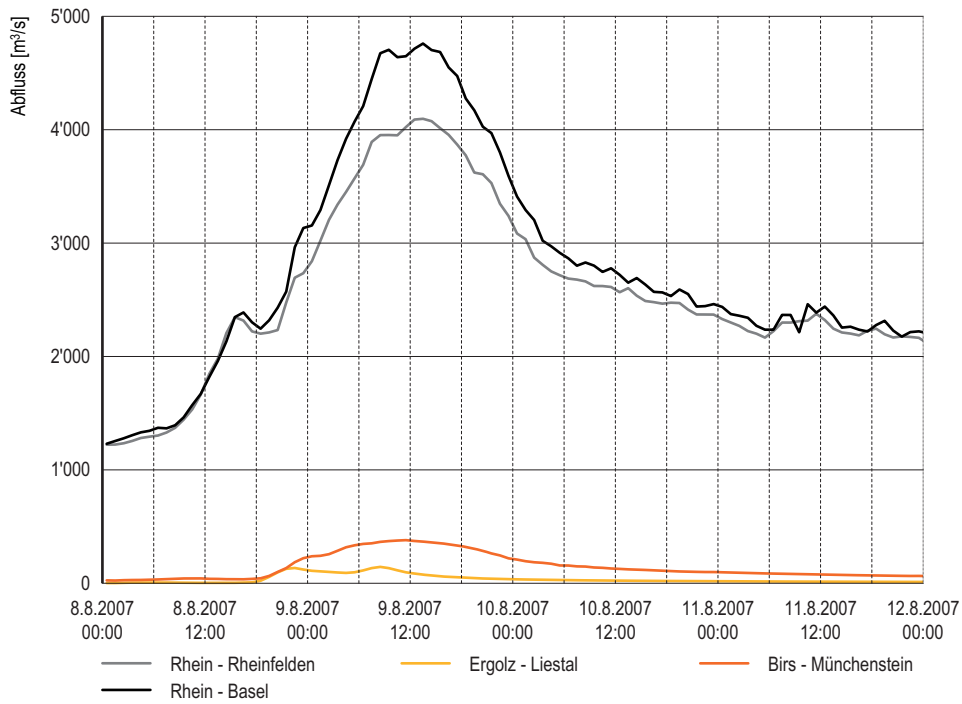
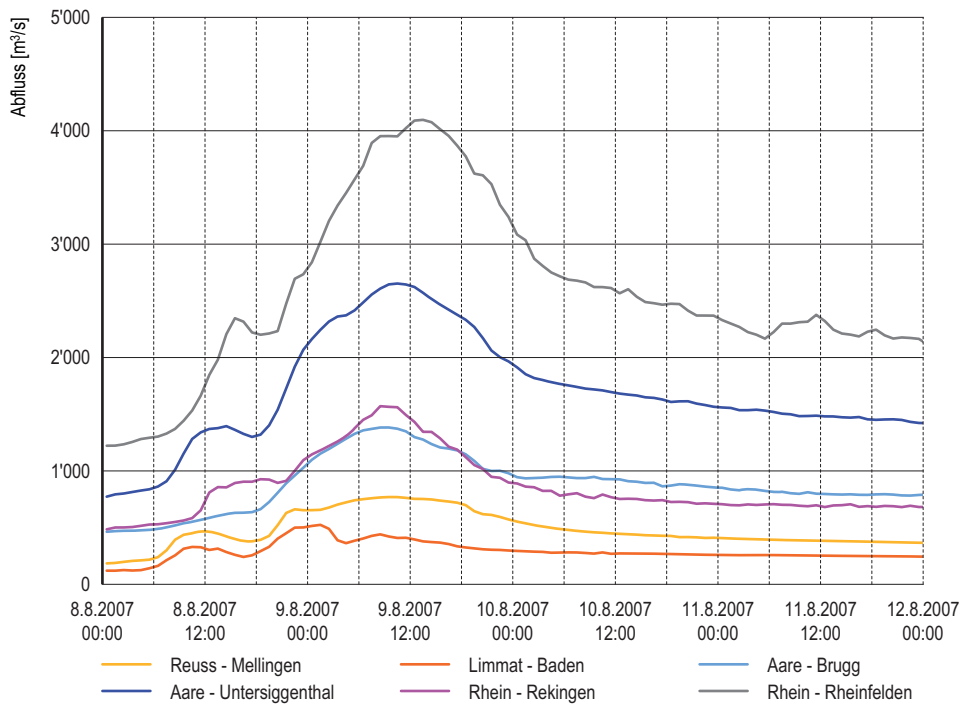


Abb. 3.2 zeigt den Verlauf des Hochwasserereignisses im Gebiet des Zusammenflusses von Aare, Reuss, Limmat und Rhein (oben) sowie im Rhein bis Basel (unten). Die Limmat in Baden erreichte den höchsten Wert in der Nacht vom 8. auf den 9. August. Die Hochwasserspitzen der Aare in Brugg, der Reuss in Mellingen (und in der Folge der Aare in Untersiggenthal) sowie des Rheins in Rekingen traten alle beinahe zum selben Zeitpunkt, am Morgen des 9. August auf. Kurz nach dem Mittag waren die Hochwasserspitzen im Rhein bei Rheinfelden und bei Basel zu beobachten.

Hochwasserverlauf am Rhein

## 3.2 Datenerhebung

### 3.2.1 Messbetrieb und Abflussbestimmung

An den Messstationen und -einrichtungen waren im August 2007 kaum Schäden zu verzeichnen. Die Ganglinien der Wasserstände sind fast überall durchgehend und in guter Qualität vorhanden. Da sich der Schwerpunkt dieses Ereignisses im Mittelland und damit vielfach unterhalb von grösseren Seen befand, waren die Probleme wegen Geschiebe und Schwemmholz für das Messnetz eher klein. An vielen Stationen wurden während dem Hochwasser und damit unter erschwerten Bedingungen Abflussmessungen durchgeführt. Bei einer Abflussmessung werden der Verlauf der Flusssohle, die Querschnittsfläche sowie die Verteilung der Fliessgeschwindigkeiten sehr detailliert aufgenommen und daraus der momentane Abfluss berechnet. Diese Messungen mussten auch noch nach dem Ereignis mit grosser Intensität weitergeführt werden, um für jede Station die Beziehung zwischen Wasserstand und Abfluss zu kontrollieren und gegebenenfalls den veränderten Bedingungen anzupassen.

### 3.2.2 Bestimmung der Spitzenabflüsse

Die Abflussbestimmung erfolgt über den direkt und kontinuierlich gemessenen Wasserstand und die mit periodischen Abflussmessungen geeichte Pegelstand/Abfluss-Beziehung. Für den Spitzenabfluss des Hochwassers muss diese Beziehung bis zum erreichten Maximalwasserstand extrapoliert werden. Bei dieser Extrapolation werden einerseits die durchgeführten Abflussmessungen und Profilaufnahmen, lokale hydraulische Berechnungen, der Vergleich mit benachbarten Messstationen sowie auch weitergehende Modellrechnungen beigezogen. Trotzdem führt eine starke Extrapolation meist auch zu grösserer Unsicherheit bei der Hochwasserbestimmung.

Abflussbestimmung

In Tab. A3.1 im Anhang A3 sind deshalb stationsweise die Informationen über die maximale Abflussmessung (der letzten 10 Jahre), das Ausmass der nötigen Extrapolation zur Ermittlung des Spitzenabflusses vom August 2007, über die Beschaffenheit und die Stabilität des Gerinnes beim Messprofil sowie Bemerkungen zu allfälligen Besonderheiten beim Ablauf des Hochwassers 2007 aufgelistet.

### 3.2.3 Alarme aus Messstationen

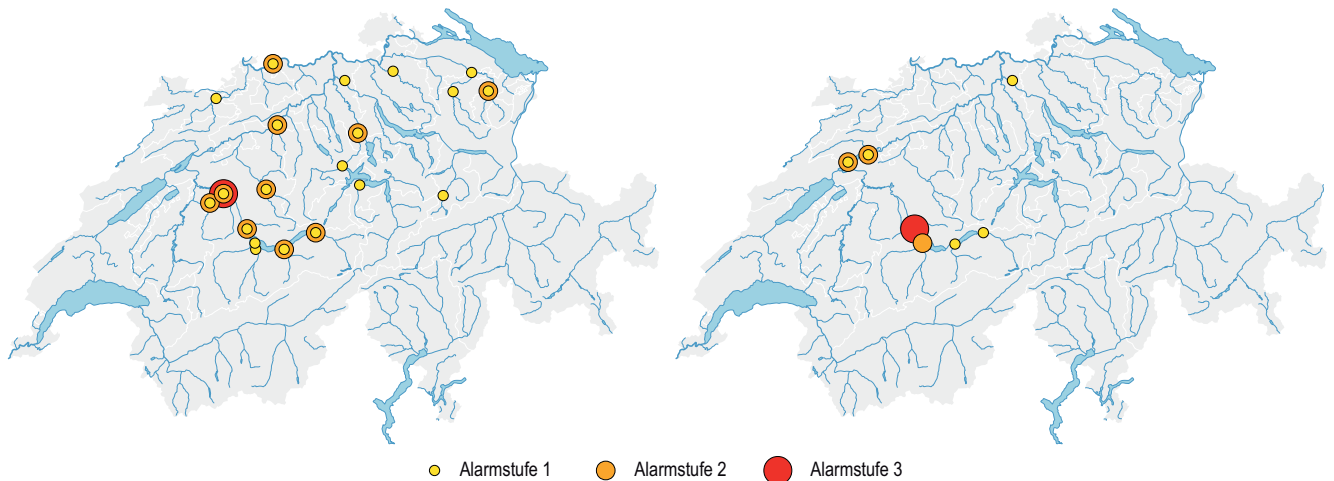
Alarmstationen sind hydrometrische Messstationen die auf Grund der Bedürfnisse kantonaler Fachstellen und von Kraftwerken mit zusätzlichen Geräten für die Funktion «Übermittlung einer Hochwasser-Alarmmeldung» dotiert sind. In Absprache mit dem Kunden werden sogenannte Alarmwasserstände (vielfach ausgehend von den für den Kunden kritischen Abflussmengen) definiert, bei denen ein automatischer Alarm ausgelöst werden soll<sup>2</sup>. Diese automatischen Alarme ab Messstation dienen als «Weckruf» und Statusmeldung an Behörden und Einsatzkräfte. Sie können je nach Bedürfnissen der Behörden und Einsatzkräften auch mehrstufig eingerichtet werden. Damit den Verantwortlichen im Ereignisfall genügend Zeit für Massnahmen bleibt, müssen die Alarmwerte relativ tief angesetzt werden.

Funktionsweise Alarmstationen

Zwischen dem 8. August 2007, 05:15 Uhr, und dem 10. August 2007, 01:34 Uhr wurden an 24 von insgesamt 35 Alarmstationen 42 automatische Hochwasseralarme ausgelöst. Alle Alarme wurden korrekt ausgelöst und an die Kunden übermittelt. Abb. 3.3 zeigt die räumliche Verteilung der am 8./9.8. ausgelösten automatischen Alarme, die Tab. A3.2 in Anhang A3 zeigt deren zeitlichen Ablauf im Detail.

Automatische Alarmierung

**Abb. 3.3** > Automatische Alarmauslösung aus Messstationen am 8.8. (links) und am 9.8. (rechts)



<sup>2</sup> Die Meldung wird von der Messstation automatisch an eine Alarmzentrale übermittelt, die dann per Telefon die Kunden gemäss Alarmliste avisiert. Dieses Dispositiv erlaubt es der Abteilung Hydrologie, anhand des Alarmübermittlungsrapports jederzeit festzustellen, ob die Alarme richtig und zeitgerecht übermittelt und vom Kunden auch empfangen worden sind.

### 3.3 Statistische Einordnung des Ereignisses

#### 3.3.1 Standardmässige statistische Auswertungen

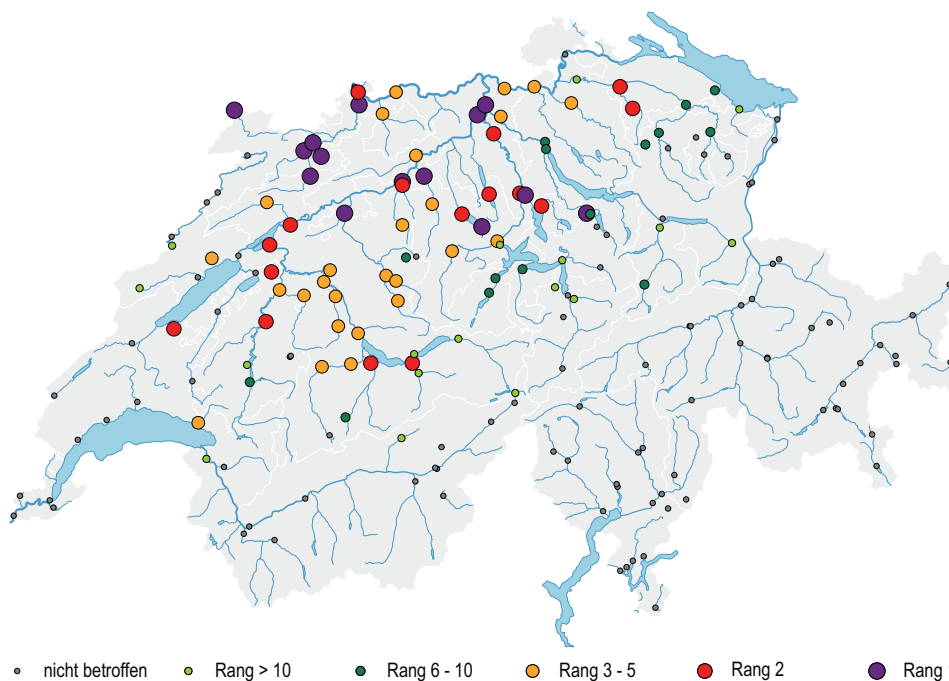
Für die eidgenössischen Abflussmessstationen wird eine Hochwasserstatistik-Datenbank geführt, die jährlich sowie zusätzlich bei Bedarf aktualisiert wird. Sie bildet die Grundlage für die Berechnung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten, gibt aber auch Auskunft über die Rangfolge eines Ereignisses innerhalb der Zeitreihe einer Messstation.

Hochwasserstatistik-Datenbank

Während dem Hochwasser vom August 2007 registrierte rund die Hälfte der knapp 200 eidgenössischen Abflussmessstationen Abflüsse mit einer Wiederkehrperiode von mindestens 2 Jahren (Abb. 3.4 und 3.5). Eine Übersicht über die definitiven Abflussspitzen und deren statistische Einordnung findet sich in Tab. A3.3 im Anhang A3.

Die flächenmässige Ausdehnung des Hochwasserereignisses im August 2007 war etwas kleiner als jene des Ereignisses im August 2005. Der Schwerpunkt lag dabei weiter nördlich, im zentralen Mittelland und in der Nordwestschweiz. Keine besonders grossen Abflussspitzen wiesen 2007 die Zuflüsse zum Vierwaldstätter- und zum Walensee auf. Nicht vom Hochwasser betroffen war Graubünden.

**Abb. 3.4** > Rangfolge der Abflussspitzen während des Hochwassers vom August 2007 innerhalb der Reihen der Jahresmaxima bei allen aktuellen eidgenössischen Abflussmessstationen



Bei 14 Abflussmessstationen wurde ein neues Maximum seit Messbeginn beobachtet. In 5 Fällen wurde dabei der Spitzenwert aus dem Jahr 2005 übertroffen bzw. egalisiert. Bei 4 weiteren Stationen wurde das Hochwasserereignis Mai 1999 vom Spitzenrang verdrängt.

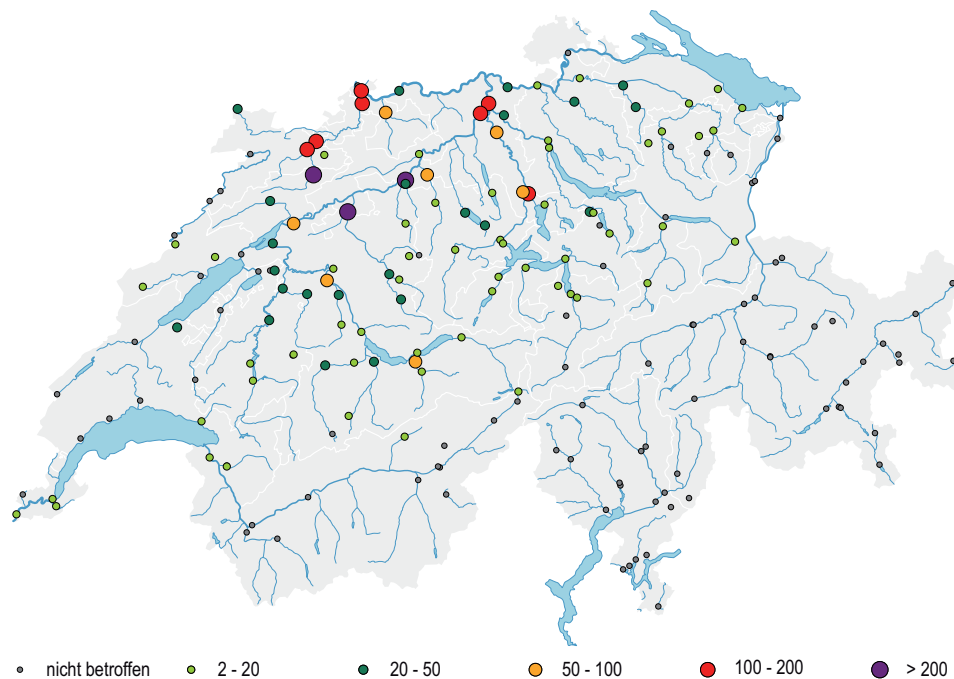
Rangfolgen

Wie Abb. 3.4 zeigt, konzentrieren sich die Messstationen, bei welchen die Hochwasserspitze aus dem August 2007 zu den 5 grössten innerhalb der Beobachtungsperiode gehört, vorwiegend auf die Einzugsgebiete unterhalb der Alpenrandseen. Ausnahmen bilden die Stationen an der Simme, der Kander und der Lütchine. Besonders grosse Veränderungen der bisherigen Höchstwerte wurden am Unterlauf der Emme, an der Aare unterhalb der Mündung der Emme, sowie im Einzugsgebiet der Birs beobachtet. Zu beachten ist, dass die Abbildung auf unterschiedlich langen Messperioden an den einzelnen Stationen beruht.

Die routinemässige Berechnung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten erfolgt anhand der Empfehlungen des DVWK. Die Analyse basiert auf den jährlichen Hochwasserspitzen. Eine ausführlichere Erläuterung des Vorgehens sowie Informationen zur Hochwasserstatistik-Datenbank finden sich in Eberhard et al. (2007).

Extremwertstatistik

**Abb. 3.5 > Übersicht über die für die Hochwasserspitze vom August 2007 berechneten Jährlichkeiten (statistische Wiederkehrperiode in Jahren)**



Verglichen mit dem Hochwasser 2005 wurden an deutlich weniger Stationen Hochwasserspitzen mit sehr kleinen Auftretenswahrscheinlichkeiten (hohe Jährlichkeiten) beobachtet (vgl. Abb. 3.5). An 10 Messstationen wird das Ereignis als 100-jährlich oder seltener eingeschätzt, in 3 Fällen davon als 200-jährlich oder seltener (Emme – Wiler, Aare – Murgenthal und Birse – Moutier). Auch aus Sicht der Extremwertstatistik konzentriert sich das Ereignis auf das zentrale Mittelland und die Nordwestschweiz.

### 3.3.2 Vergleich mit den Hochwasserereignissen 1999 und 2005

Die Auswertung der Rangfolgen hat gezeigt, dass sich die Hochwasserspitzen im August 2007 bei etlichen Messstationen in einem ähnlichen Bereich befanden wie bei den Hochwasserereignissen 1999 und/oder 2005. Auch aufgrund der zeitlichen Nähe zu diesen Ereignissen drängt sich ein Vergleich auf.

Auf den Unterschied bei der flächenmässigen Ausdehnung sowie der statistischen Einordnung der Hochwasser 2007 und 2005 ist bereits im Kapitel 3.3.1 kurz eingegangen worden. Im Vergleich mit dem Hochwasser 1999 (Aschwanden 2000) zeigt sich im August 2007 eine etwas geringere Flächenausdehnung. Gegenüber den beiden anderen Hochwasserereignissen deutlich stärker betroffen sind 2007 die Aare ab dem Bielersee bis Brugg, der Unterlauf der Emme sowie das Einzugsgebiet der Birs.

Vergleicht man die Abflussspitzen von 1999, 2005 und 2007 der Abflussmessstationen an den Unterläufen von Aare, Reuss, Limmat und Hochrhein sowie an Emme und Birs, die von einem oder mehreren dieser Hochwasserereignisse besonders stark betroffen waren, verdeutlichen sich die regionalen Unterschiede (vgl. Tab. 3.1). So differieren die Abflussspitzen in der Aare bei Untersiggenthal, nach dem Zusammenfluss von Aare, Reuss und Limmat, zwischen 1999 und 2007 nur geringfügig. Die Abflussspitze der Aare in Brugg ist 2007 aber um rund 10 % grösser als 1999, jene der Reuss in Mellingen um knapp 7 % grösser. Der Spitzenabfluss in der Limmat bei Baden ist dagegen um fast 20 % kleiner. 2005 waren die Spitzenabflüsse in der Limmat, insbesondere aber in der Aare wesentlich kleiner, die Spitze in der Reuss dagegen deutlich grösser. Für die Ausprägung des Spitzenabflusses unterhalb des Zusammenflusses spielt allerdings neben der Grösse der Abflussspitze der Zuflüsse die zeitliche Überlagerung der einzelnen Hochwasserwellen eine bedeutende Rolle.

Ein zeitliches Aufeinandertreffen der jeweils grössten bisher beobachteten Abflussspitzen könnte an den Unterliegern theoretisch zu noch höheren Werten führen. Allerdings stellt sich die Frage, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein entsprechendes Niederschlagsszenario eintreffen könnte.

**Tab. 3.1 > Vergleich der Abflussspitzen ausgewählter Messstationen**

Stationsname	Abflussspitzen [m <sup>3</sup> /s]		
	HW'99	HW'05	HW'07
Emme – Wiler	340	583	663
Aare – Brugg	1250	1057	1387
Reuss – Mellingen	760	854	770
Limmat – Baden	660	510	533
Aare – Untersiggenthal	2620	2337	2656
Rhein – Rekingen	2050	1249	1643
Rhein – Rheinfelden	4550	3464	4107
Birs – Münchenstein	220	132	383
Rhein – Basel	5090	3433	4810

## 3.4

**Erkenntnisse**

Das Hochwasser vom August 2007 ist sowohl hinsichtlich der beobachteten Hochwasserspitzen als auch der räumlichen Ausdehnung insgesamt kleiner als das Ereignis im August 2005. Nur an den Abflussmessstationen im Unterlauf der Emme, an der Aare unterhalb der Mündung der Emme sowie im Einzugsgebiet der Birs wurden neue Höchstwerte beobachtet. Für diese Stationen werden Jährlichkeiten von mehr als 100 Jahren berechnet. An vielen Abflussmessstationen unterhalb der Alpenrandseen rangiert das Ereignis von 2007 unmittelbar hinter jenen von 2005 und 1999 an zweiter oder dritter Stelle.

Das hydrometrische Messnetz hat sich im August 2007 sehr gut bewährt. Die nach 2005 getroffenen Massnahmen führten zu einer Verbesserung der Hochwassersicherheit der Messstationen. An fast zwei Dritteln aller vom Hochwasser betroffenen Abflussmessstationen kann die Qualität der Spitzenabflussbestimmung als gut bis sehr gut bezeichnet werden, nur in rund 10 % der Fälle ist die Qualität unsicher. Punktuell sind nach wie vor zusätzliche Massnahmen zur hochwassersicheren Ausgestaltung der Messstationen notwendig sowie Verbesserungen bei der Messtechnik für die Bestimmung der Spitzenabflüsse. Weiter muss der redundante Ausbau der Mess- und Übertragungssysteme vorangetrieben werden, weil jederzeit verfügbare aktuelle Daten für Vorhersage und Lagebeurteilung unbedingt erforderlich sind.

Die mit verschiedenen Kunden vereinbarten automatischen Hochwasseralarmierungen direkt ab Messstation haben sich als zuverlässig erwiesen. Alle Alarme wurden ausgelöst und erreichten die Kunden in der vereinbarten Frist.

Auf der Alpennordseite vielerorts zweit- oder drittgrösstes Ereignis nach 2005 und 1999

Messnetz hat sich bewährt

Hochwasseralarme ab Station haben funktioniert

3.5

## Ausblick

Die Hochwasserstatistiken und deren Methoden werden an die neusten Entwicklungen angepasst. Damit sollen neue Erkenntnisse aus ausserordentlichen Ereignissen berücksichtigt werden. Solche Anpassungen sind insbesondere in Anbetracht eines Klimawandels von Bedeutung, um Hochwasserszenarien aufzubauen, die auf instationäre natürliche Prozesse Rücksicht nehmen.

### Literatur

Aschwanden H. 2000: Hochwasser 1999 – Analyse der Messdaten und statistische Einordnung. Hydrologische Mitteilungen, Nr. 27, LHG, Bern. 116 S.

Eberhard A., Diezig R., Kan C., Sigrist B. 2007: Hydrologie Fließgewässer. In Bezzola G.R., Hegg C. (Ed.) 2007: Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1-Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0707: 39–70.

MeteoSchweiz 2008: Witterungsbericht Jahr 2007. 8 S.

## 4 > Abflussvorhersage

Andreas Helbling

*Etwa 12 bis 24 Stunden vor dem Ereignis konnten die Abflussvorhersagen die Höhe und den Zeitpunkt der Abflussspitzen einigermaßen zufrieden stellend erfassen. Das BAFU belieferte im Augusthochwasser 2007 alle seine Kunden rechtzeitig mit Vorhersagebulletins. Die Analysen und Nachrechnungen der Vorhersagen zeigen die Notwendigkeit von weiteren Verbesserungen. Diese betreffen insbesondere die hydrologische Modellierung, die Grundlagen zur Berücksichtigung der Seeregulierungen und die Vorhersageprodukte im Internet.*

### 4.1 Einleitung

#### 4.1.1 Vorhersagesystem FEWS

Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) erstellt seit 1986 Abflussvorhersagen für das Einzugsgebiet des Rheins. Seit Juni 2007 steht mit FEWS (**Flood Early Warning System**) die dritte Generation von Vorhersagesystemen im operationellen Einsatz. FEWS deckt das gesamte Einzugsgebiet des Rheins bis Basel ab. Darin eingeschlossen sind auch die Zuflüsse der Nachbarstaaten Österreich und Deutschland. Das gesamte Einzugsgebiet von rund 36 000 km<sup>2</sup> ist in 62 Teileinzugsgebiete unterteilt. An jedem Gebietsausfluss steht eine hydrometrische Station. Bei vielen Einzugsgebieten ist das natürliche Abflussregime beeinflusst, sei es durch die Energieerzeugung in Kraftwerken oder die Regulierung von Seen. Die Beeinflussung durch Kraftwerke ist im Modell eher rudimentär abgebildet. Dagegen sind die Vorschriften zur Regulierung der Ausflüsse aus den Alpenrandseen im System implementiert, wobei auch eine manuelle Eingabe der Seeausflüsse möglich ist.

Vorhersagegebiet

In FEWS ist das hydrologische Modell HBV-96 implementiert (Lindström et al. 1997). Dabei handelt es sich um ein semi-distributives konzeptuelles Niederschlag-Abfluss Modell. Bis zum Vorhersagezeitpunkt wird es mit den stündlichen Werten des hydrometrischen Messnetzes des BAFU und einiger hydrometrischen Stationen der Nachbarstaaten Österreich und Deutschland sowie der automatischen Stationen des SwissMet-Net der MeteoSchweiz nachgeführt. Im Vorhersagebereich wird es durch das numerische Wettermodell COSMO-7 angetrieben (Kapitel 2.6.1). Aktuelle COSMO-7 Modellläufe stehen dem BAFU zweimal täglich um ca. 05:00 und 17:00 MEWZ (mitteleuropäische Winterzeit) zur Verfügung mit Startzeit um 01:00 bzw. 13:00 MEWZ, was 00:00 bzw. 12:00 UTC entspricht. Damit werden in FEWS für alle Stationen der 62 Teileinzugsgebiete Abflussvorhersagen für die nächsten drei Tage gerechnet. Bei

Vorhersageprodukte

normaler Abflusssituation erstellt das BAFU werktags gegen 08:30 Uhr eine Abflussvorhersage. In kritischen Situationen wird der Vorhersagerhythmus erhöht und der Betrieb auf das Wochenende sowie Feiertage ausgedehnt. Von acht Stationen der grossen Mittellandflüsse werden die Resultate als Vorhersagebulletins – welche die reinen Modellergebnisse wiedergeben – auf dem Internet publiziert.<sup>3</sup> Wegen den grossen Unsicherheiten bei den Vorhersagen von kleinen und mittleren Einzugsgebieten stehen die Resultate der restlichen Stationen dem breiten Publikum zurzeit nicht zur Verfügung. Einsatzbehörden werden sie jedoch angeboten. Diese können ein Hochwasser-Vorhersage-Abonnement lösen, welches die Warnung vor der Überschreitung eines gemeinsam definierten Abflusswertes an den gewünschten Stationen, die Belieferung mit allen Vorhersagebulletins, telefonische Beratung sowie die Entwarnung umfasst. Zusätzlich zum Vorhersagebulletin erhalten die Kunden in Form eines Beilageblattes eine Einschätzung der Niederschlagsvorhersage des COSMO-7 und eine Interpretation der Abflussvorhersage. Die Einschätzung von COSMO-7 beruht dabei auf einer Diskussion mit den Prognostikern von MeteoSchweiz. Die Zustellung der Vorhersagebulletins und der Beilageblätter erfolgt per Fax oder E-Mail. Diese Dienstleistung darf nicht mit den im Kapitel 3.2.3 beschriebenen Alarmstationen verwechselt werden, bei welchen die Kunden aufgrund eines beobachteten und nicht eines vorhergesagten Abflusswertes benachrichtigt werden. Heute werden Hochwasservorhersagen an die Fachstellen von acht Kantonen, die Nationale Alarmzentrale, die Armee-Nachrichtenzentrale, die Rheinschiffahrtsdirektion, diverse Kraftwerksbetriebe sowie die Vorhersagezentren in Strassburg (Bas-Rhin), Karlsruhe (Baden-Württemberg) und Mainz (Rheinland-Pfalz) geschickt.

#### 4.1.2 Vorhersagen im Rahmen von MAP D-PHASE

Von Juni 2007 bis November 2007 arbeitete das BAFU im internationalen Projekt MAP D-PHASE mit (Anhang A1). In diesem Projekt testeten Wetterdienste, Hydrologische Dienste und End-User gemeinsam die neuen Wettermodelle und die darauf basierenden hydrologischen Modelle. Das BAFU nutzte einige der zur Verfügung gestandenen Wettermodelle und betrieb dazu ein zum operationellen Vorhersagedienst parallel laufendes Vorhersagesystem, im Weiteren als «Testsystem MAP D-PHASE» bezeichnet (Tab. 4.1). Einmal pro Tag wurden damit Vorhersagen gerechnet und ein Bulletin mit drei Grafiken erstellt:

Vom BAFU eingesetzte  
Wettermodelle

1. Vergleichende Darstellung der Abflussvorhersagen basierend auf den drei deterministischen Wettermodellen COSMO-7, COSMO-2 (Kap. 2.6.1) und EZMWF<sup>4</sup>.
2. Gegenüberstellung der operationellen Abflussvorhersage basierend auf COSMO-7 mit den einzelnen Läufen des SRNWP-PEPS<sup>5</sup>.
3. Vergleichende Darstellung der operationellen Abflussvorhersage basierend auf COSMO-7 mit den Abflussvorhersagen basierend auf COSMO-LEPS (Kap. 2.6.2), dargestellt als Perzentile.

<sup>3</sup> [www.bafu.admin.ch/hydrologie/01833/02021/02023/index.html?lang=de](http://www.bafu.admin.ch/hydrologie/01833/02021/02023/index.html?lang=de)

<sup>4</sup> Informationen dazu sind zu finden unter [www.ecmwf.int/](http://www.ecmwf.int/)

<sup>5</sup> Informationen dazu sind zu finden unter [www.euroforecaster.org/newsletter11/peps.pdf](http://www.euroforecaster.org/newsletter11/peps.pdf)

**Tab. 4.1 > Vom BAFU eingesetzte Wettermodelle im Rahmen des Forschungsprojekts MAP D-PHASE**

Modell	Modelltyp	Auflösung	Vorhersagezeitraum	Läufe/Tag	Eintreffen bei BAFU
COSMO-7	Deterministisches Modell	7 km	72 h	2 x	4 h später
COSMO-2	Deterministisches Modell	2.2 km	bis 30 h	8 x	6 h später
EZMWF	Deterministisches Modell	25x40 km	240 h	2 x	11 h später
COSMO-LEPS	Probabilistisches Modell 16 Member	10 km	132 h	1 x	11 h später
SRNWP-PEPS	Probabilistisches Modell Bis 21 Member	7 km	30–72 h	4 x	16 h später

Das BAFU publizierte die Resultate für die am Projekt Teilnehmenden auf der MAP D-PHASE Visualisierungsplattform (Anhang A1-1). Als zusätzliche Dienstleistung stellte es seinen Kunden die oben beschriebenen Bulletins zur Verfügung.

#### 4.1.3 Für die Analysen verwendete hydrologische Daten

Für die nachfolgend beschriebenen Analysen wurden die definitiven Werte der hydro-metrischen Messstationen des BAFU verwendet. Die während dem Ereignis erstellten Abflussvorhersagen beruhen natürlich auf den provisorischen Werten. Falls an den Werten im Nachgang grössere Korrekturen vorgenommen worden sind, scheint es nun, als ob die Vorhersagen nicht an den Messwerten anhängen würden (siehe z. B. Abb. 4.11).

Provisorische kontra  
definitive Werte

Da das hydrologische Modell HBV-96 die Abflüsse auf Stundenbasis berechnet, werden für die Auswertungen die beobachteten Stundenmittel<sup>6</sup> und nicht die Momentanwerte herangezogen. Bei grossen Fliessgewässern sind die Differenzen zwischen Stundenmittel und Momentanwert klein. Bei kleineren Fliessgewässern können die Werte hingegen stärker voneinander abweichen. Bei der Station Emme–Emmenmatt wurde z. B. ein maximaler Momentanwert von 485 m<sup>3</sup>/s beobachtet. Das maximale Stundenmittel beträgt 456 m<sup>3</sup>/s.

Momentanwert kontra  
Stundenmittel

Im Kapitel Abflussvorhersage werden konsequent die Stundenmittel angegeben. Deshalb differieren die Werte im Vergleich zu den anderen Kapiteln, in welchen die momentanen Spitzenwerte ausgewiesen sind.

<sup>6</sup> Der Abfluss kann nicht direkt gemessen werden (siehe Kapitel 3.2.3). Deshalb wird vom beobachteten Abfluss gesprochen.

## 4.2

**Vorhersagetätigkeit**

Am Montagmorgen, 06.08.2007 überschritten die vorhergesagten Abflusswerte an mehreren Stationen die vereinbarten Warnschwellen. Die betroffenen Kunden wurden entsprechend gewarnt (Tab. 4.2). Die erhöhten Abflüsse wurden aufgrund der in COSMO-7 prognostizierten Gewitterniederschläge in der Nacht vom 06. auf den 07. August erwartet. Sie wiesen noch nicht auf das Grossereignis vom 08./09. August hin. Im Beilageblatt wurde auf die grossen Unsicherheiten bei der Vorhersage von konvektiven Niederschlägen aufmerksam gemacht. Zudem wurde erwähnt, dass von Dienstag bis Donnerstag verbreitet grössere Niederschlagsmengen zu erwarten seien.

Montagmorgen, 06. August

Der COSMO-7-Lauf vom 06.08.2007 12:00 UTC zeigte immer noch lokal sehr starke Gewitter, doch die Gewitterzellen waren anders lokalisiert als im Lauf von 00:00 UTC. Dies hatte zur Folge, dass die Abflüsse in der Abendvorhersage vom 06.08.2007 die vereinbarten Warnschwellen nicht mehr überschritten. Die Kunden wurden darüber benachrichtigt.

Montagabend, 06. August

Die Vorhersage vom 07.08.2007 10:00 MESZ zeigte an mehreren Stationen ein Überschreiten der Warnschwellen, jedoch auf unkritischem Niveau. Die prognostizierten Abflussspitzen wurden gegen Ende des Vorhersagezeitraums erwartet, also in der Nacht vom 09. auf den 10.

Dienstag, 07. August

Da im Verlauf des 07.08.2007 keine wesentlichen Änderungen eintraten, wurde die nächste Vorhersage am Morgen des 08.08.2007 gerechnet. HBV-96 rechnete zu diesem Zeitpunkt teilweise Abflüsse, welche deutlich über den Warnschwellen lagen, insbesondere für die Stationen Aare – Murgenthal, Kleine Emme – Littau, Reuss – Mellingen und daraus resultierend auch für Rhein – Rheinfelden und Rhein – Basel. Der Regulierdienst des Amtes für Wasser und Abfall des Kantons Bern wurde über die hohen prognostizierten Abflüsse bei Murgenthal telefonisch informiert. Der Diensthabende konnte seinerseits Angaben zu den geplanten Regulierungen des Bielersees für die nächsten 5 Stunden machen, welche dann in FEWS mitberücksichtigt wurden. Wie gewohnt wurde bei MeteoSchweiz eine Einschätzung der verschiedenen Wettermodelle eingeholt und die meteorologische Situation diskutiert. MeteoSchweiz war damals der Ansicht, dass der COSMO-7-Lauf von 08.08.2007 00:00 UTC die Niederschlagsmenge um 20 bis 30 % überschätzt. Entsprechend wurden die hydrologischen Vorhersagen interpretiert; die prognostizierten Abflüsse wurden generell als zu hoch eingeschätzt. Unterstützt wurde diese These durch die mit dem Testsystem MAP D-PHASE erstellten Abflussvorhersagen, welche tiefere Abflüsse prognostizierten. Alle Informationen und Einschätzungen wurden auf dem Beilageblatt für die Kunden zusammengetragen. Auf den Bulletins im Internet wurde ausnahmsweise ebenfalls ein Kommentar beigefügt, damit die Vorhersagen leichter zu interpretieren sind. Folgende Bemerkungen standen auf den öffentlichen Bulletins:

Mittwochmorgen, 08. August

*«Gemäss Mitteilung von MeteoSchweiz überschätzt das für unsere Abflussprognose verwendete Wettermodell die Niederschlagsmengen um 20 bis 30 %. Entsprechend sind die Abflussprognosen wahrscheinlich zu hoch, insbesondere an der Aare, an der Reuss*

---

*und am Rhein. Andere Modelle zeigen deutlich tiefere Abflüsse. Die Situation muss jedoch aufmerksam weiterverfolgt werden. Die Unwetterwarnungen von MeteoSchweiz sind zu beachten.»*

Als der neuste Lauf des COSMO-7 eingetroffen war, wurde am Abend des 08.08.2007 die nächste Vorhersage gerechnet, die mehrheitlich höhere Abflussspitzen lieferte als die vorangehende. Im Gegensatz zum Morgen wurden auch an der Thur und der Limmat die vereinbarten Schwellenwerte überschritten. Damit wurden nun alle Kunden mit den Bulletins und dem Beilageblatt beliefert. Da MeteoSchweiz die prognostizierten Niederschläge des neusten COSMO-7-Laufs als plausibel einstufte, wurde von sehr grossen Abflussmengen ausgegangen. Die vorhergesagten Spitzen an der Kleinen Emme, der Reuss und der Aare schienen trotzdem unrealistisch hoch zu sein. Für die Station Reuss–Mellingen wurde z. B. ein Abfluss von 1563 m<sup>3</sup>/s vorhergesagt. Das bisher beobachtete Maximum betrug 854 m<sup>3</sup>/s. Deshalb wurde versucht, im Beilageblatt und als Kommentar auf dem Bulletin diese Werte zu relativieren, unter anderem mit dem Vergleich zum Augusthochwasser 2005.

Mittwochabend, 08. August

Aufgrund der vorhergesagten Abflüssen mit Wiederkehrperioden von über 300 Jahren, dem Witterungsverlauf und dem Wunsch von Kunden wurde entschieden, erstmals in der 20-jährigen Geschichte die Vorhersagezentrale während der ganzen Nacht besetzt zu halten. Um 23:00 und 01:30 MESZ wurden weitere Prognosen gerechnet. Diese wurden jedoch als unrealistisch eingeschätzt und deshalb weder im Internet publiziert noch den Kunden verschickt. Für die Station Aare–Murgenthal wurde z. B. in der Vorhersage von 23:00 MESZ ein maximaler Abfluss von fast 2000 m<sup>3</sup>/s prognostiziert (beobachtet wurden 1258 m<sup>3</sup>/s am 09.08.2009 02:00 MESZ). Solche enormen Abflussspitzen können gerechnet werden, wenn zum Vorhersagezeitpunkt die grössten Niederschläge bereits gefallen sind, im Wettermodell aber erst für die nächsten Stunden vorhergesagt werden. Dadurch fliesst der Niederschlag doppelt – das heisst als gefallener und als prognostizierter – in das hydrologische Modell ein. Entsprechend resultieren zu hohe Abflussvorhersagen. Erst die Vorhersage von 04:30 MESZ wurde wieder als plausibel betrachtet und ausgegeben.

Mittwochnacht, 08./09. August

In der Folge wurden in einem erhöhten Rhythmus bis am Abend des 09.08.2007 Vorhersagen erstellt. Um die Auswirkungen der von den Kantonen gewünschten, ausserordentlichen Änderungen des Bielerseeausflusses abschätzen zu können, wurden zudem zusätzliche Prognosen gerechnet. Ab dem 10.08.2007 wurde wieder auf Normalbetrieb umgestellt.

Donnerstag, 09. August

Während des ganzen Ereignisses holten Kunden telefonisch weitere Informationen und Einschätzungen ein. Mit dem Kanton Bern bestand von Anfang an ein enger Kontakt bezüglich der Regulierung des Bielersees und der Vorhersage für Murgenthal. Im Weiteren wurde mehreren Privatpersonen Auskunft zu der möglichen Entwicklung an den Fliessgewässern gegeben.

**Tab. 4.2 > An die Kantone ausgegebene Abflussvorhersagen vom 06.08.2007 bis 09.08.2007**

Datum, Zeit (MESZ)	Stationen	Kantone
Montag, 06.08.2007, 11:50	Emme – Emmenmatt, Aare – Murgenthal, Aare – Brugg, Reuss – Mellingen, Rhein – Rheinfelden, Rhein – Basel	AG, BE, ZG, ZH, BS
Montag, 06.08.2007, 19:30	Emme – Emmenmatt, Aare – Murgenthal, Aare – Brugg, Reuss – Mellingen, Rhein – Rheinfelden, Rhein – Basel	AG, BE, ZG, ZH, BS
Dienstag, 07.08.2007, 10:00	Emme – Emmenmatt, Aare – Murgenthal, Reuss – Mellingen, Thur – Halden, Thur – Andelfingen, Rhein – Rheinfelden	AG, BE, ZG, ZH, BS, TG
Mittwoch, 08.08.2007, 11:00	Emme – Emmenmatt, Aare – Murgenthal, Aare – Brugg, Kleine Emme – Littau, Reuss – Mellingen, Rhein – Rheinfelden, Rhein – Basel	AG, BE, ZG, ZH, BS LU, SO
Mittwoch, 08.08.2007, 20:00	Emme – Emmenmatt, Aare – Murgenthal, Aare – Brugg, Kleine Emme – Littau, Reuss – Mellingen, Limmat – Baden, Thur – Halden, Thur – Andelfingen, Rhein – Rekingen, Rhein – Rheinfelden, Rhein – Basel	AG, BE, ZG, ZH, BS, TG, LU, SO
Donnerstag, 09.08.2007, 04:30	dito	dito
Donnerstag, 09.08.2007, 08:00	dito	dito
Donnerstag, 09.08.2007, 12:00	dito	dito
Donnerstag, 09.08.2007, 15:15	dito	dito
Donnerstag, 09.08.2007, 19:15	dito	dito

## 4.3

**Güte der operationellen Vorhersage**

Grundsätzlich setzt sich die Unsicherheit von Abflussvorhersagen aus den Unsicherheiten der numerischen Wettervorhersage und den Unsicherheiten der hydrologischen Modelle zusammen. In diesem Kapitel wird die Güte der während dem Hochwasser operationell herausgegebenen Abflussvorhersagen, also diejenigen basierend auf dem Wettermodell COSMO-7, analysiert.

Bereits drei Tage vor dem Ereignis wurden mehrere Warnschwellen überschritten und die Kunden entsprechend informiert. Aber erst die Vorhersage vom 08.08.2007 11:00 MESZ, also – je nach Station – etwa 12 bis 24 Stunden vor dem Ereignis, konnte die Höhe und den Zeitpunkt der Abflussspitzen einigermaßen zufrieden stellend erfassen. Dies gilt nicht für das Thur-Hochwasser, welches vom Modell überhaupt nicht vorhergesagt wurde. Am besten wurde die Höhe des maximalen Abflusses an der Aare in Murgenthal und Brugg sowie am Rhein in Rheinfelden und Basel prognostiziert. Die Abweichungen im Vergleich zu den beobachteten Abflussspitzen betragen zwischen 8 und 16%. An den restlichen Stationen waren sie zum Teil deutlich grösser. Mit der Ausnahme von Reuss–Mellingen traten die Abflussspitzen an allen Stationen früher ein als gemäss den Modellergebnissen erwartet wurde. Insbesondere an der Emme in Emmenmatt und der Aare in Murgenthal waren die Differenzen mit bis zu 17 Stunden sehr gross.

Vorhersage 08.08.2007,  
11:00 MESZ

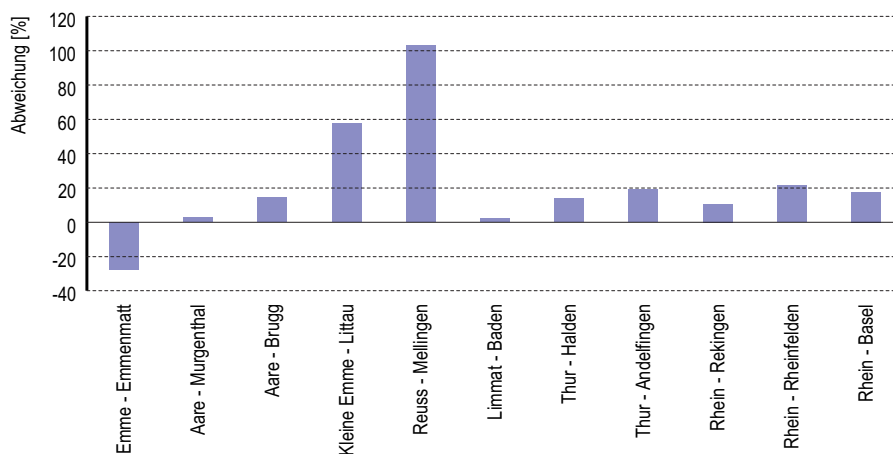
Die Vorhersage vom 08.08.2007 20:00 MESZ konnte die Höhe der Abflussspitzen mehrheitlich gut erfassen. Abgesehen von den Stationen Emme–Emmenmatt, Kleine Emme–Littau und Reuss–Mellingen war die Abweichung kleiner als 21% (Abb. 4.1). Wiederum wurden – mit der Ausnahme von Reuss–Mellingen – die Abflussspitzen zu spät prognostiziert (Abb. 4.2). Die Differenz war generell etwas kleiner als in der Vorhersage vom Morgen.

Vorhersage 08.08.2007,  
20:00 MESZ

Zur Bestimmung der zeitlichen Differenz wurde der Zeitpunkt des Spitzenabflusses in der Vorhersage und in den beobachteten Werten verglichen. Je nach Verlauf der Ganglinie kann die Angabe etwas trügerisch sein. In der Vorhersage der Station Aare–Murgenthal vom 08.08.2007 11:00 MESZ rechnete HBV-96 z. B. einen flachen Scheitel (Abb. 4.8, Ganglinie «Aare–Murgenthal, berechnet mit vorhergesagten meteorologischen Daten; mit UDD»). Da der Abfluss am Ende des Scheitels ein wenig höher war als zu Beginn, ergibt dies eine zeitliche Differenz von 14 Stunden. Wird jedoch der Beginn des Scheitels betrachtet, ist die Abweichung mit 8 Stunden deutlich kleiner.

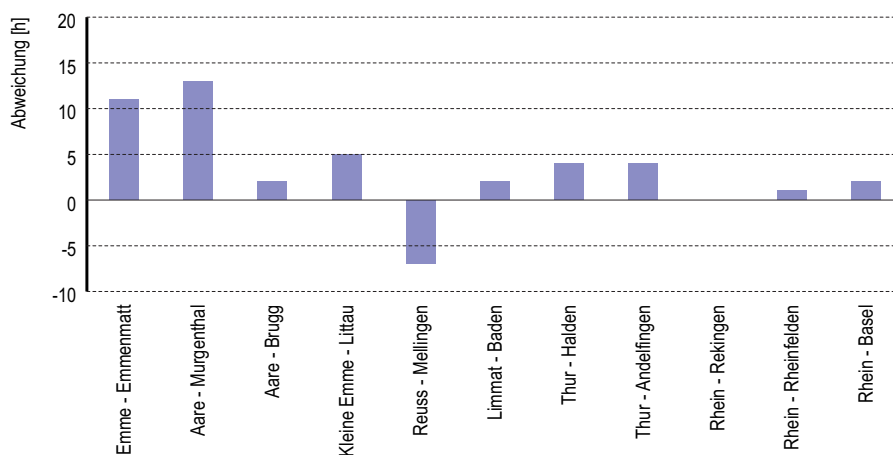
**Abb. 4.1 > Vorhersage vom 08.08.2007, 20:00 MESZ –  
Prozentuale Abweichung der vorhergesagten von der beobachteten Höhe des Spitzenabflusses**

*Eine positive Abweichung bedeutet, dass der vorhergesagte Spitzenabfluss höher war als der beobachtete.*



**Abb. 4.2 > Vorhersage vom 08.08.2007 20:00 MESZ –  
Abweichung des vorhergesagten vom beobachteten Zeitpunkt des Spitzenabflusses**

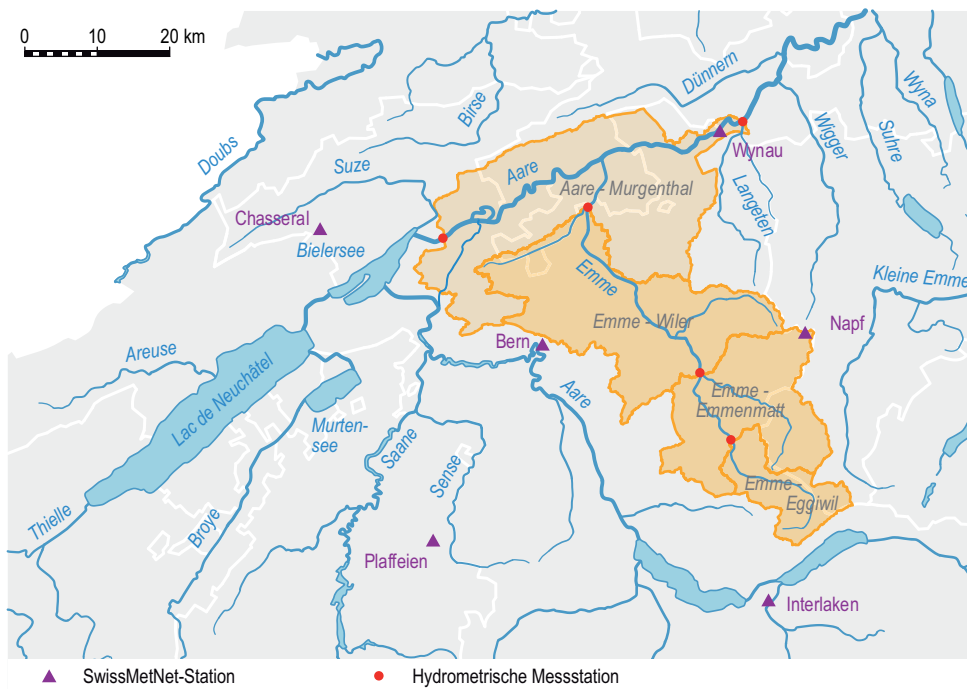
*Eine positive Abweichung bedeutet, dass der beobachtete Spitzenabfluss früher eintrat als gemäss der Vorhersage erwartet wurde.*



#### 4.4 Analyse der operationellen Vorhersagen für die Emme und die Aare

Die Aare unterhalb des Bielersees und die Emme waren vom Hochwasser besonders betroffen. Deshalb werden in diesem Kapitel die operationellen Vorhersagen für die Stationen Aare–Murgenthal und Emme–Emmenmatt detaillierter betrachtet und zwar diejenigen vom 08.08.2007 11:00 MESZ. Für die Analyse wurden zudem Vorhersagen mit meteorologischen Messdaten und unterschiedlich gewählten Bielerseeausflüssen nachgerechnet.

**Abb. 4.3** > Hydrologische Teileinzugsgebiete und Messstationen im Untersuchungsgebiet



#### 4.4.1 Meteorologische Messdaten für die Nachrechnung der Abflussvorhersagen

Durch das Nachrechnen von Abflussvorhersagen mit meteorologischen Messdaten kann die Güte des hydrologischen Modells beurteilt werden, da die numerischen Wettervorhersagen als mögliche Fehlerquelle ausgeschlossen werden können. Das hydrologische Modell HBV-96 benötigt als meteorologische Eingangsparameter den Niederschlag, die Temperatur, die Windgeschwindigkeit und die Taupunkt-Temperatur. MeteoSchweiz erstellte im Rahmen der Ereignisanalyse für den Niederschlag gegitterte Datensätze, für die anderen benötigten Parameter jedoch nicht (Anhang A2). Deshalb werden für das Nachrechnen der Abflussvorhersagen die Messdaten der SwissMetNet-Stationen verwendet, für welche alle notwendigen Parameter zur Verfügung stehen.

Vom Modell HBV-96  
benötigte meteorologische  
Eingangsparameter

In FEWS werden die Punktmessungen der SwissMetNet-Stationen mittels Kriging zu einem stündlichen Gebietsmittel interpoliert. Beim Niederschlag bezieht sich das Mittel auf das Teileinzugsgebiet, bei der Temperatur, der Windgeschwindigkeit und der Taupunkt-Temperatur auf Höhenstufen innerhalb der Teileinzugsgebiete. Beim Niederschlag wird das Mittel anschliessend mit einem für das Teileinzugsgebiet spezifischen Korrekturfaktor multipliziert. Es muss beachtet werden, dass die resultierenden Werte nicht unbedingt mit den wirklichen übereinstimmen. Für die drei Teileinzugsgebiete der Emme verwendet FEWS u. a. die SwissMetNet-Stationen von Bern, Wynau, Interlaken und vom Napf (Abb. 4.3). Diese bilden nicht in jedem Fall die meteorologischen Verhältnisse des Emmentals ab. Zur Kontrolle wurden deshalb die von der MeteoSchweiz zur Verfügung gestellten Niederschlagsanalysen herangezogen (Anhang A2). Die Resultate der Interpolationen für die anderen Parameter konnten nicht überprüft werden. Sie sind in diesem Zusammenhang auch nicht von entscheidender Bedeutung, weil bei diesem Hochwasser der Schnee im Einzugsgebiet der Emme und im Einzugsgebiet der Aare unterhalb des Bielersees keine Rolle spielt. MeteoSchweiz erstellte zwei unterschiedliche Niederschlagsdatensätze:

Kontrolle der verwendeten  
meteorologischen Messdaten

- > *Pluviometer-Datensatz:* Der Datensatz ist auf Tagesbasis und eignet sich insbesondere für genaue Schätzungen der absoluten Gebietsniederschlagsmengen auf einer Skala von mindestens 250 km<sup>2</sup> im Flachland oder 400 km<sup>2</sup> im Gebirge (Anhang A2-1).
- > *Radar-Datensatz:* Der Datensatz ist auf Stundenbasis und eignet sich insbesondere für die Beurteilung der zeitlichen und räumlichen Entwicklung des Niederschlagsereignisses. Bezüglich der absoluten Genauigkeit der Mengen erfüllt er nicht so hohe Anforderungen (Anhang A2-2).

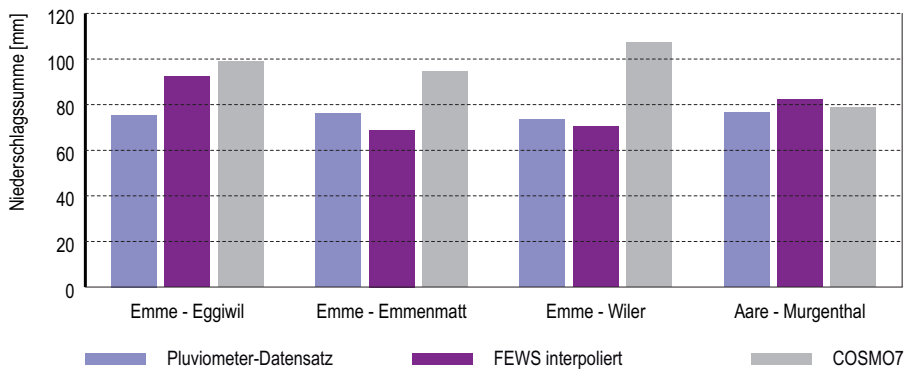
Mittels eines geografischen Informationssystems wurden mit den beiden Datensätzen die Mittel für die FEWS-Teileinzugsgebiete bestimmt. Auch diese Werte sind mit Unsicherheiten behaftet. Es ist jedoch die beste vorhandene Annäherung. Genauere Angaben zu den Unsicherheiten in den Niederschlagsanalysen der MeteoSchweiz sind in Bezzola und Hegg (2008) und Frei und Germann (2007) zu finden.

Die Tagessummen der in FEWS interpolierten und die auf der Basis des Pluviometer-Datensatzes der MeteoSchweiz berechneten Gebietsniederschläge der Teileinzugsgebiete für den 08.08.2007 und 09.08.2007 liegen in derselben Grössenordnung (Abb. 4.4

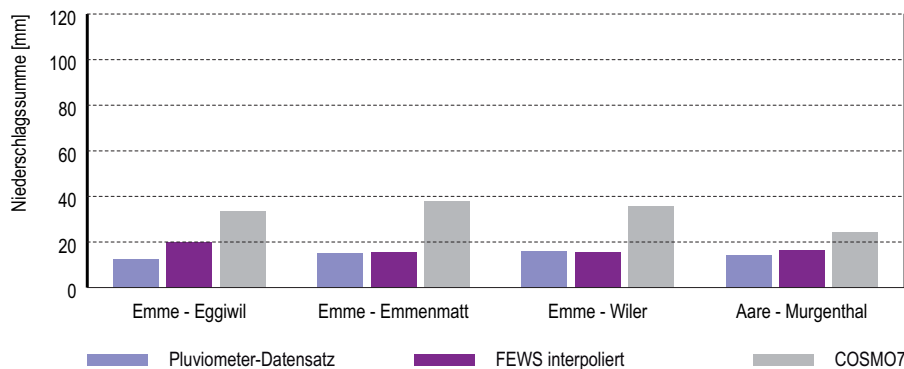
Niederschlagsmengen

und 4.5). Nur im Teileinzugsgebiet Emme–Eggwil weichen die Werte stärker voneinander ab. Vom 08.08.2007 07:00 MEWZ bis zum 09.08.2007 07:00 MEWZ beträgt zum Beispiel die Niederschlagssumme in FEWS 93 mm und die Analyse der Meteo-Schweiz ergibt 76 mm. Dies ist auf den in FEWS verwendeten Niederschlagskorrekturfaktor (1.393) zurückzuführen, welcher offenbar in diesem Ereignis nicht optimal ist. Für die beiden anderen Emme-Teileinzugsgebiete und das Teileinzugsgebiet Aare–Murgenthal stimmen die Werte in FEWS trotz den zum Teil weit entfernten Regenmessern gut überein.

**Abb. 4.4** > Vergleich der Niederschlagssummen vom 08.08.2007 07:00 MEWZ bis zum 09.08.2007 07:00 MEWZ für verschiedene Teileinzugsgebiete, siehe Abb. 4.3



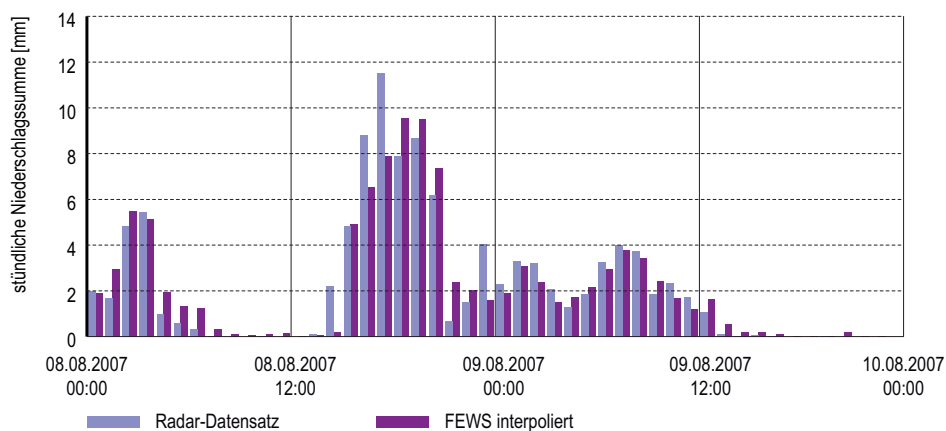
**Abb. 4.5** > Vergleich der Niederschlagssummen vom 09.08.2007 07:00 MEWZ bis zum 10.08.2007 07:00 MEWZ für verschiedene Teileinzugsgebiete, siehe Abb. 4.3



Der zeitliche Ablauf des Niederschlagsereignisses am 08.08.2007 und 09.08.2007 wird mit den in FEWS interpolierten Gebietsniederschlägen gut abgebildet. Im Vergleich zum Radardatensatz gibt es in allen betrachteten Teileinzugsgebieten nur kleinere Abweichungen, siehe das Beispiel Emme – Emmenmatt in Abb. 4.6.

Zeitliche Entwicklung des Niederschlagsereignisses

**Abb. 4.6** > Vergleich der stündlichen Niederschlagssummen für das Teileinzugsgebiet Emme – Emmenmatt



#### 4.4.2 Emme – Emmenmatt

Die operationelle Vorhersage für die Station Emme–Emmenmatt berechnete einen gegenüber der Realität um 35 % tieferen Spitzenabfluss, obwohl COSMO-7 die Niederschlagsmengen überschätzte (Abb. 4.4, 4.5 und 4.6). Wenn als Input für die Vorhersagen die meteorologischen Messdaten verwendet werden, ist die Abweichung des prognostizierten im Vergleich zum beobachteten maximalen Abfluss noch grösser und beträgt rund 70 %. Da die in FEWS interpolierten Gebietsniederschlagssummen als plausibel angesehen werden (Kap. 4.4.1), deutet dies auf eine schlechte hydrologische Modellierung hin.

Höhe des Spitzenabflusses

HBV-96 rechnete in der operationellen Vorhersage den Zeitpunkt des maximalen Abflusses 17 h zu spät. Einen Teil dieser Verzögerung kann auf das Wettermodell COSMO-7 zurückgeführt werden, welches im Vergleich zum Radar-Datensatz die Phase des Hauptniederschlages etwa 3 bis 4 Stunden zu spät prognostizierte (vgl. Abb. 4.7 und 4.6). Der Rest wird wahrscheinlich durch die schlechte hydrologische Modellierung verursacht. Der Anstieg ist zu langsam, obwohl COSMO-7 hohe Niederschlagsintensitäten prognostizierte. Wenn für die Vorhersage die gemessenen meteorologischen Daten als Input verwendet werden, steigt der Abfluss ebenfalls deutlich zu langsam an.

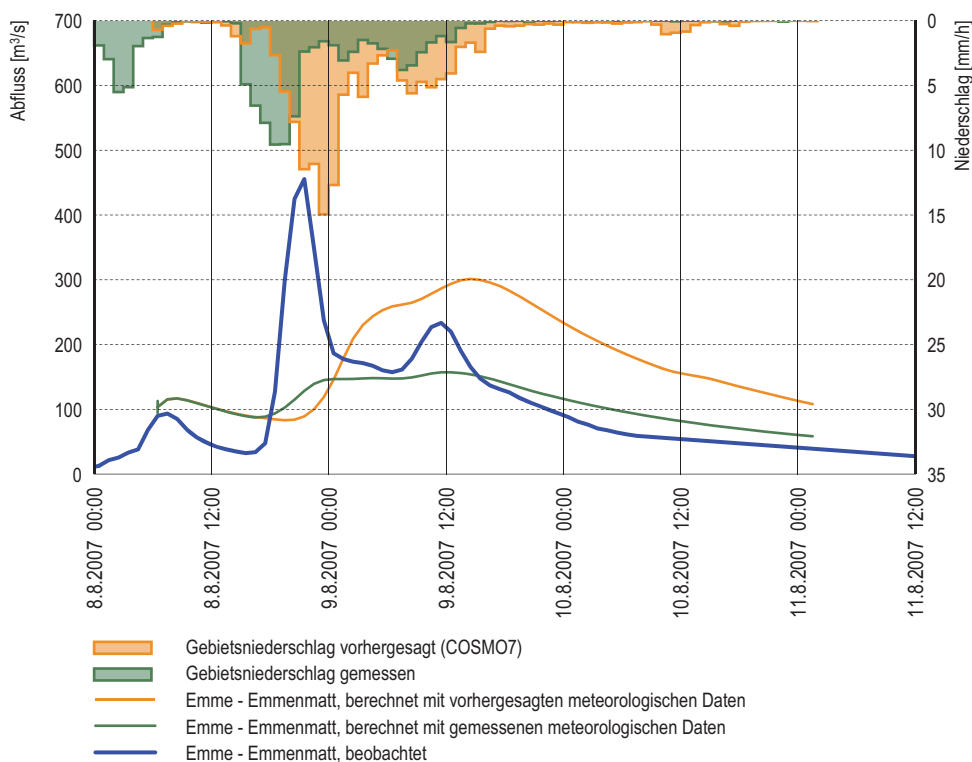
Zeitpunkt des Spitzenabflusses

Im Einzugsgebiet der Emme spielen die kurzfristigen Niederschlagsintensitäten bei der Entstehung von Hochwasser eine wichtige Rolle. Zu den kurzfristigen Niederschlagsintensitäten sind keine gesicherten Werte vorhanden, weil die absoluten stündlichen Mengen im Radar-Datensatz hohe Qualitätsanforderungen nicht erfüllen. Durch die

Hydrologische Modellierung

Einbeziehung der beiden Niederschlagsanalysen von MeteoSchweiz ist jedoch davon auszugehen, dass die in FEWS interpolierten Gebietsniederschläge in diesem Ereignis eine gute Schätzung darstellt. Deshalb scheint die Hypothese der schlechten hydrologischen Modellierung des Emme-Einzugsgebiets plausibel zu sein. In früheren Untersuchungen, bei denen die Abflüsse mit meteorologischen Messdaten nachgerechnet wurden, wurde ebenfalls eine generelle Unterschätzung der Spitzenabflüsse bei der Station Emme – Emmenmatt durch das Modell festgestellt. Dies kann verschiedene Gründe haben. Einerseits ist es aufgrund der schlechten Abdeckung mit meteorologischen Messstationen schwierig, das Einzugsgebiet gut zu kalibrieren. Andererseits können auch die geringe räumliche Differenzierung und die vereinfachten Prozessabbildungen im verwendeten Modell eine Rolle spielen. In HBV-96 werden zwar innerhalb der Teileinzugsgebiete eine Höhenstufung und eine Unterteilung der Landnutzung vorgenommen. Doch im Vergleich zu distributiven und stärker prozessorientierten hydrologischen Modellen wie WaSiM<sup>7</sup> oder PREVAH<sup>8</sup> sind diese Differenzierungen innerhalb der Teileinzugsgebiete noch ziemlich grob.

**Abb. 4.7 > Vergleich der beobachteten Abflüsse und Niederschläge mit den Ergebnissen der operationellen Vorhersage vom 08.08.2007 11:00 MESZ und der Vorhersage mit meteorologischen Messdaten für die Station Emme – Emmenmatt**



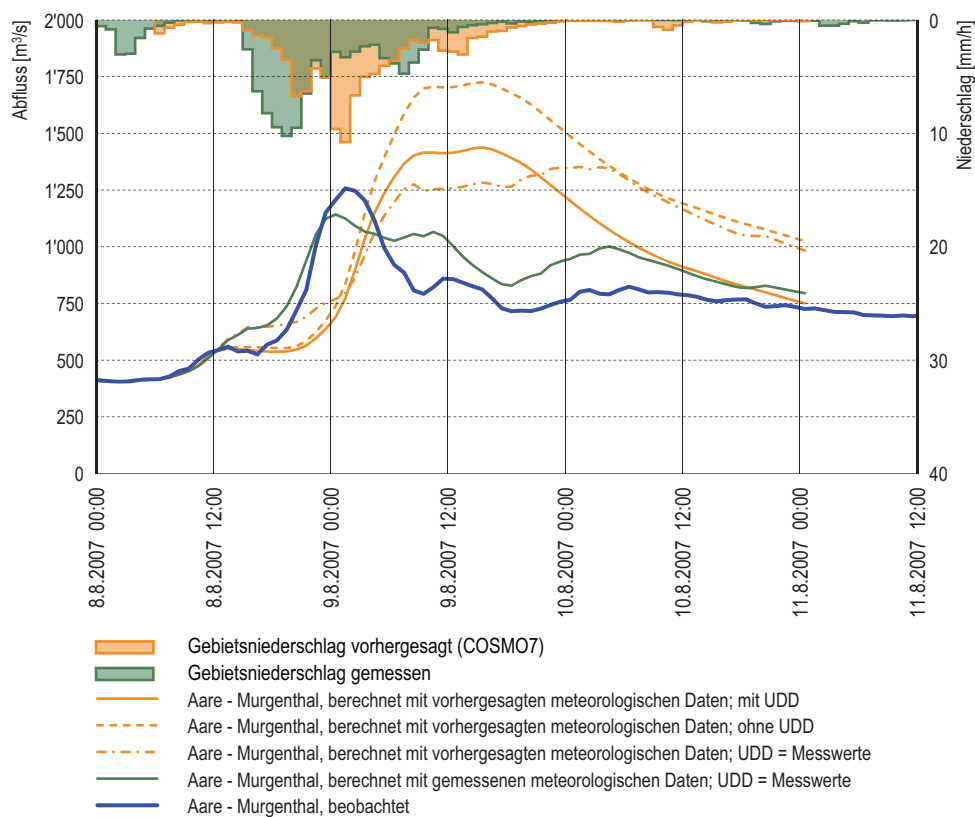
<sup>7</sup> Informationen dazu sind zu finden unter [www.wasim.ch/](http://www.wasim.ch/)

<sup>8</sup> Informationen dazu sind zu finden unter <http://hydrant.unibe.ch/PREVAH/>

#### 4.4.3 Aare – Murgenthal

Der Abfluss bei Murgenthal bildet sich aus dem Bielerseeausfluss, dem Zufluss der Emme und der Murg sowie dem im Teileinzugsgebiet generierten Abfluss (Abb. 4.3). Der Ausfluss aus dem Bielersee wird vom Kanton Bern gesteuert. Ein Regulierreglement legt fest, wie das Wehr zu bedienen ist. Es beinhaltet die Reguliervorschriften, ein Regulierdiagramm sowie einen Anhang betreffend die Hochwasserregulierung, d. h. für die Drosselung des Bielerseeausflusses bei Emmehochwasser (vgl. Kap. 5.3). Das Regulierdiagramm (Linienreglement) ist in FEWS implementiert, die Hochwasserregulierung hingegen nicht. Da während einem Emme-Hochwasser nicht nach dem Linienreglement gesteuert wird, ermöglicht FEWS auch eine manuelle Eingabe des Bielerseeausflusses. Diese Option wird als UDD (User Defined Discharge) bezeichnet. Für die Analyse wurden Vorhersagen mit unterschiedlich gewählten Bielerseeausflüssen nachgerechnet (vgl. Abb. 4.8).

**Abb. 4.8 > Vergleich der beobachteten Abflüsse und Niederschläge mit den Ergebnissen der operationellen Vorhersage vom 08.08.2007 11:00 MESZ und weiteren Vorhersagevarianten für die Station Aare – Murgenthal**



- > Aare–Murgenthal, *berechnet mit vorhergesagten meteorologischen Daten; mit UDD*: Dies ist die operationelle Vorhersage, welche am 08.08.2007 11:00 MESZ herausgegeben wurde. Der zu erwartende Bielerseeausfluss wurde dabei manuell eingegeben (Abb. 4.9). Basis hierfür waren die Angaben der Regulierzentrale des Kantons Bern wonach vorgesehen war, den Ausfluss in den nächsten fünf Stunden auf 500 m<sup>3</sup>/s zu erhöhen. Dieser Anstieg wurde im UDD eingegeben und danach der Ausfluss konstant auf 500 m<sup>3</sup>/s gehalten, was auch im Beilageblatt für die Kunden erwähnt wurde.

Der Anstiegsbeginn und der Zeitpunkt des Spitzenabflusses der Aare bei Murgenthal werden zu spät vorhergesagt. Dies ist auf die beiden folgenden Punkte zurückzuführen: 1. HBV-96 berechnet den Zeitpunkt des Spitzenabflusses bei der Station Emme–Emmenmatt 17 Stunden zu spät (Kap. 4.4.2). 2. COSMO-7 prognostiziert das Hauptniederschlagsereignis mit den höchsten Intensitäten im Teileinzugsgebiet Aare–Murgenthal zu spät (Abb. 4.8). Entsprechend berechnet HBV-96 den im Teileinzugsgebiet generierten Abfluss zu spät.

HBV-96 berechnet einen gegenüber der Realität um 140 m<sup>3</sup>/s zu hohen Spitzenabfluss, obwohl die Vorhersage in Emmenmatt 160 m<sup>3</sup>/s zu tief ausfällt. Dies hängt mit dem eingegebenen Bielerseeausfluss zusammen. Im FEWS wurde mit einem konstanten Ausfluss von 500 m<sup>3</sup>/s gerechnet. In Wirklichkeit wurde dieser wegen dem Emme-Hochwasser jedoch vorübergehend fast auf 200 m<sup>3</sup>/s gedrosselt (Abb. 4.9). Zudem wird im Teileinzugsgebiet Aare–Murgenthal ein zu hoher Abfluss vorhergesagt. Frühere Analysen zeigten bereits, dass das hydrologische Modell die Abflüsse in diesem Teileinzugsgebiet bei Hochwasser tendenziell überschätzt.

Der Abfluss des abfallenden Astes ist zu hoch, obwohl der im UDD eingegebene Bielerseeausfluss ab dem 09.08.2007 20:00 MESZ tiefer ist als der gemessene. Der Grund liegt darin, dass in der Vorhersage sowohl der abfallende Ast der Station Emme–Emmenmatt als auch des Teileinzugsgebiets Aare–Murgenthal zu hoch ist.

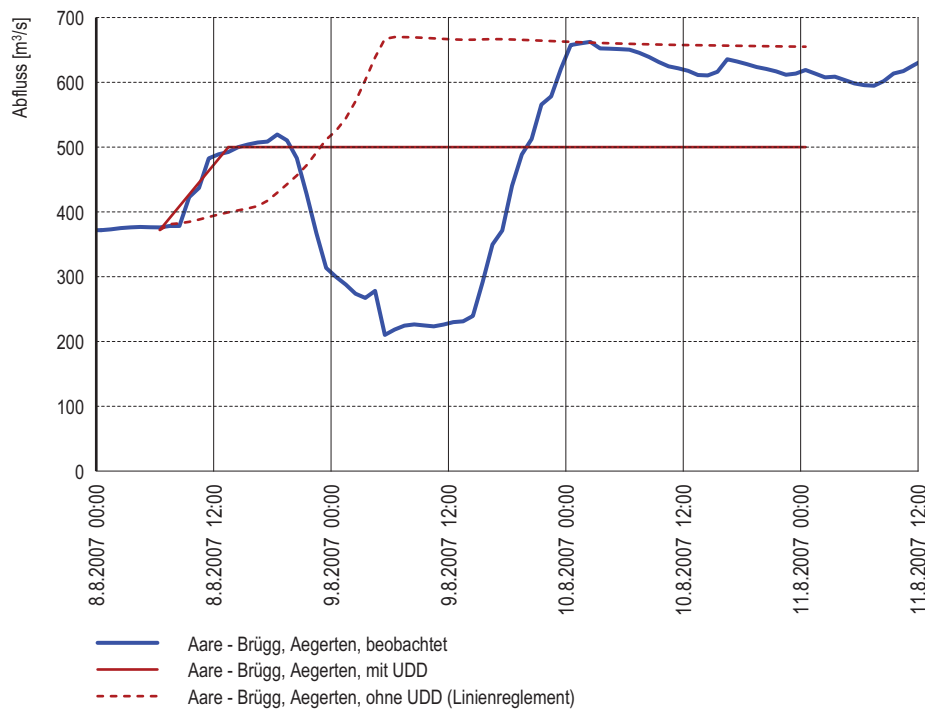
- > Aare–Murgenthal, *berechnet mit vorhergesagten meteorologischen Daten; ohne UDD*: Bei dieser Modellberechnung wurde der Bielerseeausfluss nicht manuell eingegeben, sondern FEWS bestimmte ihn aufgrund des Linienreglements. Dazu rechnet HBV-96 eine Vorhersage des Bielerseepegels. In Abb. 4.9 ist ersichtlich, dass der Bielerseeausfluss ohne UDD ab dem 09.08.2007 höher ist als der mit UDD eingegebene. Damit lässt sich auch der höhere Abfluss in Murgenthal im Vergleich zur operationellen Vorhersage erklären. Es zeigt aber auch die Wichtigkeit und Notwendigkeit der UDD und entsprechender Grundlagen, um damit plausible Vorhersagen zu erstellen.
- > Aare–Murgenthal, *berechnet mit vorhergesagten meteorologischen Daten; UDD = Messwerte*: Die Vorhersage wurde mit dem beobachteten Bielerseeausfluss gerechnet. Dieser ist im Vergleich zum eingegebenen Bielerseeausfluss bei der operationellen Vorhersage wegen der Drosselung zuerst tiefer und danach höher. Entsprechend ist der maximale Abfluss in Murgenthal im Vergleich zur operationellen Vorhersage tiefer; doch es dauert länger bis der Abfluss wieder abnimmt.

> Aare–Murgenthal, *berechnet mit gemessenen meteorologischen Daten; UDD = Messwerte*: Bei dieser Vorhersage berechnet HBV-96 den Zeitpunkt des Spitzenabflusses nur 1 Stunde früher als er in Realität beobachtet wurde. Offenbar kann das hydrologische Modell den zeitlichen Verlauf der Abflussbildung im Teileinzugsgebiet Aare–Murgenthal für dieses Ereignis gut abbilden. Die Menge des in diesem Teileinzugsgebiet generierten Abflusses überschätzt es hingegen. Denn der berechnete Spitzenabfluss für die Station Aare–Murgenthal ist im Vergleich zum beobachteten nur rund 100 m<sup>3</sup>/s zu tief, obwohl die Vorhersage für Emme–Emmenmatt 300 m<sup>3</sup>/s zu tief ausfällt (vgl. Abb. 4.7, Abfluss berechnet mit gemessenen meteorologischen Daten).

Da der Zufluss aus der Murg für die Vorhersage der Station Aare–Murgenthal eine untergeordnete Rolle spielt – an der Station Murg – Murgenthal wurde ein Spitzenabfluss von 50 m<sup>3</sup>/s beobachtet – wurde er in der Analyse nicht berücksichtigt.

Die detaillierte Analyse zeigt, wie sensibel das System reagiert. Für eine gute Vorhersage für die Station Aare–Murgenthal müssen alle Elemente stimmen: das Wettermodell, der Bielerseeausfluss, das hydrologische Modell für das Emme-Einzugsgebiet und das Teileinzugsgebiet Aare–Murgenthal.

**Abb. 4.9** > Vergleich des beobachteten Bielerseeausflusses bei der Station Aare – Brügg, Aegerten mit dem Ausfluss gemäss Linienreglement und dem Ausfluss, welcher für die Vorhersage vom 08.08.2007 11:00 MESZ manuell eingegeben wurde



#### 4.5 **Erfahrungen mit den Abflussvorhersagen im Rahmen von MAP D-PHASE**

Die Mitarbeit im Forschungsprojekt MAP D-PHASE brachte für das BAFU mehrere Neuerungen mit sich:

Neuerungen für das BAFU  
dank MAP D-PHASE

1. Das BAFU berechnete Abflussvorhersagen basierend auf verschiedenen und nicht nur einem einzigen Wettermodell.
2. Mit den Wettermodellen COSMO-LEPS und EZMWF standen Mittelfristvorhersagen zur Verfügung. Deren Vorhersagehorizonte betragen im Gegensatz zu COSMO-7 mehr als drei Tage.
3. Mit COSMO-2 setzte das BAFU ein häufig aktualisiertes Wettermodell ein.

In den folgenden Kapiteln wird untersucht, welchen Nutzen diese Neuerungen während dem Augusthochwasser gebracht haben. Am Schluss wird die Güte der Abflussvorhersagen basierend auf den verschiedenen Wettermodellen auf einer qualitativen Basis beurteilt. Für die Analysen wurden jeweils die Stationen Emme–Emmenmatt, Aare–Murgenthal, Kleine Emme–Littau und Rhein–Rheinfeldern herangezogen. Die Stationsauswahl wurde aufgrund der Kriterien Relevanz für das Ereignis, geografische Lage und Einzugsgebietsgrösse getroffen.

##### 4.5.1 **Nutzen von verschiedenen Modellen**

Dank dem Forschungsprojekt MAP D-PHASE standen während dem Hochwasser verschiedene Wettermodelle und dadurch verschiedene hydrologische Vorhersagen zur Verfügung. Diese Situation war sowohl für das BAFU als auch für seine Kunden neu. Innerhalb des Prognoseteams wurden die verschiedenen Vorhersagen intensiv diskutiert. Dabei war der Kontakt mit den Meteorologen sehr wichtig. Bei den Telefongesprächen mit MeteoSchweiz wurde immer auch nach einer Einschätzung der vom BAFU verwendeten Wettermodelle gefragt. Die erhaltenen Informationen wurden in den Beilageblättern für die Kunden und in den Anmerkungen zu den öffentlichen Vorhersagen auf dem Internet weitergegeben. Auf dem Beilageblatt vom 9. August 12:00 Uhr stand zum Beispiel:

Austausch mit den Meteorologen  
zu den Wettermodellen

*«Gemäss Mitteilung von MeteoSchweiz sind die prognostizierten Niederschläge aus COSMO-7 eher etwas tief. Folglich sind die sinkenden Abflüsse mit Vorsicht zu betrachten. MeteoSchweiz hat mehr Vertrauen in das EZMWF-Modell. Wir empfehlen deshalb, die entsprechende Abflussprognose von MAP D-PHASE auch noch anzuschauen.»*

Die verschiedenen Abflussvorhersagen im Rahmen von MAP D-PHASE erlaubten eine Einordnung der operationellen Vorhersage. Dies war aus Sicht des BAFU sehr hilfreich, obwohl sich im Nachhinein die COSMO-7-Abflussvorhersagen als die besten herausstellten (Kap. 4.5.4). Wie die Kunden mit der Modellvielfalt umgingen, wird im Rahmen einer sozialwissenschaftlichen Evaluation an der Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) im Auftrag des BAFU untersucht. Diese Arbeiten sind noch nicht abgeschlossen.

Einordnung der operationellen  
Abflussvorhersage

#### 4.5.2 Nutzen von Mittelfristvorhersagen

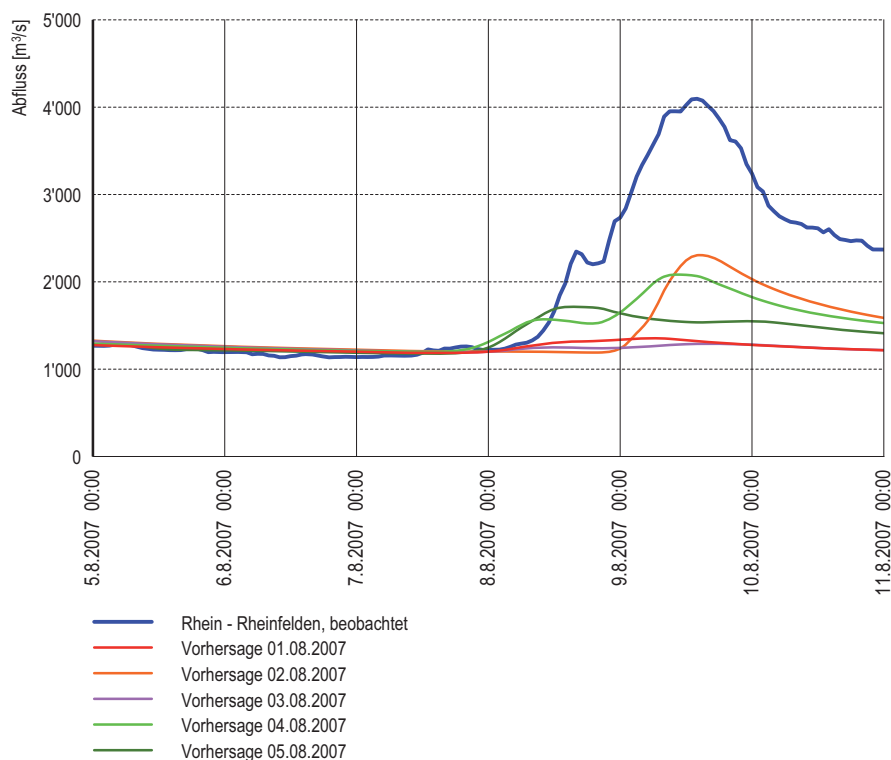
Der Vorhersagehorizont der Wettermodelle COSMO-LEPS und EZMWF beträgt 5 bzw. 10 Tage. Entsprechend stehen auch hydrologische Mittelfristvorhersagen zur Verfügung. Die Vorhersagen wurden nachträglich gerechnet, weil damals am Wochenende vom 4. und 5. August keine Vorhersagen erstellt wurden. Dabei muss beachtet werden, dass beim EZMWF-Modell jeweils der 00-Uhr-Lauf verwendet wurde. Im Normalbetrieb wird bei der Vorhersage am Morgen der 12-Uhr-Lauf vom Vortag verwendet, weil das EZMWF-Modell beim BAFU 11 h später eintrifft. Bei den Simulationen wurde der Seeausfluss des Thuner-, Bieler- und Vierwaldstättersees manuell eingegeben (UDD). Der letzte Messwert wurde als künftiger Seeausfluss angenommen.

Nachrechnen der  
Abflussvorhersagen

Die COSMO-LEPS-Vorhersagen 5 und 4 Tage vor dem Ereignis wiesen nur auf ganz leicht erhöhte Abflüsse hin. Auch die Maxima der Ensembles liessen noch kein Hochwasser vermuten. Bei der Station Emme–Emmenmatt betrug zum Beispiel nur  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ , beobachtet wurden dann jedoch  $456 \text{ m}^3/\text{s}$ . Einzelne EZMWF-Vorhersagen zeigten mehrere Tage vor dem Ereignis zwar höhere Abflüsse als COSMO-LEPS, trotzdem waren die Werte noch weit unter den schliesslich beobachteten. Zudem variierten die Vorhersagen von Tag zu Tag sehr, was auch nicht ein grosses Hochwasser erahnen liess (Abb. 4.10). Folglich war der Nutzen der Mittelfristvorhersagen in diesem Fall eher klein.

Ergebnisse

**Abb. 4.10** > Mittelfristvorhersagen basierend auf dem EZMWF-Modell im Vergleich mit den beobachteten Abflüssen für die Station Rhein – Rheinfelden



### 4.5.3 Nutzen eines häufig aktualisierten Wettermodells

COSMO-2 ist ein hoch aufgelöstes Wettermodell (Auflösung: 2.2 km), mit welchem alle 3 Stunden ein neuer Lauf gerechnet wird. Während dem Ereignis wurden Abflussvorhersagen basierend auf COSMO-2 nicht in einem so hohen Rhythmus erstellt. Um die Vorteile eines häufig aufdatierten Wettermodells überprüfen zu können, wurden sie nachträglich im 3-Stunden Rhythmus gerechnet.

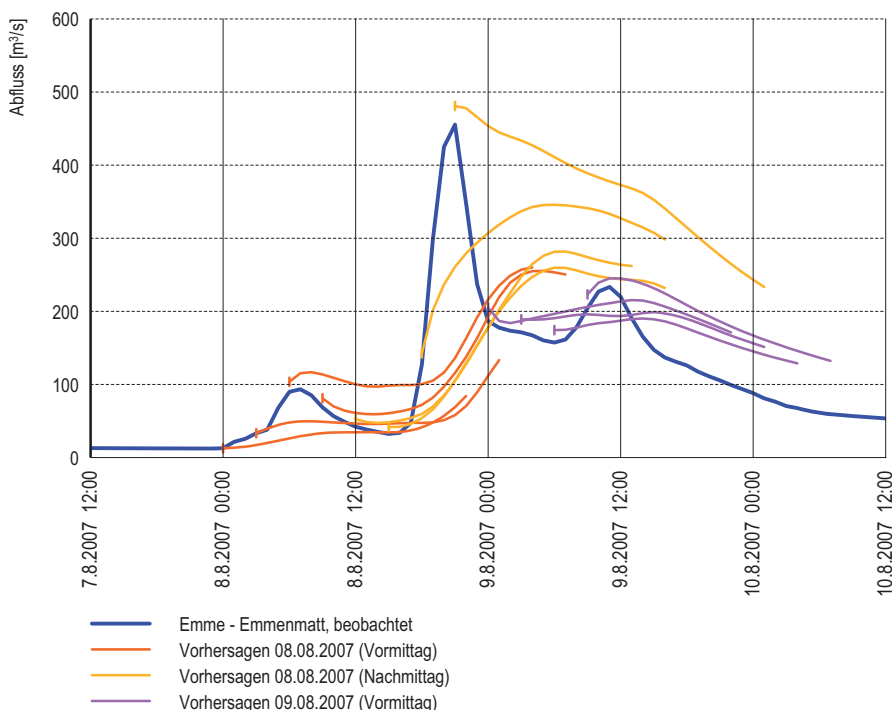
Die Resultate sehen unterschiedlich aus. Bei der Station Emme–Emmenmatt (Abb. 4.11) bringt COSMO-2 keine Verbesserung. Die meisten Vorhersagen sind noch tiefer als diejenigen mit COSMO-7 und der Zeitpunkt des Spitzenabflusses wird ebenfalls zu spät gerechnet. Sogar die Vorhersage mit Startzeit 08.08.2007 18:00 MEWZ, also nur 2.5 Stunden vor dem Scheitel, kann die Höhe und den Zeitpunkt des Spitzenabflusses nur ungenügend prognostizieren.

Nachrechnen der  
Abflussvorhersagen

Ergebnisse

**Abb. 4.11** > Beobachteter Abfluss im Vergleich mit den COSMO-2-Vorhersagen für die Station Emme – Emmenmatt

*Für die Analysen wurden die definitiven Abflusswerte verwendet. Die während dem Ereignis erstellten Abflussvorhersagen beruhen auf den provisorischen Werten. Bei der Station Emme – Emmenmatt wurden im Nachgang grössere Korrekturen vorgenommen, weshalb in dieser Darstellung die Vorhersagen nicht an den Messwerten anknüpfen.*

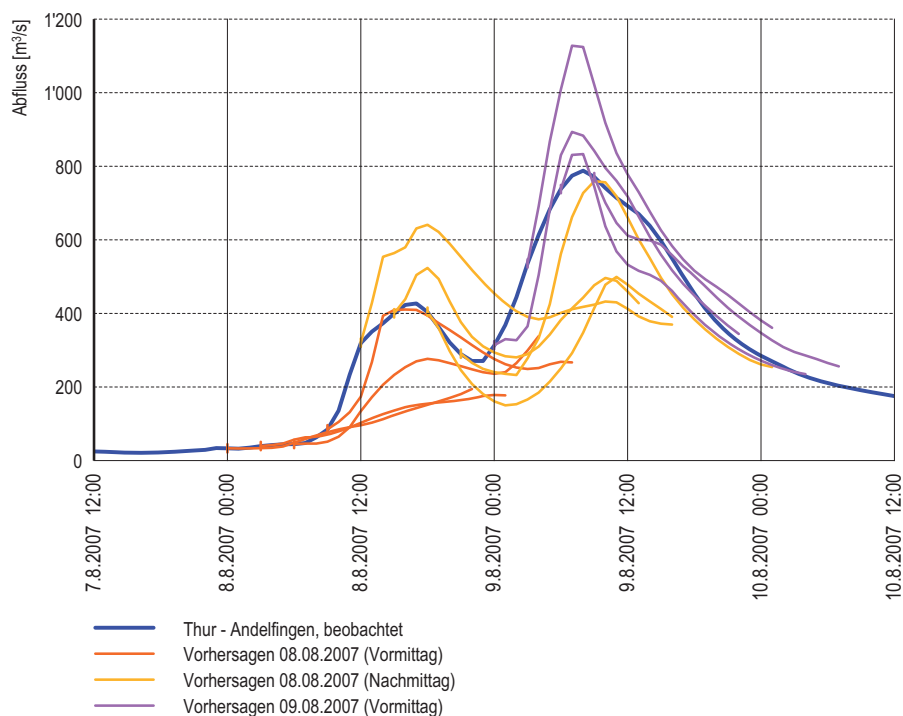


Bei der Station Kleine Emme–Littau (Abb. 4.12) sind die Vorteile eines häufig aufdatierten und hoch aufgelösten Wettermodells ersichtlich. Die ersten Vorhersagen vom 08.08.2007 prognostizieren den Verlauf des Hochwassers zwar noch schlecht. Doch ab 21:00 rechnen sie den Zeitpunkt und die Höhe des Spitzenabflusses sehr gut. Einzige

Ausnahme ist die 03-Uhr-Simulation vom 09.08.2007, welche einen zu hohen Abfluss vorhersagt.

Bei den Stationen Aare–Murgenthal und Rhein–Rheinfelden ist die Qualität der COSMO-2- und COSMO-7-Vorhersagen vergleichbar. Die COSMO-2-Vorhersagen bringen also bei diesen beiden Stationen keinen wesentlichen Vorteil.

**Abb. 4.12 > Beobachter Abfluss im Vergleich mit den COSMO-2-Vorhersagen für die Station Thur – Andelfingen**



#### 4.5.4 Vergleich der verschiedenen Modelle

Die Abflussvorhersagen basierend auf den verschiedenen Wettermodellen miteinander zu vergleichen ist schwierig. Einerseits ist die Anzahl Läufe pro Tag und der Vorhersagezeitraum sehr unterschiedlich, andererseits gibt es sowohl deterministische wie auch probabilistische Modelle. Betrachtet wurden deshalb nur die Abflussvorhersagen basierend auf den Modellen COSMO-7, EZMWF und COSMO-LEPS mit Startzeit 08.08.2007 06:00 Uhr.

Die COSMO-7-Abflussvorhersage für die Station Emme–Emmenmatt ist zwar nicht befriedigend, doch sie kommt dem beobachteten Abfluss am nächsten. Gemäss den Berechnungen basierend auf dem EZMWF-Modell wäre kein Hochwasser zu erwarten gewesen. Die vorhergesagte Abflussganglinie zeigt nur einen minimalen Anstieg und geht knapp über 100 m³/s. Bei der COSMO-LEPS-Vorhersage beträgt der höchste Wert des Medians rund 150 m³/s. Das Band des 25–75 %-Quantils erstreckt sich von

Emme – Emmenmatt

100 bis 200 m<sup>3</sup>/s, wobei kein genauer zeitlicher Ablauf des Ereignisses erkennbar ist. Der beobachtete Spitzenabfluss beträgt 456 m<sup>3</sup>/s.

Für die Station Aare–Murgenthal ist wiederum die Abflussvorhersage basierend auf COSMO-7 am besten. Die EZMWF-Abflussvorhersage ist deutlich zu tief. Die Mehrzahl der Members der COSMO-LEPS-Vorhersagen liefern ebenfalls zu tiefe Spitzenabflüsse. Das gesamte Band deckt einen Bereich von 450 bis 1850 m<sup>3</sup>/s ab und enthält somit den beobachteten Höchstabfluss von 1258 m<sup>3</sup>/s.

Für die Station Thur–Andelfingen wäre gemäss den Berechnungen basierend auf COSMO-7 und EZMWF kein Hochwasser zu erwarten gewesen. Das Band des 25–75%-Quantils der COSMO-LEPS-Vorhersage deckt einen Bereich von 250 bis 550 m<sup>3</sup>/s ab und kommt damit dem beobachteten Spitzenabfluss von 788 m<sup>3</sup>/s etwas näher. Der zeitliche Ablauf des Ereignisses ist jedoch sehr schwierig herauszulesen. Je nachdem welches Quantil betrachtet wird, ist der höchste Abfluss zu einem anderen Zeitpunkt zu erwarten.

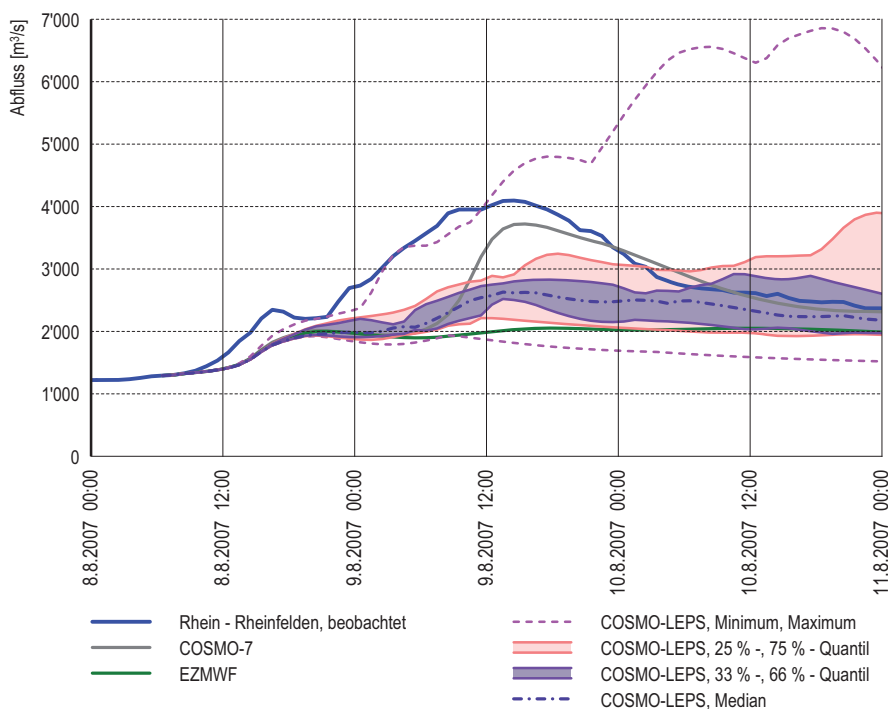
In Rheinfeldern wurde für den Rhein ein Spitzenabfluss von 4096 m<sup>3</sup>/s beobachtet. Die EZMWF-Vorhersage mit einem Maximum knapp über 2000 m<sup>3</sup>/s ist also deutlich zu tief (Abb. 4.13). Auch der höchste Wert des Medians der COSMO-LEPS-Vorhersage mit 2700 m<sup>3</sup>/s weicht noch stark vom beobachteten Wert ab. Das 25–75%-Quantil erstreckt sich von 2100 bis 3700 m<sup>3</sup>/s und das gesamte Ensemble deckt eine sehr grosse Bandbreite von 1900 bis 6800 m<sup>3</sup>/s ab. Bezüglich Spitzenabfluss und Zeitpunkt kommt die COSMO-7-Abflussvorhersage der beobachteten Ganglinie am nächsten.

Aare – Murgenthal

Thur – Andelfingen

Rhein – Rheinfeldern

**Abb. 4.13 > Vergleich der Abflussvorhersagen für die Station Rhein – Rheinfeldern basierend auf den Wettermodellen COSMO-7, EZMWF und COSMO-LEPS**



## 4.6 Erkenntnisse und Ausblick

Das BAFU belieferte alle Kunden, welche die Abflussvorhersage im Abonnement beziehen, rechtzeitig mit Vorhersagebulletins. Etwa 12 bis 24 Stunden vor dem Ereignis konnten die Abflussvorhersagen die Grösse und den Zeitpunkt der Abflussspitzen einigermaßen zufrieden stellend erfassen. Die prognostizierten Spitzenabflüsse wichen mehrheitlich weniger als 20 % von den beobachteten ab. Bezüglich des Zeitpunkts der maximalen Abflüsse betragen die Abweichungen in den meisten Fällen weniger als 5 Stunden. Bei einigen Stationen waren die Differenzen jedoch wesentlich grösser. Die Aussagegenauigkeit ist folglich auch so kurz vor dem Ereignis wegen den Unsicherheiten in den Wettermodellen und den hydrologischen Modellen begrenzt.

Güte der operationellen  
Abflussvorhersagen

Die Analyse hat gezeigt, dass die hydrologische Modellierung für die Station Emme – Emmenmatt nicht zufrieden stellend ist. Die Vereinfachungen im verwendeten Modell HBV-96 könnten einen Grund dafür sein. Deshalb ist das BAFU daran, die Voraussetzungen zu schaffen, um die distributiven hydrologischen Modelle WaSiM und PREVAH in FEWS implementieren zu können. Mit WaSiM wurden bereits erste Testrechnungen für das Emme-Einzugsgebiet durchgeführt, welche eine wesentliche Verbesserung gegenüber HBV-96 zeigen.

Hydrologische Modellierung  
des Emme-Einzugsgebiets

Für eine zuverlässige Abflussvorhersage an der Aare in Murgenthal ist unter anderem der Bielerseeausfluss eine wichtige Komponente. Da in Hochwassersituationen vom Linienreglement abgewichen wird, ist das BAFU auf die Angaben vom Regulierdienst des Amtes für Wasser und Abfall des Kantons Bern angewiesen. Die Zusammenarbeit wurde deshalb verstärkt und der Informationsfluss institutionalisiert.

Angaben zum Bielerseeausfluss  
in Hochwassersituationen

Bewährt haben sich die beim Hochwasser 2005 eingeführten Beilageblätter für die Kunden. In diesen Beilageblättern wird das COSMO-7 aufgrund der Informationen von MeteoSchweiz eingeschätzt und die Abflussvorhersagen interpretiert. Dadurch können die Kunden die Vorhersagen besser einordnen, womit sich auch viele Rückfragen erübrigen. Das Angebot im Internet für die breite Öffentlichkeit ist hingegen noch nicht optimal. Ausnahmsweise wurde auf den Bulletins ein kurzer Kommentar beigefügt, um die Interpretation der Vorhersagen zu erleichtern. Dabei handelte es sich jedoch nur um eine Behelfslösung, welche punkto Präsentation nicht überzeugte. Unter anderem aus diesem Grund ist das BAFU daran, den Internetauftritt im Bereich der Abflussvorhersage neu zu gestalten.

Vorhersageprodukte

Die Interpretation der Modellresultate wird in Zukunft immer wie wichtiger werden. Deshalb muss der Kontakt mit MeteoSchweiz noch intensiviert werden. Im Weiteren wird voraussichtlich ab Mitte 2010 das Rechnen der Abflussvorhersagen automatisiert, damit mehr Zeit für die Beurteilung der Resultate bleibt. Die Automatisierung hat zudem den Vorteil, dass in einem hohen Rhythmus neue Vorhersagen gerechnet werden können. Mit COSMO-2 steht neu auch ein häufig aktualisiertes (alle 3 Stunden) Wettermodell zur Verfügung.

Zusammenarbeit  
mit MeteoSchweiz

Dank dem Forschungsprojekt MAP D-PHASE standen während dem Ereignis verschiedene hydrologische Vorhersagen zur Verfügung. Das BAFU bewertet diese Modellvielfalt als positiv. Einerseits können die Vorhersagen besser eingeordnet werden. Andererseits wird die Kommunikation mit MeteoSchweiz erleichtert, weil sich die Meteorologen in ihren Vorhersagen nicht allein auf COSMO-7 abstützen. Es ist deshalb geplant, die vom BAFU während MAP D-PHASE genutzten Modelle (abgesehen von SRNWP-PEPS) in den operationellen Vorhersagedienst zu integrieren.

Modellvielfalt

Die im Rahmen dieser Analyse durchgeführten Auswertungen der Abflussvorhersagen basierend auf verschiedenen Wettermodellen sind relativ rudimentär, da sie sich auf ein einziges Ereignis beschränkten. In einem internen Verifikationsprojekt werden zurzeit die Abflussvorhersagen von einem Zeitraum von eineinhalb Jahren detailliert ausgewertet. Diese Resultate sind sehr wichtig, um die Güte der Abflussvorhersagen bei den einzelnen Stationen – basierend auf verschiedenen Wettermodellen – zu kennen.

Verifikation der  
Abflussvorhersagen

Erstmals in der 20-jährigen Geschichte der Abflussvorhersage des BAFU wurde ein 24-h-Betrieb aufgenommen. Dies war mit dem zur Verfügung stehenden Personal machbar, da das Ereignis nur von kurzer Dauer war. In Zukunft wird der Schichtbetrieb aufgrund der gestiegenen Ansprüche wahrscheinlich häufiger und zeitlich länger vorkommen. Dank der im Rahmen des Projekts OWARNA (Optimierung von Warnung und Alarmierung) zusätzlich geschaffenen – jedoch befristeten – Stellen ist zurzeit die Vorhersagezentrale des BAFU dafür besser gerüstet.

Schichtbetrieb

#### Literatur

Bezzola G.R., Hegg C. (Ed.) 2008: Ereignisanalyse 2005, Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahregrundlagen. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0825. 429 S.

Frei C., Germann U. 2007: Räumliche Niederschlagsanalysen zum Hochwasser 2005, Interpretationshilfe zu den Datensätzen von MeteoSchweiz. Version 1.0 vom 7. Sep. 2007: 8 S. Erhältlich unter [www.meteoschweiz.admin.ch](http://www.meteoschweiz.admin.ch) >Forschung >Publikationen >Einzelschriften.

Lindström G., Johansson M., Magnus P., Gardelin M., Bergström S. 1997: Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. In: Journal of Hydrology 201, Elsevier: 272–288.

Vorhersagen  
für die ganze Schweiz

## 5 > Regulierung der Jurarandgewässer bei Hochwasser

Armin Petrascheck, Ines Röser, Cornel Beffa, Jürg Trösch, Wolfgang Ruf, Gian Reto Bezzola

*Das System der Jurarandgewässer stiess im August 2007 an seine Grenzen, obwohl die Wiederkehrperiode der Zuflüsse zu den Jurarandseen unter 50 Jahren liegt. Bezüglich der unterliegenden Aare und der Emme muss das Hochwasser 2007 als ein seltenes Ereignis eingestuft werden. Im Rahmen der Ereignisanalyse werden mögliche Wege zur Verbesserung des Hochwasserrückhalts in den Seen und zur Hochwasserregulierung in der unterliegenden Aare aufgezeigt. Verhindert werden können Hochwasserereignisse auch in Zukunft nicht; durch eine frühere und raschere Reaktion mit Hilfe von Vorhersagen und einer optimierten Regulierung lassen sie sich aber besser bewältigen.*

### 5.1 Einleitung

Die drei durch Kanäle verbundenen Jurarandseen bilden ein System, in dem – je nach Grösse, Dauer und räumlicher Verteilung der Zuflüsse – Wasser zwischen den Seen sowohl in die eine als auch in die andere Richtung fliessen kann. Dieses System wird durch den aus dem Bielersee führenden Nidau-Büren-Kanal entwässert. Hochwasser aus dem Einzugsgebiet der drei Seen werden durch deren Retentionswirkung gedämpft. Diese Wirkung kann durch das Regulierwehr Port, mit welchem der Ausfluss aus dem Bielersee gesteuert wird, beeinflusst werden. Primäres Ziel der Regulierung ist der Hochwasserschutz. Einerseits sollen Seehöchststände zum Schutz der Seeanstösser verhindert, andererseits der Abfluss in der Aare zum Schutz der Unterlieger begrenzt werden. Die Regulierung trägt aber auch weiteren Interessensbereichen Rechnung, zum Beispiel der Landwirtschaft, Fischerei, dem Vogelschutz, der Vegetation, dem Uferschutz, Gewässerunterhalt, Tourismus, der Schifffahrt, Erholung und der Wasserkraftnutzung.

Die Jurarandgewässer – ein reguliertes System

Nach der Verwirklichung der zweiten Juragewässerkorrektion (1962–1973) herrschte die weit verbreitete Meinung, dass das Hochwasserproblem im Seeland und an der unterliegenden Aare – zumindest bis Murgenthal, wo die Aare den Kanton Bern verlässt – endgültig gelöst sei. Konnte das Überschreiten der Hochwassergrenze am Bielersee um 34 cm im Jahre 2005 noch als die berühmte Ausnahme von der Regel betrachtet werden, so zeigte die Überschreitung um 53 cm nur zwei Jahre danach, dass doch noch ein ernsthaftes Hochwasserproblem besteht. Dies um so mehr, als im August 2007 auch der Spitzenabfluss der Aare bei Murgenthal mit 1262 m<sup>3</sup>/s massiv über dem durch die Regulierung angestrebten Höchstwert von 850 m<sup>3</sup>/s (so genannte Murgenthalerbedingung) lag und in den Kantonen Solothurn und Aargau grosse Hochwas-

Trügerische Sicherheit

serschäden eintraten (vgl. Kap. 1). Das mit der zweiten Juragewässerkorrektur angestrebte Ziel, Seeanstösser und Unterlieger künftig vor Überschwemmungen vollständig zu schützen, wurde im August 2007 nicht erreicht.

Es galt somit, das Ereignis vom August 2007 in mehrfacher Hinsicht zu untersuchen. Einerseits war zu analysieren, welche Ursachen 2007 zum Überschreiten der Hochwassergrenze am Bielersee sowie der Murgenthalerbedingung führten. Des Weiteren galt es zu prüfen, welche Möglichkeiten zur Minderung der Hochwasserstände der Seen und des Abflusses der Aare bestehen. Diese Betrachtung darf sich aber nicht nur auf das Hochwasserereignis vom August 2007 beschränken, sondern muss auch verschiedenartige Szenarien einbeziehen, die auf historischen Ereignissen beruhen oder aufgrund von synthetischen Hochwasserganglinien abgeleitet werden. Somit ergaben sich folgende Aufgabenstellungen:

Motivation und Aufgabenstellung

> *Rekonstruktion des Hochwassers 2007*

Mit Hilfe numerischer Simulationen sollte das Hochwasser vom 8./9. August 2007 rekonstruiert werden. Damit sollten insbesondere auch die nicht gemessenen Zuflüsse in die Jurarandseen und die unterliegende Aare sowie die Auswirkungen der Regulierung des Wehrs Port auf den Ablauf des Ereignisses ermittelt werden.

> *Erweiterte Szenarienbetrachtung*

Um den unterschiedlichen Ereignistypen Rechnung zu tragen, waren nebst dem Hochwasser 2007 auch historische Hochwasserereignisse einzubeziehen sowie die Studie «Extremhochwasser im Einzugsgebiet der Aare» des Kantons Bern (BVE 2007) zu berücksichtigen.

> *Prüfung der Wirksamkeit möglicher Massnahmen*

Möglichkeiten zur Optimierung der Regulierung der Hochwasserstände der Jurarandseen und des Abflusses in der unterliegenden Aare sollten aufgezeigt und geprüft werden. Im Vordergrund standen dabei organisatorische Massnahmen wie der Einbezug von Niederschlags- und Abflussvorhersagen bei der Regulierung. Untersucht wurden aber auch bauliche Optimierungsmassnahmen wie beispielsweise eine Erweiterung des Zihlkanals zur besseren Ausnutzung des Retentionsvermögens des Neuenburgersees.

> *Synthese*

Schliesslich sollten auf der Basis der Analysen Vorschläge für konkrete Massnahmen bzw. für das weitere Vorgehen erarbeitet werden.

Durch die Bearbeitung dieser Aufgabenstellungen wird einerseits eine Erklärung für das Überschreiten der Grenzwerte und andererseits nach Möglichkeiten zur Vermeidung ähnlicher Höchstwerte gesucht. Sie beschränkt sich auf das Ziel «Hochwasserschutz». Dies ist jedoch nur eines der Ziele, die mit der zweiten Juragewässerkorrektur beziehungsweise der heutigen Regulierung erreicht werden sollten. Die Anforderungen der Landwirtschaft, der verschiedenen Sparten der Ökologie oder der Schifffahrt an bestimmte jahreszeitliche Wasserstände müssen genauso berücksichtigt werden wie der Wunsch der Aarekraftwerke nach einer ausgeglichenen Wasserführung. Diese teilweise gegensätzlichen Anforderungen widerspiegeln sich in den bestehenden Reguliervorschriften, wobei in Hochwassersituationen Abweichungen davon erlaubt sind. Solange sich also Vorschläge zur Anpassung der Regulierung im Rahmen dieser Ausnahmere-

Berücksichtigung  
verschiedener Interessen

gelung bewegen, wird dadurch das Gesamtkonzept der Regulierung nicht in Frage gestellt. Entsprechend beschränkte sich die Suche nach Verbesserungen im Bereich der Regulierung auf die Möglichkeiten einer kurzfristigen Intervention.

Der Abschnitt über das *System der Jurarandgewässer und der unterliegenden Aare* enthält einen Beschrieb des Einzugsgebiets und der wichtigsten hydrologischen Kenngrössen sowie einen Abriss der beiden Juragewässerkorrekturen. Es folgt ein Abschnitt, welcher der *Regulierung der Jurarandgewässer* gewidmet ist. Im Abschnitt über das *Hochwasser vom August 2007* werden die Ergebnisse der Rekonstruktion des Ereignisses beschrieben, eine Einordnung hinsichtlich der Zuflüsse zu den Jurarandseen und der Zuflüsse aus dem Zwischeneinzugsgebiet unterhalb des Bielersees vorgenommen sowie die vorläufigen Erkenntnisse aus der Analyse des Hochwassers 2007 präsentiert. Im Abschnitt über *mögliche Verbesserungsmaßnahmen* werden zunächst mögliche Strategien diskutiert, anschliessend die Wirksamkeit von Massnahmen zur Vergrösserung des Rückhalts in den Jurarandseen geprüft, erste Möglichkeiten zur Verbesserung der Vorhersage von Hochwasserabflüssen aus dem Zwischeneinzugsgebiet unterhalb des Bielersees aufgezeigt sowie mögliche Massnahmen zur Hochwasserretention und bezüglich Erhöhung der Abflusskapazität der Aare diskutiert. Nach der Präsentation der *Erkenntnisse* aus der Prüfung möglicher Verbesserungsmaßnahmen werden die bereits umgesetzten *Sofortmassnahmen* beschrieben.

Aufbau des Kapitels

## 5.2 Das System der Jurarandseen und der unterliegenden Aare

### 5.2.1 Einzugsgebiet und Abflussregime

Der Murten-, Neuenburger- und Bielersee, ihre Verbindungskanäle sowie ihre Zu- und Ausflüsse bilden ein grossräumiges wasserwirtschaftliches System. Es erstreckt sich vom waadtländischen La Sarraz im Westen bis zur Einmündung der Emme in die Aare unterhalb von Solothurn im Osten. Das Einzugsgebiet der Jurarandgewässer liegt im Hoheitsgebiet der fünf Kantone Freiburg, Waadt, Neuenburg, Bern und Solothurn. Eine Charakteristik ist, dass sich das Einzugsgebiet über verschiedene Höhenstufen erstreckt und sowohl Teile der Alpen, Voralpen, des Jura und des Mittellandes umfasst.

Die Jurarandgewässer – ein grossräumiges wasserwirtschaftliches System

Das Einzugsgebiet der Jurarandseen weist bei der Abflussmessstation Aare – Brügg, Aegerten eine Fläche von 8293 km<sup>2</sup> auf. Die Messstelle liegt rund 4.5 km flussabwärts des Ausflusses der Aare aus dem Bielersee. Zwischen dem Seeausfluss und der Station Brügg, Aegerten befindet sich das Wehr Port, mit welchem der Ausfluss aus dem Bielersee reguliert wird.

Einzugsgebiet

Die Fläche des Zwischeneinzugsgebiets von der Messstelle Aare – Brügg, Aegerten bis zur Messstelle Aare – Murgenthal beträgt 1826 km<sup>2</sup>. Rund die Hälfte des Zwischeneinzugsgebiets wird durch die Emme entwässert, deren Einzugsgebiet bei der Messstelle Emme – Wiler, Limpachmündung 939 km<sup>2</sup> misst. Mit insgesamt 10 119 km<sup>2</sup> umfasst das Einzugsgebiet der Aare bei Murgenthal rund 25 % der Fläche der Schweiz (Abb. 5.1). Dies veranschaulicht die Bedeutung der Jurarandgewässer für den Schweizer Wasserhaushalt.

**Abb. 5.1 > Lage und Grösse des Einzugsgebiets der drei Jurarandseen bis zur Abflussmessstation Aare – Brügg, Aegerten und des Zwischeneinzugsgebiets von Brügg bis zur Messstelle Aare – Murgenthal**

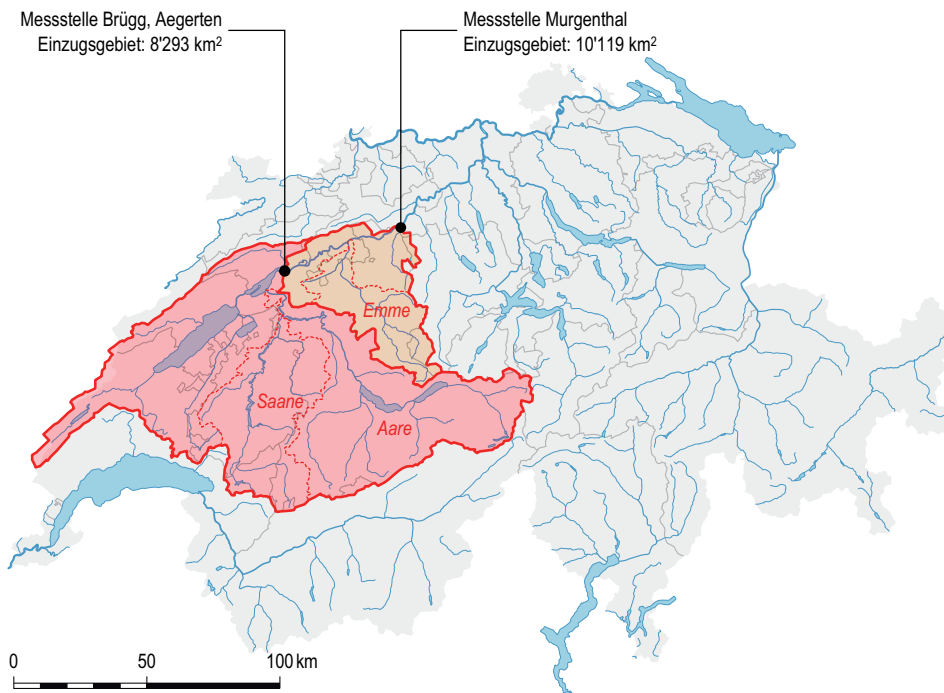


Tabelle 5.1 zeigt eine Übersicht der wichtigsten Kenndaten der drei Seen. Da durch die Regulierung ein Jahresgang der Seen angestrebt wird, sind darin nicht nur Jahresmittelwerte sondern auch die Monatsmittel für Juni und Dezember angegeben. Die Hochwasser, welche Anlass für die zweite Juragewässerkorrektur waren, ereigneten sich jeweils im hydrologischen Winterhalbjahr (Oktober bis März). Aus Gründen des Hochwasserschutzes werden durch die Regulierung der Jurarandseen die mittleren Seestände im Winter rund 40 cm tiefer gehalten als im Sommer.

Kenngrössen der Jurarandseen

**Tab. 5.1 > Wichtigste Kenndaten der Jurarandseen (Periode 1983–2007)**

*Der mittlere Gesamtzufluss zu den einzelnen Seen basiert auf einer Bilanzierung des Ausflusses aus dem Bielersee, der Abflüsse in den Verbindungskanälen sowie der Seestandsänderungen.*

See	Einzugsgebiet [km <sup>2</sup> ]	Seefläche [km <sup>2</sup> ]	mittlerer Seestand [m ü.M.]			Hochwassergrenze [m ü.M.]	mittlerer Gesamtzufluss [m <sup>3</sup> /s]		
			Jahr	Juni	Dez.		Jahr	Juni	Dez.
Murtensee	696	23.0	429.31	429.50	429.10	430.85	11.6	10.8	13.4
Neuenburgersee	2 671	217.9	429.30	429.49	429.09	430.50	55.8	49.1	67.2
Bielersee	8 281	39.8	429.27	429.47	429.04	430.35	245	345	194

Durch den Hagneck-Kanal fließen dem Bielersee im jährlichen Mittel 177 m<sup>3</sup>/s zu (Messstation Aare – Hagneck, Messreihe 1984–2008). Rund 72 % des Gesamtzuflusses zu den Jurarandseen stammen somit aus der Aare, deren Anteil am gesamten Einzugsgebiet der Jurarandseen allerdings nur 62 % (5104 km<sup>2</sup>) ausmacht. Der mittlere monatliche Zufluss aus der Aare weist ein Maximum im Sommer auf. Im Gegensatz dazu ist bei den Zuflüssen zum Neuenburger- und Murtensee, die aus dem Jura bzw. dem Mittelland stammen, mit höheren Werten im Winter bzw. Frühling zu rechnen.

Räumliche und zeitliche  
Verteilung der Zuflüsse

Die Zuflüsse durch den Hagneck-Kanal werden durch zwei Flüsse bestimmt, der Saane mit einem Einzugsgebiet von 1892 km<sup>2</sup> und einem mittleren jährlichen Abfluss von 53.8 m<sup>3</sup>/s (Messstation Saane – Laupen, Messreihe 1949–2008) und der Aare mit einem Einzugsgebiet von 3212 km<sup>2</sup> und einem mittleren Abfluss von 122 m<sup>3</sup>/s (Messstation Aare – Bern, Schönau, Messreihe 1935–2008). Beide Flüsse sind in Bezug auf Hochwasser stark unterschiedlich: So erreichte beispielsweise die Aare in Bern am Abend des 8. Augusts 2007 einen Spitzenabfluss von 524 m<sup>3</sup>/s (Abb. 3.1). Das Tagesmittel des Abflusses am Folgetag betrug noch immer 482 m<sup>3</sup>/s, und bis am 11. August lag der mittlere Abfluss über 400 m<sup>3</sup>/s. Im Gegensatz dazu erreichte der Spitzenabfluss der Saane am 9. August einen Wert von 846 m<sup>3</sup>/s, ging aber am Folgetag bereits wieder auf einen mittleren Wert von 234 m<sup>3</sup>/s zurück (Abb. 3.1). Die hohen Abflussspitzen der Saane bilden ein Kapazitätsproblem beim Hagneck-Kanal, die grossen Zuflussvolumina der Aare lassen die Jurarandseen stark ansteigen.

Zuflüsse zum Bielersee –  
unterschiedliches Verhalten  
von Aare und Saane

Der Unterschied zwischen Saane und Aare ist auf die ausgleichende Wirkung des Thuner- und des Brienersees zurückzuführen. Grosse Hochwasserzuflüsse aus dem Berner Oberland werden durch die Retention in diesen beiden Seen zeitlich verzögert an die Jurarandseen abgegeben. Um die Überschwemmungen des Thunersees zu vermindern, wurde seine Ausflusskapazität durch den 2009 in Betrieb genommenen Stollen erhöht, durch welchen bis zu 100 m<sup>3</sup>/s zusätzlich abgeleitet werden können. Mit diesem wird der Ausfluss im Vorfeld grosser Hochwasser erhöht und der Anstieg des Thunersees begrenzt. Die Auswirkungen dieser zeitlichen Veränderung des Aareabflusses auf die Jurarandseen hängen einerseits vom Ablauf des Gesamt ereignisses, andererseits davon ab, ob die erhöhten Zuflüsse durch eine Erhöhung des Abflusses beim Wehr Port ganz oder teilweise kompensiert werden können.

Zuflüsse zum Bielersee –  
Einfluss der Berner Oberländer  
Seen und des Stollens Thun

Die Bewirtschaftung der Speicherseen der Kraftwerke Oberhasli wird durch die Regulierung von Briener- und Thunersee überlagert und ist am Bielersee kaum mehr nachweisbar. Sehr viel direkter ist jedoch der Einfluss der Kraftwerksspeicher an der Saane. Diese konnten beispielsweise beim Hochwasser vom August 2005 rund 22 Mio. m<sup>3</sup> Wasser zurückhalten, was einen zusätzlichen Anstieg des Bielersees um weitere 9 cm verhinderte (André et al. 2007). Der mögliche Rückhalt in den Speichern hängt allerdings von der Jahreszeit und der Vorgeschichte ab, sofern nicht ein besonderes für den Hochwasserschutz vorgesehenes Volumen freigehalten wird. Der Einfluss der Kraftwerksspeicher an der Saane auf die Höchststände der Jurarandseen ist jedoch sehr begrenzt, da – relativ gesehen – die möglichen zusätzlichen Retentionsvolumina klein sind.

Zuflüsse zum Bielersee –  
Einfluss der Kraftwerksspeicher

Dem Neuenburger- und Murtensee fließen zahlreiche kleinere und mittlere Gewässer zu. Der gesamte mittlere jährliche Zufluss dieser Gewässer beträgt  $68 \text{ m}^3/\text{s}$ , was rund 28 % des Gesamtzuflusses zu den Jurarandseen entspricht. Einzugsgebietsflächen über  $300 \text{ km}^2$  haben nur die Orbe, die Areuse und die Broye. Vom Einzugsgebiet dieser beiden Seen ist rund die Hälfte durch Abflussmessungen des Bundes, ein weiteres Sechstel durch kantonale Messstellen abgedeckt.

Zuflüsse zum Neuenburger- und Murtensee – nur zur Hälfte gemessen

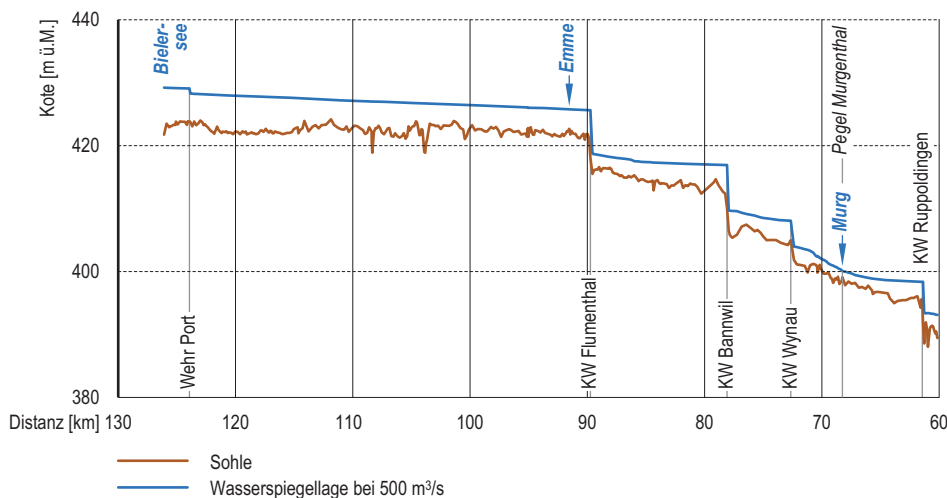
Von den  $1826 \text{ km}^2$  des Zwischeneinzugsgebiets von Brügg bis Murgenthal entfallen  $939 \text{ km}^2$  auf die Emme, die sich durch grosse, aber verhältnismässig kurz dauernde Hochwasser auszeichnet. Das Regulierreglement für das Wehr Port sieht daher vor, bei Hochwasser der Emme die Abflüsse aus dem Bielersee zu drosseln, so dass der Gesamtabfluss der Aare in Murgenthal  $850 \text{ m}^3/\text{s}$  nicht überschreitet.

Zwischeneinzugsgebiet von Port bis Murgenthal – Drosselung der Aare bei Emmehochwasser

Die Fließstrecke der Aare vom Wehr Port bis zur Messstation Murgenthal misst  $58 \text{ km}$ . Das Gefälle der Aare bis Murgenthal wird in drei Staustufen genutzt (Abb. 5.2). Die Flusskraftwerke Flumenthal, Bannwil und Wynau werden als Laufkraftwerke betrieben. Das Kraftwerk Flumenthal dient gleichzeitig auch der Regulierung des Aarewasserstandes bei Niedrigwasser und gewährleistet dadurch die Schiffbarkeit der Aare zwischen dem Bielersee und Solothurn.

Wasserkraftnutzung der Aare unterhalb der Jurarandseen

Abb. 5.2 > Längenprofil der Aare zwischen dem Bielersee und dem Kraftwerk Ruppoldingen



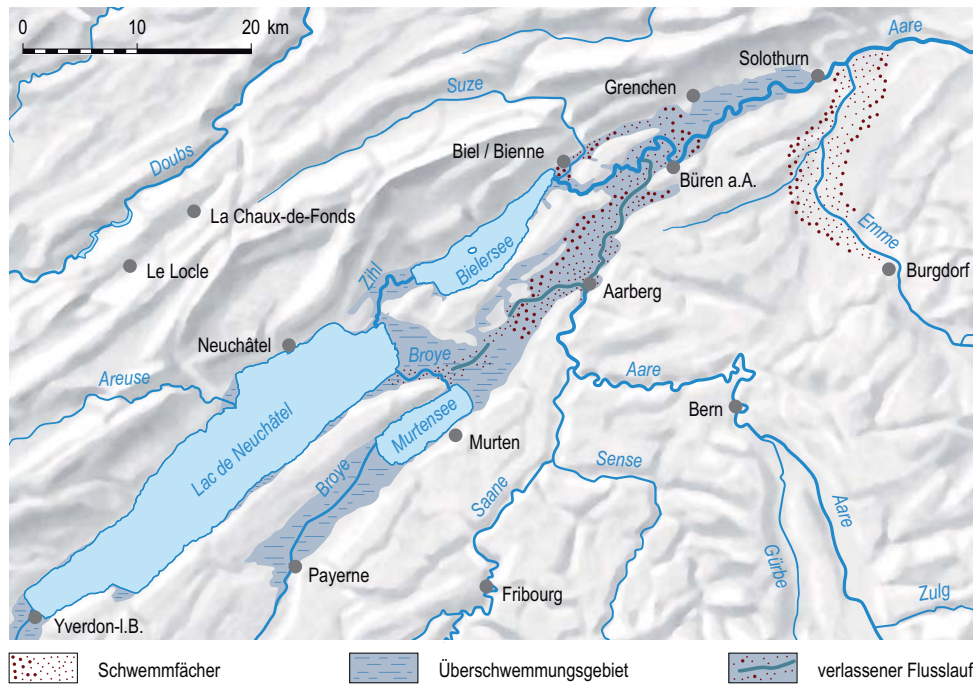
## 5.2.2 Die Juragewässerkorrekturen

Seit der letzten Eiszeit erfuhr das System der Jurarandgewässer mehrmals markante Veränderungen. Der flache Schwemmkegel der Aare flussabwärts ihres Austritts aus dem hügeligen Mittelland bei Aarberg stellte eine variable Wasserscheide dar. So floss die Aare zeitweise nach Westen Richtung Neuenburgersee, zeitweise nach Osten, wo sie sich bei Büren mit dem Ausfluss aus dem Bielersee, der unteren Zihl, vereinigte (Abb. 5.3).

Markante Veränderungen seit der letzten Eiszeit

**Abb. 5.3 > Jurarandgewässer vor der ersten Juragewässerkorrektur;  
modifiziert nach Kühne (2004) und Nast (2006)**

Die Karte zeigt den Zustand der Gewässer um 1850 auf der Basis der Dufour-Karte.



Archäologische Funde zeigen, dass die Pegel der Flüsse und Seen seit der Bronzezeit um mehrere Meter anstiegen (Müller 1973). Ursache hierfür waren Geschiebeablagerungen der Aare und der Emme. Flussabwärts von Aarberg lagerte die Aare das ihr aus der Saane, der Zulg und der Kander (bis zur Kanderumleitung im Jahre 1714) reichlich zugeführte Geschiebe auf dem markanten Schwemmfächer ab, der schliesslich über Lyss bis nach Büren reichte und dort die einmündende untere Zihl aufstaute (Abb. 5.3). Die Folge waren ein Einstau des Bielersees und über diesen auch des Neuenburger- und des Murtensees (Vischer 2003). Unterhalb von Solothurn führte die Emme der Aare wesentlich mehr Geschiebe zu, als diese abzuführen vermochte. Die resultierenden Ablagerungen von Emmegeschiebe stauten die Aare und machten diese zwischen Büren und Solothurn mit der Zeit zu einem relativ trög fliessenden und mäandrierenden Strom (Vischer 2003).

Die Geschiebeablagerungen der Aare und der Emme führten über Jahrhunderte zu einer Verschlechterung der Abflussverhältnisse. Die Folge der Rückstauungen waren zunehmend häufigere Überschwemmungen, die ab dem Spätmittelalter bedrohlich wurden (Kühne 2004). Die Überschwemmungen wurden zunehmend ausgedehnter, und die regelmässig betroffenen Flächen versumpften (Abb. 5.3). Bei ausserordentlichen Hochwassern kam es vor, dass sich die Jurarandseen zu einem einzigen See vereinigten und somit grosse Flächen überflutet wurden. Häufig verwandelte sich auch die Fläche zwischen Büren und Solothurn zu einem weiteren See (Vischer 2003).

Rückstau durch Geschiebe  
aus Aare und Emme

Verschlechterung der Situation  
im Spätmittelalter

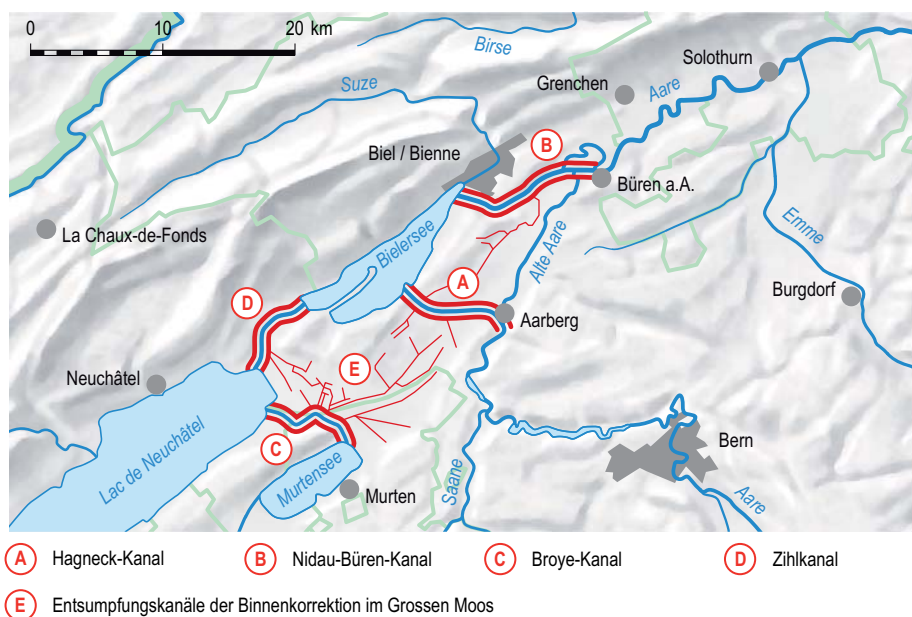
Im 18. und 19. Jahrhundert wurden von verschiedenen Experten unterschiedliche Lösungen zur Verbesserung der Situation vorgeschlagen. Schliesslich setzte sich die Idee des Bündner Oberingenieurs Richard La Nicca (1794–1883) durch, welche eine Ableitung der Aare in den Bielersee vorsah. Der Bundesbeschluss vom 25. Juli 1867 bildete die Basis für die erste Juragewässerkorrektion als Gemeinschaftswerk des Bundes und der Kantone Freiburg, Waadt, Neuenburg, Bern und Solothurn.

Projekt La Nicca zur Ableitung der Aare in den Bielersee

Dem Bundesbeschluss von 1867 entsprechend hatte der Bund die Oberaufsicht über die Arbeiten der ersten Juragewässerkorrektion, welche 1868 begannen und bis 1891 dauerten. In organisatorischer Hinsicht wurde zwischen der oberen Korrektion zur Ableitung der Aare in den Bielersee und zur Verbesserung des Abflusses zwischen den drei Seen sowie der unteren Korrektion zur Verbesserung der Ausflussverhältnisse aus dem Bielersee unterschieden.

Erste Juragewässerkorrektion 1868–1891

Abb. 5.4 > Erste Juragewässerkorrektion 1868–1891; nach Müller (1974)



Das eigentliche Kernstück der ersten Juragewässerkorrektion stellt der 8 km lange Hagneck-Kanal dar, durch welchen die Aare von Aarberg in den Bielersee abgeleitet wurde (Abb. 5.4). Die Ausweitungen und Begradigungen der Broye zum 8 km langen Broyekanal und der Zihl zum 8.5 km langen Zihlkanal dienten der Verbesserung des Abflusses zwischen den Seen. Der 12 km lange Nidau-Büren-Kanal bezweckte die Verbesserung der Ausflussverhältnisse aus dem Bielersee. Die zur Verbesserung der Abflussverhältnisse in der Aare zwischen Büren und Attisholz zu realisierenden Massnahmen wurden hingegen auf unbestimmte Zeit zurückgestellt.

Durch die erste Juragewässerkorrektur (I. JGK) wurden die Wasserspiegellagen der drei Jurarandseen um rund 2.5 m abgesenkt. Durch die Ableitung der Aare in den Bielersee wurden die Hochwasserspitzen in der Aare unterhalb des Bielersees gedämpft, und das Geschiebe aus der Aare lagerte sich fortan schadlos im Bielersee ab. Für die an die Seen angrenzenden Ebenen wurde die Überschwemmungsgefahr deutlich verringert. Durch die markante Absenkung der Wasserstände konnten die Böden melioriert und so fruchtbare Ackerflächen von etwa 350 km<sup>2</sup> gewonnen werden.

Auswirkungen der I. JGK

Obwohl sich die I. JGK in den ersten Jahrzehnten nach ihrer Realisierung als grosser Erfolg erwiesen hatte, zeigten sich dennoch bald neue Probleme. Die entsumpften Ebenen senkten sich infolge von Setzungen und Oxidation der torfhaltigen Böden und wurden damit wieder anfällig für Durchnässungen und Überschwemmungen (Müller 1960). In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts ereigneten sich zudem mehrere schwere Hochwasser. Das Hochwasser von 1910 verdeutlichte, dass das alte Wehr von Nidau unzweckmässig war, und die Oberlieger verlangten gar dessen Sprengung. Man beschränkte sich aber zunächst auf eine Sanierung, die 1911 bis 1915 erfolgte.

Neue Probleme

Im Auftrag der oberliegenden Kantone wurde 1914 ein erstes Projekt für eine zweite Juragewässerkorrektur (II. JGK) vorgelegt, doch der Erste Weltkrieg unterbrach die weiteren Arbeiten. Die Kosten eines zweiten Projekts von 1921 wurden als zu hoch betrachtet, und wegen der Wirtschaftskrise waren auch die Bemühungen um die Realisierung eines reduzierten Projekts erfolglos. Da sich die II. JGK dadurch weiter verzögerte, drängte der Kanton Bern auf einen vorzeitigen Bau des neuen Wehrs bei Port (Abb. 5.7) als Ersatz für das baufällige Wehr Nidau. Als vorgezogene Massnahme der II. JGK wurde das neue Wehr Port von 1936 bis 1940 realisiert.

Der Weg zur zweiten  
Juragewässerkorrektur

Die schweren Hochwasser von 1948 und 1950, entsprechende Vorstösse im eidgenössischen Parlament und die Aufforderung des Bundesrats führten dazu, dass die betroffenen Kantone gemeinsam die Initiative zu einem neuen Projekt ergriffen. Dieses wurde 1952 vorgelegt und sah Massnahmen im Umfang von 52 Mio. Franken vor. Im Bemühen um die Realisierung einer zweiten Juragewässerkorrektur schlossen die Kantone Freiburg, Waadt, Neuenburg, Bern und Solothurn am 7. September 1956 einen Vertrag über die Vorbereitung und Durchführung der II. JGK ab. Dieses Konkordat wurde durch den Bundesrat am 8. Mai 1959 genehmigt.

Konkordat der betroffenen  
Kantone von 1959

Zur Realisierung der II. JGK richteten die Kantone ein gemeinsames Projektierungsbüro ein. Als Projekt- und Bauleiter wurde der ETH-Professor Dr. Robert Müller gewählt. Am 3. Januar 1957 übernahm Prof. Müller diese anspruchsvolle Aufgabe und arbeitete – ausgehend vom 1952 vorgelegten Vorschlag – ein eigenes Projekt aus. Mit dem Bundesbeschluss vom 5. Oktober 1960 wurde den JGK-Kantonen für die II. JGK ein Bundesbeitrag von 50 % der subventionsberechtigten Kosten zugesichert (BBl 1960 II 1062).

Ausführungsprojekt Müller

Mit dem Projekt Müller für die zweite Juragewässerkorrektur sollte ein regulierfähiges System geschaffen werden, mit welchem Hochwasserperioden so reguliert werden können, dass keine Überschwemmungen mehr auftreten. Dazu verlangte das Projekt (Müller 1959, 1960):

- > eine *Absenkung der Höchststände* der Jurarandseen um 1 m bei gleichen mittleren Seeständen zur Verbesserung der Sicherheit gegen Überschwemmungen an den Jurarandseen,
- > eine *Hebung der Tiefststände* der Jurarandseen zur Vermeidung weiterer Setzungen der Ebenen um die Jurarandseen,
- > die *Schaffung einer hydraulischen Einheit* («Einheitssee») zur Reduktion der Differenz zwischen den Höchstständen der drei Seen und zur Schaffung einer ungefähr gleichen Sicherheit gegen Überschwemmungen an allen drei Seen,
- > eine *Absenkung der Hochwasserspiegel in der Aare* zwischen Büren und der Emmemündung um rund 1.5 m,
- > die *Einhaltung geeigneter Niedrigwasserspiegel in der Aare* zwischen Büren und der Emmemündung.

Ziele der II. JGK

Entsprechend den verfolgten Zielen bestand die zwischen 1962 und 1973 realisierte zweite Juragewässerkorrektur in einer Verstärkung der ersten. Dabei wurden der Nidau-Büren-Kanal, der Broyekanal und der Zihlkanal vergrössert und die einst zurückgestellten Flussbauarbeiten unterhalb von Büren und insbesondere im Bereich der Emmemündung teilweise verwirklicht (Abb. 5.5).

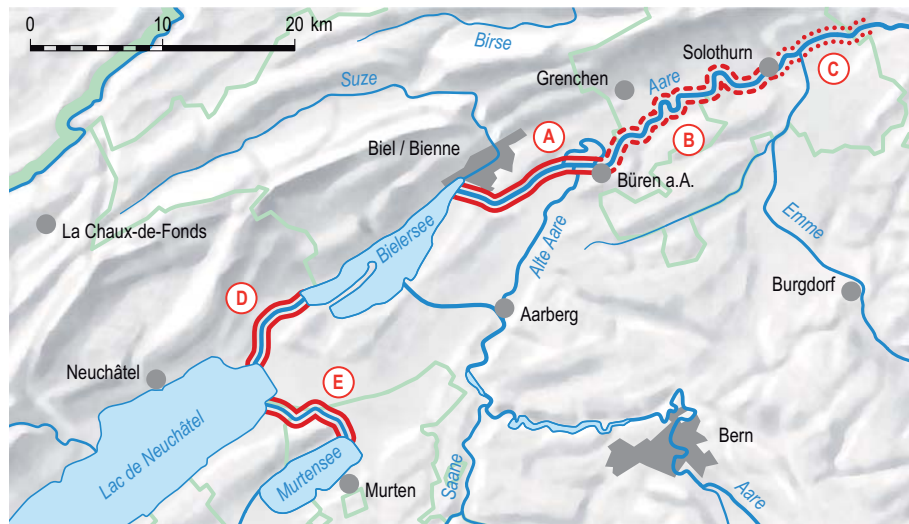
Realisierung der II. JGK  
1962–1973

Die Absenkung der Seehöchststände um 1 m bedingte eine Erhöhung des Ausflussvermögens aus dem Bielersee und somit einen Ausbau des Nidau-Büren-Kanals. Eine generelle Verbreiterung des Kanals war infolge der überbauten Ufer nicht möglich. Deshalb wurde der Kanal um rund 5 m vertieft, was auch eine entsprechende Sicherung der Ufer bedingte.

Von Büren bis Solothurn weist die Aare 10 grosse Flusskrümmungen auf. Im Zuge der II. JGK liess man diese Mäander bestehen, fixierte aber den Aarelauf. Von Solothurn bis über die Emmemündung hinaus wurde das Bett der Aare verbreitert und vertieft, wodurch die Hochwasserspiegel in der Mäanderstrecke abgesenkt und damit die Überschwemmungsgefahr der Ebenen entlang der Aare weitgehend gebannt werden konnten. Das am 1. Januar 1970 in Betrieb genommene Flusskraftwerk Flumenthal gewährleistet die Regulierung des Aarewasserstandes bei Niedrigwasser.

Die drei Jurarandseen mit einer Gesamtfläche von rund 280 km<sup>2</sup> bilden ein grosses Wasserbecken, in dem bei 1 m Seeanstieg ein Volumen von über 280 Mio. m<sup>3</sup> gespeichert werden kann. Vor der II. JGK stiegen bei Hochwasser der Murten- und der Bielersee schneller an als der bedeutend grössere und somit trägere Neuenburgersee. Durch die massive Vergrösserung der Querschnitte der Verbindungskanäle sollte durch die II. JGK ein Einheitssee mit gleich hohen Wasserständen in allen drei Seen geschaffen werden.

Abb. 5.5 > Zweite Juragewässerkorrektur 1962–1973; nach Müller (1959, 1974)



- (A) Nidau-Büren-Kanal (Vertiefung und Verbreiterung des Kanals, Ausbau der Ufer)
- (B) Korrektion Büren - Solothurn (Ausbau der Ufer)
- (C) Korrektion Emme - Hohfuhren (Vertiefung des Flussbetts)
- (D) Zihlkanal (Vertiefung und Verbreiterung des Kanals)
- (E) Broye-Kanal (Vertiefung und Verbreiterung des Kanals)

Gegenüber dem Voranschlag vom 1. Januar 1959 von 88.7 Mio. Franken beliefen sich die tatsächlichen Aufwendungen für die II. JGK auf 152.2 Mio. Franken. Davon waren 52.3 Mio. Franken teuerungsbedingt, so dass auf Preisbasis 1959 Mehrausgaben von 11.3 Mio. Franken (oder 12.7 % des Voranschlags) resultierten (Müller 1974).

Kosten der II. JGK

Der Bund beteiligte sich an den subventionsberechtigten Kosten von 150.6 Mio. Franken mit 75.3 Mio. Franken. Die verbleibenden 76.9 Mio. Franken teilten sich die JGK-Kantone Freiburg (12.9 %), Waadt (11.3 %), Neuenburg (8.1 %), Bern (40.2 %) und Solothurn (27.5 %).

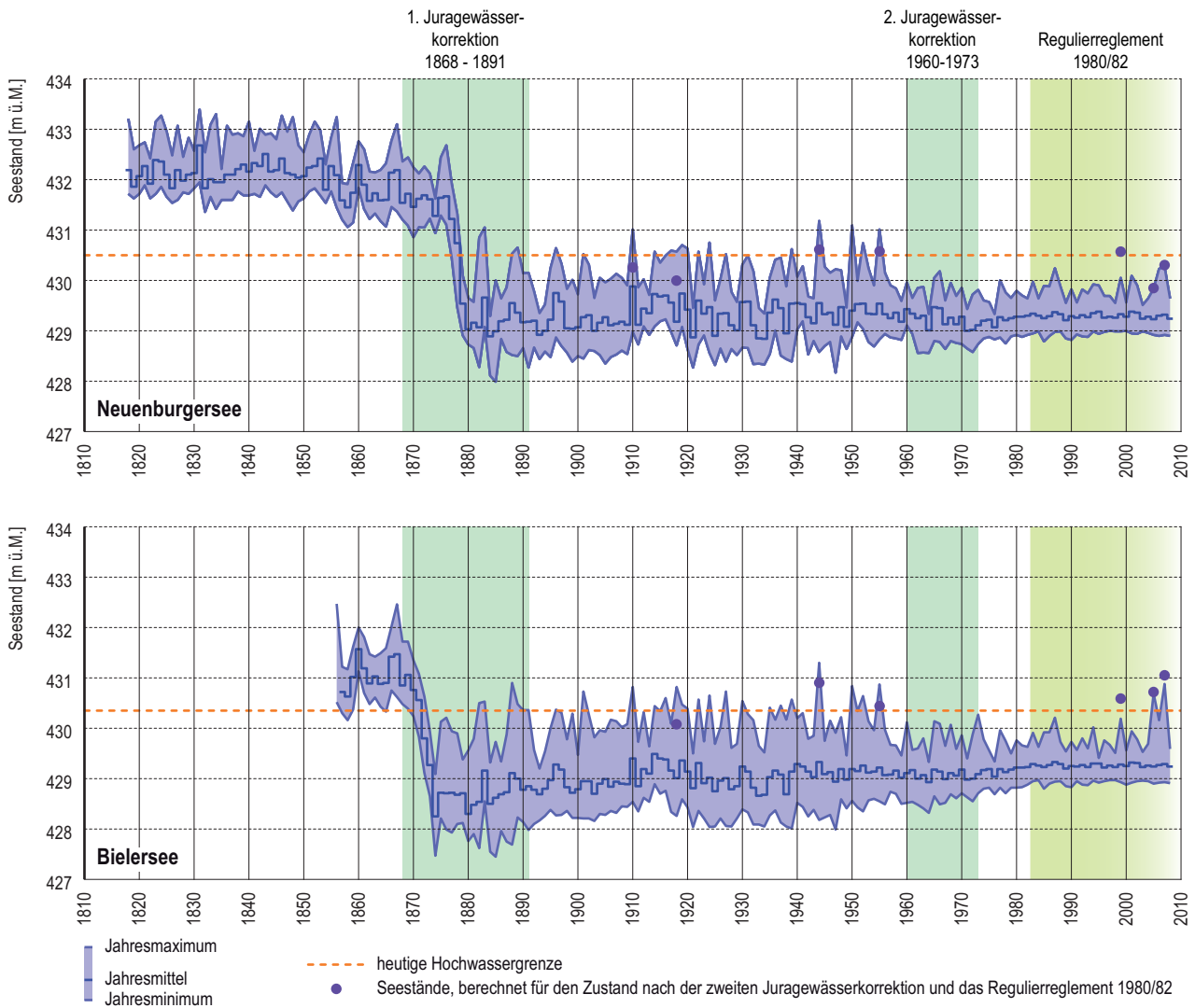
Obwohl das Hochwasser 2005 zur Überschreitung der Hochwassergrenze am Bielersee geführt hat, sind seit der Realisierung der II. JGK bis 2007 keine Ereignisse aufgetreten, die sowohl im Bereich der Jurarandgewässer als auch entlang der unterliegenden Aare grössere Überschwemmungen verursacht haben. Die mit der II. JGK angestrebten Ziele wurden aber trotzdem weitgehend erreicht (Abb. 5.6):

Auswirkungen der II. JGK

- > die Hochwasserstände der Jurarandseen wurden gesenkt,
- > die Mittelwasserstände wurden beibehalten,
- > die Niedrigwasserstände wurden angehoben.

**Abb. 5.6 > Jährliche Höchst-, Niedrigst- und Mittelwasserstände des Neuenburger- und Bielersees**

Als Punkte sind die berechneten Seehöchststände angegeben, die unter heutigen Randbedingungen bzw. bei strikter Einhaltung des Regulierreglements 1980/82 für die Zuflüsse der Hochwasser von 1910, 1918, 1944, 1955, 1999, 2005 und 2007 resultieren würden.



Mit dem Wehr Port (Abb. 5.7) wird der Ausfluss aus dem Bielersee gemäss einem Reglement reguliert (vgl. Kap. 5.3). Dadurch werden direkt der Wasserstand des Bielersees und indirekt jene des Neuenburger- und des Murtensees beeinflusst. Die Dämpfung der Seestandsschwankungen (Abb. 5.6) ist somit einerseits auf die flussbaulichen Massnahmen, andererseits auf ein angepasstes Regulierkonzept zurückzuführen.

Regulierwehr Port

Abb. 5.7 > Wehr Port; Blick vom Unterwasser mit dem Bielersee im Hintergrund

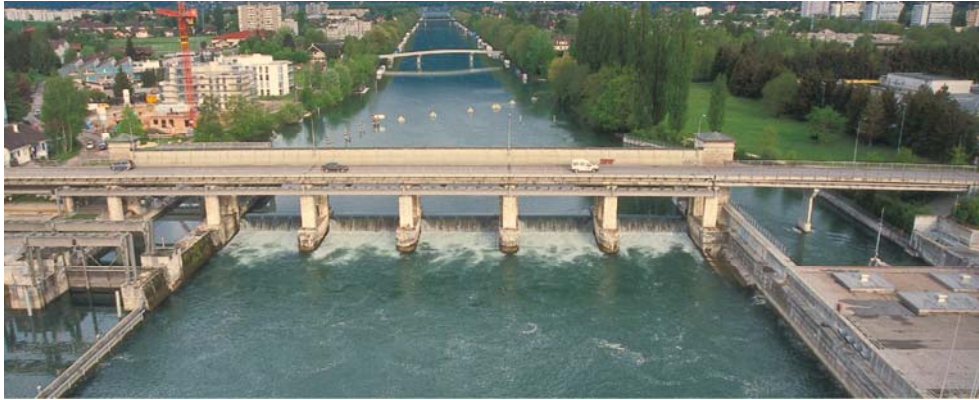


Foto: AWA, Bern

Zur Gewährleistung eines einheitlichen Unterhalts aller Werke der durch die II. Jura-gewässerkorrektur betroffenen Gewässer und zur Regulierung der Jurarandseen besteht zwischen den Kantonen Freiburg, Waadt, Neuenburg, Bern und Solothurn seit 1973 eine interkantonale Vereinbarung, deren aktuelle Version vom September 2003 datiert (ex SR 721.61).

Zuständigkeiten  
für Unterhalt und Regulierung

### 5.3 Die Regulierung der Jurarandseen

Der Zweck der Regulierung bestand ursprünglich darin, die Schwankung der Seestände zu verringern. Hochwasserstände sollten gedämpft und Niedrigwasserstände angehoben werden. Vor der Regulierung gemäss dem aktuellen Reglement 1980/82 (vgl. Kap. 5.3.1) war der Schwankungsbereich der Seespiegel wesentlich grösser (Abb. 5.6).

Ziel und Zweck der Regulierung

Mit der Regulierung wird ein Jahrgang der Seespiegel angestrebt, welcher den vielfältigen Anforderungen an die Wasserstände der Jurarandseen und an den Abfluss der unterliegenden Aare Rechnung trägt. Nebst dem primären Ziel des Hochwasser-schutzes werden damit eine Reihe weiterer Interessenbereiche berücksichtigt, so zum Beispiel die Landwirtschaft, Fischerei, der Vogelschutz, die Vegetation, der Ufer-schutz, Gewässerunterhalt, Tourismus, die Schifffahrt, Erholung oder Wasserkraftnut-zung. (VAW 1996).

Seit dem 1. Januar 1983 erfolgt die Regulierung der Jurarandseen gemäss dem *Regu-lierreglement 1980/82*. Dieses beinhaltet die *Reguliertvorschriften*, ein *Regulier-diagramm* mit der Beziehung zwischen dem Datum, dem Seestand und dem Abfluss beim Wehr Port sowie einen *Anhang betreffend die Hochwasserregulierung*. Dieser Anhang enthält die Vorschriften für die Hochwasserregulierung, d. h. die Drosselung des Bielerseeausflusses bei grossen Emmehochwassern, mit dem Ziel, den Abfluss der Aare in Murgenthal auf  $850 \text{ m}^3/\text{s}$  zu beschränken (so genannte Murgenthalerbedingung).

Das Regulierreglement 1980/82  
und seine Elemente

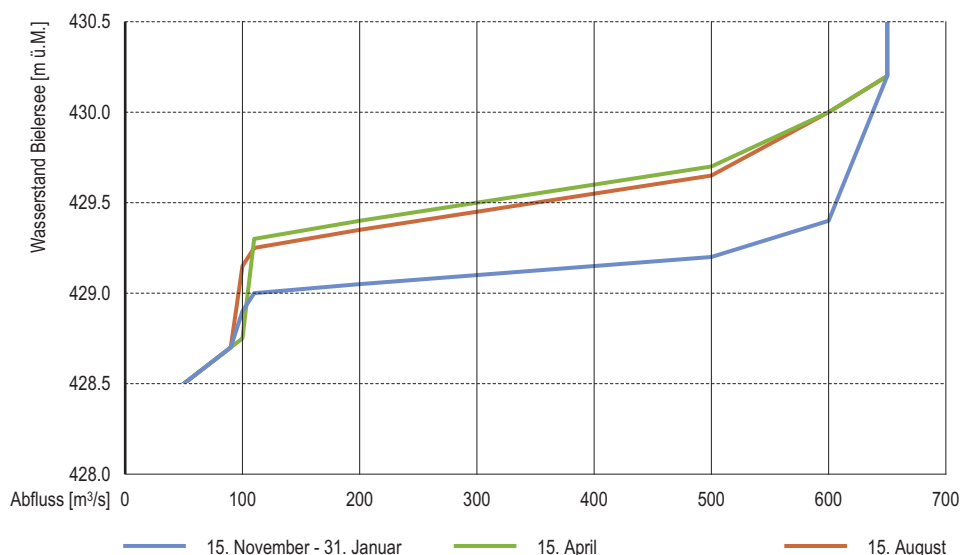
### 5.3.1 Reguliervorschriften und Regulierdiagramm

Das Regulierreglement 1980/82 wurde vom damaligen Bundesamt für Wasserwirtschaft (BWW, heute Bundesamt für Umwelt BAFU) und den JGK-Kantonen gemeinsam erarbeitet und vom Bundesrat am 19. April 1983 genehmigt. Es setzt auf den Erfahrungen mit dem provisorischen Reglement von 1972 (ergänzt 1974) auf. Die Ausführung der Regulierung obliegt dem Kanton Bern. Anpassungen des Reglements im Einvernehmen mit den Bundesbehörden aufgrund neuer Anforderungen sind jederzeit möglich.

Das Reglement von 1980/82 äussert sich zwar nicht direkt zu den mit der Regulierung angestrebten Seeständen. Diese lassen sich jedoch aus den in Abb. 5.8 gezeigten Pegel-Abflussbeziehungen ablesen, auf welchen das für die praktische Anwendung verwendete *Regulierdiagramm* (Abb. 5.9) basiert. Die Kurven weisen über einen weiten Abflussbereich einen flachen Verlauf auf. Mit den saisonal unterschiedlichen Zuflüssen (Tab. 5.2) resultieren so «Wunschpegelstände», die im Mittel im Winter zwischen 429.00 und 429.20 m ü.M., im Sommer zwischen 429.30 und 429.70 m ü.M. liegen.

Angestrebte Seestände

**Abb. 5.8** > Beziehung zwischen dem Pegel des Bielersees und dem Abfluss beim Wehr Port für verschiedene Jahreszeiten

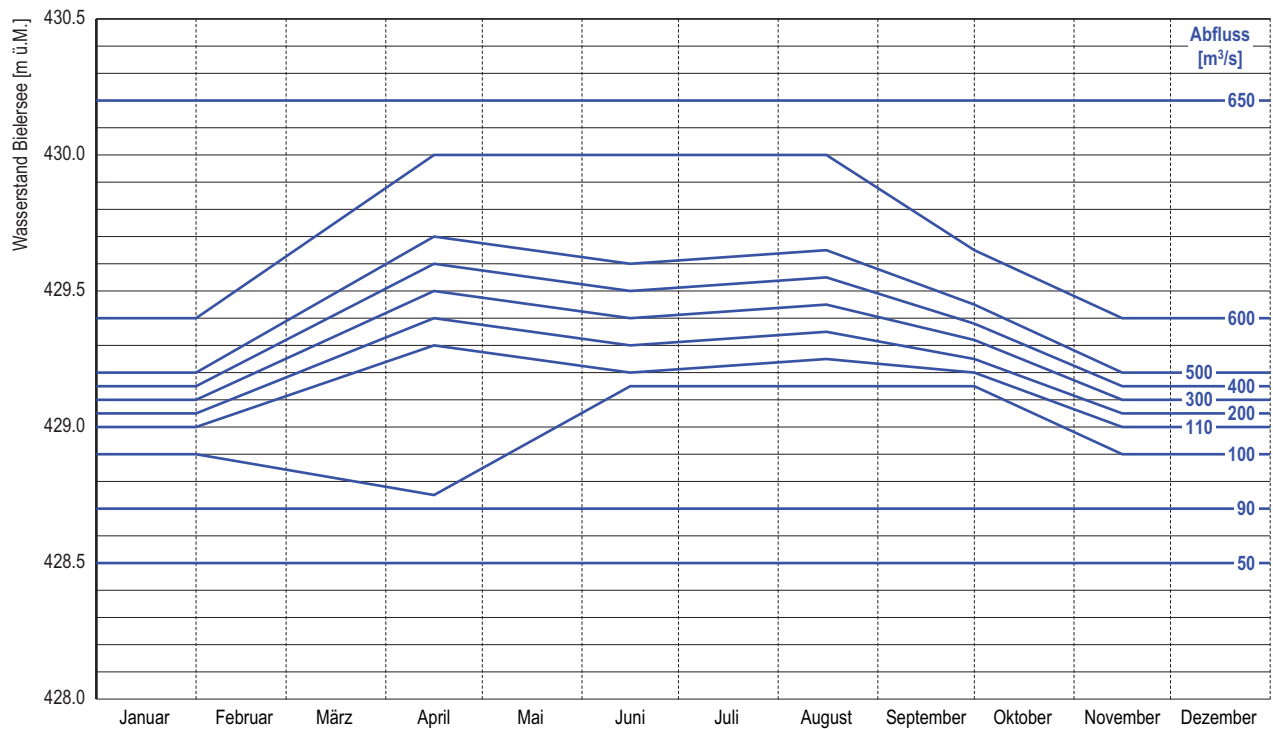


Das *Regulierdiagramm* (Abb. 5.9) definiert eine eindeutige Beziehung zwischen dem Seestand und dem einzustellenden Seeausfluss. Diese Beziehung ist im Fall der Jura- und Randseen von der Jahreszeit abhängig. Aufgrund der Art seiner Darstellung wird diese Form von Regulierdiagramm auch als *Linienreglement* bezeichnet (vgl. Anhang A4-1).

Das Regulierdiagramm des Reglements 1980/82

Durch die Linien des Regulierdiagramms werden dem beim Pegel Ligerz, Klein Twann gemessenen Wasserstand des Bielersees in Abhängigkeit des Datums die beim Wehr Port einzustellenden Abflusswerte zugeordnet. Zwischenwerte sind durch lineare Interpolation zu ermitteln.

Abb. 5.9 &gt; Regulierdiagramm des Regulierreglements 1980/82



Die Grundsätze für die Regulierung sind in den *Reguliertvorschriften* wie folgt beschrieben (BWW 1980):

Grundsätze für die Regulierung  
gemäss dem Reglement 1980/82

«Beim Wehr Nidau/Port ist jener Abfluss anzusteuern, der gemäss Regulierdiagramm an jenem Tag dem jeweiligen Wasserstand des Bielersees entspricht. Weicht die Wasserstandskote, die nach Regulierdiagramm dem momentanen Abfluss der Aare zugeordnet ist, nur wenig vom Seestand ab, so ist im Interesse einer ausgeglichenen Wasserführung auf Wehroperationen zu verzichten. Die zulässige Abweichung ist auf  $\pm 0.03$  m festgelegt; sie kann vom Kanton Bern im Einvernehmen mit dem Bundesamt für Wasserwirtschaft jederzeit den neusten Erkenntnissen angepasst werden.

Pro Stunde ist höchstens einmal zu regulieren, wobei die Abflussänderung möglichst klein zu halten ist; Abflussänderungen von mehr als  $\pm 10$  Prozent des jeweiligen Abflusses sind zu vermeiden.

Die Abflussänderungen sollen in der Regel pro Tag  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  nicht übersteigen. Liegt jedoch der Wasserstand des Bielersees oberhalb der Kote, welcher nach Regulierdiagramm ein Abfluss von  $400 \text{ m}^3/\text{s}$  zugeordnet ist, so dürfen die Abflussänderungen bei rasch steigenden oder fallenden Seeständen pro Tag eine Spanne von  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  erreichen.»

Nach unten sind die Reguliergrenzen durch die im Rahmen der Projektierung der II. JGK festgelegten Niedrigwassergrenzen (Tab. 5.2) gegeben. Bei Seeständen über

Reguliergrenzen

430.20 m ü.M. beträgt der Abfluss 650 m<sup>3</sup>/s. Im Vergleich zur Zielgrösse von 850 m<sup>3</sup>/s für den maximalen Abfluss der Aare in Murgenthal ist also der maximale Ausfluss aus dem Bielersee um 200 m<sup>3</sup>/s geringer. Diese Differenz berücksichtigt die Zuflüsse aus dem Zwischeneinzugsgebiet vom Wehr Port bis Murgenthal für all jene Fälle, bei welchen nicht die besonderen Bestimmungen der Hochwasserregulierung anzuwenden sind. Die Beschränkung des maximalen Ausflusses kann bei lang anhaltenden Zuflüssen, die über 650 m<sup>3</sup>/s liegen, zu einer Überschreitung der Hochwassergrenzen (Tab. 5.2) führen. Aus diesem Grund sieht das Reglement in Notsituationen die Möglichkeit vor, vom Reglement abweichen zu können.

**Tab. 5.2 > Im Rahmen der II. JGK festgelegte Hoch- und Niedrigwassergrenzen der drei Jurarandseen (Müller 1959)**

See	Hochwassergrenze [m ü.M.]	Niedrigwassergrenze [m ü.M.]
Bielersee	430.35	428.60
Neuenburgersee	430.50	428.70
Murtensee	430.85	428.70

Bezüglich Abweichungen hält das Regulierreglement 1980/82 folgendes fest:

Abweichungen vom Reglement

*«Ausgenommen während Hochwasserperioden ist zur Zeit des Hechtlaichs ein erhebliches Sinken der Seestände möglichst zu vermeiden. Dazu darf der Bielerseeabfluss um höchstens 10 Prozent gegenüber dem vom Reglement vorgeschriebenen Abfluss reduziert werden. Die zuständigen kantonalen Fischereifachstellen melden Beginn und Ende der Laichzeit.»*

*In Notsituationen sind weitere Abweichungen vom Reglement im Einvernehmen mit den zuständigen Stellen der beteiligten Kantone und dem Bundesamt für Wasserwirtschaft zulässig.»*

Abweichungen vom Regulierreglement kommen vor, da weitere Einflussfaktoren bei der Regulierung zu berücksichtigen sind. So wurde beispielsweise angesichts der grossen Schneehöhen im Jura und den Voralpen im Frühjahr 1999 (BWG 2000) und im Frühjahr 2009 (BAFU, 2009a; BAFU 2009b) der Abfluss beim Wehr Port gegenüber dem Reglement erhöht. Dadurch wurde der für diese Jahreszeit charakteristische Anstieg der Seepegel zeitlich verzögert und in den Seen eine entsprechende Speicherkapazität geschaffen.

Zur Regulierung bei Hochwasser schreibt das Regulierreglement 1980/82 vor:

Besonderheiten für die Regulierung bei Hochwasser

*«Droht der Abfluss der Aare beim Pegel Murgenthal den Wert von 850 m<sup>3</sup>/s zu übersteigen, so ist eine angemessene Drosselung des Abflusses aus dem Bielersee vorzunehmen.»*

*Bei Wehroperationen zur Einhaltung der Murgenthalerbedingung sind stündliche Abflussänderungen von bis zu ±50 m<sup>3</sup>/s zulässig.»*

*Muss wegen der Murgenthalerbedingung der Abfluss beim Wehr Nidau/Port begrenzt werden, so dürfen die Abflussänderungen pro Tag 200 m<sup>3</sup>/s überschreiten.*

*Das zur Einhaltung der Murgenthalerbedingung anzuwendende Verfahren ist im Anhang dargelegt. Es kann vom Kanton Bern im Einvernehmen mit dem Bundesamt für Wasserwirtschaft jederzeit den neusten Erkenntnissen angepasst werden.»*

Auf die Besonderheiten der Regulierung bei Hochwasser wird in Kapitel 5.3.2 näher eingegangen.

Ende 1986 wurde die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich durch die interkantonale Aufsichtskommission der JGK mit der Durchführung einer «*Studie über die optimale Regulierung der II. JGK unter Einbezug von Untersuchungen über die Auswirkungen der Reglementsanwendung auf die Umwelt*» beauftragt. Die Ergebnisse der breit angelegten und abgestützten Studie, die auf einer umfassenden Nutzwertanalyse basierte, wurden 1996 vorgelegt (VAW 1996). Im Rahmen der Studie wurden mittels Simulationsrechnungen die Nutzwerte für das bisherige Regulierreglement und für leicht veränderte Regulierdiagramme ermittelt und verglichen. Die Untersuchung kam zum Schluss, dass wohl «*punktuellen Verbesserungen im Liniendiagramm zugunsten einzelner Interessenbereiche möglich sind*», wesentliche Änderungen am Reglement aufgrund der relativ schmalen Datenbasis jedoch nicht gerechtfertigt sind. Der Bericht enthält die – rückblickend als zu optimistisch einzuschätzende – Aussage, dass «*... auch extreme Hochwasser unter der Anwendung des Reglements 1980/82 schadlos abgeführt werden können.*»

Prüfung des Reglements 1980/82  
durch die ETH Zürich

Das aktuelle Linienreglement entspricht regelungstechnisch einem saisonal variablen Proportionalregler. Die sich aus den grossen Gradienten ergebenden Abflussschwankungen beim Seeausfluss werden mittels Nebenbedingungen abgefangen. Niederschlags- oder Abflussvorhersagen finden im aktuellen Reglement keinen Eingang. Hingegen werden jedoch weitere Einflussgrössen berücksichtigt, namentlich die Schneehöhen im Jura für eine Tieferhaltung des Seestandes im Frühjahr. Diese Abweichungen vom Reglement dienen der Optimierung von festgestellten Schwachpunkten und sind ein Indiz dafür, dass eine grundsätzliche Überprüfung des gültigen Reglements angezeigt ist. Dies betrifft primär den Einbezug von Zuflussprognosen sowie den Ersatz des starren Linienreglements durch robustere Reglerkonzepte, welche eine adäquate Abbildung der verschiedenen Nebenbedingungen erlauben (vgl. Anhang A4-2).

Folgerungen

### 5.3.2 Hochwasserregulierung der Aare

*«Droht der Abfluss der Aare beim Pegel Murgenthal den Wert von 850 m<sup>3</sup>/s zu übersteigen, so ist eine angemessene Drosselung des Abflusses aus dem Bielersee vorzunehmen.»* Diese Bestimmung im Regulierreglement 1980/82 wird als «*Murgenthalerbedingung*» bezeichnet. Mit ihr soll verhindert werden, dass bei einem Hochwasser aus dem Zwischeneinzugsgebiet unterhalb des Bielersees der Abfluss der Aare bei Murgenthal über den besagten Schwellenwert ansteigt. Das Zwischeneinzugsgebiet umfasst

Murgenthalerbedingung

zwischen den Messstationen Brügg, Aegerten und Murgenthal eine Fläche von 1826 km<sup>2</sup>, wovon allein 939 km<sup>2</sup> auf die Emme (Station Wiler) entfallen.

Wegen der Laufzeit zwischen dem Wehr Port und dem Pegel Murgenthal (2–3 Stunden) müssen die Abflüsse am Wehr Port vor dem Eintreffen der Hochwasserwelle aus dem Zwischeneinzugsgebiet gedrosselt werden. Als Indikator für Hochwasser der Emme wird der 40.4 km oberhalb der Mündung gelegene Pegel Emmenmatt mit einem Einzugsgebiet von 443 km<sup>2</sup> verwendet (Abb. 5.10). Als Indikator für Hochwasser der Langete dienen die Messungen bei der vom Kanton Bern betriebenen Station Leimiswil (Einzugsgebiet 95 km<sup>2</sup>).

Frühzeitige Drosselung des Abflusses beim Wehr Port

Um am Wehr Port frühzeitig reagieren zu können, ist eine Vorhersage für den Abfluss der Aare in Murgenthal notwendig. Die Hochwasserregulierung basiert aus diesem Grunde auf einer 4-Stunden-Abflussprognose für die Aare bei Murgenthal, anhand welcher der Soll-Abfluss der Aare beim Wehr Port ermittelt wird. Das Vorgehen zur Erstellung dieser Abflussprognose ist im Anhang zum Regulierreglement festgelegt (BWW 1980). In Anlehnung an den Namen des Verfassers hat sich dafür die Bezeichnung «Aebi-Rechnung» eingebürgert.

Prognoserechnung nach Aebi

Bei der Aebi-Rechnung handelt sich um eine Bilanzierung der Zuflüsse zur Aare zwischen Port und Murgenthal. Ausgehend von den beobachteten Abflüssen bei den Stationen *Aare – Brügg*, *Aegerten*, *Aare – Murgenthal*, *Emme – Emmenmatt* und *Langete – Leimiswil* (Abb. 5.10) wird eine Prognose für den zu erwartenden Abfluss der Aare in Murgenthal berechnet. Dazu werden die Zu- und Wegflüsse ins System in Stundenintervallen bilanziert. Formelmässig ausgedrückt lautet die Aebi-Rechnung (mit dem Superskript  $i$  für den aktuellen Stundenwert):

Abflussprognose am Pegel Murgenthal

$$Q_{Murgenthal}^{Prognose} = Q_{Port}^i + Q_{Emmenmatt}^i + Q_{Differenzgebiet\ West}^i + Q_{Differenzgebiet\ Ost}^i$$

mit

$$Q_{Differenzgebiet\ West}^i = Q_{Murgenthal}^i - Q_{Port}^{i-2} - Q_{Emmenmatt}^{i-4} - 7.2 Q_{Leimiswil}^{i-4} \quad 9$$

und

$$Q_{Differenzgebiet\ Ost}^i = 7.2 Q_{Leimiswil}^i \quad 9$$

Dabei gelten folgende Nebenbedingungen:

$$0 < Q_{Differenzgebiet\ West}^i < 300 \text{ m}^3/\text{s}$$

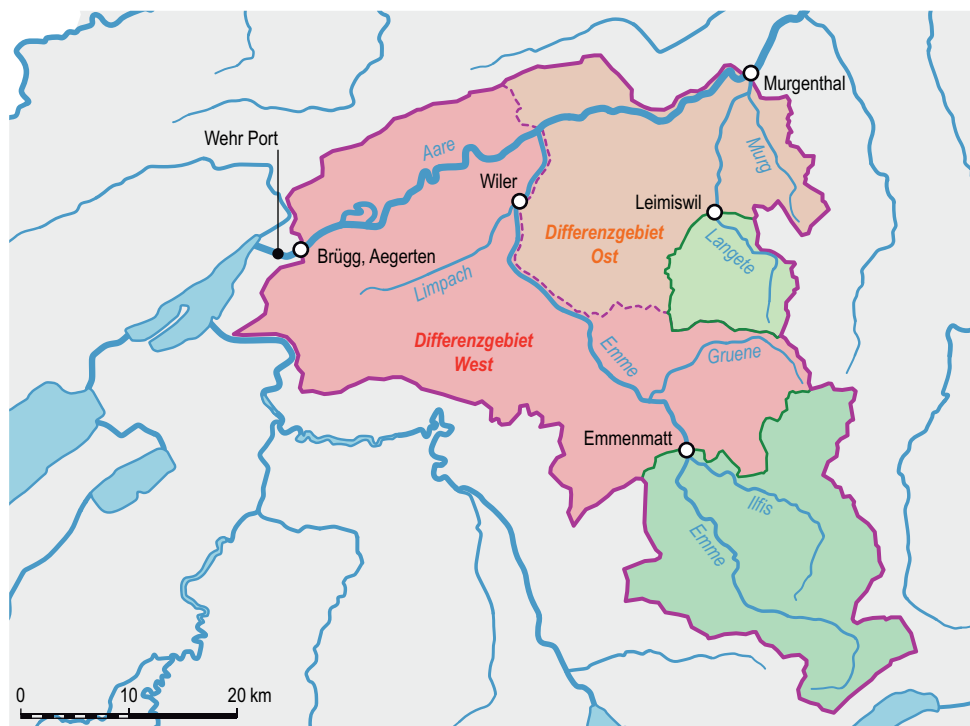
$$Q_{Differenzgebiet\ Ost}^i < Q_{Differenzgebiet\ West}^i + 100 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\left| Q_{Murgenthal}^i - Q_{Murgenthal}^{i-1} \right| < 100 \text{ m}^3/\text{s}$$

<sup>9</sup> Die ursprüngliche Version der Aebi-Rechnung basiert auf der Station Langete – Lotzwil (Einzugsgebiet 115 km<sup>2</sup>). Seit der Inbetriebnahme des Langete-Stollens im Jahre 1991 werden die Abflüsse der Langete bei der Station Leimiswil (Einzugsgebiet 95 km<sup>2</sup>) gemessen. Deshalb werden bei der Berechnung die Abflüsse der Langete nicht – wie von Aebi ursprünglich vorgeschlagen – mit 6, sondern mit 7.2 multipliziert. Bei grossflächigen Ereignissen, lang andauernden und intensiven Niederschlägen oder Schneeschmelze auch in tieferen Lagen wird mit einem Wert von 9 gerechnet.

$Q_{\text{Differenzgebiet West}}$  und  $Q_{\text{Differenzgebiet Ost}}$  bezeichnen die Zuflüsse aus den Teileinzugsgebieten westlich der Emme (exkl. der Emme bis Emmenmatt) bzw. östlich der Emme (exkl. der Langete bis Leimiswil). Übersteigt der prognostizierte Abfluss der Aare in Murgenthal den Grenzwert von  $850 \text{ m}^3/\text{s}$ , so ist der Abfluss beim Wehr Port um den entsprechenden Anteil (jedoch höchstens um  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  pro Stunde) zu reduzieren. Ist der prognostizierte Abfluss kleiner als der Grenzwert, so ist eine Abflusserhöhung in Richtung des Sollwertes aus dem Linienreglement vorzusehen.

**Abb. 5.10** > Gliederung des Zwischeneinzugsgebiets von Port bzw. der Messtation Brügg, Aegerten bis Murgenthal für die Prognoserechnung nach Aebi



Werden die Nebenbedingungen vernachlässigt, so lässt sich die Aebi-Rechnung in folgender Form schreiben:

Vereinfachungen  
für die Bilanzrechnung

$$Q_{\text{Murgenthal}}^{\text{Prognose}} = Q_{\text{Murgenthal}}^i + (Q^i - Q^{i-2})_{\text{Port}} + (Q^i - Q^{i-4})_{\text{Emmenmatt}} + 7.2 (Q^i - Q^{i-4})_{\text{Leimiswil}}$$

Daraus lassen sich die impliziten Annahmen in der Bilanzbetrachtung ablesen:

- > Die Abflüsse der Stationen Port, Emmenmatt und Leimiswil liegen zeitgleich vor.
- > Die Laufzeiten bis Murgenthal sind konstant (d. h. ereignisunabhängig) und betragen im Mittel für die Aare vom Wehr Port 3 Stunden, für die Emme von Emmenmatt 4 Stunden und für die Langete von Leimiswil ebenfalls 4 Stunden. Die in Natur vor-

handene Abhängigkeit der Wellenlaufzeiten vom Abfluss sowie die Wirkung der Gerinneretention werden nicht berücksichtigt.

- > Die Beiträge aus den beiden Differenzgebieten West und Ost sind über die Prognosedauer konstant.

Die Station Emme – Wiler wird bei der Prognoserechnung nicht berücksichtigt. Die Betrachtung der entsprechenden Einzugsgebietsflächen (Tab. 5.3) zeigt, dass rund 70 % des Einzugsgebietes zwischen dem Wehr Port und Murgenthal als ungemessene Grössen in das Verfahren eingehen.

Grosser Anteil des Zwischeneinzugsgebiets unberücksichtigt

**Tab. 5.3 > Einzugsgebietsflächen der berücksichtigten Messstationen im Zwischeneinzugsgebiet**

	Einzugsgebietsfläche [km <sup>2</sup> ]	Anteil am Zwischeneinzugsgebiet Brügg – Murgenthal [%]
Emme – Emmenmatt	443	24.3
Langete – Leimiswil	95	5.2
Differenzgebiete West und Ost	1288	70.5
Zwischeneinzugsgebiet Brügg – Murgenthal	1826	100.0

Zur Einhaltung der Murgenthalerbedingung ist eine frühzeitige Drosselung des Bielerseeausflusses notwendig. Die hierzu erforderliche Prognose des Abflusses der Aare in Murgenthal erfolgt mittels einer einfachen Bilanzierung der Zuflüsse. Dadurch bleiben von rund 70 % der beitragenden Einzugsgebietsfläche die dynamischen Eigenschaften des Systems (veränderliche Wellenlaufzeiten, Gerinneretention) unberücksichtigt. In Kapitel 5.5.4 wird ein Vorschlag präsentiert, welcher zur Behebung einiger der erkannten Limiten des bisherigen Rechenverfahrens beitragen kann.

Folgerungen

### 5.3.3 Funktionsweise der JGK

Die Einhaltung der mittleren Seewasserspiegel ist wegen der nach der I. JGK gemachten Erfahrung (Absacken der Moorböden, Humusverzehr) eine zentrale Forderung an die Regulierung der räumlich und zeitlich variablen Zuflüsse.

Für das Beispiel des Bielersees ist in Abb. 5.11 der durch die Regulierung seit 1983 erreichte Jahresgang des Seepegels gezeigt. Der Seestand ist – auch mit Regulierung – aufgrund der Variation der Zuflüsse zum Teil beträchtlichen Schwankungen unterlegen. Augenfällig sind die Höchstwasserstände vom 10. August 2007 und vom 23. August 2005, bei welchen jeweils die Hochwassergrenze überschritten wurde. Deutlich erkennbar ist aber auch, dass der im Mittel erreichte Jahresgang im Winterhalbjahr<sup>10</sup> um bis zu einem halben Meter tiefere Seestände aufweist als im Sommerhalbjahr. Dieser auch für den Neuenburger- und den Murtensee charakteristische Jahresgang verdeutlicht die Auslegung der Regulierung auf Winterhochwasser, da die historischen

Jahresgang des Bielerseepegels

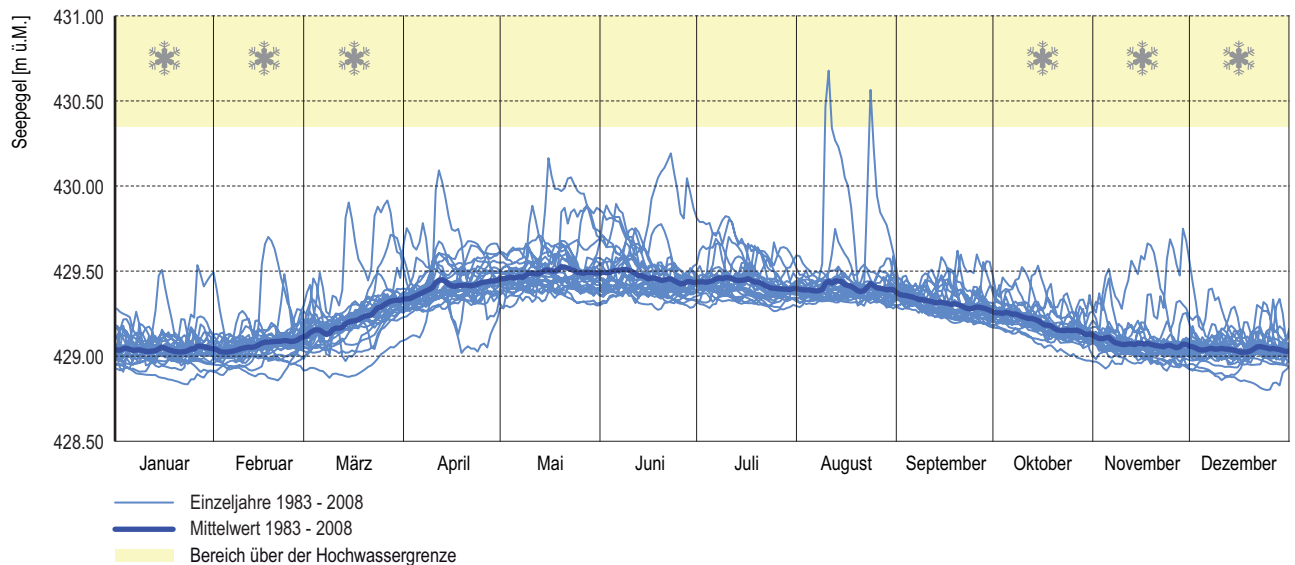
<sup>10</sup> Das hydrologische Jahr dauert in der Schweiz vom 1. Oktober bis 30. September; das hydrologische Winterhalbjahr von Oktober bis März, das Sommerhalbjahr von April bis September.

Ereignisse, welche Anlass für die II. JGK waren, sich jeweils im Winterhalbjahr ereigneten. So hält denn Müller (1974) im abschliessenden Bericht über die II. Juragewässerskorrektur fest:

«... , dass die Korrektur der II. JGK ohne Sicherheitszuschläge geplant und ausgeführt wurde. Die strengeren vorbeugenden Drosselungsvorschriften zum Schutz des unteren Aaretals erschweren das Einhalten höchster Seestände unter 430.50 und bedingen im «Winter» tiefe Bereithaltungen unter 429.20. Das geschaffene regulierfähige System genügt gerade, um die allseitigen Bedingungen zu erfüllen, lässt aber keinen «Spielraum» für Sonderwünsche. [...] Das Bestreben, nicht nur die Ebenen um die Seen, sondern auch das ganze Aaretal gegen Überschwemmungen zu schützen, bedingt eine strenge Regulierdisziplin. Es darf vor allem beim Beginn von Hochwasserperioden kein Retentionsraum durch zu kleine Seeausflüsse verloren gehen.»

**Abb. 5.11** > Jahresgang des Bielerseepegels von 1983 bis 2008 sowie Mittelwert des Seepegels für jeden Tag des Jahres (Tagesmittel)

Die Schneeflockensymbole bezeichnen die Monate des hydrologischen Winterhalbjahres.



Das grosse Speicherpotenzial des Neuenburgersees ermöglicht den Ausgleich der Zuflüsse über Wochen und Monate. Die Wasserstände der beiden anderen Seen gleichen sich durch die Verbindungskanäle an. Die geringen Wasserspiegelunterschiede zwischen den Seen ermöglichen ein Fliessen in beide Richtungen. Zentrales Element ist der Zihlkanal, welcher den Ausgleich zwischen dem Speicher (Neuenburgersee), dem Ausfluss (Wehr Port) und dem grössten Zufluss (Hagneck-Kanal) bewirkt. Seit Beginn der Messungen im Jahr 1984 bewegen sich die Tagesmittel der Abflüsse im Zihlkanal zwischen den Extremen von +300 m<sup>3</sup>/s (Durchfluss vom Neuenburger- zum Bielersee) und -390 m<sup>3</sup>/s (Durchfluss vom Bieler- zum Neuenburgersee), was den regen Austausch kennzeichnet. Der Broyekanal ist für die Entlastung des Murtensees

Austausch zwischen den Seen

wichtig. Die höchsten Zuflüsse vom Murtensee zum Neuenburgersee erreichten  $130 \text{ m}^3/\text{s}$ , während das Maximum in der Gegenrichtung rund  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  betrug.

Das Zusammenwirken der verschiedenen Elemente der JGK bei Hochwasser lässt sich am Vergleich der Hochwasser vom August 2005 und vom April 2006 aufzeigen. Beide Hochwasser hatten gesamthaft sehr ähnliche Zuflüsse (Tab. 5.4). 2005 erreichte der Bielersee ein Maximum von  $430.69 \text{ m ü.M.}$ ,  $53 \text{ cm}$  höher als 2006 ( $430.16 \text{ m ü.M.}$ ). Beim Neuenburgersee war es umgekehrt, das Maximum von 2005 ( $429.83 \text{ m ü.M.}$ ) war  $40 \text{ cm}$  tiefer als 2006 ( $430.23 \text{ m ü.M.}$ ). Die Gründe des unterschiedlichen Verhaltens sind aus den Abb. 5.12 (Hochwasser 2005) und Abb. 5.13 (Hochwasser 2006) ersichtlich.

Unterschiedliches Verhalten  
bei gleichem Zuflussvolumen

**Tab. 5.4 > Mittlerer Gesamtzufluss zu den Jurarandseen der Hochwasser 2005 und 2006 für verschiedene Dauerstufen**

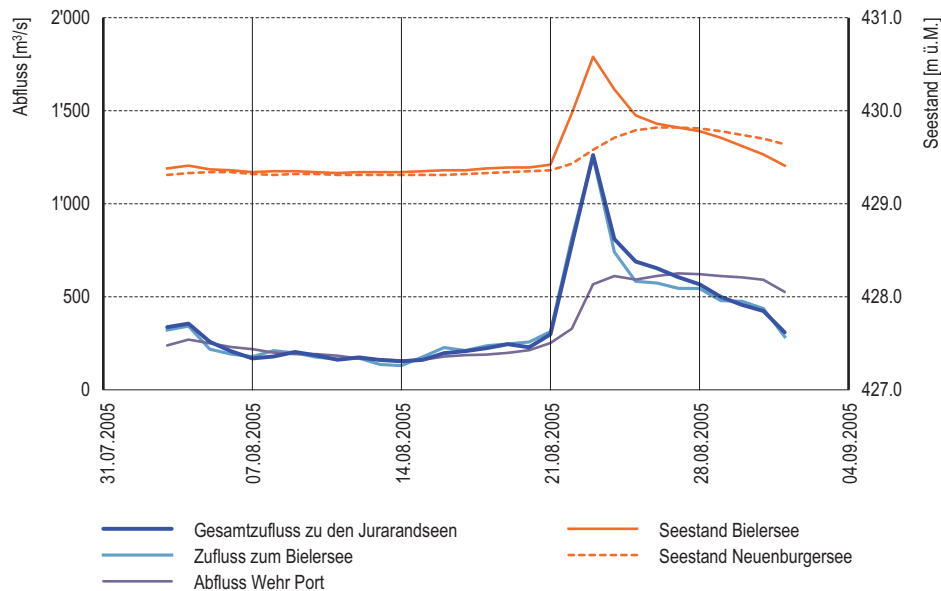
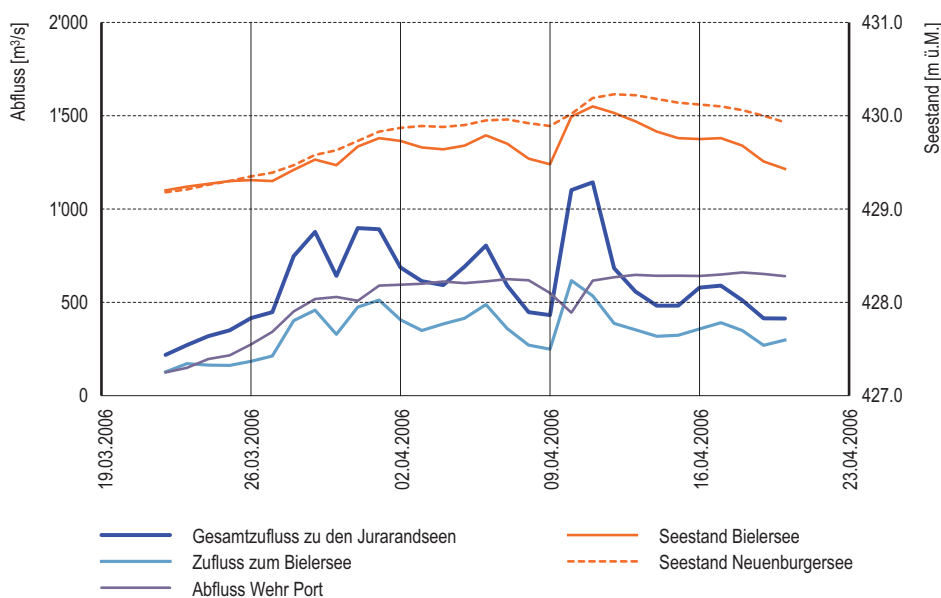
	mittlerer Gesamtzufluss [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]							
	1 Tag	2 Tage	3 Tage	4 Tage	5Tage	7 Tage	10 Tage	14 Tage
August 2005	1261	1036	951	886	839	767	675	562
April 2006	1143	1122	976	871	811	765	745	744

Im August 2005 war das Hochwasserereignis von den Zuflüssen zum Bielersee dominiert (Abb. 5.12). Die Zuflüsse zum Neuenburgersee waren im Vergleich dazu unbedeutend. Der grosse Zufluss der Aare durch den Hagneck-Kanal liess den Bielersee vom relativ tiefen Niveau ( $429.30 \text{ m ü.M.}$ ) um mehr als  $1.30 \text{ m}$  ansteigen. Zum Neuenburgersee entstand ein Gefälle von über einem Meter, weshalb durch den Zihlkanal über  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  vom Bieler- zum Neuenburgersee flossen. Es ist offensichtlich, dass bei diesem Ereignistyp die Höchststände des Neuenburgersees unter jenen des Bielersees bleiben.

Hochwasser vom August 2005

Anders war die Situation im April 2006 (Abb. 5.13). Die Zuflüsse zu den beiden Seen waren in der gleichen Grössenordnung von je etwa  $400 \text{ m}^3/\text{s}$ . Dadurch stiegen zwischen dem 1. und 10. April 2006 beide Seen an, obwohl beim Wehr Port seit dem 1. April nahezu kontinuierlich ein Abfluss von  $600 \text{ m}^3/\text{s}$  abgegeben wurde. Am 9. April hatte der Neuenburgersee bereits die Kote  $429.90 \text{ m ü.M.}$  erreicht, lag also bereits um  $60 \text{ cm}$  über dem Niveau von 2005. Die Zuflüsse zum Bielersee stiegen am 10. April auf ca.  $600 \text{ m}^3/\text{s}$  an und entsprachen somit dem Ausfluss beim Wehr Port. Unmittelbar vor der Hochwasserspitze musste der Abfluss beim Wehr Port wegen der Murgenthalerbedingung gedrosselt werden, was – zusammen mit dem hohen Gesamtzufluss von über  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$  – zu einem raschen Anstieg des Bielersees um etwa  $60 \text{ cm}$  und des Neuenburgersees um  $30 \text{ cm}$  auf  $430.23 \text{ m ü.M.}$  führte. Das Niveau des Bielersees blieb im gesamten Zeitraum unter jenem des Neuenburgersees.

Hochwasser vom April 2006

**Abb. 5.12 > Ganglinien der Zuflüsse und der Seestände des Hochwassers vom August 2005 (Tagesmittel)****Abb. 5.13 > Ganglinien der Zuflüsse und der Seestände des Hochwassers vom April 2006 (Tagesmittel)**

Der Vergleich der Ereignisse von 2005 und 2006 zeigt, dass neben dem zufließenden Gesamtvolumen auch dessen räumliche und zeitliche Verteilung entscheidend ist, und wie der Bielersee bei einer Drosselung infolge der Murgenthalerbedingung besonders deutlich reagiert. Im Falle des Hochwassers 2005 war kein grosser Einfluss der Murgenthalerbedingung erkenntlich. Beim Hochwasser 2006 ist jedoch ein Teil des Seeanstieges am Bielersee der Murgenthalerbedingung zuzurechnen.

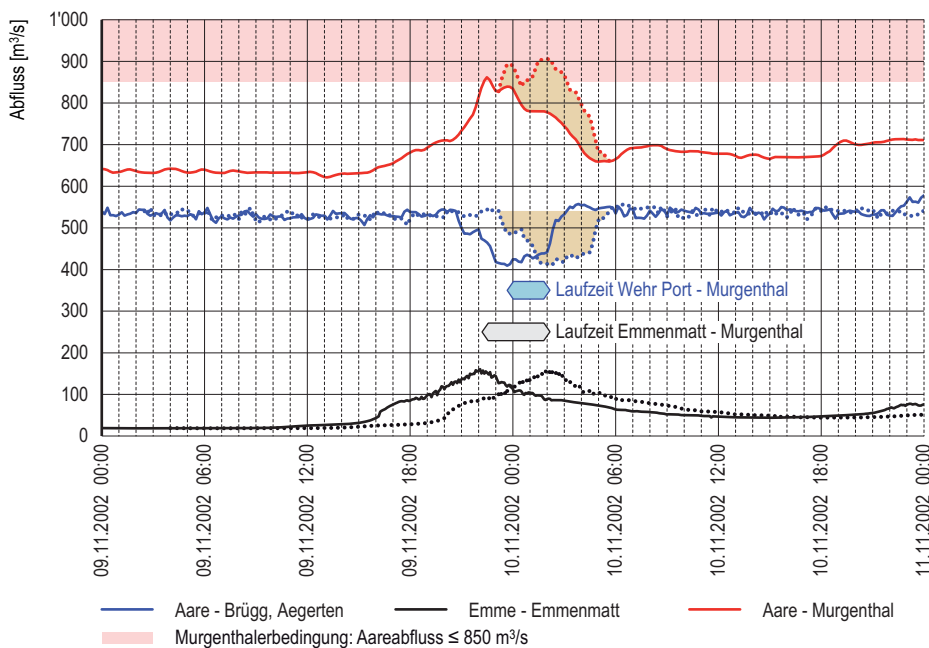
Räumliche Verteilung  
der Zuflüsse entscheidend

Trotz relativ starker Vereinfachungen hat sich die Prognoserechnung nach Aebi als Basis zur Drosselung des Bielerseeausflusses bei Emmehochwassern grundsätzlich bewährt. Exemplarisch ist in Abb. 5.14 der Ablauf eines kleineren Emmehochwassers im November 2002 dargestellt. Darin sind die beobachteten Ganglinien der Aare bei Brügg, Aegerten unterhalb des Wehrs Port, der Aare bei Murgenthal und der Emme bei Emmenmatt gezeigt. Werden die Ganglinien der Aare bei Brügg, Aegerten und der Emme bei Emmenmatt die dem Verfahren nach Aebi zugrunde gelegten Fließzeiten zeitlich verschoben, so ist ersichtlich, dass durch die Drosselung beim Wehr Port die Hochwasserwelle der Emme kompensiert wurde und ein Überschreiten des Zielwerts von 850 m<sup>3</sup>/s in Murgenthal verhindert werden konnte.

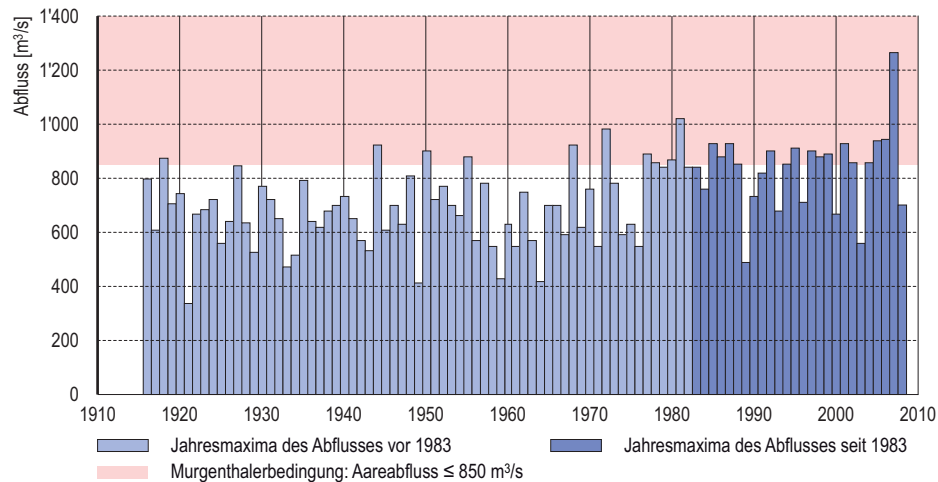
Hochwasserregulierung  
bisher weitgehend erfolgreich

**Abb. 5.14 > Drosselung des Bielerseeausflusses am Wehr Port beim Emmehochwasser vom 9./10. November 2002 zur Verhinderung eines Abflusses über 850 m<sup>3</sup>/s in der Aare bei Murgenthal (Zeitangaben in Winterzeit)**

Infolge der Laufzeit wirkt sich eine Abflussänderung beim Wehr Port erst nach 2 bis 3 Stunden in Murgenthal aus. Um dies zu verdeutlichen, ist die bei Brügg, Aegerten beobachtete Abflussganglinie (ausgezogene Linie) um diese Laufzeit verschoben (gepunktete Linie). Die Hochwasserwelle aus Emmenmatt trifft nach einer Laufzeit von rund 4 Stunden in Murgenthal ein. Der hinterlegte Bereich entspricht der in Murgenthal durch die Drosselung bewirkten Abflussreduktion. Ohne Drosselung des Abflusses beim Wehr Port wäre in Murgenthal bei diesem Beispiel ein Abfluss von rund 900 m<sup>3</sup>/s erreicht worden.



Allerdings zeigt die Zeitreihe der Jahreshochwasser der Aare in Murgenthal (Abb. 5.15), dass seit Beginn der Anwendung des Regulierreglements 1980/82 im Jahre 1983 eine strikte Einhaltung der Murgenthalerbedingung nicht erreicht wurde. Die Überschreitungen waren jedoch – abgesehen von 2007 – eher moderat. Auf die Gründe für das massive Übertreffen des Zielwerts von 850 m<sup>3</sup>/s im August 2007 wird im Kapitel 5.4.1 eingegangen.

**Abb. 5.15 > Jahresmaxima des Abflusses der Aare in Murgenthal seit 1916**

#### 5.4 Das Hochwasser vom 8./9. August 2007

Ein wichtiger Teil dieser Ereignisanalyse war einerseits die vertiefte Betrachtung des Ablaufs des Hochwassers vom 8./9. August 2007 für den Bereich der Jurarandseen und der unterliegenden Aare unter besonderer Berücksichtigung der Regulierung, andererseits die historische Einordnung des Ereignisses.

Ziele

An den wichtigsten Fließgewässern im System der Jurarandgewässer sind Abflussmessstationen vorhanden. Es werden aber nicht sämtliche Zuflüsse zu den Jurarandseen und aus dem Zwischeneinzugsgebiet unterhalb des Bielersees gemessen. Deshalb wurde für diese ungemessenen Zuflüsse eine Rekonstruktion des Ereignisses unter Verwendung eines hydrodynamischen Modells nötig. Dieses Modell wurde auch für die Prüfung von Massnahmen eingesetzt, die in Kapitel 5.5 beschrieben wird.

Die Hochwasserregulierung und ihre Grundlagen wurden in Bezug auf das Hochwasser 2007 genauer untersucht und analysiert. Hierbei wurde einerseits der Einfluss der Hochwasserregulierung auf den Wasserstand des Bielersees und die Abflussganglinie in Murgenthal untersucht, andererseits wurden die Güte und Grenzen der Prognoserechnung nach Aebi aufgezeigt.

Um die Ereignisse des Hochwassers im August 2007 besser verstehen zu können, die Funktionsweise und die Grenzen des Systems aufzuzeigen und daraus mögliche Massnahmen ableiten zu können, wurde anschliessend eine Einordnung des Ereignisses aus hydrologischer Sicht vorgenommen.

#### 5.4.1 Rekonstruktion des Hochwasserereignisses mit Hilfe von Simulationsrechnungen

Das hydrodynamische Modell zur Rekonstruktion des Hochwasserereignisses im August 2007 umfasst den Bereich der Jurarandseen (Murtensee, Bielersee und Neuenburgersee) mit ihren Zuflüssen und Verbindungskanälen, die Regulierung beim Wehr Port und die Aare vom Bielersee einschliesslich der vorhandenen vier Laufkraftwerke bis zum Kraftwerk Ruppoldingen rund 7 km flussabwärts des Pegels Murgenthal (TK-Consult AG 2006). Hierbei wurde auf ein bestehendes eindimensionales Modell zurückgegriffen, welches mit Flux<sup>DSS/DESIGNER</sup> (Reichel 2001) im Jahr 2001 implementiert (TK-Consult AG 2006) und im Rahmen der Ereignisanalyse Hochwasser 2005 aktualisiert worden war (TK-Consult AG 2008). Es wurde im Rahmen der Ereignisanalyse 2007 angepasst und erweitert. Die Seen sind als breite eindimensionale Stränge in das Fliesstreckenschema integriert. Ein modellinterner Regler beinhaltet sowohl die in Kapitel 5.3.1 beschriebenen Reguliervorschriften als auch das Prozedere der Hochwasserregulierung nach Aebi gemäss Kapitel 5.3.2.

Hydrodynamisches Modell

Als Input für die Zuflüsse werden die Abflussdaten der folgenden Stationen verwendet: Orbe – Orbe, Mentue – Yvonand, Areuse – Boudry, Seyon – Valangin, Canal de la Broye – Sugiez, Bibere – Kerzers, Zihlkanal – Gampelen, Aare – Hagneck, Suze – Sonceboz und Emme – Wiler. Um die ungemessenen bzw. durch kantonale Messstellen erfassten Zuflüsse in die Seen berücksichtigen zu können, werden im Modell Übertragungsfaktoren verwendet, mit welchen die gemessenen Zuflüsse unter Berücksichtigung der Grösse der ungemessenen Einzugsgebiete multipliziert wurden. Die Faktoren wurden zuletzt am Ereignis 2005 kalibriert. Bei der Verwendung dieser Kalibrierfaktoren für das Hochwasserereignis im August 2007 stellten sich diese als zu niedrig heraus, so dass die Seestände systematisch unterschätzt wurden. Das Modell wurde deshalb für den Zeitraum vom 01.07.2007–31.08.2007 nachkalibriert. Ausserdem wurde der über den Seen gefallene Niederschlag dabei explizit ins Modell eingegeben.

Kalibrierung

Auch aus dem Zwischeneinzugsgebiet zwischen dem Bielersee und dem Pegel Murgenthal münden ungemessene Zuflüsse in die Aare. Im August 2007 erhöhte sich der Abfluss in der Aare zwischen dem Wehr Port und Murgenthal durch seitliche Zuflüsse beträchtlich, wobei Abflussmessdaten nur für die beiden Hauptzuflüsse Emme und Murg vorliegen. Für den ungemessenen Teil des Zwischeneinzugsgebiets wurde mit dem Modell unter Berücksichtigung der beobachteten Abflüsse der Aare bei Brügg und Murgenthal die Zuflussganglinie rekonstruiert, welche integral den gesamten ungemessenen Zuflussanteil über die gesamte Strecke umfasst.

Der modellinterne Regler bildet die gemäss Linien- und Hochwasserreglement einzuhaltenden Vorschriften für die Regelung des Abflusses am Wehr Port ab. Differenzen zwischen der tatsächlichen Regulierung und der mit dem Modellregler simulierten Abflusssteuerung können sich aus zweierlei Gründen ergeben. Einerseits kann bei der Regulierung am Wehr Port von den bestehenden Vorschriften abgewichen werden (vgl. Kap. 5.3.1). Andererseits ist die Implementierung des Modellreglers anspruchsvoll und die Abbildung und Simulation der komplexen Reguliervorschriften kann – vor allem bei der Hochwasserregulierung – zu numerischen Problemen führen. Die tatsächlichen Abflüsse am Wehr Port sind jedoch durch die Aufzeichnungen an der direkt unterhalb

Modellinterner Regler

liegenden Messstation Aare – Brügg bekannt. Deshalb wurden die Simulationsrechnungen nicht nur mit den gemäss Regler berechneten Seeausflüssen, sondern auch mit den in Brügg beobachteten Abflusswerten durchgeführt.

Die Ergebnisse aus der hydraulischen Modellierung wurden mit den gemessenen Seewasserständen im Bieler-, Neuenburger- und Murtensee, den beobachteten Durchflüssen in den Verbindungskanälen und bei den Abflussmessstationen der Aare in Brügg und Murgenthal verglichen. Bei Verwendung der beobachteten Ausflüsse aus dem Bielersee kann die Güte des Modells getestet und seine Tauglichkeit nachgewiesen werden. Sie erwies sich insgesamt als gut, so dass das Modell für die Rekonstruktion des Ereignisses und für die Benutzung in den Szenarienrechnungen verwendet werden konnte. Auf allfällige Abweichungen zwischen Simulationsergebnissen und beobachteten Ganglinien und deren Konsequenzen wird im Folgenden näher eingegangen.

Ergebnisse der Simulation des Hochwassers vom August 2007

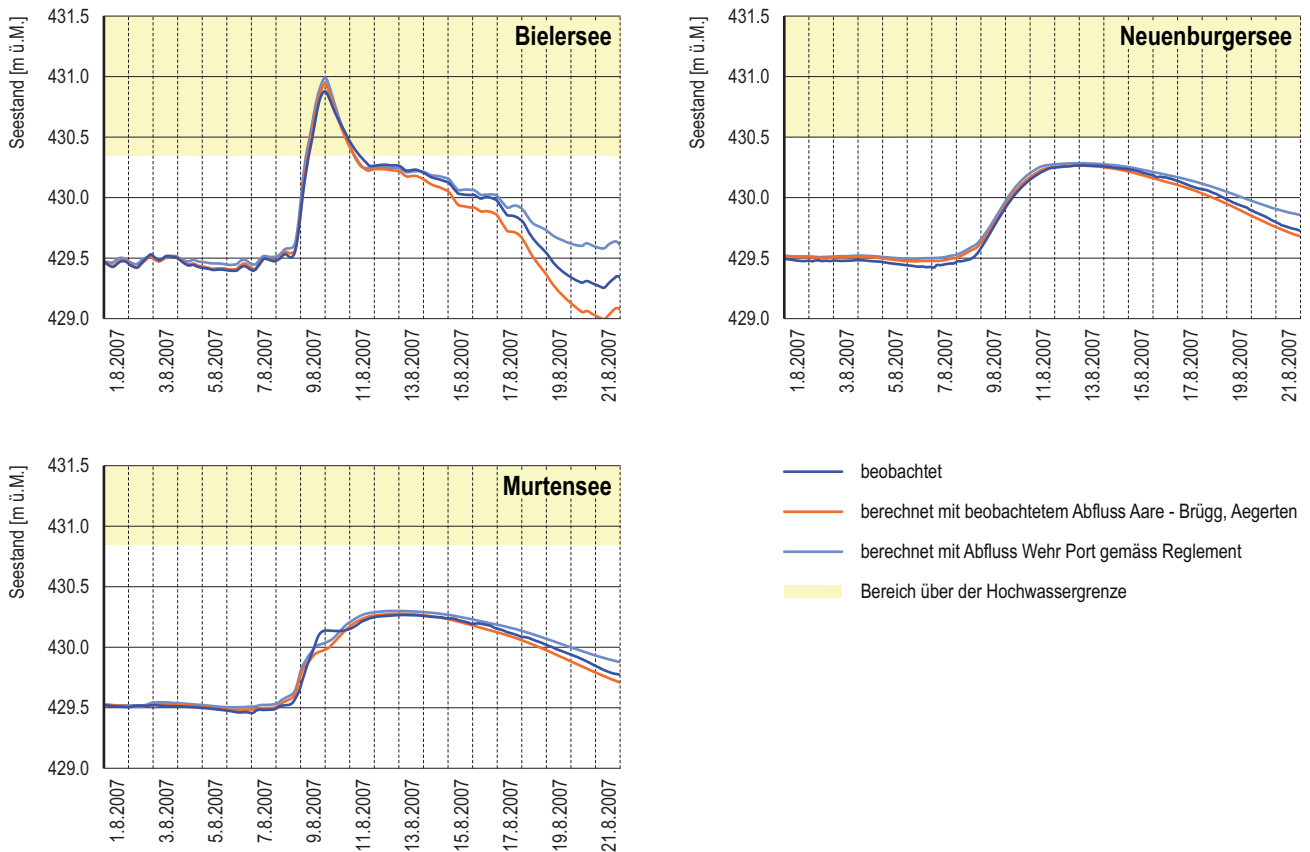
Bei den in Abb. 5.16 gezeigten Seewasserständen wird insbesondere auf den Bielersee eingegangen, da dieser aufgrund der hohen Zuflüsse aus dem Hagneck-Kanal und der im Vergleich zum Neuenburgersee kleinen Seefläche schneller und stärker reagiert und somit dort die Veränderungen am grössten sind.

Seestände

Bei der Simulation mit dem beobachteten Abfluss in Brügg liegt das Maximum des simulierten Bielerseestands lediglich 6 cm über dem beobachteten Höchststand. Deutlich tiefere Seestände ergeben sich jedoch im Nachlauf des Ereignisses. Dies ist auf eine Unterschätzung der Zuflüsse in die Jurarandseen bei abklingendem Hochwasser zurückzuführen, was durch die grundsätzlichen Eigenschaften der Kalibrierung erklärt wird. Sie erfolgte gesamthaft über einen bestimmten Zeitraum. Deshalb sind im Detail Abweichungen im zeitlichen Verlauf möglich. Das gezeigte Ergebnis deutet darauf hin, dass die verwendeten Kalibrierfaktoren für den Bereich des Hauptereignisses zutreffend sind, sie aber beim Abklingen des Ereignisses die Zuflüsse in die Jurarandseen unterschätzen. Diese Abweichungen sind jedoch für die hier zu behandelten Fragestellungen von untergeordneter Bedeutung. Die beobachteten Seestände des Neuenburger- und des Murtensees lassen sich mittels der Simulationsrechnungen sehr gut reproduzieren (Abb. 5.16).

Wenn die Simulation nicht mit dem beobachteten Seeausfluss, sondern mit dem modellinternen Regler erfolgt, ergeben sich nochmals leicht höhere maximale Seestände. Interessant ist in diesem Zusammenhang wiederum das Verhalten im Nachgang des eigentlichen Hochwasserereignisses. Hier liegen (etwa ab dem 13. August) die simulierten Seestände deutlich höher als die gemessenen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Bielerseepegel nach dem Ereignis rascher als gemäss dem Linienreglement vorgegeben wieder auf den Sommerwasserstand gesenkt wurde.

Abb. 5.16 &gt; Berechnete und beobachtete Wasserstände während des Ereignisses vom August 2007 für die Jurarandseen



Im Zihlkanal (Abb. 5.17) ist deutlich der starke Rückfluss vom Bielersee in den Neuenburgersee zu erkennen, der in der Nacht vom 9. auf den 10. August mehr als 400 m<sup>3</sup>/s betrug. Hier sind die Abweichungen zwischen den simulierten und beobachteten Werten mit knapp 100 m<sup>3</sup>/s auffällig. Dies kann verschiedene Gründe haben. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass die Messung des Durchflusses im Zihlkanal aufgrund wechselnder Durchflussrichtungen relativ schwierig und mit gewissen Unschärfen behaftet ist.

Zihlkanal

Nach Abklingen des Hochwassers ist erkennbar, dass sich die Fliessrichtung wieder ändert und der Zufluss vom Neuenburger- in den Bielersee über mehrere Tage hin langsam, aber stetig zunimmt. Im Broyekanal hingegen ist nur eine Erhöhung des Durchflusses über etwa 2 Tage hinweg bis auf etwa 100 m<sup>3</sup>/s festzustellen. Hier kam es nicht zu einer Fliessumkehr.

Am Wehr Port (Abb. 5.17) wird die Steuerung des Abflusses durch den modellinternen Regler im Wesentlichen gut abgebildet, jedoch ist in der Phase der Drosselung ein Überschwingen mit damit verbundenen Oszillationen erkennbar. Der Regler bildet zwar das Linienreglement sehr gut ab, beherrscht aber die Hochwasserregulierung noch

Drosselung

nicht optimal. Auf den Wasserstand im Bielersee hat dies einen geringen Einfluss. Weil der Einfluss auf den Abfluss in der unterliegenden Aare jedoch grösser sein könnte, wurde für die genauere Untersuchung der Hochwasserregulierung nebst der numerischen Simulation noch eine zweite Methode angewendet (vgl. Kap. 5.4.2). Um die numerischen Probleme mit dem Regler zu beheben, wurde dessen Weiterentwicklung mittlerweile eingeleitet.

**Abb. 5.17 > Berechnete und beobachtete Abflüsse im Zihl- und Broyekanal sowie in der Aare unterhalb des Wehrs Port während des Ereignisses vom August 2007**

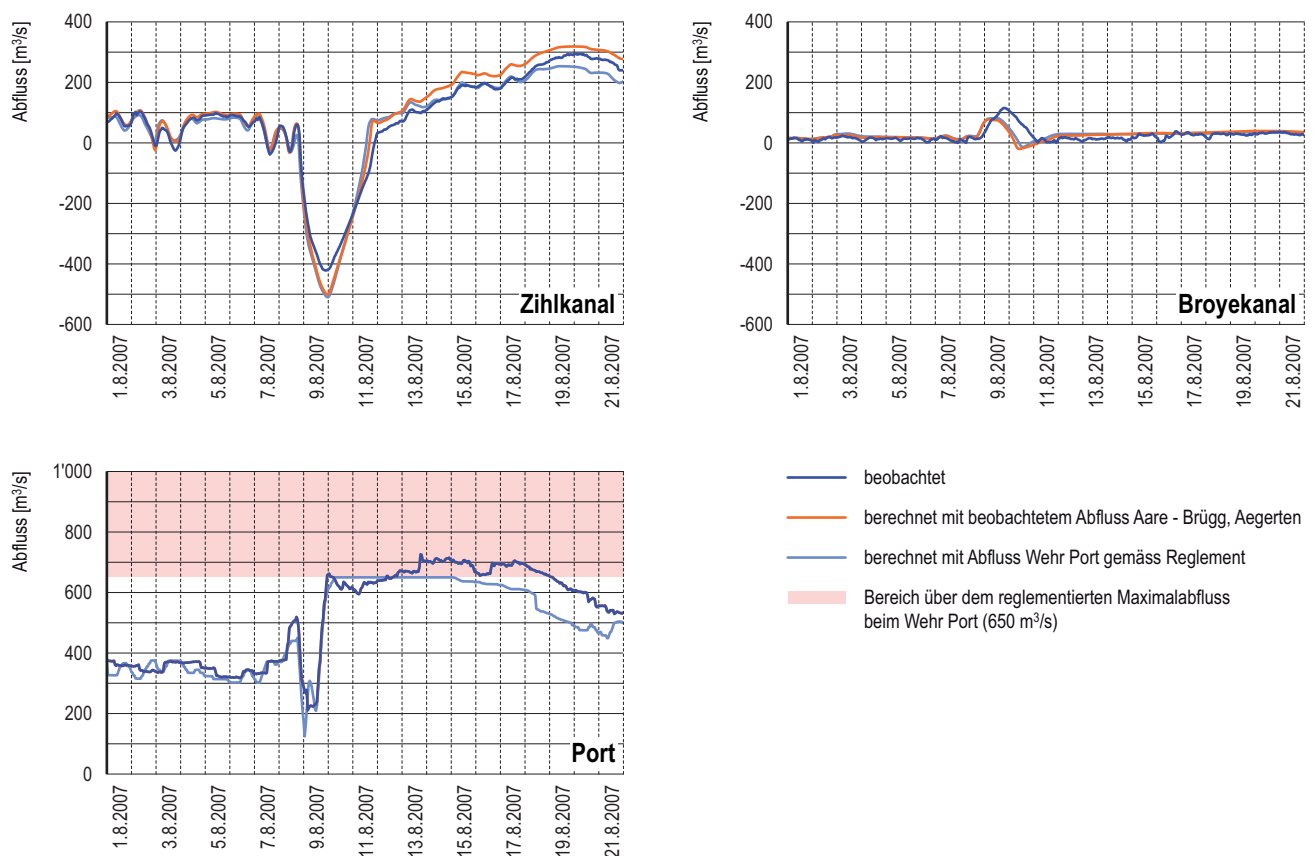


Abb. 5.18 zeigt die für den Pegel Murgenthal simulierte Ganglinie der Aare. Damit diese mit dem beobachteten Abfluss in Murgenthal verglichen werden kann, wurde sie unter Verwendung der in Brügg registrierten Abflusswerte berechnet. Der simulierte Verlauf der Hochwasserwelle stimmt für das Hauptereignis sehr gut mit der Beobachtung überein.

Murgenthal

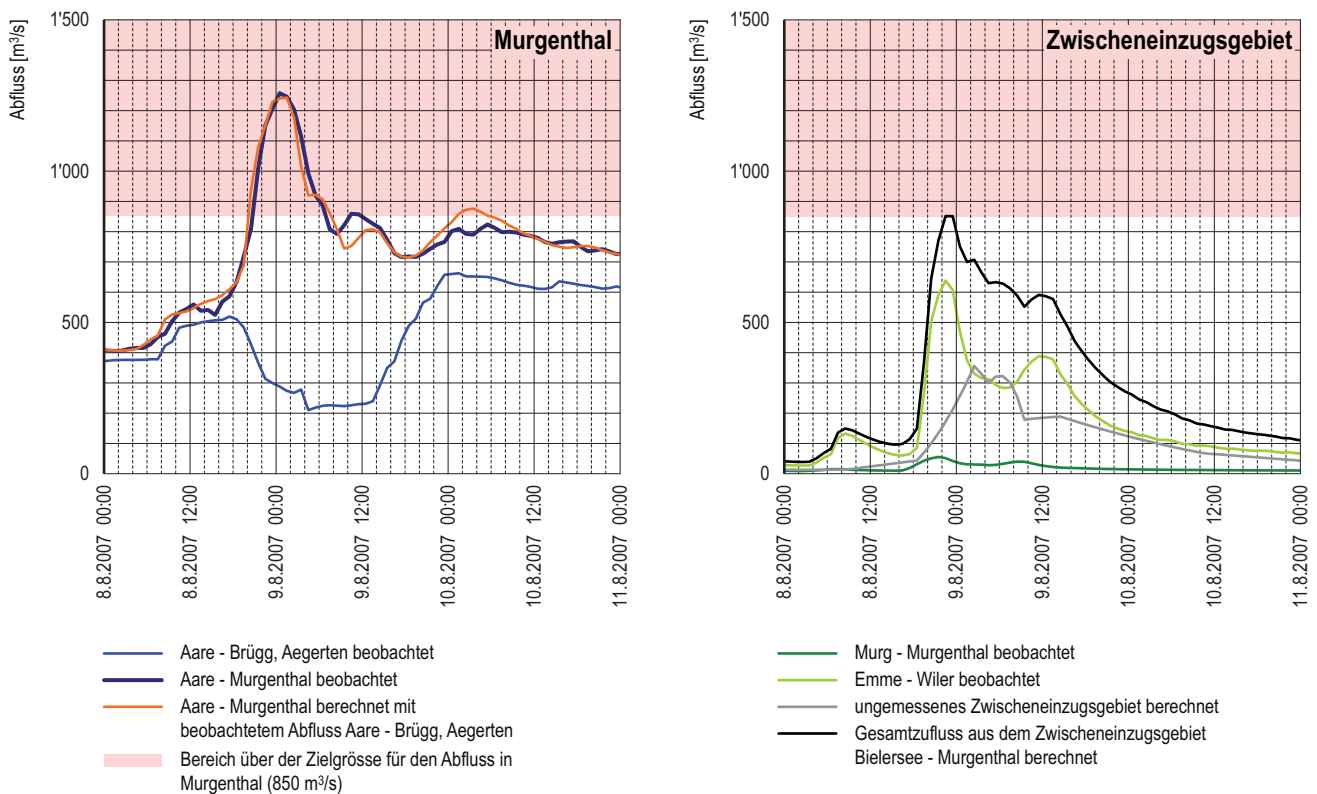
Aufgrund der Übereinstimmung zwischen den beobachteten und simulierten Ganglinien der Seewasserstände und Abflüsse kann das kalibrierte Modell für weitere Untersuchungen verwendet werden. In einem ersten Schritt ging es darum, die Zuflüsse aus dem ungemessenen Zwischeneinzugsgebiet zwischen Port und Murgenthal zu ermitteln.

Beitrag des Zwischeneinzugsgebiets unterhalb des Bielersees

Der Grund für den ausserordentlichen Abfluss der Aare war der grosse Beitrag aus dem Zwischeneinzugsgebiet von Port bis Murgenthal. Einerseits erreichte die Emme im Jahr 2007 den höchsten Abflusswert seit Beginn der Aufzeichnungen im Jahr 1922 (Abb. 5.26), andererseits trug auch der ungemessene Teil des Zwischeneinzugsgebiets zu einem erheblichen Teil zum Abflussgeschehen bei. Dies zeigt die Rekonstruktion der Zuflussganglinie aus diesem Teil des Einzugsgebiets mit Hilfe des Modells (Abb. 5.18). Angesichts der Bedeutung dieses Ergebnisses und zu dessen Plausibilisierung wurden die Zuflussganglinien aus dem Zwischeneinzugsgebiet zusätzlich mit Hilfe einer zweiten Methode rekonstruiert. Dazu wurden die zur Verfügung stehenden Abflussdaten unter Berücksichtigung der Laufzeiten (ohne diffusive Wellenbetrachtung oder Retentionseffekten in den Fliessgewässern) bilanziert. Das Ergebnis aus der Modellierung wurde grundsätzlich bestätigt, tendenziell ergeben sich sogar eher noch etwas höhere Zuflüsse aus dem Zwischeneinzugsgebiet. Wie Abb. 5.18 zeigt, genügten allein schon die seitlichen Zuflüsse in die Aare zwischen Port und Murgenthal, um die Zielgrösse von 850 m<sup>3</sup>/s in Murgenthal zu erreichen.

**Abb. 5.18** > Ergebnisse der hydraulischen Modellierung für den Abfluss der Aare bei Murgenthal und für den Gesamtzufluss aus dem Zwischeneinzugsgebiet (Zeitangaben in Winterzeit)

Der Gesamtzufluss aus dem Zwischeneinzugsgebiet setzt sich aus den Zuflüssen der Emme, Murg und aus dem ungemessenen Teil des Zwischeneinzugsgebiets zusammen.



#### 5.4.2 Analyse der Hochwasserregulierung und ihrer Grundlagen

Um den Einfluss der Regulierung am Wehr Port auf den Verlauf der Hochwasserwelle vom 8./9. August 2007 in der Aare zu untersuchen, wird nachfolgend der Verlauf der Wehroperationen im Detail dargestellt und analysiert. In einem ersten Schritt wurde untersucht, wie sich diese Wehrregulierung auf den Zeitpunkt und die Spitze der Abflussganglinie in Murgenthal auswirkte. Hierfür wurde zunächst die Aebi-Rechnung mit den damals zur Verfügung stehenden Abflussdaten nachvollzogen. Hieraus resultiert der Soll-Abfluss beim Wehr Port unter strikter Einhaltung aller bestehenden Reguliervorschriften, welcher mit der tatsächlichen Regulierung verglichen wurde. Basierend auf diesem Vergleich wurde anschliessend beurteilt, welche Auswirkungen die tatsächliche Regulierung auf den Abfluss der Aare bei Murgenthal hatte.

Da 2007 das System an seine Grenzen stiess, stellt sich auch die Frage nach der Güte der Grundlagen für die Hochwasserregulierung. Im Zusammenhang mit den aussergewöhnlich kurzen Anstiegszeiten des Hochwassers in der Emme und der ausserordentlich hohen Zuflüsse aus dem Zwischeneinzugsgebiet interessiert insbesondere die Prognosefähigkeit der Aebi-Rechnung. Diese wurde ebenfalls vertieft untersucht, denn letztlich hängt der in Port einzustellende Ausfluss direkt von der mit der Aebi-Rechnung gemachten Vorhersage für den Pegel Murgenthal ab.

Am Vormittag des 8. August wurde der Ausfluss beim Wehr Port gegenüber dem durch das Regulierdiagramm vorgegebenen Wert um rund  $70 \text{ m}^3/\text{s}$  erhöht, um dadurch das Speichervolumen des Bielersees angesichts der zu erwartenden Niederschläge und Zuflüsse besser ausnützen zu können (Abb. 5.19 oben). Bis zum Abend des 8. August hat dies einen zusätzlichen Anstieg des Bielersees um rund 5 cm verhindert. Am Abend des 8. August 2007 fand der Übergang von der Regulierung gemäss Regulierdiagramm zur Hochwasserregulierung statt. Dieser Übergang erfolgte rechtzeitig. Da aber zu Beginn der Drosselung der Abfluss über dem durch das Regulierdiagramm gegebenen Wert lag und die Drosselungsgeschwindigkeit gemäss Reglement limitiert ist, erfolgte die Reduktion des Abflusses am Wehr Port insgesamt jedoch verzögert. Allerdings wurde im weiteren Verlauf der Abfluss am Wehr Port auch etwas stärker gedrosselt, als dies gemäss den Vorschriften der Hochwasserregulierung notwendig gewesen wäre. Die Abweichungen während der Phase der Hochwasserregulierung haben den Bielersee insgesamt um rund 3 cm weniger hoch ansteigen lassen.

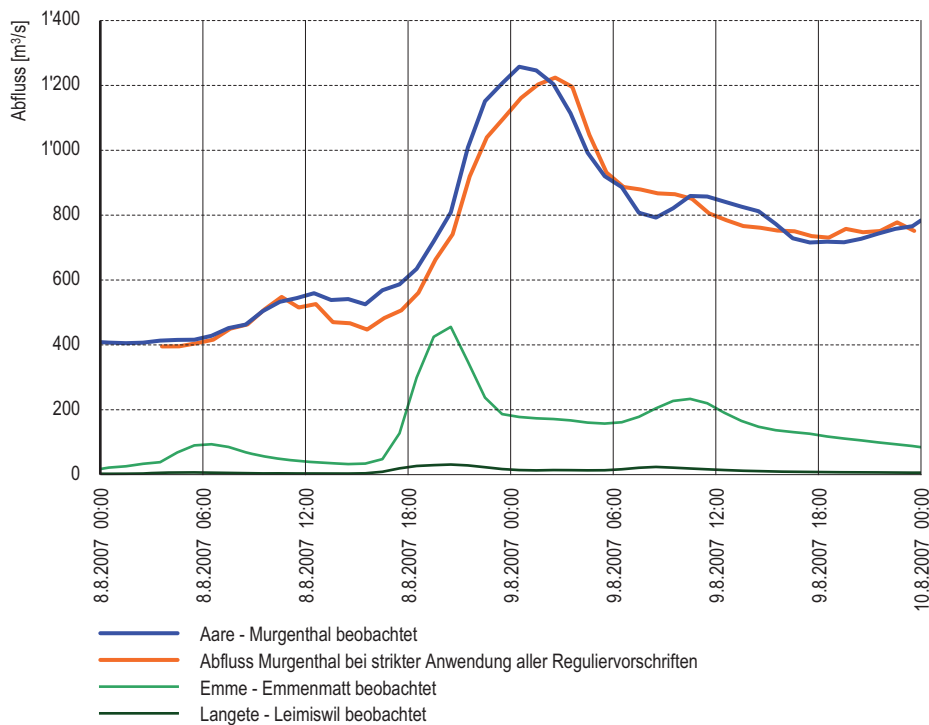
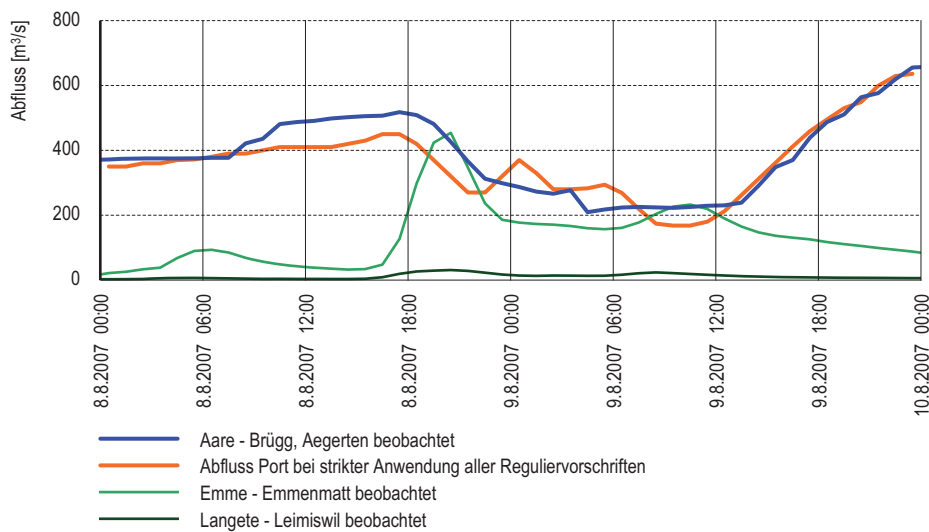
Die Bilanzierung der Differenzen am Wehr Port unter Berücksichtigung der Laufzeiten liefert für den Pegel Murgenthal eine Abflussganglinie, wie sie sich unter idealen Bedingungen bei strikter Anwendung aller Reguliervorschriften ergeben hätte (Abb. 5.19 unten). Hätten am 8. und 9. August 2007 bei der Regulierung des Abflusses am Wehr Port sämtliche Reguliervorschriften ideal eingehalten werden können, so wäre dadurch der Spitzenabfluss der Aare in Murgenthal um rund 2% geringer ausgefallen ( $1230 \text{ m}^3/\text{s}$  anstelle von  $1262 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Zeitlich wäre die Hochwasserspitze rund 3 Stunden später aufgetreten.

Ziele und Methodik

Einfluss der Hochwasserregulierung auf den Bielersee und den Abfluss in Murgenthal

**Abb. 5.19** > Vergleich der beobachteten Abflussganglinien und der rekonstruierten Ganglinien bei strikter Anwendung aller Reguliervorschriften während des Hochwassers vom 8./9. August 2007 für den Ausfluss am Wehr Port (oben) und am Pegel Murgenthal (unten) (Zeitangaben in Winterzeit)

Die zusätzlich gezeigten Abflusswerte der Stationen Emme – Emmenmatt und Langete – Leimiswil gehen ebenfalls in die Aebi-Rechnung ein (vgl. Kap. 5.3.2).

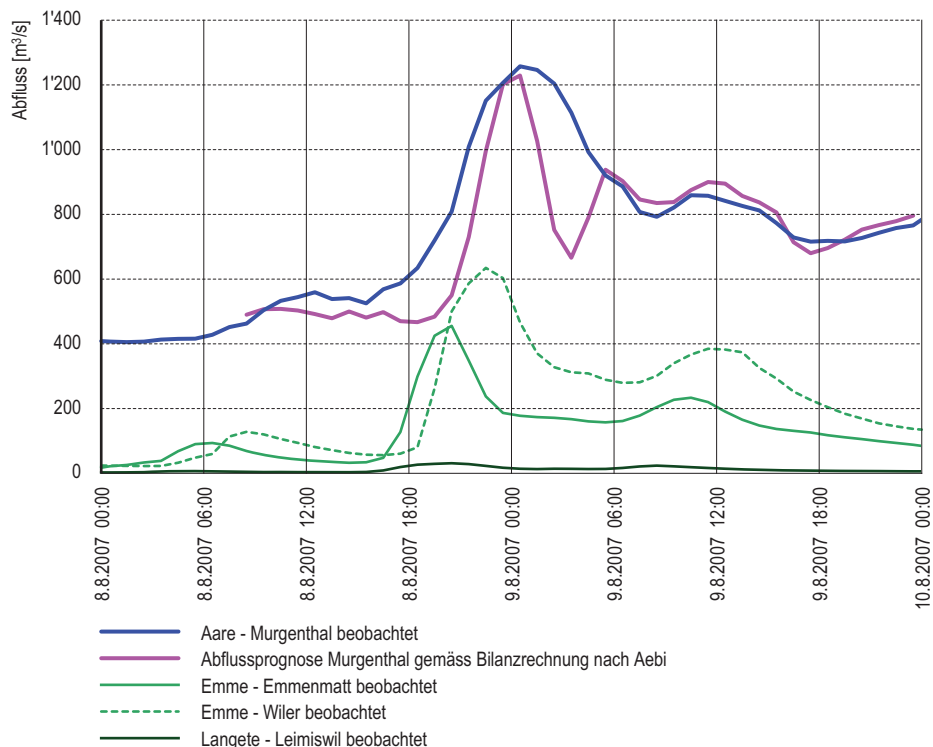


Das Hochwasser 2007 zeigt die Grenzen der Prognoserechnung nach Aebi, welche der Hochwasserregulierung zugrunde liegt und sich bis 2007 grundsätzlich bewährt hatte. Das Verfahren erlaubte zwar eine zuverlässige Vorhersage des Spitzenabflusses der Aare bei Murgenthal hinsichtlich Grösse und Zeitpunkt, liess aber erwarten, dass das Hochwasser später ansteigen und früher wieder abklingen würde (Abb. 5.20). Die Ursachen für diese Abweichungen sind unter anderem im aussergewöhnlich raschen Anstieg der Emme sowie bei den ungewöhnlich hohen Zuflüssen aus dem übrigen Teil des Zwischeneinzugsgebiets zu suchen. Das Ereignis 2007 sowie die Zunahme der Spitzenabflüsse der Emme in der jüngeren Vergangenheit verdeutlichen den Bedarf nach verbesserten Vorhersagen als Grundlage für die Hochwasserregulierung der Jurarandgewässer.

Grenzen der Prognoserechnung  
nach Aebi

**Abb. 5.20 > Vergleich des Abflusses der Aare in Murgenthal mit der Abflussprognose gemäss Aebi-Rechnung (Zeitangaben in Winterzeit)**

Der Vergleich der zusätzlich gezeigten Ganglinien der Emme bei Emmenmatt bzw. bei Wiler mit der Ganglinie der Aare bei Murgenthal verdeutlicht den ausserordentlich raschen Ablauf des Hochwassers. Von untergeordneter Bedeutung war der Beitrag aus dem Teileinzugsgebiet der Langete.

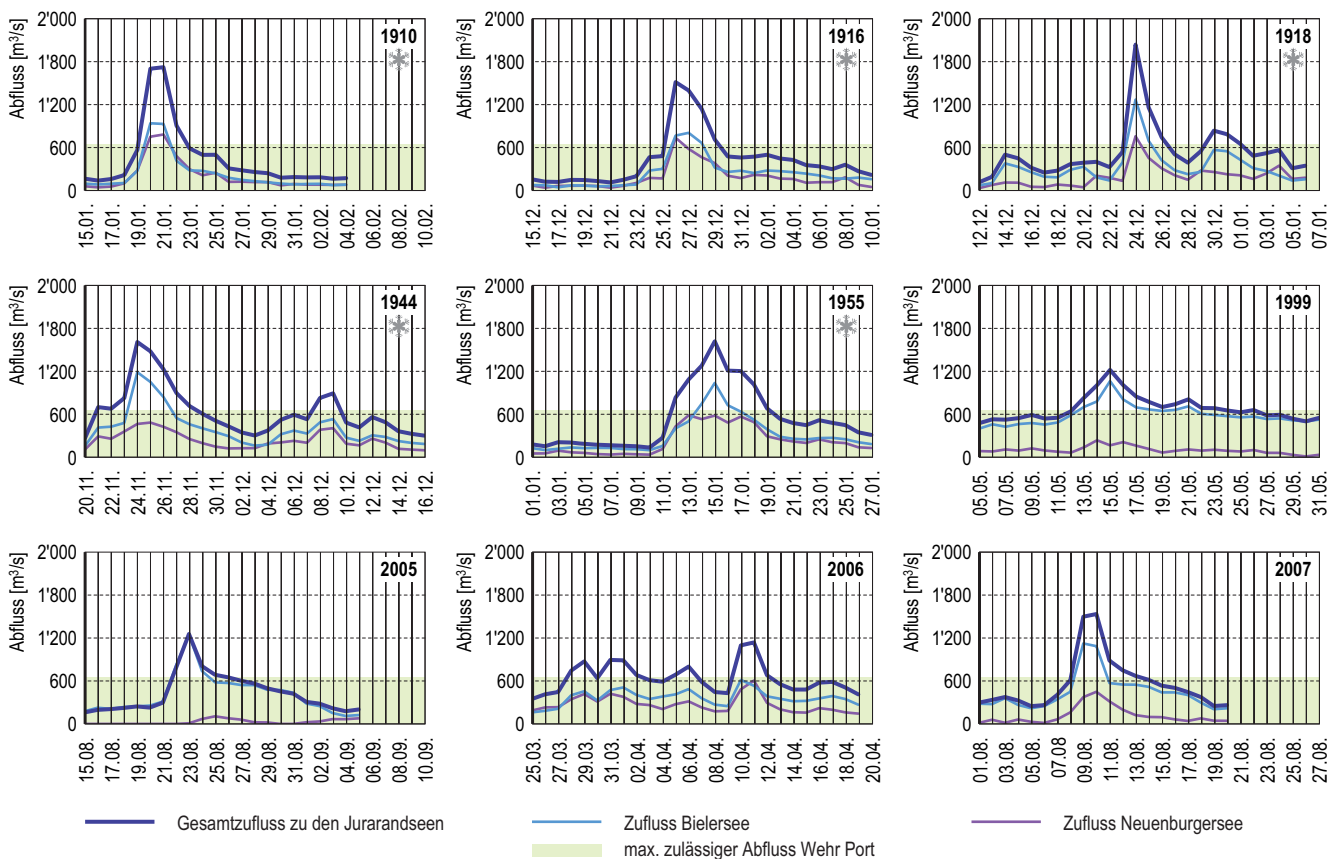


5.4.3 Einordnung hinsichtlich der Zuflüsse zu den Jurarandseen

Um das Hochwasserereignis vom August 2007 aus hydrologischer Sicht hinsichtlich seines Ausmasses und Häufigkeit einordnen zu können, wurden die grossen Hochwasser seit 1910 genauer untersucht. Hierbei wurde zwischen den Zuflüssen in die Jurarandseen und den Seewasserständen unterschieden. Untersucht wurden Charakteristika der Ganglinien, Spitzenzuflüsse zu den Seen hinsichtlich verschiedener Dauerstufen, maximaler Seewasserstände sowie erforderlicher Speichervolumina der Seen. Vergleichbare Untersuchungen bezüglich der Zuflüsse aus dem Zwischeneinzugsgebiet finden sich in Kapitel 5.4.4.

Abb. 5.21 > Zuflüsse zu den Jurarandseen bei ausgewählten grossen Hochwassern (Tagesmittel)

Die Schneeflockensignatur bezeichnet Ereignisse im hydrologischen Winterhalbjahr (Oktober bis März).



Die historischen Hochwasserereignisse wurden anhand der Zuflüsse zum Bieler- und Neuenburgersee auf der Basis von Tagesmittelwerten genauer untersucht. Die Auswahl wurde aufgrund der Kriterien Zuflussspitzen und Zuflussvolumina getroffen. Dieselben Ereignisse wurden später auch als Szenarien verwendet, um die Wirksamkeit von Massnahmen genauer zu untersuchen (Kap. 5.5.2). Für die Prüfung der Wirksamkeit

Charakterisierung  
historischer Hochwasser

von Massnahmen spielt neben dem Zuflussvolumen und der Dauer des Ereignisses auch die räumliche Verteilung der Zuflüsse eine Rolle, wie dies in Kapitel 5.3.3 bereits anhand des Vergleichs der Hochwasser 2005 und 2006 gezeigt wurde. Abb. 5.21 zeigt die Auswahl der grössten beobachteten Hochwasser. Folgende Typen können hierbei unterschieden werden:

- > *Aare-Hochwasser*: Zuflüsse überwiegend aus der Aare in den Bielersee (1944, 1999, 2005, 2007).
- > *Jura-Hochwasser*: Zuflüsse sowohl aus dem Jura in den Neuenburgersee als auch von der Aare in den Bielersee (1910, 1916, 1955, 2006). Dies sind vorwiegend Winterhochwasser.

Des Weiteren kann zwischen kurzen intensiven Ereignissen mit hohen Zuflussspitzen (1910, 1918) und lang andauernden hohen Zuflüssen (1944, 2006) unterschieden werden. Ausserdem fällt auf, dass sämtliche früheren Hochwasser (bis zum Jahr 1955) im Winter stattfanden, während sich die jüngeren Ereignisse (ab 1999) jeweils im Sommer ereigneten.

Die Zuflussvolumina in die Jurarandseen lassen sich durch die über verschiedene Zeiträume gemittelten Zuflüsse charakterisieren. Die grössten Zuflüsse zum Neuenburger- und Murtensee betragen bei Betrachtung der 1-Tageswerte 700–800 m<sup>3</sup>/s, bei den 10-Tageswerten 350–450 m<sup>3</sup>/s. Die grössten Zuflüsse zum Bielersee liegen bei den 1-Tageswerten zwischen 1000 und 1300 m<sup>3</sup>/s, bei den 10-Tageswerten zwischen 600 und 700 m<sup>3</sup>/s.

**Tab. 5.5** > Ranglisten der gemittelten Zuflüsse zu den Jurarandseen für verschiedene Dauerstufen der 12 grössten Ereignisse

Die Bestimmung erfolgte auf der Basis von Tagesmittelwerten.

Rang	1 Tag		3 Tage		5 Tage		10 Tage		14 Tage	
	Jahr	[m <sup>3</sup> /s]	Jahr	[m <sup>3</sup> /s]	Jahr	[m <sup>3</sup> /s]	Jahr	[m <sup>3</sup> /s]	Jahr	[m <sup>3</sup> /s]
1	1918	2057	1944	1491	1955	1285	1955	999	1955	849
2	1910	1740	1910	1460	1944	1243	1944	943	1999	797
3	1944	1659	1955	1375	1910	1112	1999	856	1950	794
4	1955	1626	1916	1366	2007	1072	1919	834	1944	774
5	2007	1541	1918	1330	1916	1063	2007	808	2006	744
6	1916	1531	2007	1312	1918	1012	1950	804	1919	735
7	1990	1329	1950	1085	1999	976	1918	801	1987	732
8	1950	1279	1990	1084	1950	895	1987	795	1910	697
9	1946	1273	1999	1072	1990	895	1952	778	1924	692
10	2005	1261	1939	1026	1952	890	1917	775	1992	686
11	1999	1245	1930	1025	1930	884	1910	747	2002	680
12	1931	1233	1977	992	1977	883	2006	745	1918	678

In Tab. 5.5 sind für verschiedene Dauerstufen (1 bis 14 Tage) jeweils die gemittelten Gesamtzuflüsse in die Jurarandseen der 12 grössten Ereignisse seit 1910 aufgetragen. Die Ereignisse sind für jede Dauerstufe ihrem Rang nach geordnet. Zur Illustration sind beispielhaft die Ereignisse der Jahre 1919, 1944, 1955, 1999 und 2007 farblich hervorgehoben. Diese Ereignisse unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Dauer und der damit verbundenen Zuflussvolumina resp. mittleren Zuflüssen. Auffallend bei den Gesamtzuflüssen ist unter anderem, dass bei zunehmender Dauer die Bedeutung des Ereignisses von 1918 abnimmt, während jene des Ereignisses vom Mai 1999 deutlich zunimmt. Die Ereignisse 1944 und 1955 eignen sich gut als Referenzereignisse, da sie sowohl bei der Dauer als auch bei den Spitzenzuflüssen zu den grössten zählen. 1944 war stärker durch Zuflüsse aus der Aare geprägt und zeigt wie 1999 eine zweite, wenn auch geringere Spitze. Die Abfolge von zwei Niederschlagsereignissen kurz aufeinander ist besonders kritisch, da bereits durch das erste Ereignis hohe Seestände erreicht werden. Das Hochwasserereignis von 2007 belegt für die Dauern von 1 Tag bis zu 10 Tagen innerhalb der betrachteten Periode von knapp 100 Jahren die Rangplätze 4 bis 6. Dies bedeutet, dass Zuflüsse in die Jurarandseen in dieser Grössenordnung zwar als gross, nicht aber als aussergewöhnlich angesehen werden können.

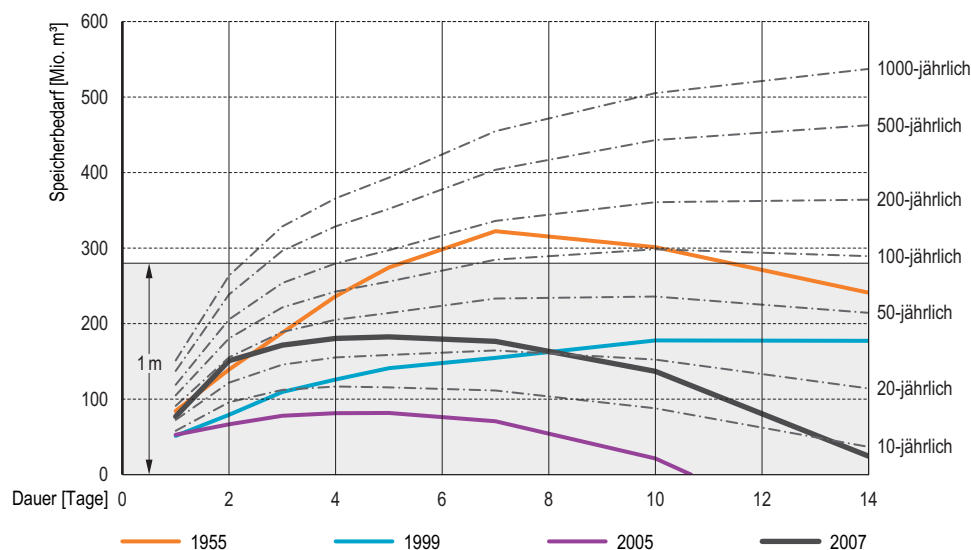
Einordnung und Interpretation  
historischer Hochwasser

Bereits im Rahmen der Ereignisanalyse 2005 (Petrascheck 2008) wurde eine Volumenstatistik für die Zuflüsse in die Jurarandseen erstellt. Diese Statistik ist in Abb. 5.22 für verschiedene Jährlichkeiten und Dauerstufen dargestellt. Gleichzeitig ist dort auch der Speichervolumenbedarf für die Hochwasserereignisse 1955, 1999, 2005 und 2007 eingetragen.

Volumenstatistik der Zuflüsse

**Abb. 5.22** > Abhängigkeit des Speicherbedarfs der Jurarandseen von der Jährlichkeit und der Dauerstufe; aus Petrascheck (2008)

Der Speicherbedarf entspricht dem Zuflussvolumen über die entsprechende Dauerstufe bei Annahme eines konstanten Ausflusses in Port von  $650 \text{ m}^3/\text{s}$ . Gestrichelt sind die Dauerkurven einer statistischen Analyse dargestellt, farbige durchgezogene Linien ausgewählte historische Ereignisse. Grau hinterlegt ist die Umrechnung des Speicherbedarfs auf eine äquivalente durchschnittliche Seestandsänderung in den Jurarandseen um 1 m.



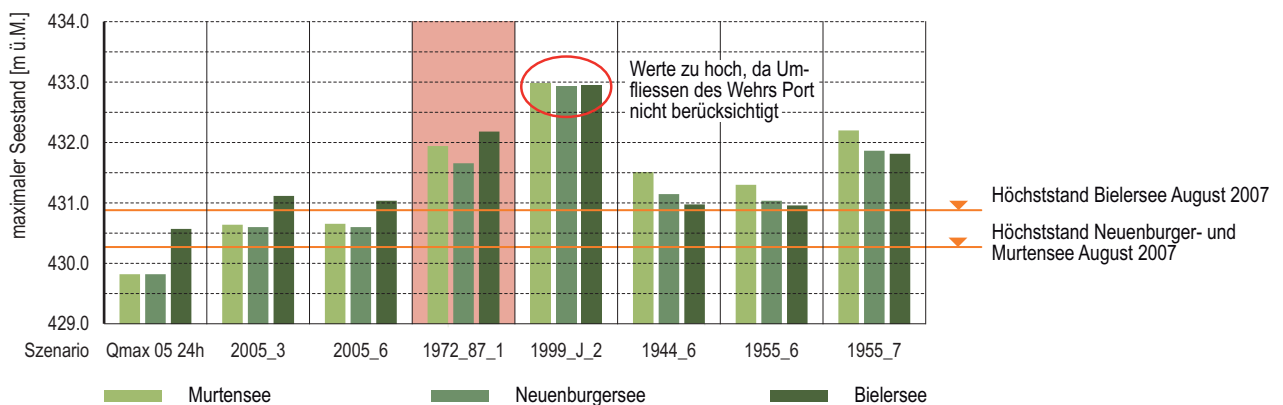
Der für diese Ereignisse zusätzlich erforderliche Speicherbedarf ergibt sich aus der zeitlichen Integration der Zuflüsse unter Annahme eines konstanten Seeausflusses von  $650 \text{ m}^3/\text{s}$ . Es wird deutlich, dass das Hochwasser 2007 hinsichtlich des zugeführten Volumens in die Jurarandseen zwar als hoch, nicht aber als aussergewöhnlich einzustufen ist. Das Hochwasser 1955 übertrifft beispielsweise dasjenige von 2007 bei weitem. Im August 2007 trat jedoch die besondere Situation ein, dass die hohen Zuflüsse auf einen bereits hohen Seewasserstand trafen.

Eine weitere Einordnung des Hochwassers 2007 ergibt sich aus einem Vergleich mit den im Rahmen der Studie «Extremhochwasser im Einzugsgebiet der Aare» des Kantons Bern abgeleiteten Szenarien (BVE 2007). In dieser Untersuchung wurden die Abflüsse und Seestände für diese verschiedenen Niederschlagsszenarien simuliert (Abb. 5.23). Die ungünstigsten Bedingungen ergab eine Abfolge von grossräumigen Starkniederschlägen wie z. B. 1972 oder 1999. Aber auch ein Ereignis wie jenes vom Januar 1955 kann, wenn es durch Vorregen und eine verstärkte Schneeschmelze erhöht wird, zu Seeständen in der Grössenordnung von 432 m ü.M. führen. Ein Vergleich mit den im August 2007 erreichten Höchstständen zeigt, dass für fast alle Extremszenarien deutlich höhere Seestände resultieren (Abb. 5.23). Das Ereignis von 2007 kann also auch hinsichtlich der Seewasserstände nicht als extrem eingestuft werden.

Vergleich der Seestände mit der  
Extremhochwasserstudie Aare

**Abb. 5.23** > Maximale simulierte Seestände für die ausgewählten Extremereignisse gemäss der Studie «Extremhochwasser im Einzugsgebiet der Aare» des Kantons Bern (BVE 2007)

Für Kriterien zur Festlegung der Szenarien siehe Text, für Details wird auf die zitierte Studie verwiesen. Das hervorgehobene Szenario wurde im Rahmen der in Kapitel 5.5 beschriebenen Prüfung von Verbesserungsmassnahmen verwendet.



#### 5.4.4 Einordnung hinsichtlich der Zuflüsse aus dem Zwischeneinzugsgebiet

Im folgenden werden ein Vergleich der Hochwasserganglinie der Emme von 2005 und 2007 sowie eine statistische Betrachtung der Emme und des übrigen Zwischeneinzugsgebiets präsentiert. Die Untersuchung basiert auf der Betrachtung von Tagesmittelwerten des Abflusses über den Zeitraum der verfügbaren Messdaten seit 1922 sowie auf den einzelnen Ganglinien der Emme für die Ereignisse 2005 und 2007.

Datengrundlage

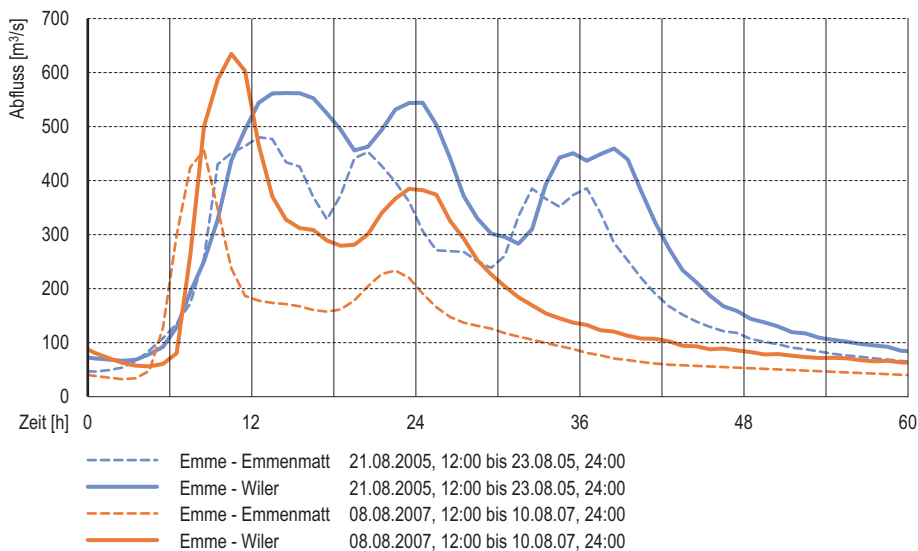
Es zeigte sich, wie bereits oben erwähnt, dass sich die Hochwasserereignisse 2005 und 2007 hinsichtlich des Beitrags aus dem Zwischeneinzugsgebiet wesentlich unterschieden. Zwar reagierte in beiden Fällen die Emme stark, jedoch übertraf 2007 der Spitzenabfluss jenen von 2005. Insbesondere war das Ereignis von 2007 durch eine deutlich kürzere Anstiegszeit gekennzeichnet. Noch bedeutend stärker unterschied sich das Verhalten des übrigen Zwischeneinzugsgebiets. Während dieses 2005 praktisch keinen Beitrag zum Abflussgeschehen lieferte, steuerte es 2007 erheblich zum Abfluss bei (Abb. 5.18 bzw. Abb. 5.25).

Vergleich des Hochwasser-  
verlaufs 2005 und 2007

Abb. 5.24 zeigt den Verlauf der Hochwasserwellen zwischen Emmenmatt und Wiler (vgl. Abb. 5.10 für die Lage der Messstationen) für die Ereignisse von 2005 bzw. 2007. Beim Hochwasser 2005 hat sich die Abflussspitze zwischen diesen beiden Stationen vor allem zeitlich verschoben und um 19% zugenommen. 2007 hat sie sich jedoch um 37% erhöht. Die Volumenzunahme betrug 2005 nur 26%, im Jahr 2007 jedoch 64%. Der Spitzenabfluss der Emme erreichte 2007 mit 663 m<sup>3</sup>/s den höchsten beobachteten Wert seit Beginn der Aufzeichnungen in Wiler im Jahr 1922. Aussergewöhnlich war im August 2007 zudem der überaus rasche Anstieg der Emme. Innerhalb einer Stunde erhöhte sich der Abfluss in Wiler von 250 auf über 500 m<sup>3</sup>/s.

**Abb. 5.24** > Vergleich der Hochwasserabflüsse 2005 und 2007 an den beiden Pegelstellen der Emme (Stundenmittel; Zeitangaben in Winterzeit)

Der Abstand der beiden Messstellen beträgt 27 km (vgl. Abb. 5.10 für die Lage der Stationen).

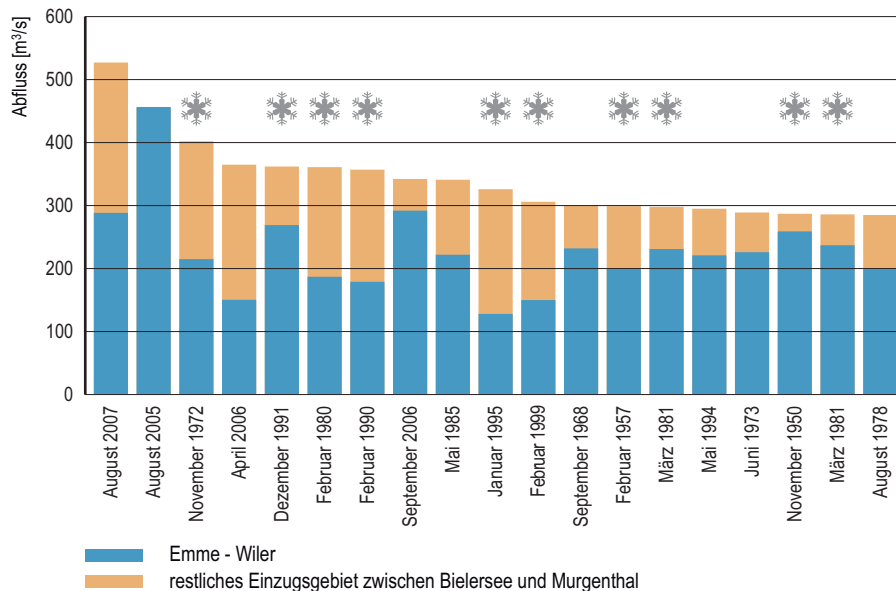


Während die Abflüsse der Emme scharfe kurze Spitzen aufweisen, sind die Abflüsse aus dem übrigen Zwischeneinzugsgebiet etwas ausgeglichener. Die stündlichen Zuflüsse aus dem restlichen Zwischeneinzugsgebiet lassen sich mit den vorhandenen Daten nur unscharf rekonstruieren. Aus Abb. 5.25 ist jedoch erkennbar, dass die Tagesmittel bis zu 240 m<sup>3</sup>/s betragen können. Aus Abb. 5.25 kann weiter herausgelesen werden, dass vor 1980, als das derzeit gültige Reglement erarbeitet wurde, der mittlere Tages-

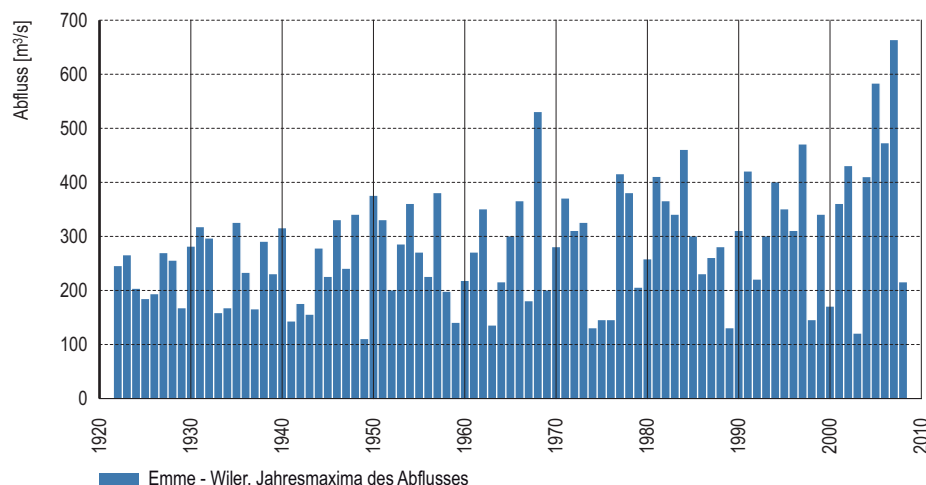
Einordnung Emme und übriges  
Zwischeneinzugsgebiet

zufluss des restlichen Zwischeneinzugsgebietes nur ein einziges Mal (im Jahr 1972) knapp  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  erreichte. Seit 1980 ist auch eine starke Zunahme in der Häufigkeit von hohen Spitzenabflüssen der Emme festzustellen (Abb. 5.26). Wurde in den 59 Jahren vor 1980 der Abfluss von  $400 \text{ m}^3/\text{s}$  nur zweimal erreicht oder überschritten, so war dies nach 1980 zehnmal der Fall. 2007 war in Bezug auf den Spitzenabfluss und 2005 in Bezug auf das Volumen das grösste Ereignis. Es ist offensichtlich, dass unter diesen Bedingungen ein Einhalten der Zielgrösse von  $850 \text{ m}^3/\text{s}$  in Murgenthal nicht garantiert werden kann. So erreichten 2007 die Zuflüsse aus dem Zwischeneinzugsgebiet (inkl. Emme) allein kurzfristig  $850 \text{ m}^3/\text{s}$  (Abb. 5.18).

**Abb. 5.25** > Die 19 grössten Zuflüsse aus dem Zwischeneinzugsgebiet zwischen dem Wehr Port und Murgenthal (Tagesmittel; Messperiode 1922 bis 2008)



**Abb. 5.26** > Jahresmaxima des Abflusses der Emme beim Pegel Wiler (Messperiode 1922–2008)



## 5.5 Verbesserungsmassnahmen

### 5.5.1 Mögliche Massnahmen

Die grundsätzlichen Möglichkeiten zur Verbesserung der Hochwassersicherheit im System der Jurarandgewässer beschränken sich auf zwei Typen von Massnahmen:

Grundsätzliche Möglichkeiten

- > die Vergrösserung des Hochwasserrückhaltevolumens der Jurarandseen bzw. in deren Einzugsgebiet,
- > die Erhöhung der zulässigen Abflüsse in der unterliegenden Aare.

Die Analyse der Varianten zeigt allerdings, dass der operative Spielraum begrenzt ist.

Eine Vergrösserung des Rückhaltevolumens durch *permanente Absenkung der Spiegel der Jurarandseen* ist gemäss den Erfahrungen nach der I. JGK als sehr kritisch zu beurteilen und widerspricht zudem auch den Interessen anderer Nutzungen sowie den ökologischen Randbedingungen. Die Vergrösserung des Rückhalts durch eine *Erhöhung der Hochwassergrenze* ist – zumindest am Bielersee – wegen des vorhandenen Schadenpotenzials nicht möglich. Somit verbleiben als Möglichkeiten:

Vergrösserung des  
Hochwasserrückhaltevolumens

- > *Temporäre Schaffung von Rückhaltevolumen in den Jurarandseen auf der Basis von Abflussvorhersagen*

Dank der ständigen Verbesserung der Niederschlags- und Abflussvorhersagen ist eine auf Prognosen basierende temporäre Absenkung der Jurarandseen zur Vergrösserung des Rückhaltevermögens ein viel versprechender Ansatz. Da diese Art von Massnahme primär die Regulierung betrifft und somit organisatorischer Natur ist, lässt sie sich einfach und rasch umsetzen. Auch die Hochwasserregulierung des Thunersees nutzt diese Möglichkeit.

- > *Verbesserte Ausnutzung der Speicherkapazität des Neuenburgersees durch eine Erweiterung des Zihlkanals*

Eine Erweiterung des Zihlkanals führt zu einer stärkeren Angleichung der Wasserspiegel des Bieler- und des Neuenburgersees und wirkt vor allem bei ausserordentlichen Zuflüssen zum Bielersee bzw. bei einer Drosselung des Bielerseeausflusses auf Grund der Murgenthalerbedingung. Auch nach einer Erhöhung der Kapazität des Zihlkanals muss der Spiegel des Bielersees über jenen des Neuenburgersees ansteigen, damit ein ausreichendes Gefälle für grössere Abflüsse in den Neuenburgersee vorhanden ist.

- > *Vergrösserte Speichermöglichkeiten im Einzugsgebiet der Jurarandseen*

Grundsätzliche Möglichkeiten zur Speicherung stellen einerseits die Berner Oberländer Seen, andererseits die Kraftwerksspeicher an der Saane dar. Am Brienersee sind Massnahmen zur Erhöhung des Rückhaltevermögens beschränkt und schwierig zu realisieren (Petrascheck 2007). Am Thunersee wurde zur Minderung der Höchststände aufgrund des hohen Schadenpotenzials 2009 ein Hochwasserstollen realisiert. Dieser führt aber auch zu einer Reduktion der Hochwasserspeicherung im Thunersee. Bei den Kraftwerksspeichern an der Saane werden kurzfristige Verbesserungen

zur Minderung der Spitzenabflüsse untersucht. Die längerfristigen Speichermöglichkeiten werden auch im Interesse der Energiewirtschaft bereits heute genutzt. Eine signifikante Vergrösserung der Speichermöglichkeiten im Einzugsgebiet der Jurarandseen ist somit nicht möglich.

Gemäss dem aktuellen Regulierreglement wird der maximale Abfluss beim Wehr Port auf 650 m<sup>3</sup>/s begrenzt. In Zeiten ohne wesentliche Zuflüsse aus dem unterliegenden Zwischeneinzugsgebiet könnte der Abfluss bei Port grundsätzlich gesteigert werden, was allerdings zwischen dem Bielersee und Solothurn Einschränkungen für die Schifffahrt sowie – ohne entsprechende Massnahmen – gewisse Schäden zur Folge hätte. Eine Erhöhung des maximalen Abflusses beim Wehr Port bedingt auch eine Anpassung der bisher auf 850 m<sup>3</sup>/s festgelegten Zielgrösse für den Hochwasserabfluss der Aare bei Murgenthal. Ohne zusätzliche Massnahmen zur Gewährleistung einer entsprechenden Abflusskapazität wäre eine Erhöhung dieser Zielgrösse mit dem Abbau von Sicherheiten verbunden. Notwendige Zusatzmassnahmen – die nach dem Ereignis von 2007 in jedem Fall angezeigt sind – umfassen die Überprüfung und Sanierung von Schwachstellen entlang der Aare, eine umfassende Notfallplanung sowie den Einbezug der Vorhersage zur Sicherstellung einer zeitgerechten und zuverlässigen Warnung und Alarmierung.

Erhöhung des maximal zulässigen Abflusses in der unterliegenden Aare

Die Regulierung der Jurarandgewässer stellt eine organisatorische Massnahme dar. Anpassungen von organisatorischen Massnahmen lassen sich grundsätzlich rasch und kostengünstig umsetzen oder anpassen. Aus diesem Grund liegt der Fokus bei der vertieften Prüfung möglicher Massnahmen auf der Regulierung der Jurarandseen. Nebst dem Potenzial einer temporären Vergrösserung des Rückhalts der Jurarandseen durch Einbezug von Abflussvorhersagen werden aber auch die Wirksamkeit einer permanenten Optimierung des Rückhalts durch einen Ausbau des Zihlkanals bzw. eine Erhöhung der Abflusskapazität der Aare zumindest in grundsätzlicher Art geprüft. Zur Bewertung dieser beiden Massnahmen müssen jedoch im Rahmen von Folgeprojekten noch deren Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit geprüft werden.

Fokus auf rasch und kostengünstig umsetzbare Massnahmen

Zusätzlich werden die Möglichkeiten zur Verbesserung der Abflussvorhersagen für das Zwischeneinzugsgebiet als Basis für eine optimierte Hochwasserregulierung der Jurarandseen sowie die allfällige Nutzung der Flusskraftwerke in der Aare für das Hochwassermanagement diskutiert.

Gemäss Abb. 5.27 lassen sich somit folgende Handlungsfelder und Ziele definieren:

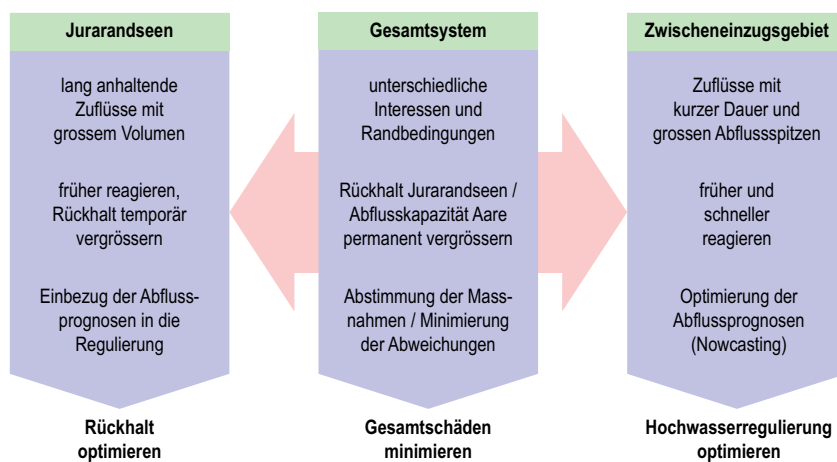
Handlungsfelder und Ziele

- > Lang anhaltende und volumenreiche Hochwasser aus dem Einzugsgebiet der *Jurarandseen* bedingen Rückhaltevolumina, die – bei einem konstanten maximalen Seeausfluss von 650 m<sup>3</sup>/s – für das Ereignis von 2007 in der Grössenordnung von 200 Mio. m<sup>3</sup> und für ein 100-jährliches Ereignis im Bereich von 300 Mio. m<sup>3</sup> liegen (Abb. 5.22). Die temporäre Vergrösserung des Rückhaltevermögens erfordert eine Absenkung der Jurarandseen im Vorfeld von Ereignissen. Dazu sind Vorhersagen der zu erwartenden Zuflüsse erforderlich.
- > Hochwasser aus dem *Zwischeneinzugsgebiet* haben eine Anlaufzeit von 3 bis 6 Stunden und eine Dauer von 24 bis 48 Stunden. Die Drosselung des Abflusses beim

Wehr Port zur Kompensation der Hochwasserzuflüsse aus der Emme bzw. dem übrigen Zwischeneinzugsgebiet bedingt in den Jurarandseen ein Speichervolumen in der Grössenordnung von 25 bis 50 Mio. m<sup>3</sup>. Die rechtzeitige Einleitung der Abflussreduktion beim Wehr Port erfordert eine verbesserte Früherkennung der Ereignisse aus dem Zwischeneinzugsgebiet. Für eine optimale Hochwasserregulierung ist zudem eine verbesserte Abflussvorhersage für das Zwischeneinzugsgebiet über einen Vorhersagezeitraum von 48 Stunden notwendig.

- > In einer Betrachtung des *Gesamtsystems* sind die möglichen Massnahmen aufeinander abzustimmen. Dazu gehören die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der möglichen Massnahmen sowie die Berücksichtigung der verschiedenen Interessen und Randbedingungen. Der Hochwasserschutz ist ein Teilaspekt der Regulierung der Jurarandgewässer. Um die anderen Regulierungsziele möglichst wenig zu beeinträchtigen, sollen die Abweichungen vom bisherigen Reglement minimal sein. Ziel aller Massnahmen ist letztlich eine Minimierung der Schäden bei Grossereignissen innerhalb des gesamten Systems.

**Abb. 5.27 > Handlungsfelder und Ziele zur Verbesserung der Hochwassersituation im System der Jurarandgewässer**



### 5.5.2 Handlungsfeld Jurarandseen – Prognoseregulierung

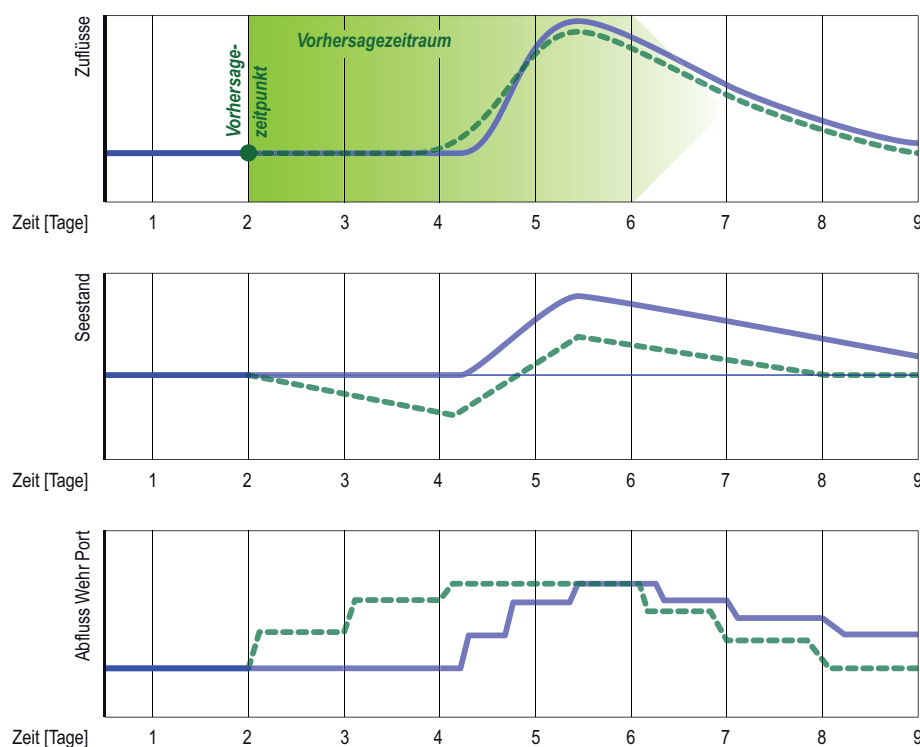
Das Konzept der temporären Vergrösserung des Rückhaltevermögens der Jurarandseen basiert auf einer temporären Absenkung der Seespiegel im Vorfeld eines potenziellen Ereignisses aufgrund der heute verfügbaren und in Kapitel 4.1 beschriebenen Abflussvorhersagen. Diese als Ergänzung des bestehenden Regulierreglements vorgeschlagene Massnahme wird nachfolgend als «Prognoseregulierung» bezeichnet. Abb. 5.28 zeigt schematisch anhand der Ganglinien der Zuflüsse, des Seestands und des Seeausflusses einen Vergleich der bisherigen Regulierpraxis und der Prognoseregulierung. Bei der bisherigen Regulierung kann der Ausfluss aus dem Bielersee erst erhöht werden, wenn der Seestand aufgrund grosser Zuflüsse ansteigt. Da *erst während dem Ereignis reagiert* wird, weist die Regulierung eine gewisse Trägheit auf, die sich nachteilig auf die

Ergänzung der Regulierung mit einer Prognoseregulierung

Begrenzung von Höchstwasserständen auswirkt. Im Gegensatz dazu wird bei der Prognoseregulierung der Ausfluss beim Wehr Port *bereits vor einem Ereignis* erhöht, falls aufgrund der Abflussvorhersagen grosse Zuflüsse und damit ein übermässiges Ansteigen der Seen zu erwarten ist. Dadurch wird der Seespiegel vorgängig abgesenkt und erreicht so während des Hochwassers einen niedrigeren Höchststand.

**Abb. 5.28** > Schematische Darstellung der bisherigen Regulierpraxis im Vergleich zum Vorgehen bei der Prognoseregulierung

Bei der Regulierung gemäss dem Reglement 1980/82 (ausgezogene Linien) muss bei grossen Zuflüssen zunächst der Bielersee ansteigen, bevor der Ausfluss beim Wehr Port sukzessive erhöht werden kann. – Bei der Prognoseregulierung (gestrichelte Linien) wird der Ausfluss vor einem Hochwasser erhöht, wenn aufgrund der Vorhersagen Zuflüsse zu erwarten sind, die ein übermässiges Ansteigen der Seen bewirken. Dadurch wird der Seespiegel vorgängig abgesenkt und erreicht so während des Hochwassers einen niedrigeren Höchststand.

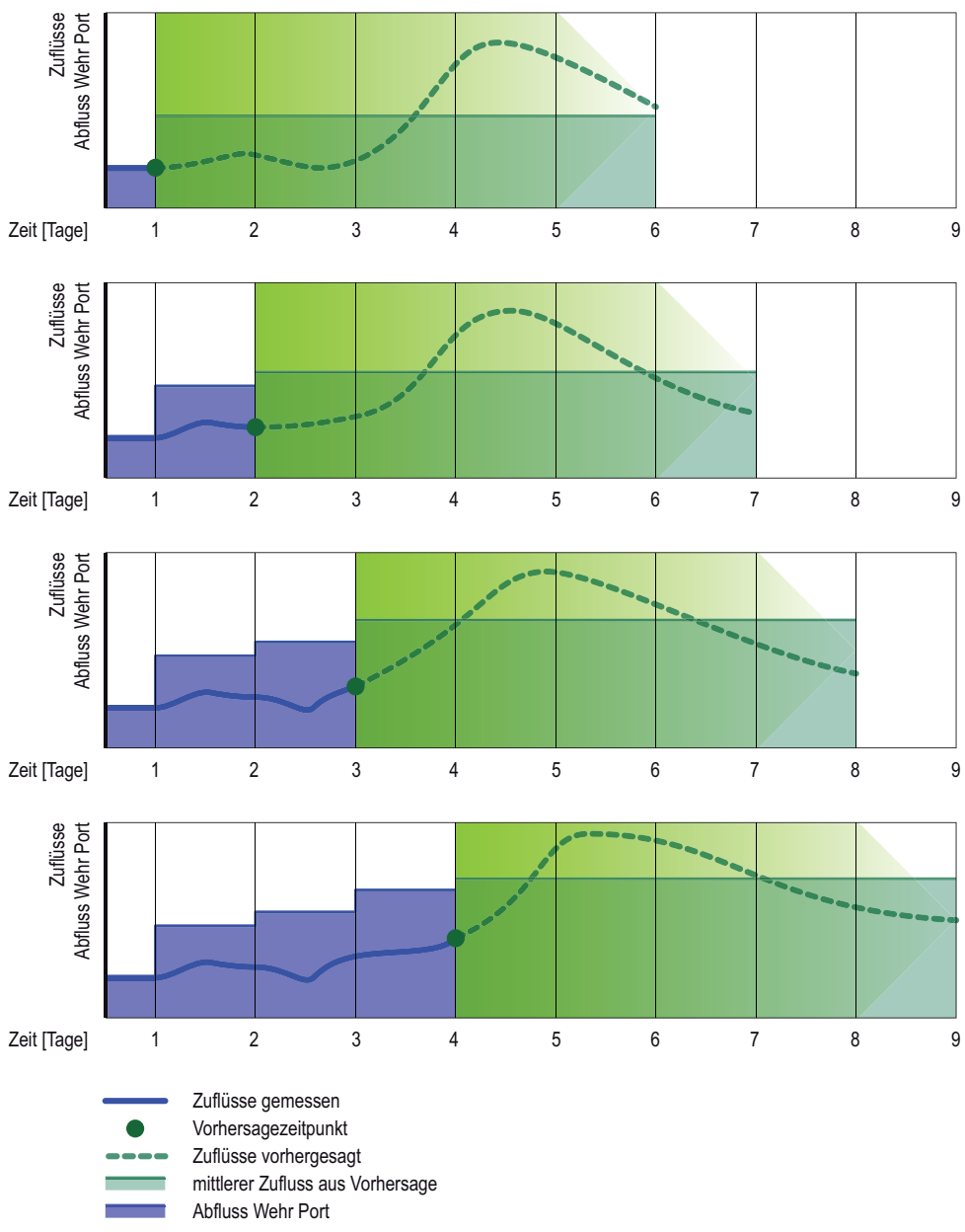


Abflussvorhersagen werden derzeit über Vorhersagezeiträume von bis zu 10 Tagen erstellt (vgl. Kap. 4.1). Da mit zunehmender Länge des Vorhersagezeitraums die Unschärfen in der Aussage deutlich zunehmen, scheint derzeit die Berücksichtigung der Ergebnisse über einen Vorhersagezeitraum von rund 5 Tagen sinnvoll. Dieser Zeitraum bestimmt somit auch den frühesten möglichen Zeitpunkt vor einem Ereignis, bei dem die Prognoseregulierung einsetzt. Entsprechend der relativ kurzen Dauer der Vorabsenkungsphase ist davon primär der wegen seiner kleineren Fläche rasch reagierende Bielersee betroffen, während das Ausmass der Vorabsenkung beim bedeutend träger reagierenden Neuenburgersee geringer ausfällt.

Vorhersagezeiträume  
für die Prognoseregulierung

**Abb. 5.29 > Ermittlung des Bielerseeausflusses während der Prognoseregulierung**

Aus der vorhergesagten Zuflussganglinie (gestrichelt) wird der mittlere Zufluss über den Vorhersagezeitraum ermittelt und mit dem aktuell durch das Linienreglement vorgesehenen Ausfluss verglichen. Der höhere der beiden Werte wird beim Wehr Port eingestellt. Das Prozedere wiederholt sich jeweils beim Vorliegen einer neuen Abflussvorhersage.



Das Vorgehen zur Festlegung des Bielerseeausflusses während der Prognoseregulierung ist in Abb. 5.29 schematisch dargestellt. Aus der Abflussvorhersage für die Aare bei Hagneck wird der mittlere Zufluss über den Vorhersagezeitraum (bzw. bei einer 10-Tagesprognose über die ersten 5 Tage des Vorhersagezeitraums) bestimmt und mit

Bielerseeausfluss während der Prognoseregulierung

dem aktuell durch das Linienreglement vorgesehenen Ausfluss verglichen. Als Ausfluss für die nächsten 24 Stunden wird beim Wehr Port der höhere Wert eingestellt. Die Prozedur wird jeweils beim Vorliegen einer neuen Vorhersage wiederholt (in der Regel nach 24 Stunden).

Randbedingungen für die Prognoseregulierung sind einerseits der minimal einzuhaltende Seestand, bis zu welchem die Vorabsenkung erfolgen darf, und andererseits der maximale Abfluss beim Wehr Port bzw. in Murgenthal. Für die Prüfung der Wirksamkeit der Prognoseregulierung wurde – in Anlehnung an das Regulierdiagramm (Abb. 5.9) und die im Rahmen der II. JGK festgelegte Niedrigwassergrenze (Tab. 5.2) – eine minimale Kote des Bielersees von 428.8 m ü.M. berücksichtigt.

Randbedingungen

Um die Wirksamkeit der Prognoseregulierung zu untersuchen, wurden die Zuflüsse verschiedener Hochwasser mit unterschiedlichen Charakteristika betrachtet. Berücksichtigt wurden die in Kapitel 5.4.3 beschriebenen Hochwasser von 1918, 1944, 1955, 1999, 2005 und 2007 sowie auch das in Abb. 5.23 hervorgehobene Szenario aus der Extremhochwasserstudie des Kantons Bern (BVE 2007). Für die historischen Ereignisse von 1918, 1944 und 1955 wurden anhand der bekannten Abflüsse und Seestände die Ganglinien der Gesamtzuflüsse zu den einzelnen Seen ermittelt. Diese Zuflüsse liegen – entsprechend der verfügbaren Datengrundlage – in Form von Tagesmittelwerten vor. Die Ganglinien der Hochwasser von 1999, 2005 und 2007 sowie des Szenarios aus der Extremhochwasserstudie liegen in höherer zeitlicher Auflösung als Stundenwerte vor. Die bereitgestellten Zuflussganglinien wurden anschliessend als Eingangsgrösse für die Simulationsrechnungen mit dem die Jurarandseen und die unterliegende Aare umfassenden numerischen Modell (vgl. Kap. 5.4.1) verwendet, mit welchem die Wirkung der Prognoseregulierung geprüft wurde.

Untersuchte Zuflussszenarien

Die Simulationen erfolgten zunächst unter der Annahme, dass die Zuflüsse über einen Vorhersagezeitraum von 5 Tagen richtig vorhergesagt werden, d. h. die Prognoseganglinie entspricht der tatsächlichen Zuflussganglinie. In einem weiteren Schritt wurde auch die Sensitivität der Ergebnisse hinsichtlich der Güte der Vorhersagen untersucht.

Annahmen bezüglich Prognose

Gemäss dem Regulierreglement 1980/82 ist der zulässige Abfluss beim Wehr Port auf 650 m<sup>3</sup>/s und der Abfluss der Aare bei Murgenthal auf 850 m<sup>3</sup>/s begrenzt (vgl. Kap. 5.3.1). Um die Wirkungen einer Kapazitätserhöhung der unterliegenden Aare zu untersuchen, wurden nebst diesen Grenzwerten auch der Fall simuliert, bei dem der maximale Abfluss beim Wehr Port 850 m<sup>3</sup>/s und die Zielgrösse in Murgenthal 1100 m<sup>3</sup>/s betragen.

Maximaler Seeausfluss

Schliesslich wurden alle Simulationen sowohl mit der aktuellen Geometrie des Zihlkanals (Querprofilaufnahmen von 1998), als auch für einen deutlich erweiterten Zihlkanal durchgeführt. Dazu wurden im numerischen Modell die Querprofile des Kanals um 10 m verbreitert und um 2 m vertieft, was einer Erweiterung des durchströmten Querschnitts um rund 50 % entspricht.

Geometrie des Zihlkanals

In Abb. 5.30 sind die den Simulationen zugrunde gelegten Zuflusssszenarien und Randbedingungen dargestellt. Aus der Kombination der 7 Zuflusssszenarien mit den verschiedenen Randbedingungen resultieren 56 mögliche Kombinationen. Für insgesamt 42 dieser Kombinationen wurden Simulationsrechnungen durchgeführt. Mit Ausnahme der Kombinationen mit einem erweiterten Zihlkanal wurden alle Simulationsrechnungen für die aktuelle Geometrie der Jurarandseen, der Verbindungskanäle und der unterliegenden Aare durchgeführt.

Simulierte Kombinationen

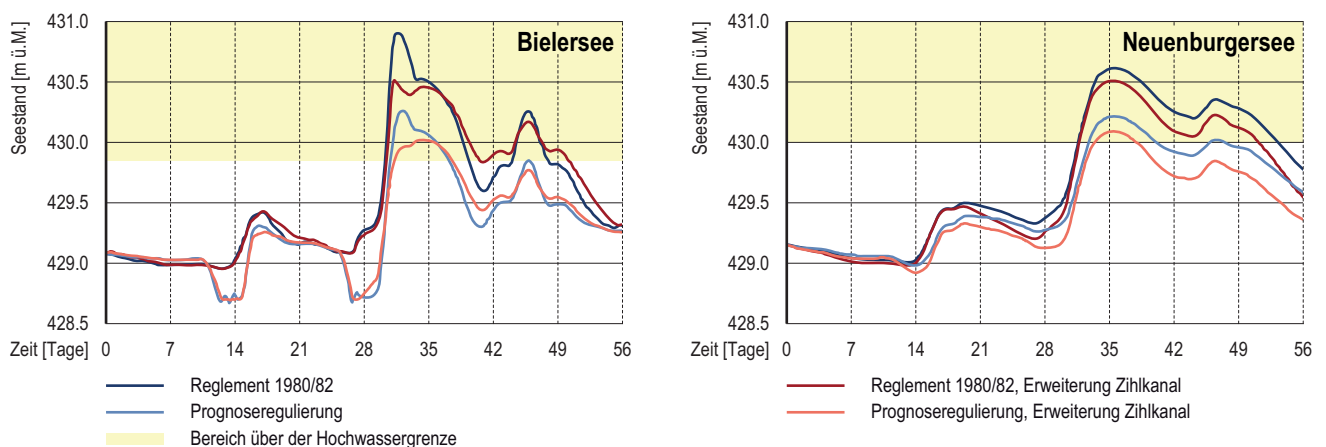
Abb. 5.30 > Den Simulationen zugrunde liegende Zuflusssszenarien und variierte Randbedingungen

Szenario Zufluss	Regulierung Wehr Port	Maximalabfluss Wehr Port / Murgenthal	Geometrie Zihlkanal
1918	Reglement 1980/82	650 m³/s / 850 m³/s	heutige Geometrie
1944		850 m³/s / 1'100 m³/s	erweiterte Geometrie
1955	Prognoseregulierung		
1999			
2005			
2007			
EHQ (Extremhochwasser)			

Exemplarisch zeigt Abb. 5.31 für die Hochwasserzuflüsse von 1944 die Wirkung der Prognoseregulierung, der Erweiterung des Zihlkanals sowie der Kombination dieser Massnahmen. Bei der Prognoseregulierung setzt 3 bis 4 Tage vor dem Ereignis die Vorabsenkung ein. Am Bielersee wird dabei die Niedrigwassergrenze erreicht, während die Absenkung beim grösseren Neuenburgersee deutlich geringer ausfällt.

Wirkungsweise der Massnahmen am Beispiel des Hochwassers von 1944

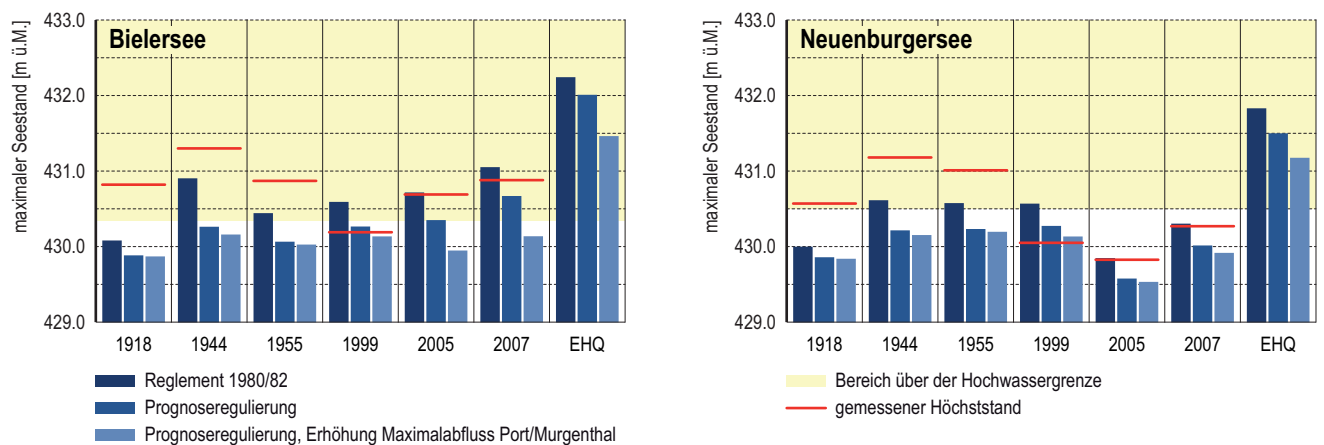
Abb. 5.31 > Ganglinien des Seestands am Bieler- und Neuenburgersee für die Zuflüsse des Hochwassers von 1944



Als Mass für die Wirksamkeit der untersuchten Massnahmen bieten sich die maximalen Seestände an, die im Verlauf der simulierten Ereignisse erreicht werden. Diese sind für den Bielersee und den Neuenburgersee in Abb. 5.32 zusammen mit den gemessenen Höchstständen dargestellt. Nicht gezeigt sind die Ergebnisse der Simulationsrechnungen für den Murtensee, dessen Höchststände sich maximal um 2 cm von jenen des Neuenburgersees unterscheiden.

Analyse der  
Simulationsergebnisse

**Abb. 5.32 > Maximalwasserstände am Bieler- und Neuenburgersee für verschiedene Szenarien im heutigen Zustand und mit aktueller Regulierung, mit Prognoseregulierung sowie einer Erhöhung der maximalen Abflüsse beim Wehr Port und in Murgenthal**



Der Vergleich der für die Regulierung gemäss dem Reglement 1980/82 simulierten maximalen Seestände mit den gemessenen Höchstständen von 1918, 1944 und 1955 zeigt die Verbesserung, welche mit der II. JGK erreicht wurde. Für diese Ereignisse würden unter heutigen Randbedingungen Höchststände resultieren, die 40 bis 70 cm unter den damals gemessenen Maximalwerten liegen. Für das Hochwasser 1999 ergeben sich aus der Simulation Höchststände, die über den gemessenen Höchstwerten liegen. Dies erklärt sich dadurch, dass im Frühling 1999 angesichts der grossen Schneemengen über längere Zeit bewusst vom Linienreglement abgewichen wurde (vgl. Kap. 5.3.1). Für das Hochwasser 2005 stimmen die simulierten und die gemessenen Höchststände überein. Beim Hochwasser 2007 bewirkte die tatsächliche Regulierung (vgl. Kap. 5.4.1), dass der Bielersee um rund 10 cm weniger hoch anstieg, als bei strikter Regelung entsprechend dem Reglement 1980/82. Auf den Höchststand des Neuenburgersees hatte dies hingegen keinen Einfluss; für das Hochwasser 2007 sind der simulierte und der gemessene Höchststand identisch.

Einfluss der II. JGK  
auf die Seehöchststände

Die Wirkung der Prognoseregulierung ergibt sich aus dem Vergleich der simulierten Höchststände für das Reglement 1980/82 mit jenen für die Prognoseregulierung (Abb. 5.32). In diesem Zusammenhang wird auch die Wirkung einer zusätzlichen Erhöhung des Maximalabflusses der Aare beim Wehr Port bzw. in Murgenthal diskutiert.

Wirkung der Prognoseregulierung

> Für die Zuflüsse des *Winterhochwassers von 1918* lassen sich mit der Prognoseregulierung die Höchststände am Bielersee um 20 cm und am Neuenburgersee um rund 15 cm reduzieren. Die Kombination der Prognoseregulierung mit einer Erhöhung

der Maximalabflüsse bringt keine zusätzliche Verbesserung. Für alle betrachteten Kombinationen liegen die Höchststände am Bieler- und Neuenburgersee jedoch unter den Hochwassergrenzen.

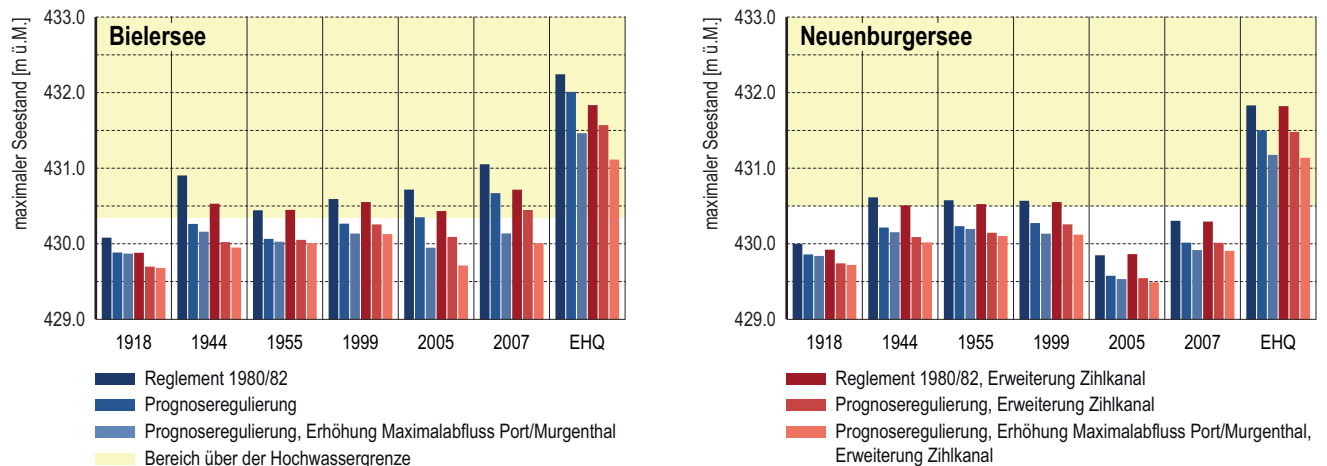
- > Für das *Winterhochwasser von 1944* wird mit der Prognoseregulierung der Höchststand am Bielersee um 64 cm deutlich reduziert. Auch am Neuenburgersee resultiert ein um 40 cm tieferer Höchststand. Durch die Kombination der Prognoseregulierung mit einer Erhöhung der Maximalabflüsse lässt sich der Höchststand am Bielersee zusätzlich um 10 cm, jener am Neuenburgersee um 6 cm reduzieren. Mit den Zuflüssen von 1944 werden unter heutigen Randbedingungen und bei der Regulierung gemäss dem Reglement 1980/82 die Hochwassergrenzen am Bielersee um 55 cm und am Neuenburgersee um 11 cm überschritten. Mit der Prognoseregulierung lässt sich dies verhindern.
- > Das *Winterhochwasser von 1955* zeichnete sich durch ein grosses Volumen aus. Für die Zuflüsse von 1955 führt die Prognoseregulierung zu einer Reduktion des Höchststands am Bielersee um rund 40 cm, am Neuenburgersee um rund 35 cm. Bei der Prognoseregulierung wird die Niedrigwassergrenze erreicht und dadurch das Mass der Vorabsenkung begrenzt. Deshalb resultiert aus der Kombination der Prognoseregulierung mit einer Erhöhung der Maximalabflüsse keine signifikante zusätzliche Verbesserung. Mit den Zuflüssen von 1955 werden bei der Regulierung gemäss dem Reglement 1980/82 die Hochwassergrenzen knapp überschritten (am Bielersee um 9 cm und am Neuenburgersee um 8 cm). Mit der Prognoseregulierung liegen hingegen die Höchststände jeweils um rund 30 cm unter der Hochwassergrenze.
- > Das *Frühlingshochwasser von 1999* war ebenfalls ein volumenreiches Hochwasser. Mit der Prognoseregulierung ergeben sich an beiden Seen um rund 30 cm tiefere Höchststände. Eine zusätzliche Erhöhung der Maximalabflüsse reduziert die Höchststände um weitere 15 cm. Bei der Regulierung gemäss dem Reglement 1980/82 werden die Hochwassergrenzen am Bielersee um 24 cm und am Neuenburgersee um 7 cm überschritten. Mit der Prognoseregulierung resultieren Höchststände, die an beiden Seen im Bereich der 1999 gemessenen Maxima und damit unter der jeweiligen Hochwassergrenze liegen.
- > Die *Sommerhochwasser von 2005 und 2007* zeichnen sich durch einen hohen Zufluss zum Bielersee auf. Für diese Zuflüsse bewirkt die Prognoseregulierung am Bielersee eine Reduktion des Höchststandes um 35–40 cm, am Neuenburgersee um 25–30 cm. Die Kombination der Prognoseregulierung mit einer Erhöhung der Maximalabflüsse bei Port bzw. Murgenthal bewirkt eine zusätzliche Minderung der Höchststände um 40–50 cm am Bielersee und um 5–10 cm am Neuenburgersee. Am Neuenburgersee liegen für beide Zuflussszenarien die Höchststände unter der Hochwassergrenze. Am Bielersee kann für die Zuflüsse von 2005 mit der Prognoseregulierung das Überschreiten der Hochwassergrenze gerade vermieden werden. Für die Zuflüsse von 2007 wird jedoch auch mit der Prognoseregulierung die Hochwassergrenze um 32 cm übertroffen. Für diesen Fall bedarf es der Kombination mit der Erhöhung der maximalen Ausflüsse, um am Bielersee das Überschreiten der Hochwassergrenze zu verhindern.
- > Die Zuflüsse des *Extremereignisses*, das einem Hochwasser im *Spätherbst* entspricht, haben ausserordentlich hohe Wasserstände zur Folge. Der Bielersee würde bis auf 432.25 m ü.M. ansteigen, der Neuenburgersee auf 431.8 m ü.M. Die bei sol-

chen Wasserständen resultierenden Überschwemmungen sind im numerischen Modell nicht berücksichtigt. Deshalb sind die Ergebnisse der Simulationen für dieses Szenario mit einer gewissen Vorsicht zu interpretieren. Mit der Prognoseregulierung können die Höchststände am Bielersee um rund 25 cm, am Neuenburgersee um rund 35 cm gesenkt werden. Eine noch grössere Reduktion von 50 cm am Bielersee und von 30 cm am Neuenburgersee ist bei einer zusätzlichen Erhöhung des maximalen Abflusses beim Wehr Port bzw. bei Murgenthal möglich.

Abb. 5.33 zeigt den Vergleich der in Abb. 5.32 präsentierten Ergebnisse mit den Simulationsergebnissen für die gleichen Zuflussszenarien und den erweiterten Zihlkanal. Die Erweiterung des Zihlkanals hat auf die Höchststände des Neuenburgersees nur einen geringen Einfluss. Die Massnahme würde hingegen am Bielersee zu einer Verbesserung der Situation bei kürzeren Ereignissen mit hohen Zuflüssen wie 2005 und 2007 (Sommerhochwasser) führen. Bei diesen Fällen könnte mit der Erweiterung des Zihlkanals ein ähnlicher Effekt erzielt werden wie mit der Prognoseregulierung. Am wirksamsten ist im Allgemeinen die Kombination beider Massnahmen.

Wirkung einer Erweiterung  
des Zihlkanals

**Abb. 5.33** > Vergleich der in Abb. 5.32 gezeigten Ergebnisse mit den Resultaten der Simulationen für einen erweiterten Zihlkanal



Nebst den untersuchten Szenarien sind allerdings auch Situationen denkbar, für welche die Wirkung einer Zihlkanalerweiterung differenzierter zu betrachten ist. Bei sehr hohen Zuflüssen in den Neuenburgersee drosselt heute der Zihlkanal die Zuflüsse in Richtung Bielersee. In diesem Fall ist eine kleine Durchflusskapazität von Vorteil, weil dadurch das im Vergleich zum Bielersee deutlich grössere Rückhaltevermögen des Neuenburgersees besser genutzt werden kann. Eine Erweiterung des Zihlkanals würde sich diesbezüglich nachteilig auswirken. Eine grössere Durchflusskapazität des Zihlkanals könnte sich zudem auch im Falle erhöhter Seestände (z. B. infolge eines vorangehenden Hochwassers) als nachteilig erweisen. Das aus dem Neuenburgersee nachströmende Wasser würde eine rasche Absenkung des Bielersees auf den normalen Wasserstand bzw. eine Vorabsenkung im Rahmen der Prognoseregulierung erschweren oder verunmöglichen. Für solche Situationen wäre unter Umständen sogar eine künstliche Drosselung des Durchflusses (Regulierwehr im Zihlkanal) erforderlich.

Differenzierte Betrachtung  
des Zihlkanals notwendig

Für die bisherigen Betrachtungen wurde davon ausgegangen, dass Vorhersage und Realität übereinstimmen. Aufgrund der positiven Wirkung der Prognoseregulierung und im Hinblick auf eine Umsetzung dieser Massnahme wird deshalb in einem weiteren Schritt die Sensitivität der Prognoseregulierung hinsichtlich der mit Vorhersagen grundsätzlich verbundenen Unschärfen untersucht. Betrachtet werden dabei der Einfluss unterschiedlich langer Vorhersagezeiträume sowie der Güte der Vorhersage auf die Wirkung der Prognoseregulierung. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Anhang A5 detailliert beschrieben.

Sensitivität der Prognose-  
regulierung auf Unschärfen  
in der Vorhersage

Mit der Prognoseregulierung lassen sich – unabhängig davon, ob der Vorhersagezeitraum 3, 5 oder 7 Tage umfasst – die Höchststände an den Jurarandseen im Vergleich zur Regulierung gemäss dem Reglement 1980/82 signifikant mindern. Als optimal erweist sich dabei ein Vorhersagezeitraum von 5 Tagen.

Die Prognoseregulierung ist wenig anfällig auf Unschärfen. Abweichungen zwischen Vorhersage und Realität können die Wirkung der Prognoseregulierung reduzieren, wenn das Hochwasser grösser ist oder das Ereignis früher eintritt als vorhergesagt. Selbst in diesen ungünstigen Fällen ergibt sich aber im Vergleich zur Regulierung gemäss Reglement 1980/82 eine deutliche Reduktion der Höchststände. Auch bei Fehlprognosen verhält sich das System «robust». Dauer und Mass einer irrtümlich eingeleiteten Vorabsenkung sind beschränkt, und der ursprüngliche Seestand stellt sich innerhalb weniger Tage wieder ein. Tritt ein nicht vorhergesagtes Ereignis ein und wird deshalb keine Vorabsenkung eingeleitet, so entspricht dies dem Zustand ohne Prognoseregulierung. Die Prognoseregulierung führt in diesem Fall also zu keiner Verschlechterung der bisherigen Situation.

### 5.5.3 Umsetzung der Prognoseregulierung

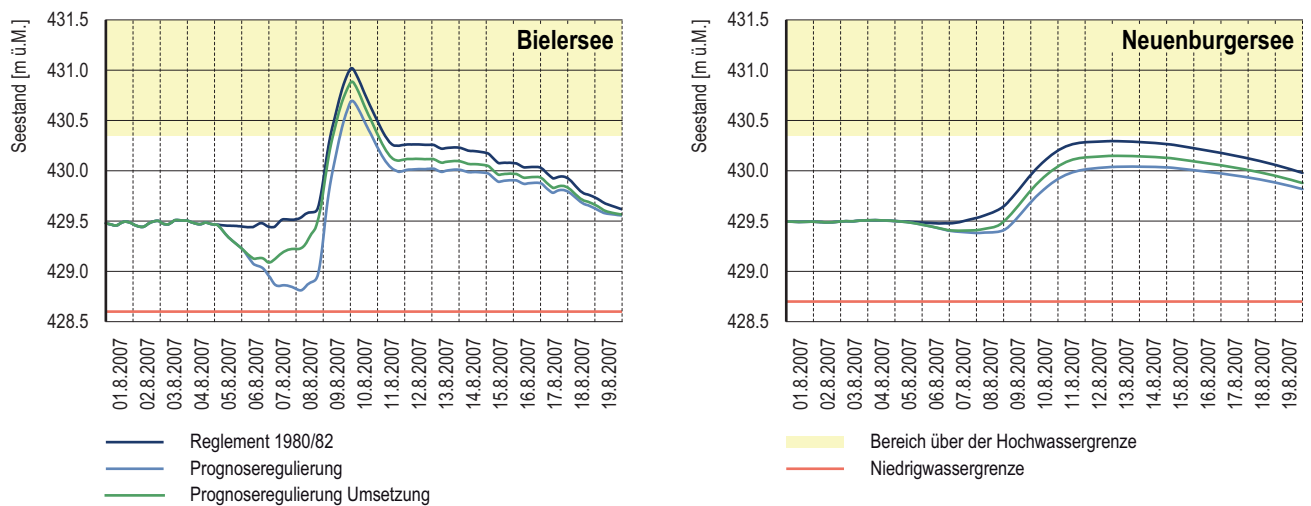
Mit den in Kapitel 5.5.2 beschriebenen Untersuchungen lagen Mitte 2008 die Grundlagen für die konkrete Umsetzung der Prognoseregulierung vor. Gestützt auf die im Reglement 1982/80 enthaltenen Bestimmungen über die Möglichkeiten von Anpassungen wurde die Prognoseregulierung – als Ergänzung zum bestehenden Reglement – im Herbst 2008 eingeführt. Anfang 2009 wurde die Massnahme den Fachstellen des Bundes und der involvierten Kantone, den Nichtregierungsorganisationen sowie den Medien und damit auch der breiteren Öffentlichkeit vorgestellt.

Einführung der Prognose-  
regulierung im Herbst 2008

Die konkrete Umsetzung der Prognoseregulierung ist in Anhang A6 beschrieben. In einer ersten Phase – bis genügend Erfahrungen auch zur Qualität der Vorhersage vorliegen – orientieren sich die entsprechenden Einschränkungen relativ stark am bestehenden Reglement. Diese Randbedingungen, welche ohne vorgängige Absprache nicht unter- bzw. überschritten werden dürfen, betreffen die minimalen Seestände sowie den maximalen und minimalen Abfluss beim Wehr Port. Abb. 5.34 zeigt die Auswirkungen dieser Einschränkungen am Beispiel des Hochwassers vom August 2007. Mit den eher konservativ angesetzten Randbedingungen lässt sich rund die Hälfte der potenziell möglichen Wirkung erzielen.

Randbedingungen während  
der Prognoseregulierung

**Abb. 5.34** > Ganglinien der Seestände im Bieler- und Neuenburgersee, simuliert für die Zuflüsse vom August 2007 bei Regulierung gemäss Reglement 1980/82, gemäss Prognoseregulierung ohne Einschränkungen und gemäss umgesetzter Prognoseregulierung



Obwohl die Umsetzung der Prognoseregulierung in einem ersten Schritt mit eher konservativ angesetzten Randbedingungen erfolgte, ist es möglich, in Absprache zwischen den Beteiligten ihr volles Potenzial auszuschöpfen. Um solche Absprachen, die bisher ad hoc erfolgten, künftig zeitgerecht und effizient durchführen zu können, wurde parallel zur Umsetzung der Prognoseregulierung das Krisenmanagement verbessert. In kritischen Situationen finden institutionalisierte Konferenzgespräche unter den zuständigen Fachstellen der direkt involvierten Kantone Freiburg, Waadt, Neuenburg, Bern, Solothurn und Aargau sowie dem BAFU statt. Diese Gespräche dienen der gemeinsamen Lagebeurteilung und sind die Grundlage für Entscheide. Jeder Partner kann eine solche Konferenz einberufen.

Institutionalisierte Absprachen  
in kritischen Situationen

Abschliessend stellt sich die Frage, wie oft zur Prognoseregulierung übergegangen wird und wie oft dabei der Bielersee bis auf den definierten minimalen Seestand abgesenkt wird. Während der Prognoseregulierung wird nicht zwingend der minimale Seestand erreicht (vgl. Beispiel in Abb. A5.5 in Anhang A5). Das Mass der Vorabsenkung ist vom Verlauf der Hochwasserzuflüsse und von der Güte ihrer Vorhersage abhängig.

Abschätzung der Häufigkeit

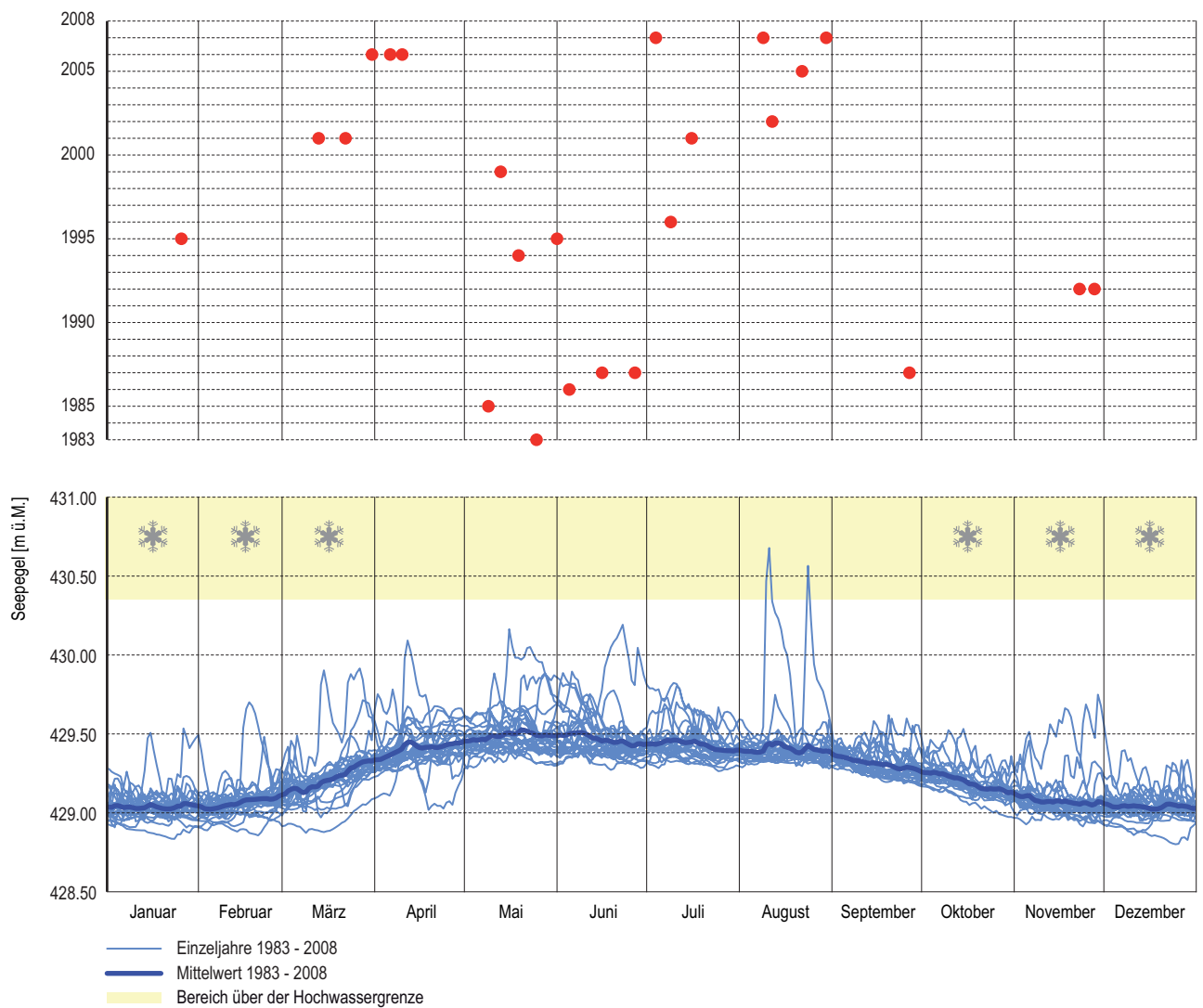
Um Aussagen über die *Häufigkeit* und das *Ausmass* möglicher Vorabsenkungen zu machen, müssten über einen längeren Zeitraum vorhergesagte und gemessene Seezuflüsse miteinander verglichen werden können. Weil aber das Abflussvorhersagesystem FEWS (Flood Early Warning System) erst seit Juni 2007 operationell in Betrieb ist (vgl. Kap. 4.1.1), ist die für einen derartigen Vergleich erforderliche Datengrundlage nicht vorhanden. Es lässt sich daher lediglich grob abschätzen, mit welcher *Häufigkeit* seit der Einführung des Regulierreglements 1980/82 im Jahr 1983 zur Prognoseregulierung übergegangen worden wäre. Sie wäre vermutlich jeweils dann eingeleitet worden, wenn der Anstieg des Bielerseestands das in Anhang A6-1 beschriebene Kriterium für den Übergang zur Prognoseregulierung erfüllt hätte. Werden die Jahresganglinien von

1983 bis 2008 nach diesem Kriterium ausgewertet, wäre – wie Abb. 5.35 zeigt – die Prognoseregulierung innerhalb der 26 Jahre umfassenden Periode 1983–2008 etwa 24 Mal eingeleitet worden. Die möglichen Fälle konzentrieren sich dabei auf das hydrologische Sommerhalbjahr (April bis September), in dem die mittleren Seestände höher und damit das verfügbare Rückhaltevolumen kleiner sind als im Winterhalbjahr.

**Abb. 5.35 > Häufigkeit des Übergangs zur Prognoseregulierung, abgeschätzt anhand der Jahresganglinien des Bielersees von 1983 bis 2008**

oben: Jahreszeitliche Verteilung der 24 Ereignisse, bei welchen zwischen dem 1.1.1983 und dem 31.12.2008 vermutlich zur Prognoseregulierung übergegangen worden wäre.

unten: Ganglinien des Bielerseestands für die Jahre 1983 bis 2008.



#### 5.5.4 Handlungsfeld Zwischeneinzugsgebiet

Im August 2007 wurde an der Emme (Station Wiler) der grösste Spitzenabfluss seit Beginn der Beobachtung im Jahr 1922 registriert (Abb. 5.26). Zudem war auch die Anlaufzeit des Hochwassers ausserordentlich kurz. Auch der Tageswert des Zuflusses aus dem restlichen Teil des Zwischeneinzugsgebiets übertraf den bisherigen Maximalwert (Abb. 5.25). Das Ereignis vom August 2007, welches somit ausserhalb des bisherigen Erfahrungsbereichs liegt, zeigte insbesondere auch die Grenzen bezüglich der heute verfügbaren Vorhersagen (hydrologische Modellrechnungen, vgl. Kap. 4.4; Prognoserechnung nach Aebi, vgl. Kap. 5.4.2) auf. Eine frühzeitige Erkennung sowie eine zuverlässige Vorhersage des zeitlichen Eintretens und des Verlaufs sind jedoch zentrale Voraussetzungen für die gezielte Drosselung des Abflusses beim Wehr Port.

Problematik

Verbesserungen bezüglich der Hochwasserregulierung in der Aare durch Drosselung des Bielerseeausflusses müssen deshalb in zwei Richtungen zielen:

Ziele

> *Früherkennung verbessern und Reaktionsgeschwindigkeit erhöhen*

Kritische Situationen, die zu grossen Hochwasserzuflüssen aus dem Zwischeneinzugsgebiet führen, müssen früher erkannt werden, um dadurch mehr Reaktionszeit zu gewinnen. Die Limitierung der Drosselungsgeschwindigkeit am Wehr Port auf eine stündliche Abflussänderung von maximal 50 m<sup>3</sup>/s (vgl. Kap. 5.3.1) begrenzt die Reaktionsgeschwindigkeit. Durch eine Erhöhung der Drosselungsgeschwindigkeit lässt sich die Reaktionsgeschwindigkeit vergrössern.

> *Hochwasserregulierung optimieren*

Für die Hochwasserregulierung ist eine verbesserte Abflussvorhersage erforderlich, um den zeitlichen Verlauf der Drosselung des Abflusses am Wehr Port optimal zu gestalten. Die Möglichkeiten umfassen dabei einerseits die Optimierung des auf einer Bilanzierung der Abflussdaten basierenden Verfahrens nach Aebi (vgl. Kap. 5.3.2), andererseits eine Verbesserung der auf hydrologischen Modellrechnungen basierenden Abflussvorhersagen (vgl. Kap. 4.4 bzw. 4.6).

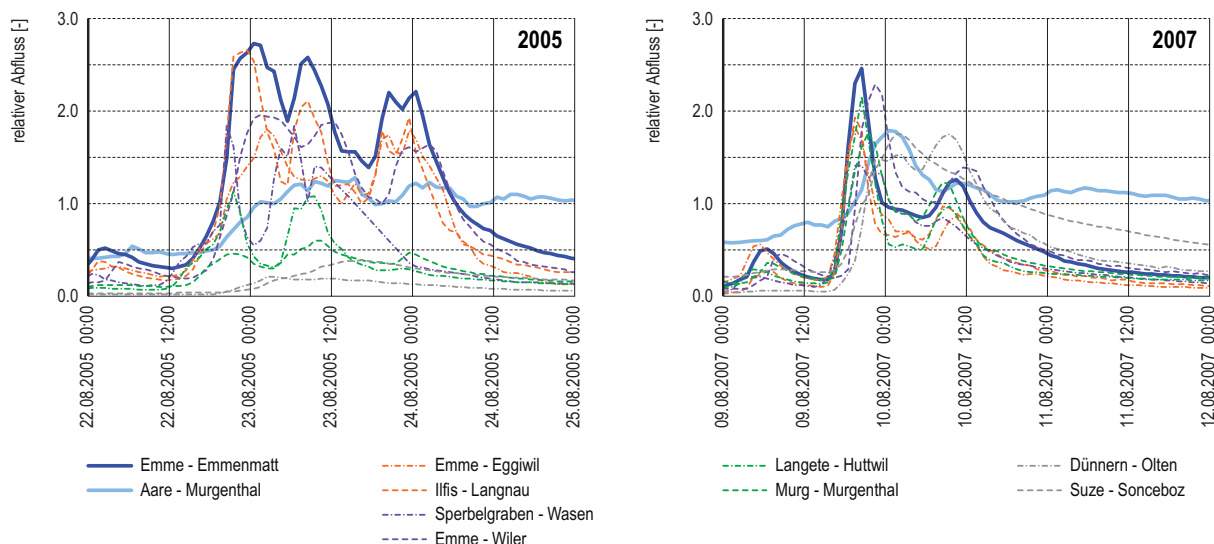
Zentrale Voraussetzung ist dabei der Zeitgewinn, das heisst die frühere Erkennung der Hochwasser aus dem Zwischeneinzugsgebiet.

In einem ersten Schritt wurde nach Möglichkeiten gesucht, dieses Verfahren zu erweitern. Da das Verfahren auf Abflussdaten beruht (vgl. Kap. 5.3.2), ist eine frühere Erkennung von Ereignissen nur möglich, wenn – nebst den bereits berücksichtigten Abflussmessstationen – Daten von Gewässern integriert werden können, die früher reagieren. Mit dem Ziel, entsprechende Indikatoren zu finden, wurden für die Ereignisse von 2005 und 2007 die Abflussganglinien weiterer Stationen im Zwischeneinzugsgebiet sowie ausgewählter Stationen angrenzender Einzugsgebiete analysiert (Abb. 5.36). Bei beiden Ereignissen findet sich keine Station, deren Abflusswerte aufgrund einer deutlichen Zunahme das Ereignis früher anzeigen, als die bereits heute für die Hochwasserregulierung verwendete Station Emme–Emmenmatt. Diese stellt somit den besten Indikator zur Früherkennung der betrachteten Ereignisse dar. Eine Verbesserung durch den Einbezug weiterer Abflussmessstationen ist nicht möglich.

Verbesserung der Früherkennung

**Abb. 5.36** > Vergleich der Ganglinien der Emme bei Emmenmatt mit den Ganglinien weiterer Stationen im Zwischeneinzugsgebiet sowie ausgewählter Stationen angrenzender Einzugsgebiete für die Hochwasser 2005 und 2007 (Stundenmittel; Zeitangaben in Winterzeit)

Der besseren Vergleichbarkeit wegen sind die Abflusswerte der Ganglinien mit dem Median der Jahresmaxima (entspricht einer Schätzung des mittleren Jahreshochwassers MHQ) der jeweiligen Stationen skaliert.



Der Früherkennung von Ereignissen auf der Basis von Abflussdaten sind durch die kurzen Anstiegszeiten insbesondere des Abflusses in der Emme (so genannter «Emme-Anschutz») sowie durch die kurzen Laufzeiten der Hochwasserwellen zwischen den jeweiligen Messstellen und Murgenthal Grenzen gesetzt. Diese Grenzen liegen zeitlich bei einer Vorwarnzeit von rund 4 Stunden. Ein weiterer Zeitgewinn bedingt deshalb den Einbezug von Niederschlagsdaten. Weil Daten von Niederschlagsstationen lediglich punktuelle Informationen liefern, steht dabei der Niederschlagsradar im Vordergrund, dessen Interpretation allerdings eine professionelle Unterstützung braucht. Zudem muss zumindest eine grobe Korrelation zwischen den Niederschlagsdaten aus dem Radar und der Grösse der zu erwartenden Abflüsse vorhanden sein. Solche Grundlagen können allerdings nicht im Rahmen der Ereignisanalyse erarbeitet werden und sind deshalb Gegenstand von Folgeprojekten.

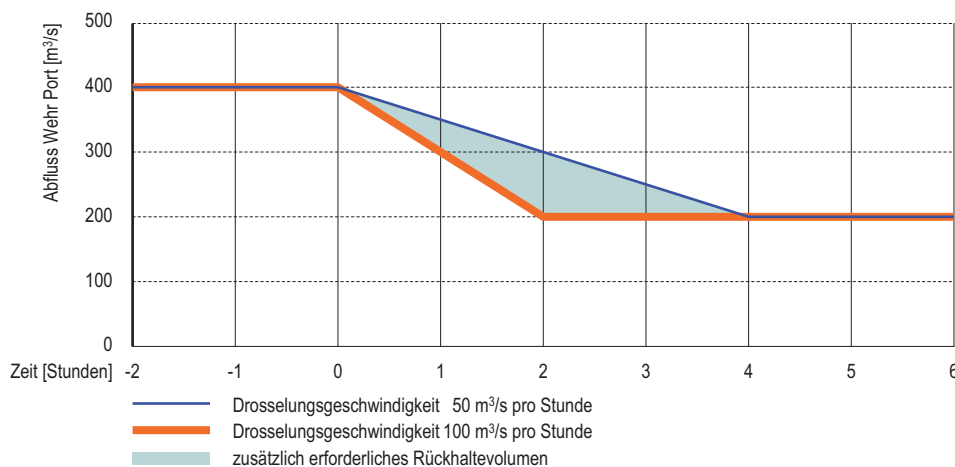
Einbezug des  
Niederschlagsradars

Nebst einer früheren Erkennung von Ereignissen stellt die raschere Reaktion eine weitere Massnahme zur Optimierung der Hochwasserregulierung dar. Aus diesem Grund wurde im Zusammenhang mit der Umsetzung der Prognoseregulierung im Herbst 2008 (vgl. Kap. 5.5.3 bzw. Anhang A6) der Grenzwert für die maximale Drosselungsgeschwindigkeit am Wehr Port von maximal 50 m<sup>3</sup>/s pro Stunde auf 100 m<sup>3</sup>/s pro Stunde erhöht. Damit kann der Abfluss der Aare in Murgenthal rascher als bisher beeinflusst werden. Durch die grössere Drosselungsgeschwindigkeit reduziert sich allerdings die Vorwarnzeit für die Aareschifffahrt bzw. für die Aarekraftwerke. Eine raschere Drosselung führt zudem dazu, dass in den Jurarandseen ein grösseres Volumen zurückgehalten werden muss. Aufgrund der kurzen Dauer des Vorgangs findet dabei kaum ein Ausgleich zwischen den Seen statt, so dass dieses Volumen im Bielersee gespeichert werden muss. Wie das Beispiel in Abb. 5.37 zeigt, ist jedoch der dadurch resultierende zusätzliche Anstieg des Bielersees bescheiden.

Erhöhung der  
Reaktionsgeschwindigkeit

**Abb. 5.37 > Beispiel einer Abflussreduktion von 400 m<sup>3</sup>/s auf 200 m<sup>3</sup>/s am Wehr Port mit einer Drosselungsgeschwindigkeit von 50 m<sup>3</sup>/s pro Stunde (bisher) bzw. von 100 m<sup>3</sup>/s pro Stunde (neu)**

Im gezeigten Beispiel kann die Abflussreduktion am Wehr Port durch die Verdoppelung der Drosselungsgeschwindigkeit innerhalb von 2 Stunden erfolgen. Damit wird auch der Abfluss der Aare in Murgenthal entsprechend früher reduziert. Das wegen der rascheren Drosselung zusätzlich erforderliche Rückhaltevolumen beträgt 720 000 m<sup>3</sup>. Dieser Rückhalt führt im Bielersee zu einem zusätzlichen Anstieg um 1.8 cm.



Die gezielte Steuerung des Abflusses beim Wehr Port im Hochwasserfall bedingt eine Vorhersage der Zuflüsse aus dem Zwischeneinzugsgebiet zwischen dem Bielersee und Murgenthal bzw. des Abflusses der Aare bei Murgenthal.

Optimierung der  
Hochwasserregulierung

Heute basiert die Hochwasserregulierung auf der Prognoserechnung nach Aebi (vgl. Kap. 5.3.2). Der Vorteil dieses Verfahrens ist seine Einfachheit. Die wesentlichen Nachteile sind der auf 4 Stunden begrenzte Vorhersagezeitraum sowie der Umstand, dass rund 70 % des Zwischeneinzugsgebiets als ungemessene Grössen in das Verfahren eingehen und von diesem Teil des Zwischeneinzugsgebiets die dynamischen Eigenschaften (Laufzeiten, Gerinneretention, Einfluss der Aarekraftwerke) unberücksichtigt bleiben.

Eine Optimierung der Hochwasserregulierung ist nur möglich, wenn bessere Vorhersagen zu Verfügung stehen. Massnahmen zur Verbesserung können dabei in zwei Richtungen zielen:

- > Verbesserung der Prognoserechnung nach Aebi durch Ersatz der darin enthaltenen Bilanzierungsmethode durch eine hydrodynamische Abflussberechnung (*flood routing*),
- > Verbesserung der auf hydrologischen Modellrechnungen basierenden Abflussvorhersagen für das Zwischeneinzugsgebiet: konzeptionelle Verbesserung der hydrologischen Modellierung (vgl. Kap. 4.4 bzw. 4.6), Einbezug der Niederschlagsdaten des Radars (Nowcasting), Koppelung des hydrologischen Modells mit einem hydrodynamischen Modell zur Berücksichtigung der dynamischen Eigenschaften, Beizug des gekoppelten Modells für die Hochwasserregulierung.

Mit dem Ersatz der im Verfahren nach Aebi enthaltenen Bilanzierungsmethode durch eine hydrodynamische Abflussberechnung bzw. durch die Kopplung eines verbesserten hydrologischen Modells mit einer hydrodynamischen Abflussberechnung liessen sich insbesondere folgende Einflüsse berücksichtigen:

- > die Gerinnretention von Aare und Emme,
- > die je nach Wasserführung unterschiedlichen Laufzeiten und
- > der Einfluss der Laufkraftwerke.

Die Auswirkungen dieser Effekte sind je nach Ereignisverlauf sehr unterschiedlich und lassen sich aufgrund ihres nichtlinearen Charakters durch eine einfache Parametrisierung nicht abbilden. Wie solche Effekte durch ein auf einem Routingverfahren basierenden «Abfluss-Abfluss-Modellsystem» berücksichtigt werden können, ist in Anhang A7 beschrieben.

Die Laufkraftwerke Flumenthal, Bannwil und Wynau beeinflussen den Abfluss der Aare zwischen Port und Murgenthal. Es muss sichergestellt werden, dass sie durch ihren Betrieb im Ereignisfall die Situation nicht zusätzlich verschärfen, indem zu einem ungünstigen Zeitpunkt der Stauraum abgesenkt und dadurch der Abfluss erhöht wird. Im Hochwasserfall mögen für den Kraftwerksbetrieb andere Anforderungen (z. B. der ungehinderte Durchgang von Schwemmholz) prioritär sein. Dies schliesst jedoch eine Nutzung der potenziellen Retentionsmöglichkeit der Aarekraftwerke zur Dämpfung der Hochwasserspitze nicht grundsätzlich aus. Durch geschicktes Timing und auf der Basis entsprechend zuverlässiger Abflussvorhersagen ist es allenfalls denkbar, die Hochwasserspitzen mit Hilfe der Kraftwerke zu reduzieren.

Durch die vorgeschlagene Verbesserung der *Prognoserechnung nach Aebi* könnten die beim Ereignis 2007 erkannten Grenzen dieses Verfahrens (vgl. Kap. 5.4.2) weitgehend behoben werden. Allerdings bleibt auch nach einer Verbesserung der Vorhersagezeitraum dieses Verfahrens auf 4 Stunden beschränkt.

Demgegenüber könnte mit einem verbesserten *hydrologischen Modell* der Vorhersagezeitraum auf die Dauer der potenziellen Hochwasser aus der Emme bzw. dem übrigen Teil des Zwischeneinzugsgebiets (24 bis 48 Stunden) ausgedehnt werden. Allerdings nehmen mit zunehmender Länge des Vorhersagezeitraums die mit der Vorhersage verbundenen Unsicherheiten zu. Die Erfahrungen mit dem Hochwasser vom August 2007 zeigen, dass das heute verfügbare Modell derzeit nicht in der Lage ist, für den wichtigsten Zufluss (Emme bei Emmenmatt) eine ausreichend zuverlässige Vorhersage zu liefern (vgl. Kap. 4.4). Eine bessere Vorhersage bedingt deshalb zunächst grundlegende Anpassungen der hydrologischen Modellierung des Zwischeneinzugsgebiets.

Die oben ausgeführten Verbesserungen der Vorhersagen als Grundlage für eine optimierte Hochwasserregulierung sind im Rahmen von Folgeprojekten vertieft zu prüfen. Gleiches gilt auch für die Wirksamkeit und Machbarkeit des Einbezugs der Aarekraftwerke in die Hochwasserregulierung.

Instationäre Abflussberechnung zur Berücksichtigung dynamischer Eigenschaften

Berücksichtigung und Einbezug der Aarekraftwerke

Inhalt von Folgeprojekten

Die in Kapitel 5.5.2 beschriebene Prognoseregulierung sieht vor, im Falle der Vorhersage volumenreicher Zuflüsse in die Jurarandseen den Abfluss beim Wehr Port zu erhöhen, um dadurch den Bielersee kurzzeitig abzusenken und so das Rückhaltevolumen zu vergrössern. Kündigt sich ein Hochwassers aus der Emme oder dem übrigen Zwischeneinzugsgebiet zwischen Bielersee und Murgenthal an, muss der Abfluss am Wehr Port rechtzeitig wieder so weit reduziert werden, dass bei Bedarf ein rascher Übergang in die Hochwasserregulierung möglich ist. Es gilt daher, den Übergang von der Prognoseregulierung zur Hochwasserregulierung optimal zu gestalten. Im Rahmen der in Anhang A6 beschriebenen Umsetzung der Prognoseregulierung wurde dieser Aspekt deshalb besonders beachtet (vgl. Anhang A6-2).

Abstimmung der Massnahmen

## 5.6 Erkenntnisse

Das Hochwasser vom August 2007 führte zu einer Überlastung des Systems der Jurarandgewässer. Der Bielersee überschritt die Hochwassergrenze um 53 cm, und in der unterliegenden Aare wurde die Zielgrösse für den maximalen Abfluss bei Murgenthal von 850 m<sup>3</sup>/s um 50 % übertroffen. Das Ziel der Juragewässerkorrekturen, der Schutz der Seeanstösser und der Unterlieger, konnte bei diesem Ereignis nicht erreicht werden.

Jurarandgewässer im August 2007 überlastet

Die Regulierung der Zuflüsse aus dem Einzugsgebiet der Jurarandseen erfolgt auf der Basis des Regulierdiagramms. Dieses legt den einzustellenden Seeausfluss in Abhängigkeit des Datums und des Bielerseestands fest. Somit muss sich zunächst der Seepegel ändern, bevor der Seeausfluss angepasst wird. Wegen dieser auf eher langsame Abflussänderungen ausgelegten Regulierung weist das System eine gewisse Trägheit auf. Im Fall von Mittel und Niedrigwasser resultiert so eine durchaus gewünschte ausgleichende Wirkung auf den Abfluss der unterliegenden Aare. Bei Hochwasser wäre jedoch eine frühzeitige Änderung des Ausflusses notwendig, um das zur Verfügung stehende Rückhaltevolumen optimal ausnutzen zu können.

Bisherige Regulierung reagiert träge

Bezüglich der Zuflüsse zu den Jurarandseen nimmt das Ereignis vom August 2007 – je nach betrachteter Dauerstufe – den Rang 4 bis 6 ein. Hinsichtlich der Zuflussvolumina entspricht es einem 20 bis 50-jährlichen Ereignis. Die zweite Juragewässerkorrektur wurde aufgrund der seinerzeitigen Erfahrungen primär auf grosse Winterhochwasser ausgelegt. Entsprechend sind die Seestände in den Wintermonaten tiefer als im Sommer. Die Besonderheit des Hochwassers vom August 2007 ist, wie auch im August 2005, die Kombination grosser und intensiver Zuflüsse mit hohen Sommerseeständen.

Einordnung des Hochwassers 2007

In der unterliegenden Aare und bezüglich der Zuflüsse aus dem Einzugsgebiet der Aare zwischen dem Bielersee und Murgenthal muss das Hochwasser 2007 jedoch als ein seltenes Ereignis eingestuft werden. Gemäss der standardmässigen statistischen Auswertung der Beobachtungsperiode 1922–2007 liegt die geschätzte Jährlichkeit des Spitzenabflusses der Emme bei Wiler über 200 Jahre (vgl. Tab. A3.3 im Anhang A3). Eine Betrachtung unter Einbezug verschiedener grösserer Hochwasser, die sich zwischen 1908 und 1917 ereignet haben und die in der Statistik nicht erfasst sind, ergibt für den Spitzenabfluss von 2007 eine Wiederkehrperiode von etwas über 100 Jahre

(TBA BE 2008). Das Hochwasser der Emme war nicht nur durch eine ausserordentliche Spitze geprägt, sondern vor allem auch durch seinen überaus raschen Anstieg und Ablauf. Aussergewöhnlich war auch der Beitrag aus dem übrigen Teil des Zwischeneinzugsgebiets. Bereits die Zuflüsse zur Aare unterhalb des Bielersees reichten im August 2007 aus, um die Zielgrösse des maximalen Abflusses in Murgenthal zu erreichen.

Der Versuch, vor dem Hochwasser das Speichervolumen des Bielersees durch eine Erhöhung des Abflusses beim Wehr Port noch zu vergrössern, der ausserordentlich rasche Anstieg der Emme sowie die Limitierung der Drosselungsgeschwindigkeit führten dazu, dass die Drosselung des Abflusses am Wehr Port nicht ideal erfolgte. Hätten alle Reguliervorschriften strikt eingehalten werden können, so wäre der Bielersee um weitere 8 cm angestiegen, der Abfluss in Murgenthal jedoch um lediglich 30 m<sup>3</sup>/s (2 %) geringer gewesen. Bezogen auf die Wasserspiegellage der Aare entspricht dies einer Differenz von 6 cm.

Regulierung während  
des Hochwassers 2007

Das Hochwasser 2007 zeigte aber insbesondere die Grenzen hinsichtlich der Grundlagen auf, auf die sich die Hochwasserregulierung stützt. Das Hochwasser der Emme wurde zu spät erkannt und die als Basis für die Hochwasserregulierung verwendete Abflussprognose nach Aebi vermochte den Verlauf des Hochwassers nur teilweise richtig vorherzusagen.

Die Rückhaltekapazität der Jurarandseen lässt sich mittels temporärer Vorabsenkung vergrössern bzw. durch eine Vergrösserung der Kapazität des Zihlkanals besser nutzen. Beiden Massnahmen lassen sich auch kombinieren. Eine erhöhte Rückhaltekapazität der Jurarandseen ist auch dann nützlich, wenn bei Hochwasser der Emme der Ausfluss beim Wehr Port reduziert werden muss.

Optimierung des Rückhalts  
möglich

Das im Rahmen der Ereignisanalyse untersuchte Konzept der Prognoseregulierung basiert auf dem Einbezug der Abflussvorhersagen zur Regulierung der Jurarandseen in Form einer Ergänzung der bestehenden Reguliervorschriften. Aufgrund der Vorhersage wird im Vorfeld von Ereignissen, die zu einem übermässigen Anstieg der Seestände führen würden, der Ausfluss beim Wehr Port frühzeitig vergrössert und so durch die temporäre Vorabsenkung der Seen zusätzliches Rückhaltevolumen geschaffen. Die Prognoseregulierung bringt in allen betrachteten Fällen eine signifikante Verbesserung und erlaubt im Vergleich zur Regulierung gemäss Reglement 1980/82 eine deutliche Minderung der Höchststände. Diese Minderung beträgt am Bielersee zwischen 20 cm (Hochwasser 1918) und 64 cm (Hochwasser 1944) sowie am Neuenburgersee zwischen 14 cm (Hochwasser 1918) und 40 cm (Hochwasser 1944). Für die August-Hochwasser von 2005 und 2007 ergibt sich eine Reduktion der Höchststände von 35 bis 40 cm am Bielersee und von knapp 30 cm am Neuenburgersee.

Prognoseregulierung bringt  
signifikante Verbesserung

Durch eine gute Vorhersage kann der Zeitraum der Vorabsenkung kurz gehalten werden. Die Untersuchungen zeigen, dass die Prognoseregulierung aber selbst auf grössere Unschärfen in den Vorhersagen wenig sensitiv reagiert. Sogar bei Fehlprognosen verhält sich das System der Jurarandseen «robust». Dauer und Mass einer irrtümlich eingeleiteten Vorabsenkung beschränkt, und der ursprüngliche Seestand stellt

sich innerhalb weniger Tage wieder ein. Findet hingegen keine Vorabsenkung statt, weil ein Ereignis nicht vorhergesagt wurde, so entspricht dies dem Zustand ohne Prognoseregulierung. In diesem Fall führt also die Prognoseregulierung nicht zu einer Verschlechterung der bisherigen Situation.

Für eine Umsetzung der Prognoseregulierung sind alle notwendigen Voraussetzungen gegeben. Deshalb wurde diese Massnahme bereits Ende 2008 operationell umgesetzt. Die Prognoseregulierung ergänzt das bestehende Regulierreglement 1980/82. Die Elemente und Vorteile des bestehenden Reglements bleiben somit erhalten. Die mit dieser Massnahme erzielbaren Verbesserungen konzentrieren sich auf das Vorfeld potenzieller Ereignisse.

Prognoseregulierung  
rasch umgesetzt

Die Prognoseregulierung ist generell wirksamer als eine Erhöhung der Kapazität des Zihlkanals. Optimal ist die Kombination beider Massnahmen. Zur Quantifizierung des Nutzens einer Erweiterung des Zihlkanals muss allerdings noch die mit dieser Massnahme verbundene Risikominderung ermittelt werden. Daraus leitet sich dann letztlich auch die Grössenordnung eventueller Investitionen ab. Zudem gilt es nebst der technischen Machbarkeit auch die Wirksamkeit dieser Massnahme für eine erweiterte Szenarienpalette zu prüfen, da sich eine Vergrösserung der Durchflusskapazität für gewisse Fälle auch nachteilig auswirken könnte. Eine mögliche Erweiterung des Zihlkanals muss daher im Rahmen entsprechender Folgeprojekte sorgfältig geprüft werden.

Erweiterung des Zihlkanals  
differenziert betrachten

Bei einer Erhöhung des maximal zulässigen Abflusses beim Wehr Port bzw. in Murgenthal müssen in den Jurarandseen kleinere Volumina zurückgehalten werden, wodurch die Seen im Ereignisfall weniger hoch ansteigen. Diese Massnahme wirkt vor allem bei vergleichsweise kurzen Ereignissen mit grossen Spitzenabflüssen wie 2005, 2007 oder dem untersuchten Extremereignis. Ihr Potenzial liegt also primär bei Ereignissen, die sich im Sommer in Kombination mit den für diese Jahreszeit charakteristischen hohen Seeständen ereignen. Im Winter bewirkt hingegen die Erhöhung des zulässigen Abflusses beim Wehr Port bzw. in Murgenthal kaum eine Verbesserung.

Erhöhung des zulässigen  
Abflusses beim Wehr Port bei  
Sommerhochwasser wirkungsvoll

Die Erhöhung des maximal zulässigen Abflusses bedingt jedoch eine umfassende Prüfung und – wo nötig – entsprechende Anpassungen der Abflusskapazität der Aare unterhalb des Bielersees. Diese Massnahme erfordert daher eine vertiefte Prüfung im Rahmen eines Folgeprojekts.

Es liegt in der Natur von empirischen Betriebsregeln wie beispielsweise der Hochwasserregulierung nach Aebi, dass sie bekannte, häufige Situationen abzudecken vermögen, aber bei neuen und extremen Bedingungen an ihre Grenzen stossen. Solche deutlich ausserhalb des bisherigen Erfahrungsbereiches liegenden Bedingungen waren durch das Emmehochwasser vom August 2007 hinsichtlich Spitze und Ablauf gegeben.

Optimierung der Hochwasser-  
regulierung der unterliegenden  
Aare bedingt neue Grundlagen

Verbesserungen zur Hochwasserregulierung in der Aare durch Drosselung des Bielerseeausflusses bedingen eine bessere Früherkennung von Hochwasserzuflüssen aus dem Zwischeneinzugsgebiet, eine raschere Reduktion des Abflusses am Wehr Port im Ereignisfall sowie generell verbesserte Abflussvorhersagen als Grundlage für die

Steuerung des Abflusses während des Hochwassers. Entscheidend ist letztlich der Zeitgewinn, das heisst die frühere Erkennung der Hochwasser aus dem Zwischeneinzugsgebiet.

Eine frühere Erkennung kritischer Situationen ist nur durch den Einbezug von Niederschlagsdaten möglich. Im Vordergrund steht dabei der Niederschlagsradar, der – im Gegensatz zu Niederschlagsstationen – flächige Informationen liefert. Zudem müssen die Grundlagen vorhanden sein, um aufgrund der Niederschlagsdaten aus dem Radar auf die Grösse der zu erwartenden Abflüsse schliessen zu können. In Zusammenarbeit mit MeteoSchweiz wurde ein entsprechendes Folgeprojekt 2008 in Angriff genommen. Seit Juli 2009 warnt MeteoSchweiz im Rahmen eines Testbetriebs den Vorhersagedienst des BAFU in kritischen Situationen auf der Basis einer Auswertung der Radar-daten.

Früherkennung von Hochwasser aus dem Zwischeneinzugsgebiet

Um künftig bei einem Hochwasser der Emme rascher reagieren zu können, wurde im Rahmen der Umsetzung der Prognoseregulierung der Grenzwert für die maximale Drosselungsgeschwindigkeit am Wehr Port von maximal 50 m<sup>3</sup>/s pro Stunde auf 100 m<sup>3</sup>/s pro Stunde erhöht.

Raschere Reaktion am Wehr Port

Die erforderlichen Verbesserungen der Abflussvorhersagen für die Emme bzw. das übrige Zwischeneinzugsgebiet zielen in zwei Richtungen:

Verbesserung der Abflussvorhersagen für das Zwischeneinzugsgebiet

- > Verbesserung der bisher zur Hochwasserregulierung verwendeten *Prognoserechnung nach Aebi* mittels Ersatz der darin enthaltenen Bilanzierungsmethode durch eine hydrodynamische Abflussberechnung;
- > Verbesserung *der auf hydrologischen Modellrechnungen basierenden Abflussvorhersagen* für das Zwischeneinzugsgebiet und Kopplung des hydrologischen Modells mit einem hydrodynamischen Modell zur Berücksichtigung der dynamischen Eigenschaften wie Laufzeiten, Gerinneretention und Einfluss der Aarekraftwerke; Beizug des gekoppelten Modells für die Hochwasserregulierung.

In beiden Richtungen sind entsprechende Folgeprojekte notwendig. Dies gilt auch für die Prüfung der Wirksamkeit und Machbarkeit des Einbezugs der Aarekraftwerke in die Hochwasserregulierung.

Bei der Regulierung der Jurarandseen gemäss dem Linienreglement ist eine Reihe von Nebenbedingungen zu berücksichtigen, zu welchen seit 2008 auch die Prognoseregulierung zählt. Die verschiedenen Nebenbedingungen sind ein Indiz dafür, dass eine grundsätzliche Überprüfung des Reglements angezeigt ist. So liesse sich unter Umständen das starre Linienreglement durch robustere Reglerkonzepte ersetzen, welche eine adäquate Abbildung der diversen Nebenbedingungen erlauben.

Grundsätzliche Überprüfung des Regulierreglements

Auch nach der Optimierung des bestehenden Systems der Jurarandseen und der unterliegenden Aare können sich Hochwasser ereignen, welche zu dessen Überlastung führen. Es ist damit zu rechnen, dass auch zukünftig sowohl die Zielgrösse des Abflusses von 850 m<sup>3</sup>/s in Murgenthal als auch die Hochwassergrenzen der Jurarandseen bei ausserordentlichen Ereignissen überschritten werden.

Überlastsituationen auch künftig möglich

## Literatur

- André S., Bollaert E. (avec une contribution de Petrascheck A. et Bezzola G.R.) 2007: Effet des ouvrages d'accumulation. In: Bezzola G.R., Hegg C. (Ed.): Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0707: 99–106.
- BAFU (Bundesamt für Umwelt) 2009a: Jurarandseen als Speicher für grössere Zuflüsse aus den Bergen. Medienmitteilung des BAFU vom 03.04.2009.
- BAFU (Bundesamt für Umwelt) 2009b: Entspannte Lage nach Schneeschmelze – Jurarandseen wieder normal reguliert. Medienmitteilung des BAFU vom 24.04.2009.
- BWG (Bundesamt für Wasser und Geologie) 2000: Hochwasser 1999 – Analyse der Ereignisse. Studienbericht Nr. 10, Bern: 166 S.
- Kühne A. 2004: Juragewässer. In: Minor H.-E., Hager W.H. (Ed.): Flussbau in der Schweiz. Gesellschaft für Ingenieurbaukunst, Band 6, Stäubli AG, Zürich: 54–73.
- Müller R. 1959: Die II. Juragewässerkorrektion. Biel (erweiterter Separatdruck vom Juni 1969 aus «Wasser- und Energiewirtschaft» 1959, Nr. 1–2, Zürich): 44 S.
- Müller R. 1960: II. Juragewässerkorrektion – vereinfachte Darstellung der Grundlagen des Projektes der II. JGK. Biel: 35 S.
- Müller R. 1973: Über die Wasserstände der Juraseen. In: Schwab H., Müller, R.: Die Vergangenheit des Seelandes im neuen Licht. Universitätsverlag Freiburg: 154–176.
- Müller R. 1974: Abschliessender Bericht über die II. Juragewässerkorrektion. Farbendruck Weber, Biel: 75 S.
- Nast M. 2006: überflutet – überlebt – überlistet: Die Geschichte der Juragewässerkorrekturen. Verein Schlossmuseum Nidau, Nidau: 192 S.
- Petrascheck A. 2007: Das Verhalten der Seen bei Hochwasser. In: Bezzola G.R., Hegg C. (Ed.) 2007: Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0707: 71–97.
- Petrascheck A. 2008: Volumenstatistik der Alpenrandseen. In: Bezzola G.R., Hegg C. (Ed.) 2008: Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahregrundlagen. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0825: 58–70.
- Reichel G. 2001: FluxDSS und FLORIS<sup>2000</sup> – ein leistungsfähiges Paket zur Modellierung der Fließvorgänge in komplexen Systemen. Österreichische Wasserwirtschaft, Jg. 53, Heft 5/6, S. 170–171.

Vischer D.L. 2003: Die Geschichte des Hochwasserschutzes in der Schweiz. Berichte des BWG, Serie Wasser, Nr. 5, Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern. 208 S.

## Unveröffentlichte Berichte

- BVE (Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion des Kantons Bern), Tiefbauamt «Extremhochwasser im Einzugsgebiet der Aare – EHW Aare», geo7 AG, geowissenschaftliches Büro, Bern; IUB Ingenieur-Unternehmung AG, Bern; Hunziker, Zarn & Partner AG, Aarau; Emch+Berger AG, Bern, Bericht und Kartenbeilagen, November 2007.
- BWW (Bundesamt für Wasserwirtschaft) «II. Juragewässerkorrektion, Regulierreglement 1980/82», Reguliervorschriften, Regulierdiagramm und Anhang, Juli 1980.
- TBA BE (Tiefbauamt des Kantons Bern), Oberingenieurkreis IV «Potenzielle Überflutungsräume der Emme – Emmenmatt bis Kantonsgrenze BE/SO», Hunziker, Zarn & Partner, Aarau, Projekt Nr. A-385, März 2008.
- TK-Consult AG «Abflussmodell JGK-05 – Aktualisierung der Datengrundlage und Migration auf FLUX/FLORIS<sup>2000</sup>», Bericht im Auftrag des BWG, Zürich, Februar 2006.
- TK-Consult AG «Hydrodynamische Modellierung der Jurarandseen (JGK)– Ereignisanalyse 2005, Historische Hochwasser», Bericht TKC 12.01 im Auftrag des BAFU, Zürich, Mai 2008.
- VAW (Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule, Zürich), «Optimale Regulierung der zweiten Juragewässerkorrektion (II. JGK) – Unter Einbezug von Auswirkungen der Reglementsanwendung auf die Umwelt», VAW-Bericht Nr. 3941 im Auftrag der interkantonalen Aufsichtskommission der II. JGK, Dezember 1996.
- Rechtliche Grundlagen**
- BBl 1960 II 1062  
Bundesbeschluss über die Gewährleistung eines Bundesbeitrages an die Arbeiten der II. Juragewässerkorrektion (vom 5. Oktober 1960).
- ex SR 721.61  
Interkantonale Vereinbarung zwischen den Kantonen Freiburg, Waadt, Neuenburg, Bern und Solothurn über den gemeinsamen Unterhalt und die Aufsicht des interkantonalen Werkes der II. Juragewässerkorrektion sowie über die Regulierung der dadurch betroffenen Gewässer (Interkantonale Vereinbarung 1985 über die II. Juragewässerkorrektion). Abgeschlossen am 4. Februar 1986.  
Vom Bundesrat genehmigt am 19. November 1986.  
In Kraft getreten am 4. Februar 1986;  
(Stand am 9. September 2003).



## 6 > Fazit

Gian Reto Bezzola, Wolfgang Ruf

*Grosse Hochwasser lassen sich heute dank Meteo- und Abflussvorhersagen in deren Vorfeld bereits erkennen. Erste Signale für ein Ereignis müssen genutzt werden, um die Bereitschaft zu erhöhen sowie die Beobachtung und die Lagebeurteilung vor Ort aufzunehmen. Der Entscheid zur Auslösung von Interventionsmassnahmen aufgrund von Vorhersagen ist aber immer von Unsicherheiten begleitet. Die kurzen Vorwarnzeiten bedingen eine umfassende, aktuelle und eingeübte Notfall- und Einsatzplanung. Der Einbezug von Abflussvorhersagen erlaubt eine Verbesserung der Hochwasserregulierung der Jurarandgewässer. Ein umfassendes Hochwasser-management unter Einbezug der regulierten Alpenrandseen soll aufgebaut werden.*

### 6.1 Einführung

Ereignisanalysen sind die einzige Möglichkeit, die Qualität von Massnahmen *wirklich* zu überprüfen. Es gilt daher, Ereignisse wie das Hochwasser vom August 2007 zu analysieren, um daraus die notwendigen Lehren zu ziehen. Dies allein genügt jedoch nicht, wenn daraus nicht konkrete Massnahmen für einen verbesserten Umgang mit Naturgefahren abgeleitet und umgesetzt werden.

Im vorliegenden Kapitel werden zunächst die Lehren aus der Analyse des Hochwassers vom August 2007 gezogen und mögliche Massnahmen aufgezeigt. Anschliessend werden die bereits eingeleiteten oder umgesetzten sowie die noch zu ergreifenden Massnahmen präsentiert.

### 6.2 Einordnung des Ereignisses

Das Hochwasser vom 8./9. August 2007 stellt ein Grossereignis dar, das weite Teile des Mittellandes in Mitleidenschaft zog. Besonders betroffen waren dabei die Birs sowie die Jurarandseen und insbesondere die unterliegende Aare. Die grossen Zuflüsse zu den Jurarandseen und aus dem Zwischeneinzugsgebiet der Aare unterhalb des Bielersees führten dazu, dass dieses bisher als «sicher» erachtete System überlastet wurde. Das Rückhaltevermögen der Jurarandseen und die Abflusskapazität der unterliegenden Aare reichten nicht aus, um das Hochwasser schadlos zu bewältigen. Das Ziel der Juragewässerkorrekturen, der Schutz der Seeanstösser und der Unterlieger, konnte im August 2007 nicht erreicht werden.

Überlastung wasserbaulicher Systeme im August 2007

In den letzten drei Jahrzehnten ist in der Schweiz eine Häufung grosser überregionaler Hochwasserereignisse zu beobachten. Das Hochwasser vom August 2007 stellt ein weiteres Ereignis in dieser Reihe dar. Mit Blick auf die letzten drei Jahrzehnte – aber

Hochwasser vom August 2007 nicht einmalig

auch im historischen Rückblick – ist das Hochwasser 2007 jedoch nicht einmalig. Derartige Ereignisse können sich somit jederzeit wiederholen.

## 6.3

### Vorhersagbarkeit des Hochwassers

Aufgrund der meteorologischen Vorhersagen kann ein Ereignis wie jenes vom August 2007 wenige Tage im Voraus erkannt werden. Die Unsicherheiten hinsichtlich des zeitlichen Verlaufs der Niederschläge, der betroffenen Gebiete und der zu erwartenden Intensitäten sind im Vorfeld des Ereignisses jedoch beträchtlich. Die erste Warnung vor grösseren Niederschlagsmengen auf der Alpennordseite, Nord- und Mittelbünden und insbesondere am Alpennordhang erfolgte durch MeteoSchweiz im August 2007 rund 60 Stunden, bevor der Abfluss der Aare unterhalb des Bielersees sein Maximum erreichte. Gegenüber der Situation im August 2005 zeichnete sich somit das Ereignis im August 2007 in den meteorologischen Modellen früher ab.

Frühe Anzeichen in den meteorologischen Vorhersagen

Die mit der meteorologischen Modellierung verbundenen Unsicherheiten übertragen sich in die Abflussvorhersagen und überlagern sich mit den Unsicherheiten der hydrologischen Modellierung. Die Abflussvorhersagen lieferten im August 2007 erst rund 12 bis 24 Stunden vor dem Erreichen der Spitzenabflüsse ein einigermaßen zuverlässiges Bild der weiteren Entwicklung des Ereignisses. Die zu erwartenden Abflussspitzen sowie der Zeitpunkt ihres Eintretens liessen sich aber selbst während des Anstiegs des Hochwassers mit den verwendeten Modellen nicht exakt vorhersagen.

Späte Konkretisierung in den Abflussvorhersagen

Insgesamt wurde das Hochwasserereignis vom August 2007 in den Vorhersagen früher erkannt und sowohl hinsichtlich der Niederschläge und Abflüsse quantitativ zuverlässiger vorhergesagt als das Hochwasser 2005. Ein Grund hierfür ist, dass sich 2007 die Niederschläge auf die Voralpen und das Mittelland konzentrierten, während 2005 primär die Voralpen und somit Gebiete betroffen waren, für das sich aufgrund der topographischen Voraussetzungen die Vorhersagen generell schwieriger gestalten. Infolge der Verteilung der Niederschläge führten 2007 vor allem die Flüsse unterhalb der Alpenrandseen Hochwasser, während im August 2005 eine deutlich grössere Anzahl schwierig zu modellierender kleinerer Einzugsgebiete oberhalb der Alpenrandseen betroffen war.

Hochwasser 2007 im Vergleich zu 2005 besser vorhergesagt

Die im Vergleich zum August 2005 bessere Vorhersageleistung beim Hochwasser 2007 ist auch auf Verbesserungen im Bereich der Vorhersagen zurückzuführen, die nach 2005 eingeleitet und zwischenzeitlich umgesetzt wurden. So steht mit dem im August 2007 bereits im Testbetrieb eingesetzten und für die damaligen Vorhersagen berücksichtigten regionalen Prognosemodell COSMO-2 der MeteoSchweiz heute ein numerisches Modell zur Verfügung, das über eine hohe Auflösung verfügt und damit den topographischen Besonderheiten des Alpenraums besser gerecht wird. Von diesen Verbesserungen profitiert auch die nachgelagerte Abflussvorhersage. Hilfreich für die Beurteilung haben sich 2007 auch die probabilistischen Meteo- und Abflussvorhersagen (Ensemble-Vorhersagen) erwiesen, mit welchen sich Unsicherheiten quantifizieren lassen. Im Bereich der Abflussvorhersage ist im Umgang mit diesen neuen Instrumenten jedoch noch mehr Erfahrung notwendig.

Weiterentwicklungen im Bereich der Vorhersagen

## 6.4 Konsequenzen für den Umgang mit Vorhersagen und Warnungen

Erste Signale in den meteorologischen Vorhersagemodellen sind noch mit grossen Unsicherheiten behaftet. Sie rechtfertigen deshalb die Auslösung aufwändiger Interventionsmassnahmen in der Regel noch nicht, eignen sich aber für Warnungen und somit als «Weckruf».

Warnung bei frühen Anzeichen in den Vorhersagen

Ausgehend von einer permanenten Interpretation und Beurteilung der Messdaten und Vorhersageergebnisse müssen frühe Signale aber konsequent genutzt werden, um innerhalb der Fach-, Führungs- und Interventionskräfte die Bereitschaft zu erhöhen, das heisst auf allen Stufen die Verbindungen bzw. die Erreichbarkeit sicherzustellen sowie – in Ergänzung zu den Vorhersagen – die Beobachtung und Lagebeurteilung vor Ort aufzunehmen.

Eine frühzeitige Reaktion aufgrund erster Signale in den Vorhersagemodellen ist dort sinnvoll, wo eingeleitete Massnahmen im Fall von Abweichungen zwischen Vorhersage und Realität mit geringen Auswirkungen und begrenzten Kostenfolgen verbunden sind. Ein Beispiel hierfür ist die als Ergänzung zum bestehenden Regulierreglement der Jurarandseen eingeführte Prognoseregulierung.

Für die Auslösung organisatorischer Massnahmen (beispielsweise mobile Hochwasserschutzmassnahmen an Fliessgewässern und Seen) bedarf es zusätzlicher Präzisierungen durch Abflussvorhersagen und Beobachtungen. Zuverlässige Abflussvorhersagen benötigen Messdaten sowie quantitative Vorhersagen hinsichtlich der zu erwartenden Niederschläge (und weiterer meteorologischer Parameter). Die Analyse der Hochwasser von 2005 (Rotach et al. 2007) und von 2007 zeigt, dass eine Präzisierung hinsichtlich der betroffenen Gewässer und der zu erwartenden Intensitäten erst im unmittelbaren Vorfeld des Ereignisses möglich ist.

Auslösung von Massnahmen aufgrund weiterer Präzisierungen

Die begrenzten Vorwarnzeiten bedingen eine Minimierung der Reaktionszeiten durch eine umfassende und aktuelle Notfall- und Einsatzplanung, Sicherstellung der personellen und materiellen Bereitschaft der Einsatzkräfte und der Bevölkerung sowie eingübte Abläufe. Voraussetzung für die zeitgerechte Intervention ist zudem ein einwandfreies Funktionieren der Warn- und Alarmierungskette, welche auch die regionale Interpretation der Vorhersagen sowie deren Präzisierung aufgrund lokaler Beobachtungen umfasst. Dies wiederum setzt die Verfügbarkeit umfassender Informationen zur aktuellen Gefahrensituation sowie entsprechendes Fachwissen vor Ort für deren Interpretation und Beurteilung voraus.

Umfassende Informationen und Fachwissen vor Ort

Vorhersagen müssen von Fachdiensten bzw. Naturgefahrenfachleuten durch Beobachtungen und Erfahrungen ergänzt werden. Daraus resultiert eine Beurteilung der Lage sowie deren Entwicklung im Fachbereich. Diese dient anschliessend der Führung als Entscheidungsgrundlage. Um im Ereignisfall die permanente Beratung der Führungsorgane sicherzustellen, müssen deshalb auf allen Stufen Fachdienste bzw. Naturgefahrenfachleute zur Verfügung stehen und in die Führungsorgane integriert werden.

Vernetzung von Fach- und Führungskräften auf allen Stufen

Die Verantwortlichkeiten und die Fachkompetenz des Bundes für die Warnung sowie die Information und Beratung vor, während und nach Naturereignissen sind auf verschiedene Stellen verteilt. So leisten beispielsweise bei Hochwasser die MeteoSchweiz, das Bundesamt für Umwelt (BAFU) und – falls zusätzlich Schneeschmelze eine Rolle spielt – das WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) Beiträge. Diese verteilte Struktur stösst bei grossen und bereichsübergreifenden Naturereignissen an Grenzen. So fehlte bisher eine fachstellenübergreifende Struktur zur gemeinsamen integrierten Beurteilung der Lage und der zu erwartenden Lageentwicklung durch diese nationalen Fachstellen, deren Vorhersagen aufeinander aufbauen.

Vernetzung der Fachkompetenzen auf Stufe Bund

## 6.5 Verbesserung des Hochwasserschutzes im System der Jurarandgewässer

Bezüglich der Regulierung der Jurarandgewässer bei Hochwasser werden im Rahmen der Ereignisanalyse mögliche Wege zur Ausschöpfung des vorhandenen Optimierungspotenzials aufgezeigt. Es kann allerdings nicht das Ziel einer Ereignisanalyse sein, ein Projekt oder gar ein neues Reglement zur Regulierung der Jurarandgewässer zu erarbeiten.

Optimierungspotenzial aufzeigen und Bestehendes ergänzen

Das Hauptziel der zweiten Juragewässerkorrektur war der Hochwasserschutz. Die Regulierung der Jurarandseen muss aber auch andere Nutzungen sowie ökologische Randbedingungen berücksichtigen. Das seit 1983 angewandte Reglement versucht, diesen unterschiedlichen Ansprüchen Rechnung zu tragen. Die im Rahmen der Ereignisanalyse vorgeschlagenen Massnahmen wurden daher als Ergänzung des Bestehenden konzipiert, mit dem Ziel, Abweichungen von der bisherigen Regulierung möglichst gering zu halten.

Mit der im Rahmen der Ereignisanalyse erarbeiteten und im Herbst 2008 operationell umgesetzten Prognoseregulierung lassen sich bei Hochwasser die Höchststände der Jurarandseen wirkungsvoll mindern. Ist aufgrund der vorhergesagten Zuflüsse ein übermässiger Anstieg der Seestände zu erwarten, wird der Ausfluss beim Wehr Port frühzeitig vergrössert, dadurch zusätzliches Rückhaltevolumen geschaffen, wodurch eine Minderung der Seehöchststände resultiert. Die Prognoseregulierung ergänzt die bisherigen Reguliervorschriften. Die Elemente und Vorteile des Reglements bleiben erhalten; die Verbesserungen konzentrieren sich auf das Vorfeld potenzieller Ereignisse. Die Prognoseregulierung ist wenig anfällig auf Unsicherheiten in der Vorhersage, und das System der Jurarandseen verhält sich selbst bei Fehlprognosen «robust». Im Fall einer irrtümlich eingeleiteten Vorabsenkung stellt sich der ursprüngliche Seestand innerhalb weniger Tage wieder ein. Wird ein Ereignis nicht vorhergesagt und findet deshalb keine Vorabsenkung statt, so entspricht dies dem Zustand ohne Prognoseregulierung. Es resultiert in diesem Fall also keine Verschlechterung der bisherigen Situation.

Optimierung der Hochwasserregulierung durch Einbezug von Vorhersagen

Die Wirksamkeit einer Erweiterung des Zihlkanals oder einer Erhöhung des maximal zulässigen Ausflusses aus dem Bielersee konnte im Rahmen der Ereignisanalyse im Grundsatz aufgezeigt werden. Diese weitergehenden Massnahmen bedürfen jedoch einer eingehenden technischen Prüfung und müssen hinsichtlich ihrer Auswirkungen sowie bezüglich Kosten und Nutzen in Folgeprojekten vertieft geprüft werden.

Vertiefte Prüfung weiterer Massnahmen

Rund 25 Jahre nach der Einführung des inzwischen mit der Prognoseregulierung ergänzten Regulierreglements ist eine grundsätzliche Überprüfung der Regulierung angezeigt. Dabei sind Randbedingungen, die im Rahmen der vorliegenden Analyse als gegeben betrachtet wurden, wie beispielsweise die Hoch- und Niedrigwassergrenzen, kritisch zu hinterfragen oder auch der Ersatz des starren Linienreglements durch ein dem Stand der Technik entsprechendes Reglerkonzept zu prüfen.

## 6.6 Ganzheitliches Hochwassermanagement unter Einbezug der regulierten Seen

Im Rahmen der Ereignisanalyse wird aufgezeigt, mit welchen Massnahmen sich die Hochwasserregulierung der Jurarandgewässer verbessern lässt. Einerseits gilt es nun, diese Erkenntnisse auf andere regulierte Seen zu übertragen. Andererseits sind die Jurarandseen Teil eines übergeordneten Systems. Die Erfahrungen im Zusammenhang mit der Optimierung ihrer Hochwasserregulierung sind deshalb im Sinne eines umfassenden Hochwassermanagements unter Einbezug der Jurarandseen, des Vierwaldstättersees und des Zürichsees weiterzuentwickeln. Ziel eines solchen Hochwassermanagements ist die Minimierung der Schäden im Gesamtsystem.

Minimierung der Schäden im Gesamtsystem

Für ein Hochwassermanagement im Gesamtsystem der Aare sind Entscheidungsgrundlagen, Instrumente und organisatorische Vorkehrungen notwendig. Dazu gehören die Kenntnis der Schadenpotenziale an den Seen und entlang der unterliegenden Flüsse sowie Modelle zur Simulation der Auswirkungen unterschiedlicher Regulierstrategien. Zusätzlich müssen für den Ereignisfall Absprachen unter den zuständigen Fachstellen der direkt involvierten Kantone und des Bundes institutionalisiert werden. Diese Absprachen dienen der gemeinsamen Lagebeurteilung und sind die Grundlage für Entscheide. Für die Hochwasserregulierung der Jurarandgewässer wurden solche Absprachen als Sofortmassnahmen im Nachgang zum Hochwasser 2007 etabliert.

Grundlagen, Instrumente und organisatorische Voraussetzungen

## 6.7 Massnahmen

Nachfolgend werden zunächst die aufgrund der Lehren aus der Analyse des Hochwassers 2007 als erforderlich identifizierten Massnahmen aufgelistet. Anschliessend werden die eingeleiteten oder bereits umgesetzten Massnahmen präsentiert. Ausgehend davon ergeben sich die noch zu ergreifenden Massnahmen. Dabei wird jeweils zwischen generellen Massnahmen und solchen, die spezifisch das System der Jurarandgewässer betreffen, unterschieden.

### 6.7.1 Erforderliche Massnahmen

Aufgrund der Erkenntnisse aus der Analyse des Hochwassers 2007 sind in folgenden Bereichen generelle Massnahmen erforderlich:

- > Zentrale und zeitgerechte Bereitstellung aller zur Beurteilung der aktuellen Gefahrensituation relevanten Informationen (wie z. B. Messdaten, Vorhersagen, Lagebulletins, Warnungen, Beobachtungen).
- > Konsequente Weiterführung der hochwassersicheren Ausgestaltung der für die Lagebeurteilung und die Vorhersage zentralen Abflussmessstationen.
- > Ganzheitliche und gemeinsame Beurteilung der Lage und deren Entwicklung bei bereichsübergreifenden Gefahrensituationen durch die Fachstellen des Bundes und Sicherstellung einer koordinierten Information und Beratung im Ereignisfall.
- > Aufbau des Fachwissens auf lokaler bzw. regionaler Ebene, um basierend auf Vorhersagen und Beobachtungen vor Ort die Führungs- und Einsatzkräfte bei der Lagebeurteilung und Entschlussfassung zu unterstützen.
- > Ausarbeitung und Umsetzung umfassender Notfallplanungen zur Begrenzung der verbleibenden Risiken.
- > Prüfung des Einbezugs von Abflussvorhersagen zur Hochwasserregulierung weiterer regulierter Seen.
- > Bereitstellung von Grundlagen und Instrumenten sowie Schaffung der organisatorischen Voraussetzungen für ein umfassendes Hochwassermanagement unter Einbezug der regulierten Alpenrandseen.

Im System der Jurarandgewässer gilt es einerseits, mit der Prognoseregulierung praktische Erfahrungen zu sammeln, und andererseits, die Massnahmen zur weitergehenden Optimierung der Hochwasserregulierung im Rahmen der oben genannten Folgeprojekte zu prüfen.

### 6.7.2 Eingeleitete Massnahmen

Auf der Basis des Bundesratsbeschlusses vom 30. Mai 2007 zur Optimierung von Warnung und Alarmierung bei Naturgefahren (OWARNA) haben MeteoSchweiz, die Eidg. Forschungsanstalt WSL und das BAFU die Entwicklung einer gemeinsamen Informationsplattform Naturgefahren GIN eingeleitet. Aufgrund des Ereignisses vom August 2007 wurde die Entwicklung beschleunigt, die Plattform befindet sich derzeit im Testbetrieb. Dabei wird aufgrund der Erkenntnisse aus der Analyse des Hochwassers 2007 insbesondere auch den Bedürfnissen der Seeregulierungen Rechnung getragen. Ab dem Frühling 2010 steht die Plattform den Fachdiensten der Kantone, nach ihrem weiteren Ausbau dann den regionalen bzw. lokalen Fachspezialisten und später auch der Öffentlichkeit zur Verfügung.

Zeitgerechte Bereitstellung  
entscheidungsrelevanter  
Informationen

Zur Verbesserung der Koordination beschlossen die Direktoren der Fachstellen des Bundes<sup>11</sup>, die im Bereich Warnung, Alarmierung und Intervention bei Naturgefahren tätig sind, im Herbst 2008 die Schaffung des Lenkungsausschusses Intervention Naturgefahren (LAINAT). Dieser erarbeitete auf Stufe Bund ein Konzept für die gemeinsame Interpretation der Vorhersagen und für eine koordinierte Lagebeurteilung bei grossen Naturereignissen. Hierfür wird 2010 ein Fachstab Naturgefahren geschaffen, welcher die Fachstellen des Bundes im Ereignisfall vereint.

Fachstab Naturgefahren  
für Gesamtbeurteilung  
auf Stufe Bund

Auf regionaler und lokaler Ebene muss eine weitergehende Interpretation und Präzisierung der überregionalen Informationen erfolgen. Dabei sind lokale Erfahrungen sowie aktuelle Beobachtungen vor Ort zu integrieren. Auf lokaler bzw. regionaler Stufe müssen hierzu entsprechende Fachkräfte rekrutiert bzw. ausgebildet werden. Unter Federführung des BAFU wird derzeit eine Ausbildung für lokale Naturgefahrenberater vorbereitet. Diese sollen regionale bzw. lokale Führungsstäbe bei der Notfallplanung und bei der Bewältigung von Ereignissen unterstützen. Vorgesehen ist eine Ausbildung im Kaskadensystem, bei dem durch den Bund kantonale Ausbildungskoordinatoren ausgebildet und Ausbildungsmaterialien bereitgestellt werden.

Aufbau des Fachwissens vor Ort

Die im Herbst 2008 aufgrund der Erkenntnisse aus der Analyse des Hochwassers 2007 für die Jurarandgewässer eingeführte Prognoseregulierung basiert auf dem Einbezug der Abflussvorhersagen. Das Beispiel zeigt das grosse Potenzial dieser Art von Massnahmen, die sich – im Vergleich zu baulichen Massnahmen – rasch und kostengünstig umsetzen lassen. Das Potenzial des Einbezugs von Abflussvorhersagen für die Hochwasserregulierung weiterer grösserer regulierter Alpenrandseen ist ebenfalls zu prüfen.

Einbezug von Vorhersagen  
zur Hochwasserregulierung  
regulierter Alpenrandseen

Aufgrund der Erfahrungen aus den Hochwasserereignissen von 2005 und 2007 hat der Kanton Zürich eine Überprüfung der Regulierung des Zürichsees eingeleitet. Im Rahmen des für die Sihl erarbeiteten Vorhersage- und Warnsystems wird auch der Sihlsee zur Minderung der Hochwasserabflüsse der Sihl mit einbezogen. Damit eröffnen sich neue Möglichkeiten für das Hochwassermanagement von Sihl und Limmat, welche vertieft geprüft werden. Während im August 2007 der Zürichseeausfluss noch aufgrund einer ad hoc zwischen den Kantonen Zürich, Aargau und dem BAFU durchgeführten Absprache erfolgte, werden auch hier die Voraussetzungen für institutionalisierte Absprachen zwischen den Fachstellen der involvierten und betroffenen Kantone und des Bundes geschaffen.

Mit Blick auf ein umfassendes Hochwassermanagement unter Einbezug der regulierten Alpenrandseen im Einzugsgebiet der Aare wurde 2009 beim BAFU das Projekt «Modell Seeregulierungen» lanciert. Im Rahmen des Projekts wird ein hydrodynamisches Simulationsmodell erstellt und somit ein Instrument geschaffen, um mittels Szenarienrechnungen Entscheidungsgrundlagen bereitzustellen und die Regulierung der Seen bei Hochwasser aufeinander abzustimmen.

Projekt  
«Modell Seeregulierungen»  
des BAFU

<sup>11</sup> Bundesamt für Klimatologie und Meteorologie MeteoSchweiz, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bundesamt für Bevölkerungsschutz BABS mit der Nationalen Alarmzentrale NAZ, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL mit dem Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Schweizerischer Erdbebendienst SED der ETH Zürich, Bundeskanzlei.

Im Rahmen der weitergehenden Optimierung der Hochwasserregulierung der Jura- randgewässer wurden verschiedene Folgeprojekte lanciert.

Weitergehende Optimierung  
der Hochwasserregulierung  
der Jura- randgewässer

In Zusammenarbeit mit MeteoSchweiz wird die Früherkennung und Vorhersage der Hochwasser aus dem Einzugsgebiet der Emme verbessert. Seit Sommer 2008 ergeht eine Warnung an den Kanton Bern und das BAFU, wenn aufgrund der beobachteten Abflüsse sowie der Niederschlagsdaten (Pluviometer und Radar) zuvor festgelegte Schwellwerte überschritten werden. In einer späteren Phase soll der Ablauf eines Hochwassers der Emme (Dauer, Form der Ganglinie, Spitze) zeitnah und zuverlässiger vorhergesagt werden können.

MeteoSchweiz hat ausserdem zwei Projekte lanciert mit dem Ziel, gesamtschweizerisch die probabilistische Radarniederschlagsvorhersage in Kürzestfrist zu verbessern sowie eine Kombination von Radar- und Pluviometerdaten für eine hoch aufgelöste Niederschlagsmessung zu etablieren. Von diesen Entwicklungen wird auch die Abflussvorhersage für die Emme bzw. das gesamte Zwischeneinzugsgebiet der Aare unterhalb des Bielersees profitieren.

In einem ersten Treffen mit den Betreibern der Aarekraftwerke wurden die Möglichkeiten sowie das weitere Vorgehen bezüglich weiterer Untersuchungen des Hochwasserabflusses in der Aare unterhalb des Bielersees definiert. Derzeit werden die Grundlagen für numerische Simulationsrechnungen unter besonderer Berücksichtigung des Kraftwerksbetriebs zusammengetragen.

Die Möglichkeiten einer Vergrösserung der Durchflusskapazität des Zihlkanals werden derzeit im Rahmen eines Folgeprojekts unter Federführung der Aufsichtskommission der zweiten Juragewässerkorrektion vertieft geprüft.

Parallel dazu erheben bzw. vervollständigen die Juragewässerkantone im Rahmen der Erstellung ihrer Gefahrenkarten die Schadenpotenziale an den Jura- randseen und entlang der unterliegenden Aare als wichtige Grundlage für ein umfassendes Hochwasser- management.

### 6.7.3 Weitere zu ergreifende Massnahmen

Durch den Bund und die durch das Hochwasser 2007 betroffenen Kantone wurden die erforderlichen Massnahmen zu wesentlichen Teilen eingeleitet. Es gilt, deren Umsetzung zügig voranzutreiben und die noch notwendigen Massnahmen auf allen Stufen an die Hand zu nehmen. Diese umfassen:

- > die Rekrutierung und Ausbildung der lokalen Naturgefahrenberater durch die Kantone auf der Basis der durch den Bund bereitgestellten Ausbildungsgrundlagen;
- > die Vernetzung der Fachdienste über alle Stufen und die konsequente Integration der Fachdienste in die Führungsstrukturen auf allen Stufen;
- > die Ausarbeitung und Umsetzung umfassender Notfallplanungen zur Begrenzung der verbleibenden Risiken;

- > die Entwicklung eines umfassenden Hochwassermanagements unter Einbezug der regulierten Alpenrandseen;
- > die grundlegende Überprüfung der Regulierung der Jurarandgewässer.

## 6.8 Ausblick

Das Hochwasserereignis vom 8./9. August 2007 zeigt nur 2 Jahre nach dem Hochwasser 2005, dass bauliche Schutzmassnahmen und regulierte wasserbauliche Systeme wie die Jurarandgewässer bei seltenen Ereignissen überlastet werden können. Die rasche Folge von Ereignissen bestätigt zudem, dass sich seltene Ereignisse jederzeit wiederholen können.

Deshalb sind – nicht nur an den Jurarandseen und der unterliegenden Aare, sondern schweizweit – eine umfassende Notfallplanung, die Sicherstellung der zeitgerechten Warnung der Führungs- und Interventionskräfte und die rechtzeitige Alarmierung der Bevölkerung unerlässliche Voraussetzungen zur Begrenzung der Schäden in Überlastsituationen. Das Potenzial von Vorhersagen und organisatorischen Massnahmen zur Minderung der verbleibenden Risiken ist in allen Gewässersystemen konsequent auszuschöpfen.

### Literatur

Bezzola G.R., Hegg C. 2008: Fazit. In: Bezzola G.R., Hegg C. (Ed.) 2008: Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahregrundlagen. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0825: 387–401.

Rotach M., Albisser P., Duding O., Eckert P., Hächler P., Schubiger F., Walser A., Vogt S., Hegg C. 2007: Niederschlags- und Abflussvorhersage. In: Bezzola G.R., Hegg C. (Ed.): Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0707: 107–126.

Umgang mit den verbleibenden Risiken



---

## > Anhang

### A1 **Neue Produkte und Instrumente aus dem Projekt MAP D-PHASE**

Das internationale Projekt D-PHASE (Demonstration of Probabilistic Hydrological and Atmospheric Simulation of flood Events in the Alpine region) hat sich zum Ziel gesetzt, Führungsstäben, Fachstellen für Naturgefahren und Anwendern aus der Wirtschaft die neuesten Erkenntnisse von Wissenschaft und Technik – basierend vor allem auf den Resultaten des internationalen Forschungsprogramms «Mesoscale Alpine Programme» (MAP, 1995, 2006) – für die Vorhersage von Starkniederschlägen und Überschwemmungen im Alpenraum in Echtzeit zur Verfügung zu stellen (Rotach et al. 2009 und Arpagaus et al. 2009).

#### A1-1 **Internetplattform mit Gefahreninformation in Echtzeit**


Unter der Federführung von MeteoSchweiz und mit Unterstützung von WSL, ETHZ und BAFU sowie zahlreicher weiterer Institutionen aus dem Alpenraum und darüber hinaus wurde eine experimentelle<sup>12</sup> Internetplattform entwickelt, auf der sich die Anwender des gesamten Alpenraums während einer Demonstrationsperiode von sechs Monaten (Juni bis November 2007) über aktuelle Wetter- und Hochwasservorhersagen informieren konnten (Rotach et al. 2009 und Arpagaus et al. 2009). Auf der Plattform wird die aktuelle Gefahrensituation, wie sie von einer Vielzahl von atmosphärischen und hydrologischen Modellen vorhergesagt wird, in einfacher Art und Weise und mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad, dargestellt. Neben einer Übersichtskarte für den ganzen Alpenraum werden für 6 Alpenregionen Gefahreninformationskarten in Echtzeit hergestellt, die mit einer Tabelle mit den Gefahreninformationen aus allen individuellen Modellen ergänzt ist (Abb. A1.1). Damit lässt sich schnell eruieren, ob in einer Region für die nächsten 5 Tage Gefahreninformationen existieren, und wie konsistent diese von verschiedenen Modellen vorhergesagt werden. Für weitere Details (zeitlicher Verlauf der Gefahreninformationen) stehen für jedes Teilgebiet und jede Abflussstation weitere Darstellungen zur Verfügung.

---

<sup>12</sup> D-PHASE stellt nur *experimentelle* Gefahreninformationen zur Verfügung. Die operationellen Warnungen werden nach wie vor über die gewohnten Kanäle und durch die offiziellen Warn-Institutionen verbreitet.

Abb. A1.1 > D-PHASE Plattform, wie sie sich am 8.8.2007 um 14:00 Lokalzeit für die Region «Central Alps» präsentiert hat (level 2)

Höchste Gefahrenstufe (rot) für zahlreiche Gebiete der Schweiz (Karte links), konsistent vorhergesagt durch eine Vielzahl von Modellen (Tabelle rechts: Gefahrenstufe einzelner Modelle (horizontal) für alle in der Karte dargestellten Gebiete (vertikal)).


D-PHASE  
 a WWRP Forecast Demonstration Project

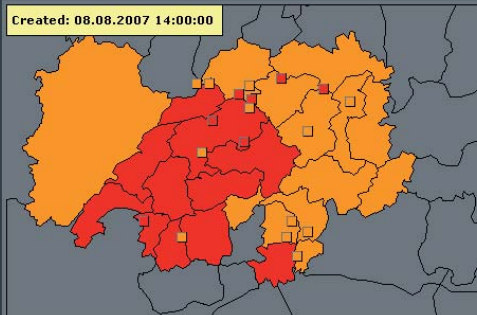
[Start](#) | [About D-PHASE](#) | [D-PHASE alerts](#) | [Terms and Conditions](#) | [Trouble shooting](#) | [Intranet](#)
Language: english

» Level 1 | Level 2

Disclaimer: D-PHASE generates experimental alerts only. - For official warnings, please consult [www.meteoalarm.eu](http://www.meteoalarm.eu).

Region: Central Alps
Atmospheric model alerts

Created: 08.08.2007 14:00:00



Day(s) of interest:  
 today ▼

Accumulation time:  
 max ▼

Model products:  
 Browser: index ▼ go

Nowcasting products:  
 MeteoSwiss Nowcasting Tools ▼ go

Monitoring products:  
 VERA (Vienna Enhanced Resolution Analysis) ▼ go

Feedback form ...  
 ... for meteorological forecasters ▼ go

- no data
- no alert
- alert for an event with a return period of at least 60 days
- alert for an event with a return period of at least 180 days
- alert for an event with a return period of at least 10 years

	CLEFS	LAMERSAT	MPEPS	TERS	COSMOGR2	COSMOGR7	LAM17	LMK	LME	AROME	ALADR	ALADR1	CMCGRM	ISACMOL	ISACMOL2	ARALMOL	QBOLM33	MMS_375	MMS_15	MMS_60
Franche Compté																				
Léman																				
Jura central et ouest																				
Alpes Fribourgeois																				
Chablais																				
Bas Valais																				
Oberwallis																				
Goms																				
Berner Oberland																				
Zentraler Alpennordhang																				
Linth und Thur																				
Surselva und Mittelbünden																				
Engadin																				
Alpenrhein																				
Prättigau und Voralpen																				
Östlicher Jura																				
Hochrhein																				
Zentrales Mittelland																				
Östliches Mittelland																				
Bodensee																				
Maggia																				
Ticino																				
Lago Maggiore																				
Lago di Lugano																				

[Start](#) | [About D-PHASE](#) | [D-PHASE alerts](#) | [Terms and Conditions](#) | [Trouble Shooting](#)
Language: EN

**A1-2 Neue Produkte**

Die neue Informationsplattform (Abfluss und Niederschlag) mit ihrem einfach verständlichen Internetauftritt macht den Endbenutzern zahlreiche neue Entwicklungen und Produkte zugänglich, unter anderem:

- > Gekoppelte Vorhersagesysteme, die in Echtzeit numerische Niederschlagsvorhersagen mit der Abflussvorhersage verbinden (Zappa et al. 2008). – Für die Schweiz sind neben 15 weiteren Abflussstationen insbesondere Abflussvorhersagen für die Aare in Murgenthal und Brugg, die Reuss in Mellingen und die Limmat in Baden erhältlich.
- > Hochaufgelöste Modelle der neuesten Generation, wie sie momentan an verschiedensten Wetterdiensten in Europa und Amerika entwickelt werden. Einheitliche Darstellung, Höhenschnitte (für nähere Details siehe Arpagaus et al. 2009).
- > Wahrscheinlichkeitsvorhersagen für das Eintreffen eines bestimmten Ereignisses, welche nicht nur die erwarteten Niederschlags- und Abflussmengen prognostizieren, sondern im gleichen Schritt auch die Zuverlässigkeit (resp. die Unsicherheit) der gemachten Vorhersage angeben. Neben zahlreichen probabilistischen atmosphärischen Modellen sind insbesondere auch für die Abflussstationen in der Schweiz probabilistische Vorhersagen erhältlich.
- > Qualitativ verbesserte und neue Radarprodukte, die das Verfolgen und Prognostizieren einer Gewitterentwicklung wesentlich vereinfachen. – Zugang zu den neuen Nowcasting-Radarprodukten der MeteoSchweiz wie «Precipitation amount» oder «Thunderstorm cell ranking» wurden von den Benutzern sehr gut aufgenommen.

**A1-3 Erfahrungen während des Hochwasserereignisses 8.–9.8.2007**

Das Hochwasserereignis vom 8.–9. August 2007 war das mit Abstand grösste Ereignis während der D-PHASE Operations Period (DOP, Juni-November 2007) im ganzen Alpenraum. Da das Ereignis relativ früh und insbesondere ohne ein kleine(re)s vorangehendes «Lern-Ereignis» innerhalb der DOP auftrat, waren vermutlich noch nicht alle Benutzer mit dem System vertraut. Trotzdem lassen sich aus den Rückmeldungen folgende Schlüsse ziehen:

- > Die gekoppelten hydrologischen Vorhersagen haben bereits am Montag (6. August) erste Hinweise auf ein grosses Ereignis gegeben, haben von Modell zu Modell und von Vorhersage zu Vorhersage allerdings stark variiert. Am Dienstag (7. August), spätestens aber am Mittwoch Morgen (8. August, ca. 11:00) wurde das Ereignis von den Modellen erfasst. – Die probabilistischen Modelle lieferten keine perfekten Vorhersagen, haben aber die Vorhersageunsicherheit (und damit die Möglichkeit für ein grosses Ereignis) bereits in den ersten für diese Tage verfügbaren Modellberechnungen eindrücklich demonstriert. Die mit dem hochaufgelösten Modell COSMO-2 gekoppelte Abflussvorhersage des BAFU für die Aare in Murgenthal vom 8. August (ca. 11:00) war ausserordentlich gut.

- > Der Echtzeit-Zugriff auf die umfangreichen Radarprodukte ist das wichtigste Werkzeug für die Beurteilung der aktuellen Wetterlage und die sehr lokale Kurzzeitfrist-Vorhersage sowie die darauf basierenden Interventionsentscheide.
- > Neben der Qualität der Gefahreninformationen und Vorhersagen sowie der weiteren Produkte auf der D-PHASE Internetplattform schätz(t)en die Einsatzorganisationen der Kantone die Plattform aus folgenden Gründen sehr:
  - Orientierung über langfristige Prognose und momentanes Wettergeschehen, standort-unabhängig, jederzeit und immer aktuell.
  - Effizientere Rückfragen bei den Fachdiensten (MeteoSchweiz, BAFU etc.) dank umfangreichem Vorwissen bereits vor der Kontaktaufnahme mit den Experten.
  - Bessere (da vollständigere) Entscheidungsgrundlage.

Im operationellen Wetterdienst wurden für die Aufbereitung der Prognosen die 4 in der zuvor durchgeführten D-PHASE Schulung definierten Modelle COSMO-2 und -7, COSMO-LEPS sowie SRNWP-PEPS (Short Range Numerical Weather Prediction – Poor Man’s Ensemble Prediction System) am häufigsten verwendet. Vereinzelt wurden die nur während D-PHASE zur Verfügung stehenden Modellsysteme MM5-15 und COSMO-I2 verwendet (für nähere Informationen zu den in D-PHASE verwendeten Modellen sei auf Arpagaus et al. 2009 verwiesen). Eine detaillierte Zusammenstellung der vom 4. bis 8. August verwendeten Modelle, rekonstruiert auf der Basis der täglichen Beurteilungsprotokolle der Prognostiker, ist in Tab. A1.1 gezeigt. Es sei darauf hingewiesen, dass die Schichtprognostiker in erster Linie bewährte und ihnen vertraute Modelle bevorzugten gegenüber den in D-PHASE verwendeten Modellen. Dies unter anderem, weil sich die Mehrheit der Prognostiker in kritischen Situationen nicht durch Daten mit experimentellem Charakter verunsichern lassen wollen, zum anderen weil verschiedene Visualisierungs-Aspekte nicht der Gewohnheit entsprachen und die D-PHASE Plattform für operationelle Zwecke nur sehr langsam funktionierte. Daher dürften die bereits vor D-PHASE im Prognosedienst verwendeten Modell-Unterlagen die Basis für die Warnungen gelegt haben. Die neu zur Verfügung stehenden Modelle und Visualisierungsmöglichkeiten wurden ergänzend dazu genutzt.

Es wurden täglich jeweils ein Prognostiker in Zürich, Genf und Locarno spezifisch damit beauftragt, die D-PHASE Produkte zu benutzen und darüber Feedback zu geben. Den übrigen Schichtprognostikern war es grundsätzlich frei gestellt, die zusätzlichen Daten für die Analysen und Warnungen in Betracht zu ziehen. Der für D-PHASE verantwortliche Prognostiker musste im Minimum die der MeteoSchweiz standardmässig zur Verfügung stehenden Modelle COSMO-2 und -7, COSMO-LEPS und PEPS, sowie die automatischen Alarmer auf der D-PHASE Visualisierungsplattform untersuchen, beurteilen und ein Feedback zum Gesamtsystem sowie zu den einzelnen Modellen auf einem Online-Formular geben (Beurteilungsprotokoll). Wie der Prognostiker methodisch diese Daten schlussendlich in der Entscheidungsfindung verwendet hat, blieb ihm freigestellt, und ist nachträglich nur schwer zu eruieren. Sicher ist, dass die D-PHASE Daten von Person zu Person sehr unterschiedlich intensiv genutzt und berücksichtigt wurden. In drei der oben erwähnten täglichen Evaluationsprotokollen wurde von den Prognostikern explizit darauf hingewiesen, dass ihnen vertraute Modelle wie zum Beispiel die globalen ECMWF, GFS und GME bei der Warnung berücksichtigt wurden, obwohl sie nicht Teil von D-PHASE waren.

**Tab. A1.1 > In den Beurteilungsprotokollen aufgeführte Modelle und Häufigkeit der Erwähnungen pro Tag und insgesamt; die grau hinterlegten Modelle waren Teil von MAP D-PHASE**

Modell	04.08.2007	05.08.2007	06.08.2007	07.08.2007	08.08.2007	insgesamt
COSMO-2	1	1		2	2	6
COSMO-7	1	2	2	2	2	9
COSMO-LEPS	1	2	2	2	2	9
PEPS				1	1	2
MM5-15				1		1
COSMO-12			1			1
ECMWF	1			1	1	3
GFS	1			1		2
GME	1			1		2

**Literatur**

Arpagaus M., Rotach M.W., Ambrosetti P., Ament F., Appenzeller C., Bauer H.-S., Behrendt A., Bouttier F., Buzzi A., Corazza M., Davolio S., Denhard M., Dorninger M., Fontannaz L., Frick J., Fundel F., Germann U., Gorgas T., Grossi G., Hegg C., Hering A., Jaun S., Keil C., Liniger M.A., Marsigli C., McTaggart-Cowan R., Montani A., Mylne K., Panziera L., Ranzi R., Richard E., Rossa A., Santos-Muñoz D., Schär C., Seity Y., Staudinger M., Stoll M., Vogt S., Volkert H., Walser A., Wang Y., Werhahn J., Wulfmeyer V., Wunram C., Zappa M. 2009: MAP D-PHASE: Demonstrating forecast capabilities for flood events in the Alpine region. Veröffentlichungen der MeteoSchweiz, 78: 75 S., erhältlich unter [www.meteoschweiz.admin.ch](http://www.meteoschweiz.admin.ch) >Forschung >Publikationen >Publikationsreihen >Veröffentlichungen der MeteoSchweiz.

Rotach M.W., Ambrosetti P., Ament F., Appenzeller C., Arpagaus M., Bauer H.-S., Behrendt A., Bouttier F., Buzzi A., Corazza M., Davolio S., Denhard M., Dorninger M., Fontannaz L., Frick J., Fundel F., Germann U., Gorgas T., Hegg C., Hering A., Keil C., Liniger M.A., Marsigli C., McTaggart-Cowan R., Montani A., Mylne K., Ranzi R., Richard E., Rossa A., Santos-Muñoz D., Schär C., Seity Y., Staudinger M., Stoll M., Volkert H., Walser A., Wang Y., Werhahn J., Wulfmeyer V., Zappa M. 2009: MAP D-PHASE: Real-time Demonstration of Weather Forecast Quality in the Alpine Region. Bulletin Amer Meteorol Soc., Volume 90, Issue 9: 1321–1336.

Zappa M., Rotach M.W., Arpagaus M., Dorninger M., Hegg C., Montani A., Ranzi R., Ament F., Germann U., Grossi G., Jaun S., Rossa A., Vogt S., Walser A., Werhan J., Wunram C. 2008: MAP D-PHASE: real-time demonstration of hydrological ensemble prediction systems, Atmos Sci Let, DOI: 10.1002/asl.:183 S.



## A2 Niederschlagsdatensätze der MeteoSchweiz

Begleitend zu den vorliegenden meteorologischen und klimatologischen Analysen des Hochwassers im August 2007 wurden ein gegitterter Niederschlags- und ein Radardatensatz aufbereitet. Die Herleitung dieser Datensätze ist weitgehend analog zu denjenigen für die Ereignisanalyse 2005. Dieses Kapitel rekapituliert die wichtigsten Eigenschaften der Datensätze. Bei ihrer praktischen Anwendung sollte unbedingt die Interpretationshilfe (Frei und Germann 2007) und die detaillierte Gegenüberstellung im zweiten Teil der Ereignisanalyse 2005 (Frei et al. 2008) berücksichtigt werden.

### A2-1 Niederschlagsanalysen aus Stationsdaten

Der aufbereitete digitale Datensatz mit täglichen Niederschlagsanalysen aus Stationsdaten hat eine räumliche Auflösung von 2 km (Schweiz-Koordinaten) und liegt für alle Tage des Augusts 2007 vor. Die berechneten Tagessummen beziehen sich jeweils auf den Zeitraum 06 – 06 UTC des Folgetags. Die Berechnung der gegitterten Analyse entspricht derjenigen für die Ereignisanalyse 2005 (Rotach et al. 2007; Meteo-Schweiz 2006). Konkret wurden 427 Stationen der MeteoSchweiz verwendet, sowie 11 Stationen des Eidgenössischen Instituts für Schnee- und Lawinenforschung SLF (IMIS Stationen). Anders als in der Analyse für August 2005 wurden nur diejenigen IMIS-Stationen berücksichtigt, welche unterhalb der Schneefallgrenze lagen. Eine kurze Einführung in die verwendeten Analyseverfahren findet sich in MeteoSchweiz (2006). Frei et al. (2008) beschreiben die quantitativen Unsicherheiten solcher Analysen.

### A2-2 Radaranalysen

Die hier verwendeten Radaranalysen umfassen eine Qualitätskontrolle der Radarmessungen, die Offline-Aneicherung der operationellen Radarniederschlagskarten an den gegitterten Pluviometerdatensatz auf der Zeitskala des gesamten Ereignisses (6.–9. August), die Akkumulation der Radarniederschlagsraten in 5-min-Auflösung über die gewünschten Perioden (1h, 3h, 6h, 12h, 24h), die Unterdrückung von restlichen Störerechos mittels für die Hydrologie entwickelter Restclutterfilter sowie das Generieren des entsprechenden Datensatzes in numerischer und grafischer Form. Die räumliche Auflösung des Datensatzes beträgt 1km. Die Vorgehensweise und die eingesetzten Methoden sind weitgehend analog zur Analyse des Hochwassers 2005, siehe Rotach et al. (2007) und MeteoSchweiz (2006). Für eine ausführliche Beschreibung der spezifisch für alpine Gebiete entwickelten Verfahren für die Radarniederschlagsmessung wird auf Joss und Lee (1995), Germann und Joss (2004) und Germann et al. (2006) verwiesen.

Der Radardatensatz umfasst vorprozessierte Bilder für direkte Verwendung in Berichten sowie die entsprechenden Daten in numerischem Format für quantitative Analysen. Die hier verwendeten Abbildungen sind ausgewählte Sequenzen aus dem Bilddatensatz und illustrieren die in den Radaranalysen enthaltene Information der räumlichen und zeitlichen Dynamik der Niederschlagssysteme.

Hochaufgelöste in Echtzeit zur Verfügung stehende quantitative Radarniederschlags-schätzungen werden bei der MeteoSchweiz seit 2003 operationell für die Überwachung sowie das Erstellen von Warnungen von Starkniederschlägen eingesetzt (Abschnitt 6 in Germann et al. 2006).

#### Literatur

Frei C., Germann U. 2007: Räumliche Niederschlagsanalysen zum Hochwasser 2005, Interpretationshilfe zu den Datensätzen von MeteoSchweiz. Version 1.0 vom 7. Sep. 2007: 8 S.  
erhältlich unter [www.meteoschweiz.admin.ch](http://www.meteoschweiz.admin.ch)  
>Forschung >Publikationen >Einzelschriften.

Frei C., Germann U., Fukutome S., Liniger M. 2008: Möglichkeiten und Grenzen der Niederschlagsanalysen zum Hochwasser 2005. In: Bezzola G.R., Hegg C. (Ed.): Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahregrundlagen. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0825: 15–32

Germann U., Joss J. 2004: Operational measurement of precipitation in mountainous terrain. In Weather radar: Principles and advanced applications, editor P Meischner, Springer Verlag: 52–77.

Germann U., Galli G., Boscacci M., Bolliger M. 2006: Radar precipitation measurement in a mountainous region. Q J R Meteorol Soc, 132: 1669–1692.

Joss J., Lee R. 1995: The application of Radar-Gauge Comparisons to Operational Precipitation Profile Corrections, J Appl Meteorol, 34: 2612–2630.

MeteoSchweiz 2006: Starkniederschlagsereignis August 2005, Arbeitsbericht MeteoSchweiz, 211: 63 S. Erhältlich unter [www.meteoschweiz.admin.ch](http://www.meteoschweiz.admin.ch)  
>Forschung >Publikationen >Publikationsreihen  
>Arbeitsberichte der MeteoSchweiz.

Rotach M., Albisser P., Duding O., Eckert P., Hachler P., Schubiger F., Walser A., Vogt S., Hegg C. 2007: Niederschlags- und Abflussvorhersage. In: Bezzola G.R., Hegg C. (Ed.): Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schaden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0707: 107–126.

---

## A3 Spitzenabflüsse und automatische Hochwasseralarme

### A3-1 Qualität der Spitzenabflussbestimmung

Tab. A3.1 listet stationsweise die Informationen über die maximale Abflussmessung (der letzten 10 Jahre), das Ausmass der nötigen Extrapolation für die Bestimmung des Spitzenabflusses vom August 2007, über die Beschaffenheit und die Stabilität des Gerinnes beim Messprofil sowie Bemerkungen zu allfälligen Besonderheiten während des Hochwassers 2007 auf.

Stationen an einem Seeausfluss sind meist geprägt von einer stabilen Sohle (kein Geschiebetrieb). Die Profile sind aber oft verkrautet (viele Nährstoffe, wenig Trübung, kleine Fliessgeschwindigkeit), was für die Abflussmessung erschwerend ist und über das Jahr zu vielen Änderungen in der Pegelstand/Abfluss-Beziehung führt. Beim Hochwasser wird dieses Kraut jedoch meist auf die Sohle gedrückt oder ausgerissen und hat somit nur wenig Einfluss auf die Abflussbestimmung.

Feste Sohlen oder Schwellen bei Messstationen sind günstig für eine zuverlässige Abflussbestimmung solange nicht erhebliche Feststoffumlagerungen während des Hochwassers die Strömungsverhältnisse verändern.

Tab. A3.1 &gt; Qualität der Spitzenabflussbestimmung für die vom Augusthochwasser 2007 betroffenen Stationen

Nr.	Stationsname	Extrapolation [%] (höchste Abflussmessung / HQ August 2007 [m³/s])	Art des Messprofils und dessen Stabilität	Bemerkungen
2416	Aabach – Hitzkirch, Richensee	50 % (4 / 6)	Seeausfluss mit Verkrautung	
2312	Aach – Salsmach, Hungerbühl	53 % (17 / 26)	Betonkanal, stabil	
2135	Aare – Bern, Schönau	0 % (531 / 524)	Sohle veränderlich	Die seit dem HW 2005 eingetretenen Auflandungen sind durch das HW 2007 wieder beseitigt worden
2019	Aare – Brienzwiler	139 % (126 / 301)	Sohle veränderlich	
2016	Aare – Brugg	57 % 884 / 1387)	Sohle veränderlich	Das Stationsgebäude wurde überflutet, was aber die Messung nicht verfälscht hat.
2029	Aare – Brügg, Aegerten	21 % (610 / 738)	Seeausfluss, stabil	
2085	Aare – Hagneck	55 % (821 / 1273)	rechtes Ufer und Sohle verändert durch Hangrutschung	Die Messung der Fliessgeschwindigkeit ist wegen zu hoher Schwebstoffführung ausgefallen
2063	Aare – Murgenthal	67 % (754 / 1262)	Sohle veränderlich	
2030	Aare – Thun	0 % (511 / 392)	Seeausfluss, stabil	
2485	Allaine – Boncourt, Frontière	56 % (46 / 72)	Betonschwelle, stabil	
2232	Allenbach – Adelboden	429 % (7 / 37)	Betonschwelle mit Ablagerungen	
2604	Biber – Biberbrugg	208 % (13 / 40)	Betonschwelle, stabil	
2266	Bibere – Kerzers	133 % (12 / 28)	Betonschwelle, stabil	
2106	Birs – Münchenstein, Hofmatt	80 % (213 / 383)	Blockschwelle, ziemlich stabil	Es hat massive Ausuferungen gegeben (Bereich Delémont bis Laufen).
2122	Birse – Moutier, La Charrue	178 % (27 / 75)	Sohle veränderlich	
2478	Birse – Soyhières, Bois du Treuil	321 % (75 / 316)	Betonschwelle, stabil	Die Aufzeichnung ist vor Erreichen des Maximums wegen Stationsüberflutung ausgefallen. Die Ganglinie wurde nach Hochwasserspuren rekonstruiert.
2447	Canal de la Broye – Sugiez	0 % (53 / 32)	Seeausfluss, stabil	
2434	Dünneren – Olten, Hammermühle	500 % (17 / 102)	Betonkanal, stabil	
2409	Emme – Eggwil, Heidbühl	72 % (103 / 177)	Betonschwelle, ziemlich stabil	
70	Emme – Emmenmatt	366 % (104 / 485)	Betonschwelle, veränderliche Anströmung	
155	Emme – Wiler, Limpachmündung	395 % (134 / 663)	Betonschwelle, ziemlich stabil	Die Station wurde geflutet was aber die Messung nicht gestört hat. Die Ausuferung in Richtung Werkkanal ist im Gesamtabfluss eingerechnet.
2481	Engelberger Aa – Buochs, Flugplatz	84 % (62 / 114)	Blockschwelle, veränderlich	Es gab eine starke Sohlenauflandung im Messprofil (massgeblich mitverursacht durch die flussabwärtsliegende Hochwasserentlastung auf den Flugplatz).
2202	Ergolz – Liestal	87 % (78 / 146)	Betonschwelle, stabil	
2415	Glatt – Rheinsfelden	69 % (61 / 103)	Betonschwelle, stabil	
2375	Grossbach – Gross, Säge	267 % (3 / 11)	Betonschwelle, ziemlich stabil	Das Spitzenhochwasser fand bereits am 20. Juni statt (geschätzter Abfluss 77 m³/s). Rückstau auf die Messstation durch Verkläuserung bei Brücke.
2276	Grosstalbach – Isenthal	283 % (6 / 23)	Betonschwelle, ziemlich stabil	
2159	Gürbe – Belp, Mülimatt	367 % (12 / 56)	Betonschwelle, stabil	
2472	Gürbe – Burgjstein, Pfandersmatt	60 % (25 / 40)	Betonschwelle, stabil	
2603	Ilfis – Langnau	125 % (113 / 254)	Betonschwelle, stabil	
2469	Kander – Hondrich	26 % (160 / 202)	Betonschwelle, stabil	
2425	Kleine Emme – Littau, Reussbühl	150 % (226 / 564)	Betonschwelle, stabil	Die Station wurde geflutet aber die Messung nicht gestört.
2487	Kleine Emme – Werthenstein, Chappelboden	113 % (164 / 350)	Betonschwelle, ziemlich stabil	
2343	Langeten – Huttwil, Häberenberg	1067 % (3 / 35)	Betonschwelle, ziemlich stabil	Das Spitzenhochwasser fand bereits am 8. Juni statt (geschätzter Abfluss 78 m³/s), Rückstau an Brückendurchlass unmittelbar oberhalb der Messstation.
2243	Limmat – Baden, Limmatpromenade	34 % (397 / 533)	Sohle ziemlich stabil	Datenübertragung wegen Modemhänger temporär unterbrochen. Die Registrierung vor Ort hat einwandfrei funktioniert.

Nr.	Stationsname	Extrapolation [%] (höchste Abflussmessung / HQ August 2007 [m³/s])	Art des Messprofils und dessen Stabilität	Bemerkungen
2099	Limmat – Zürich, Unterhard	7 % (389 / 417)	Seeausfluss, stabil	Seeausfluss
2352	Linth – Linthal, Ausgleichsbecken KLL	122 % (40 / 89)	Betonkanal mit Ablagerungen	
2125	Lorze – Frauenthal	111 % (18 / 38)	ziemlich stabil	Seeausfluss, Verkrautung
2477	Lorze – Zug, Letzi	360 % (15 / 69)	Sohle ziemlich stabil	Die Messung wurde stark gestört wegen Verstopfung der Messleitung.
2497	Luthern – Nebikon	61 % (28 / 45)	Betonschwelle, stabil	
2109	Lütschine – Gsteig	71 % (123 / 210)	Betonschwelle mit Auflandungen	
2369	Mentue – Yvonand, La Mauguettaz	28 % (46 / 59)	Sandsteingerinne, ziemlich stabil	
2386	Murg – Frauenfeld	58 % (90 / 142)	Betonschwelle, stabil	
2471	Murg – Murgenthal, Walliswil	143 % (21 / 51)	Sohle ziemlich stabil	
2126	Murg – Wängi	410 % (10 / 51)	Betonschwelle, stabil	
2018	Reuss – Mellingen	37 % (563 / 770)	Sohle ziemlich stabil	
2110	Reuss – Mühlau, Hünenberg	1 % (735 / 740)	Sohle ziemlich stabil	
2152	Reuss – Luzern, Geissmattbrücke	0 % (372 / 316)	Seeausfluss, ziemlich stabil	Rückstau durch die hochwasserführende Kleine Emme. Der Pegelstand für die Abflussbestimmung wurde korrigiert.
2289	Rhein – Basel	45 % (3320 / 4810)	Sohle ziemlich stabil	
2143	Rhein – Rekingen	40 % (1171 / 1643)	Sohle ziemlich stabil	
2091	Rhein – Rheinfelden, Wassermessstation	57 % (2623 / 4107)	Sohle ziemlich stabil	
2414	Rietholzbach – Mosnang, Rietholz	500 % (1 / 6)	Betonschwelle, stabil	
2215	Saane – Laupen	224 % (261 / 846)	Sohle veränderlich	
2160	Sarine – Broc, Château d'en bas	164 % (111 / 293)	Sohle ziemlich stabil	
2119	Sarine – Fribourg	335 % (139 / 605)	Sohle ziemlich stabil	
2102	Sarner Aa – Sarnen	0 % (55 / 48)	Seeausfluss, stabil	
2610	Scheulte – Vicques	600 % (12 / 84)	Sohle ziemlich stabil	
2608	Sellenbodenbach – Neuenkirch	533 % (6 / 38)	Betonschwelle mit Ablagerungen	
2179	Sense – Thörishaus, Sense matt	254 % (94 / 333)	Betonschwelle, veränderlich	Kiesablagerungen im Messprofil
2458	Seyon – Valangin	460 % (5 / 28)	Betonschwelle, stabil	
2176	Sihl – Zürich, Sihlhölzli	616 % (32 / 229)	Sohle ziemlich stabil	
488	Simme – Latterbach	56 % (131 / 204)	Blockschwelle, veränderlich	
2151	Simme – Oberwil	18 % (130 / 153)	Betonschwelle, ziemlich stabil	
2479	Sorne – Delémont	233 % (27 / 90)	Betonschwelle, stabil	Es gab massive Ausuferungen flussaufwärts. Die Ausuferungen im unmittelbaren Pegelbereich sind im Spitzenwert miteingerechnet.
2417	Suhre – Oberkirch	0 % (4 / 4)	Seeausfluss mit Verkrautung	
2307	Suze – Sonceboz	212 % (16 / 50)	Betonschwelle, stabil	
2044	Thur – Andelfingen	38 % (574 / 791)	Sohle ziemlich stabil	
2181	Thur – Halden	74 % (444 / 773)	Sohle ziemlich stabil	
2303	Thur – Jonschwil, Mühlau	375 % (96 / 456)	Nagelfluh, ziemlich stabil	
2132	Töss – Neftenbach	77 % (128 / 227)	Betonschwelle, stabil	
2486	Veveyse – Vevey, Copet	74 % (42 / 73)	Betonkanal, stabil	
2200	Weisse Lütschine – Zwiöltschinen	56 % (50 / 78)	Sohle veränderlich	
2450	Wigger – Zofingen	217 % (53 / 168)	Betonschwelle, ziemlich stabil	
2446	Zihlkanal – Gampelen, Zihlbrücke	333 % (-420 / 97)	Seeausfluss, stabil	umgekehrte Fliessrichtung

Legende:  sehr gut  gut  mittel  unsicher

### A3-2 Chronologie der automatisch ausgelösten Hochwasseralarme

Tab. A3.2 zeigt die Kadenz der automatischen Alarmauslösung, die zeitweise im Minutentakt erfolgte. Der in der Tabelle ebenfalls angegebene Schwellwert für den Abfluss zeigt, dass diese automatischen Alarme schon bei relativ tiefen Abflüssen ausgelöst werden. Diese werden aufgrund typischer Hochwasserganglinien des jeweiligen Gewässers unter Berücksichtigung der möglichen Anstiegsgeschwindigkeit des Hochwassers zusammen mit dem Kunden festgelegt.

Der tiefe Schwellenwert ergibt nicht nur eine längere Vorwarnzeit, sondern gewährleistet auch eine hohe Funktionssicherheit der Messstation und der Telekommunikation, da die Hochwassersituation zu diesem Zeitpunkt meist noch unkritisch ist.

**Tab. A3.2 > Chronologie der Hochwasseralarme 8./9. August 2007**

Datum	Zeit (MESZ)	Station	Schwellenwert Abfluss [m³/s] bzw. Seestand [m ü.M.]
8.08.07	05:15	Sense – Thörishaus	80
8.08.07	09:55	Töss – Neftenbach	30
8.08.07	11:25	Aare – Thun	225
8.08.07	11:58	Thur – Halden	400
8.08.07	15:27	Rhein – Rheinfelden	2200
8.08.07	16:09	Lütschine – Gsteig	90
8.08.07	16:33	Lütschine – Gsteig	120
8.08.07	16:47	Kander – Hondrich	90
8.08.07	17:54	Sense – Thörishaus	80
8.08.07	17:55	Aare – Bern	280
8.08.07	18:14	Aare – Brienzwiler	150
8.08.07	18:21	Aare – Thun	280
8.08.07	18:28	Sense – Thörishaus	130
8.08.07	18:31	Emme – Emmenmatt	150
8.08.07	18:39	Kleine Emme – Werthenstein	150
8.08.07	19:03	Aare – Bern	340
8.08.07	19:09	Emme – Emmenmatt	300
8.08.07	19:11	Engelberger Aa – Buochs	80
8.08.07	19:19	Aare – Brienzwiler	200
8.08.07	19:39	Kleine Emme – Littau	300
8.08.07	19:49	Engelberger Aa – Buochs	100
8.08.07	19:59	Linth – Linthal	131
8.08.07	20:14	Aare – Bern	400
8.08.07	20:18	Aare – Murgenthal	700
8.08.07	20:33	Reuss – Mühlau	500
8.08.07	20:56	Limmat – Baden	350
8.08.07	21:30	Reuss – Mühlau	600
8.08.07	21:31	Aare – Murgenthal	800
8.08.07	22:06	Thur – Jonschwil	300
8.08.07	22:17	Sitter – St.Gallen	170
8.08.07	22:48	Sitter – St.Gallen	250
8.08.07	23:10	Thur – Halden	400
8.08.07	23:47	Thunersee – Spiez	558.00
9.08.07	02:38	Bieleree – Ligerz	429.95
9.08.07	05:40	Bieleree – Ligerz	430.15
9.08.07	05:57	Aare – Thun	340
9.08.07	07:17	Limmat – Baden	350
9.08.07	07:23	Brienzersee – Ringgenberg	564.80
9.08.07	08:16	Thunersee – Spiez	558.20
9.08.07	08:59	Aare – Brienzwiler	150
9.08.07	21:51	Aare – Brugg	500
10.08.07	01:34	Aare – Brugg	600

A3-3 **Abflussspitzen und deren statistische Einordnung**

Während des Ereignisses vom 8./9. August 2007 registrierte rund die Hälfte der knapp 200 eidgenössischen Abflussmessstationen Hochwasserabflüsse. Eine Übersicht der definitiven Abflussspitzen und ihrer statistischen Einordnung gibt Tab. A3.3. Aufgeführt sind dabei jene Stationen, deren Abflussmaximum im August 2007 einer Wiederkehrperiode von mindestens 2 Jahren entspricht. Bei einigen Stationen wurde das Maximum 2007 zu einem anderen Zeitpunkt des Jahrs beobachtet; in diesen Fällen ist der Rang in Klammern angegeben.

**Tab. A3.3 > Übersicht über die Abflussspitzen vom 8.–13. August 2007 (in m<sup>3</sup>/s; Zeitangaben in Winterzeit) und deren statistische Einordnung**

*Wo das Maximum 2007 zu einem anderen Zeitpunkt des Jahrs beobachtet wurde, erfolgt die Angabe des Rangs in Klammern.*

Stationsname	Periodenbeginn	Anzahl Jahre	Bisheriges Maximum	Jahr	HQ 2007	Datum	Zeit	Geschätzte Jährlichkeit	Rang
Aabach – Hitzkirch, Richensee	1976	32	6	1981	5.95	10.08.2007	04:35	5–20	2
Aach – Salmsach, Hungerbühl	1962	46	48.5	1968	26	09.08.2007	08:05	5–20	8
Aare – Bern, Schönau	1918	90	620	1999	524	08.08.2007	22:45	50–100	3
Aare – Brienzwiler	1905	103	444	2005	301	08.08.2007	20:15	5–20	12
Aare – Brugg	1916	92	1250	1999	1387	09.08.2007	08:55	100–200	1
Aare – Brügg, Aegerten	1905	103	761	1999	738	13.08.2007	18:40	50–100	2
Aare – Hagneck	1984	24	1514	2005	1273	09.08.2007	21:35	20–50	2
Aare – Murgenthal	1916	92	1020	1981	1262	09.08.2007	00:45	> 200	1
Aare – Ringgenberg, Goldswil	1926	82	344	2005	188	09.08.2007	22:50	2–5	20
Aare – Thun	1906	102	570	1999	392	10.08.2007	08:15	5–20	5
Aare – Untersiggenthal, Stilli	1935	73	2620	1999	2656	09.08.2007	10:15	100–200	1
Allaine – Boncourt, Frontière	1984	24	64	1999	72	09.08.2007	06:25	20–50	1
Allenbach – Adelboden	1950	58	75	1977	37	08.08.2007	17:07	5–20	6
Alp – Einsiedeln	1992	16	110	1999	90	08.08.2007	19:55	2–5	(6)
Areuse – St.Sulpice	1959	49	55.5	1990	40	09.08.2007	16:55	2–5	(24)
Arve – Genève, Bout du Monde	1924	84	840	1968	523	09.08.2007	04:25	2–5	(35)
Biber – Biberbrugg	1990	18	38	2005	40	08.08.2007	20:22	20–50	1
Bibere – Kerzers	1956	52	35	2001	28	08.08.2007	22:32	20–50	2
Bied du Locle – La Rançonnière	1964	44	11.35	1991	7.82	09.08.2007	02:42	2–5	11
Birs – Münchenstein, Hofmatt	1917	91	330	1973	383	09.08.2007	10:55	100–200	1
Birse – Moutier, La Charrue	1912	96	65	1987	75	09.08.2007	00:25	> 200	1
Birse – Soyhières, Bois du Treuil	1983	25	160	1995	316	09.08.2007	06:33	100–200	1
Chli Schliere – Alpnach, Chilch Ertli	1979	29	89	2005	31	08.08.2007	20:09	2–5	6
Dünnern – Olten, Hammermühle	1978	30	115	1978	102	09.08.2007	09:25	5–20	3
Emme – Eggwil, Heidbuel	1975	33	245	1997	177	08.08.2007	19:37	20–50	3
Emme – Emmenmatt	1918	90	510	1997	485	08.08.2007	20:27	20–50	3
Emme – Wiler, Limpachmündung	1922	86	583	2005	663	08.08.2007	22:32	> 200	1
Engelberger Aa – Buochs, Flugplatz	1916	92	230	2005	114	08.08.2007	19:52	5–20	8
Ergolz – Liestal	1934	74	155	1994	146	09.08.2007	08:25	50–100	3
Glatt – Herisau, Zellersmühle	1961	46	120	2004	29	08.08.2007	20:00	2–5	16
Glatt – Rheinsfelden	1976	32	155	1999	103	09.08.2007	00:55	5–20	3
Goldach – Goldach	1963	45	155	2002	45	08.08.2007	20:55	2–5	15

Stationsname	Periodenbeginn	Anzahl Jahre	Bisheriges Maximum	Jahr	HQ 2007	Datum	Zeit	Geschätzte Jährlichkeit	Rang
Grande Eau – Aigle	1935	73	122.5	1944	41	08.08.2007	21:25	2–5	(27)
Grosstalbach – Isenthal	1957	51	65	2005	23	08.08.2007	19:32	5–20	12
Gürbe – Belp, Mülimatt	1923	85	59	1938	56	08.08.2007	21:05	20–50	3
Gürbe – Burgistein, Pfandersmatt	1982	26	92.5	1990	40	08.08.2007	19:15	5–20	4
Ilfis – Langnau	1990	18	340	2002	254	08.08.2007	19:57	5–20	3
Känder – Hondrich	1903	105	273	2005	202	08.08.2007	19:15	20–50	2
Kleine Emme – Littau, Reussbühl	1978	30	650	2005	564	08.08.2007	21:25	5–20	3
Kleine Emme – Werthenstein, Chappelb.	1985	23	470	2005	350	08.08.2007	19:55	5–20	3
Langeten – Huttwil, Häberenbad	1966	42	55	1978	35	08.08.2007	20:45	5–20	(5)
Limmat – Baden, Limmatpromenade	1951	57	660	1999	533	08.08.2007	22:35	20–50	4
Limmat – Zürich, Unterhard	1938	70	590	1999	417	08.08.2007	23:45	5–20	9
Linth – Linthal, Ausgleichsbecken KLL	1967	41	173	2005	89	08.08.2007	19:15	5–20	10
Linth – Mollis, Linthbrücke	1914	94	402	2005	225	08.08.2007	21:25	2–5	22
Lonza – Blatten	1956	52	81	1971	39	08.08.2007	15:15	2–5	13
Lorze – Frauenthal	1914	94	37	2005	38	08.08.2007	21:05	100–200	1
Lorze – Zug, Letzi	1983	25	119	2005	69	08.08.2007	17:00	5–20	2
Luthern – Nebikon	1988	20	76	2002	45	08.08.2007	20:44	5–20	3
Lütschine – Gsteig	1920	88	254	2005	210	08.08.2007	18:45	50–100	2
Mentue – Yvonand, La Mauguettaz	1971	37	62	2001	59	08.08.2007	23:55	20–50	2
Minster – Euthal, Rüti	1961	47	205	1977	91	08.08.2007	19:55	2–5	(18)
Muota – Ingenbohl	1923	85	433.1	2005	191	08.08.2007	21:05	2–5	24
Murg – Frauenfeld	1960	46	152.5	1968	142	08.08.2007	23:45	20–50	2
Murg – Murgenthal, Walliswil	1981	27	50.5	1986	51	08.08.2007	21:45	20–50	(2)
Murg – Wängi	1954	54	61	1999	51	08.08.2007	22:12	20–50	2
Reuss – Luzern, Geissmattbrücke	1922	86	473	2005	316	10.08.2007	13:56	2–5	26
Reuss – Mellingen	1910	98	854	2005	770	09.08.2007	09:25	50–100	2
Reuss – Mühlau, Hünenberg	1915	93	839	2005	740	09.08.2007	00:05	50–100	2
Reuss – Seedorf	1961	47	735	1987	307	08.08.2007	20:17	2–5	(21)
Rhein – Basel	1891	117	5090	1999	4810	09.08.2007	13:22	100–200	2
Rhein – Rekingen	1904	104	2250	1910	1643	09.08.2007	09:05	20–50	5
Rhein – Rheinfelden, Wassermessstation	1933	75	4550	1999	4107	09.08.2007	13:55	20–50	3
Rhône – Chancy, Aux Ripes	1904	104	1700	1944	1056	09.08.2007	06:35	2–5	(33)
Rhône – Genève, Halle de l'Île	1924	84	740	2002	582	10.08.2007	23:45	2–5	31
Rhone – Gletsch	1956	52	28.5	1987	20	08.08.2007	18:05	2–5	(14)
Rhône – Porte du Scex	1955	53	1370	2000	690	08.08.2007	23:45	2–5	15
Rietholzbach – Mosnang, Rietholz	1976	32	12.0	1994	6.1	08.08.2007	19:35	5–20	(9)
Saane – Laupen	1949	59	925	2005	846	09.08.2007	11:52	20–50	3
Sarine – Broc, Château d'en bas	1972	36	400	1974	293	08.08.2007	23:15	5–20	(6)
Sarine – Fribourg	1948	60	750	2005	605	09.08.2007	17:15	20–50	2
Sarner Aa – Sarnen	1923	85	148	2005	48	09.08.2007	18:45	5–20	7
Schächen – Bürglen	1986	22	125	2005	37	09.08.2007	02:52	2–5	15
Scheulte – Vicques	1992	16	66	1999	84	09.08.2007	00:35	5–20	1
Schwändlibach – Plaffeien, Schweinsberg	1962	46	6.6	1985	3.6	08.08.2007	18:35	2–5	(23)
Seez – Mels	1966	42	76	1987	39	08.08.2007	21:22	2–5	20
Sellenbodenbach – Neuenkirch	1991	17	38	2005	38	08.08.2007	20:25	20–50	1

Stationsname	Perioden- beginn	Anzahl Jahre	Bisheriges Maximum	Jahr	HQ 2007	Datum	Zeit	Geschätzte Jährlichkeit	Rang
Sense – Thörishaus, Sensematt	1928	80	495	1990	333	08.08.2007	20:57	20–50	3
Seyon – Valangin	1980	28	34.5	1987	28	09.08.2007	00:27	5–20	5
Sihl – Zürich, Sihlhölzli	1938	70	280	2005	229	08.08.2007	23:25	5–20	6
Simme – Latterbach	1986	22	315	2005	204	08.08.2007	21:05	5–20	4
Simme – Oberwil	1921	87	200	1944	153	08.08.2007	20:05	20–50	3
Sionge – Vuippens, Château	1976	32	50.5	1977	29	09.08.2007	07:04	2–5	15
Sitter – St.Gallen, Bruggen/Au	1981	27	590	2002	267	08.08.2007	22:25	2–5	10
Sorne – Delémont	1983	25	59	1995	90	09.08.2007	03:10	100–200	1
Sperbelgraben – Wasen, Kurzeneialp	1958	31	1.6	2000	0.77	08.08.2007	19:07	2–5	10
Suhre – Oberkirch	1976	32	4.5	1999	4.36	08.08.2007	19:55	20–50	2
Suze – Sonceboz	1961	47	65	1991	50	09.08.2007	02:05	20–50	3
Thur – Andelfingen	1904	104	1130	1999	791	09.08.2007	07:25	5–20	11
Thur – Halden	1965	43	1170	1978	773	09.08.2007	00:54	5–20	8
Thur – Jonschwil, Mühlau	1966	42	583	2006	456	08.08.2007	23:02	5–20	9
Töss – Neftenbach	1921	87	270	1953	227	08.08.2007	23:25	20–50	5
Veveyse – Vevey, Copet	1984	24	86	1990	73	08.08.2007	20:55	5–20	(4)
Weisse Lutschine – Zweilütschinen	1933	75	110	1933	78	08.08.2007	17:55	5–20	15
Wigger – Zofingen	1980	28	158	2005	168	08.08.2007	21:55	50–100	1
Worble – Ittigen	1989	19	41	2006	15.9	08.08.2007	18:55	2–5	5

## A4 Regulier- und Reglerkonzepte

### A4-1 Seeregulierung in der Schweiz

Die Literatur zum Thema Seenregulierung ist relativ spärlich. In einer allgemeinen Darstellung von 1939 zur Seenregulierung in der Schweiz führen Meyer und Keller (1939) die Vorteile von Linienreglementen (von ihnen als «Reglemente mit Abflussmengenlinien» bezeichnet) aus. Insbesondere wird deren Klarheit und Nachvollziehbarkeit gelobt und empfohlen, dass für jeden See ein solch eindeutiges und klares Reglement ausgearbeitet werden soll. So werden beispielsweise von den grösseren regulierten Schweizer Seen bis heute der Zürichsee, Thunersee, Lago di Lugano und der Lago Maggiore auf der Basis von Linienreglementen gesteuert.

Grosse Schweizer Seen anhand von Linienreglementen reguliert

1978 wurde von Spreafico (1978) anhand des Fallbeispiels Brienersee ein Verfahren vorgestellt, wie sich die Vielzahl von – oft widersprüchlichen – Anforderungen bei der Festlegung einer Reguliervorschrift einbeziehen lassen. Dabei wurde angenommen, dass sich für jeden Zielbereich eine eindeutige «Wunschganglinie» definieren lässt. Umgesetzt wurde letztlich eine «pragmatisch, praxisorientierte» Lösung, welche auf eine saisonale Variation der Pegel-Abflussbeziehung verzichtet (Chaix 1992).

Methode zur Berücksichtigung widersprüchlicher Interessen

Nach den Hochwasserereignissen von 1999 und 2005 gelangte die Seeregulierung vor allem am Thunersee und am Vierwaldstättersee in den Fokus der Öffentlichkeit. Das Hochwasser vom August 2005 war auch der Anstoss für ein Projekt zur Erhöhung des Seeausflusses und Errichtung eines Regulierwehres am bisher unregulierten Sarnersee.

Aktuelle Seeregulierungsprojekte in der Schweiz

### A4-2 Reglerkonzepte

Ein Regler dient dazu, die Parameter eines Systems in einem optimalen Bereich zu halten. Dabei ist meist eine Vielzahl von verschiedenen – und sich möglicherweise widersprechender – Anforderungen zu berücksichtigen. Bei einer Seeregulierung bestimmt der Regler den Abfluss über das Auslassbauwerk resp. die verschiedenen Wehroorgane. Grundsätzlich lassen sich unterscheiden:

Reglerklassen

- > *Deterministische Regler*: (Mathematische) Vorschrift, welche aus beobachteten Systemparameter (beispielsweise Seestände oder Zuflüsse) den Sollwert für den Seeausfluss bestimmt. Zu dieser Reglerklasse gehören Proportional-, Integral- und Differentialregler sowie die häufig eingesetzten Proportional-Integral-Differential-Regler (PID-Regler, vgl. unten).
- > *Prädikative Regler*: Basierend auf beobachteten *und* prognostizierten Systemparameter wird mittels Optimierung ein Sollwert für den Seeausfluss bestimmt.
- > *Stochastische Regler*: Eine Sammlung von Anforderungen, aus welchen durch Transferfunktionen und Priorisierung ein Sollwert für den Seeausfluss bestimmt wird.

In der Praxis ist eine Kombination dieser Reglertypen möglich und bei geeigneter Parametrisierung auch sinnvoll.

Ein Linienreglement wie das zur Regulierung der Jurarandseen verwendete Regulierdiagramm (vgl. Kap. 5.3.1) entspricht regelungstechnisch einem *Proportionalregler*, wobei die Reglerparameter üblicherweise saisonal variieren. Die Angaben zu den zulässigen Abweichungen und maximalen Abflussänderungen stellen Nebenbedingungen dar. Sie dienen dazu, im unterliegenden Fliessgewässer die Abflussschwankungen zu reduzieren.

Linienreglement entspricht regelungstechnisch einem Proportionalregler

Ein Proportionalregler stellt eine einfache Beziehung zwischen Pegel und Abfluss dar. Er ist nicht in der Lage, einen Sollwert bei veränderten Störgrössen einzuhalten. Streng genommen handelt es dabei gar nicht um einen Regler, da sonst eine einfache Öffnung auch als Regler bezeichnet werden könnte.

Grenzen des Proportionalreglers

Alternative Reglerkonzepte, wie sie etwa bei Flussstauhaltungen weit verbreitet sind, wurden bei Seen in der Schweiz erst in jüngerer Zeit ernsthaft geprüft (Kühne, 1975; Fäh und Kühne 1987). Das neue Regulierreglement für den Vierwaldstättersee setzt auf einem Proportional-Integral-Differential-Regler (PID-Regler) auf (Deubelbeiss et al. 2003). Die Vorteile dieses erweiterten Reglertyps können wie folgt zusammengefasst werden:

PID-Regler als Beispiel für einen deterministischen Regler

- > Mit dem Integral-Anteil kann gezielt auf andauernde aussergewöhnliche Zuflussbedingungen (Hoch- und Niedrigwasser) reagiert werden.
- > Der Differential-Anteil erlaubt, auf schnell ändernde Zuflussbedingungen ohne Verzögerung zu reagieren.
- > Als Folge davon können die Gradienten im Proportionalanteil kleiner gewählt werden, was unerwünschte Abflussschwankungen beim Seeauslauf (ausser bei Hochwasser) verhindert.

Die meist zahlreichen, im Fall der JGK in den Reguliervorschriften festgehaltenen Nebenbedingungen (vgl. Kap. 5.3.1 und 5.3.2), welche ein Linienreglement begleiten, sind bei einem gut parametrisierten PID-Regler nicht mehr nötig.

In der Praxis wird der *PID-Regler* in einem Leitreechner umgesetzt. Kombiniert mit einem Algorithmus, welcher die Abflussaufteilung auf die verfügbaren Wehrorgane vornimmt, erfolgt die Seeregulierung vollständig automatisiert. Die Reglerparameter bei einem PID-Regler werden vorgängig mittels Simulationsrechnungen festgelegt und anschliessend (im Normalfall) nicht mehr verändert.

Praktische Umsetzung von PID-Reglern

Als Beispiel für einen *stochastischen Reglertyp* soll nachstehend ein Fuzzy-Regler vorgestellt werden. An die Stelle von mathematischen Formeln für die Ermittlung des Abflusses aufgrund von Abweichungen vom Sollwert treten hier sprachliche Formulierungen über die Ziele der Regulierung, welche in Klassenfunktionen übersetzt werden (Fuzzifizierung). Abb. A4.1 zeigt exemplarisch eine mögliche Zuordnung von Klassenfunktionen für die Zielbereiche «Hochwasserschutz» und «Ufervegetation». Die entsprechende sprachliche Formulierung der Ziele für die beiden Bereiche könnte beispielsweise wie folgt lauten:

Fuzzy-Regler als Beispiel für einen stochastischen Reglertyp

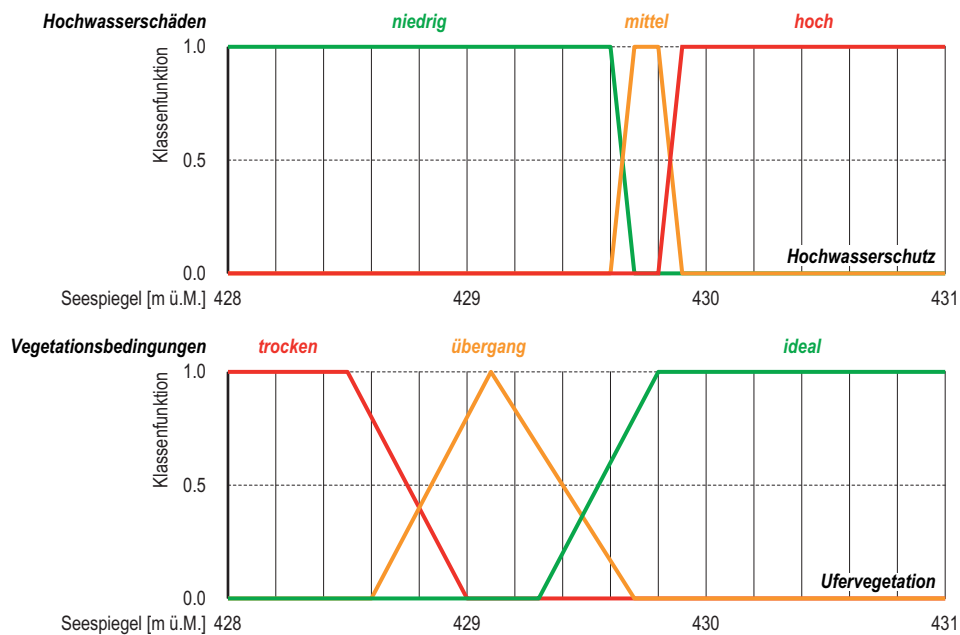
> *Hochwasserschutz*

Bei einem Seestand zwischen 429.6 m ü.M. und 429.9 m ü.M. treten mittlere Schäden auf. Hohe Schäden resultieren frühestens ab einem Stand von 429.8 m ü.M. und ab einem Stand von 429.9 m ü.M. sind die Schäden maximal.

> *Ufervegetation*

Für Seestände unter 429.0 m ü.M. erhält die Vegetation der an den See angrenzenden Feuchtgebiete zu wenig Wasser. Ideale Bedingungen herrschen spätestens ab 429.8 m ü.M. Seestände zwischen 428.6 und 429.7 m ü.M. stellen einen Übergangsbereich dar.

**Abb. A4.1 > Beispiel der Zuordnung von Klassenfunktionen für die Zielbereiche Hochwasserschutz und Ufervegetation**



Mit Hilfe von «WENN-DANN»-Regeln wird anschliessend der Zusammenhang zwischen den Eingangskriterien (Klassenfunktionen) und der Steuergrösse (Soll-Abfluss aus dem See) hergestellt. Solche Regeln lauten beispielsweise:

- > WENN («Hochwasserschäden\_niedrig» ist gross) und («Vegetationsbedingungen\_trocken» ist gross) DANN («Abfluss\_soll» ist klein)
- > WENN («Hochwasserschäden\_mittel» ist gross) und («Vegetationsbedingungen\_übergang» ist gross) DANN («Abfluss\_soll» ist mittel)

Ein Fuzzy-Regler kann zahlreiche (gewichtete) Zielkriterien berücksichtigen und die jeweils optimale Strategie wählen. Er setzt direkt auf den Zielkriterien auf und reagiert deshalb auf veränderte Randbedingungen sehr robust. Damit ist er im Vorteil gegenüber einem Linienreglement oder einem PID-Regler, deren Parametrisierung anhand historischer Daten optimiert wurde und die bei veränderten Randbedingungen angepasst werden müssen. Das sehr offen gestaltete Konzept erlaubt auch den Einbezug von Modellprognosen.

Vorteile des Fuzzy-Reglers

#### Literatur

Chaix O. 1992: Modernisierung des Reglements für die Regulierung des Brienersees. In: Symposium «Betrieb, Unterhalt und Modernisierung von Wasserbauten», Garmisch-Partenkirchen, 29.–31. Oktober 1992: 307–316.

Deubelbeiss E., Stalder P., Müller U. 2003: Regulierung des Vierwaldstättersees und Sanierung der Reusswehranlage in Luzern mit dem historischen Nadelwehr. Wasser Energie Luft, 95. Jahrgang, Heft 3/4, Baden: 51–55.

Fäh R., Kühne A. 1987: Numerische Simulation automatischer Stauregelungen bei Laufwasserkraftwerken. Wasser Energie Luft, 79. Jahrgang, Heft 5/6: 93–98.

Kühne A. 1975: Flussstauregulierung, Grundsätzliche Betrachtungen mit systemtheoretischen Methoden. Mitteilung Nr. 13, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich: 127 S.

Meyer E., Keller A.J. 1939: Reglemente für Seen-Regulierung. Schweizer Bauzeitung, Bd. 114, Nr. 16 vom 14. Oktober 1939: 183–185.

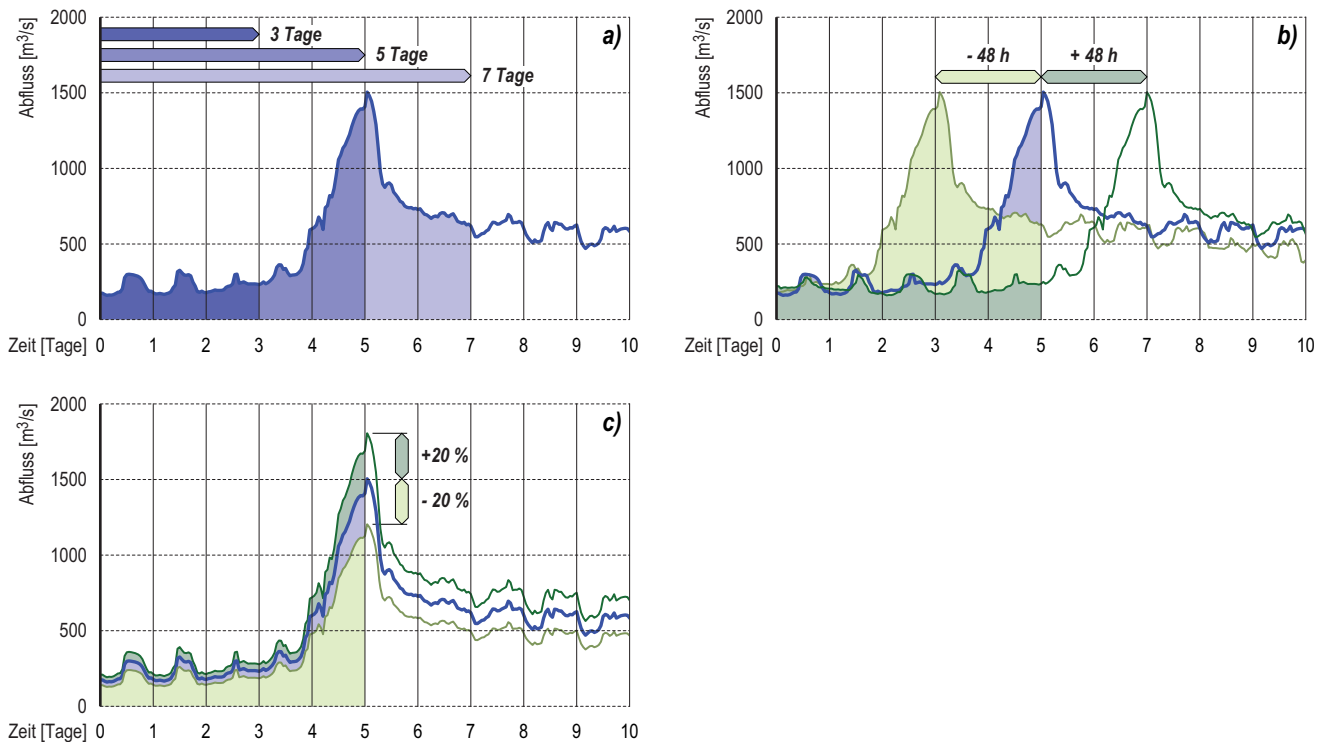
Spreafico M. 1978: Ermittlung der optimalen Reguliervorschrift für einen natürlichen See, Fallstudie Brienersee. Mitteilung Nr. 29 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich: 181 S.

## A5 Sensitivität der Prognoseregulierung bezüglich Unschärfen in der Vorhersage

Für die in Kapitel 5.5.2 beschriebene Prüfung der Wirksamkeit der Prognoseregulierung wurde davon ausgegangen, dass Vorhersage und Realität übereinstimmen. Nachfolgend werden nun der Einfluss des Vorhersagezeitraums sowie der Güte der Vorhersage auf die Wirkung der Prognoseregulierung untersucht (Abb. A5.1). Die entsprechenden Simulationen wurden sowohl für den heutigen Zustand als auch für den Fall mit einem erweiterten Zihlkanal durchgeführt.

**Abb. A5.1** > Betrachtete Fälle zur Prüfung der Sensitivität der Prognoseregulierung hinsichtlich Unschärfen der Prognose

- a) Länge des Vorhersagezeitraums  
(3 Tage / 5 Tage / 7 Tage)
- b) Abweichung zwischen dem tatsächlichen und dem vorhergesagten Zeitpunkt des Ereignisses bei einer 5-Tages-Prognose  
(48 h früher / keine Abweichung / 48 h später)
- c) Abweichung zwischen dem tatsächlichen und dem vorhergesagten Abfluss bei einer 5-Tages-Prognose  
(-20 % / keine Abweichung / +20 %)

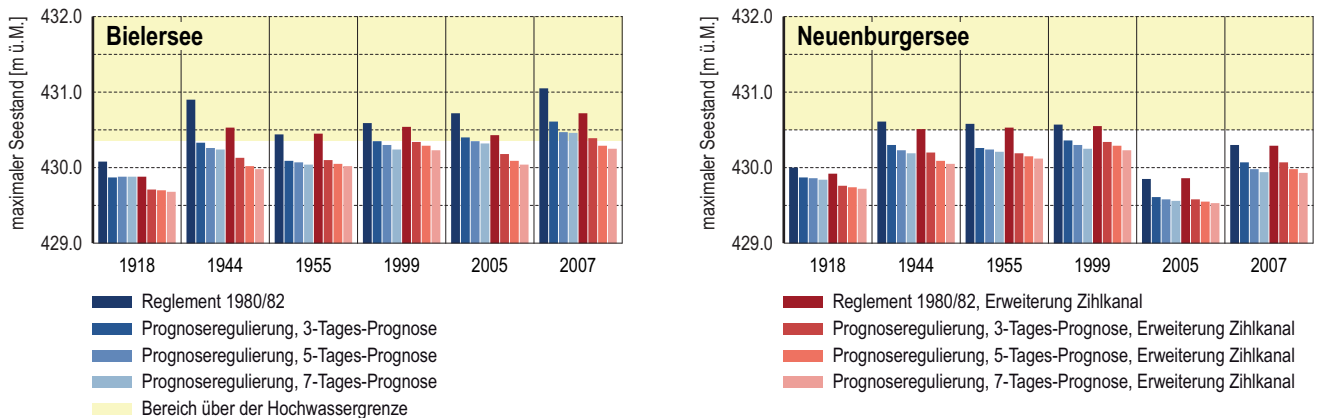


Der Vorhersagezeitraum ergibt sich in der Praxis aus den verfügbaren Wettervorhersagen (vgl. Kap. 4.1.2). Die Ergebnisse der Simulationen für unterschiedlich lange Vorhersagezeiträume (Abb. A5.1a) zeigen, dass ein Vorhersagezeitraum von 5 Tagen optimal ist (Abb. A5.2). Am Bielersee lässt sich mit einem Vorhersagezeitraum von 7 Tagen kaum zusätzliches Rückhaltevolumen schaffen, da bei entsprechender Dauer der Prognoseregulierung in der Regel der minimal einzuhaltende Seestand massgebend wird. Im Gegensatz dazu wird bei einem Vorhersagezeitraum von 3 Tagen ein Ereignis relativ spät erkannt. Aufgrund der späteren Reaktion sind auch das Mass der Vorabsenkung und damit die Wirkung der Prognoseregulierung entsprechend geringer. Ein kürzerer Vorhersagezeitraum reduziert vor allem bei den Szenarien mit den Zuflüssen von 1944 und 2007 die Wirksamkeit der Prognoseregulierung. Der Höchststand des Neuenburgersees zeigt sich hinsichtlich der Länge des Vorhersagezeitraums generell weniger sensitiv.

Länge des Vorhersagezeitraums

Unabhängig davon, ob der Vorhersagezeitraum 3, 5 oder 7 Tage umfasst, können mit der Prognoseregulierung die Höchststände an allen drei Seen im Vergleich zur Regulierung gemäss dem Reglement 1980/82 signifikant gesenkt werden.

Abb. A5.2 > Sensitivität der maximalen Seestände bezüglich Länge des Vorhersagezeitraums

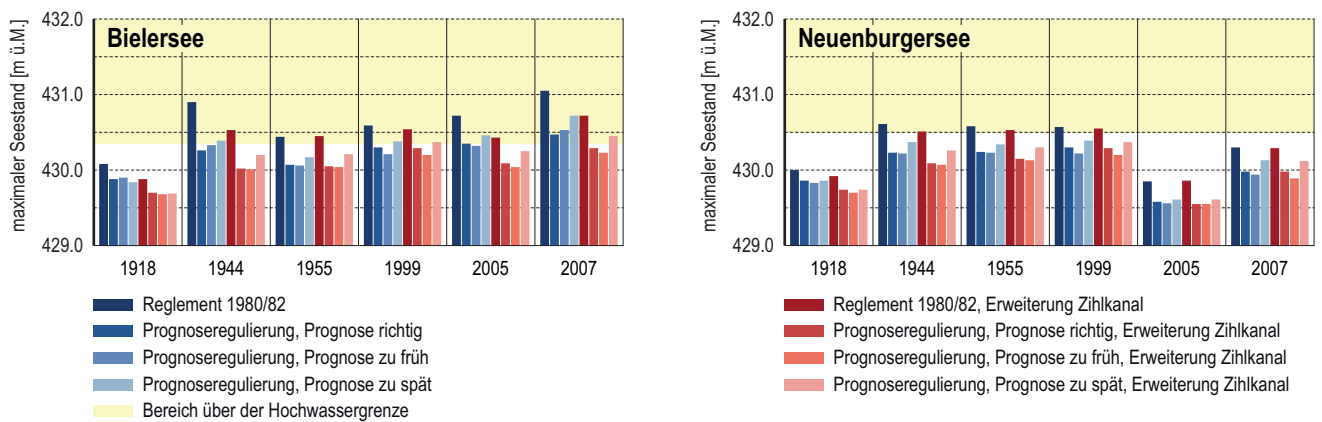


Die Auswirkungen einer Differenz zwischen dem tatsächlichen und dem vorhergesagten Zeitpunkt des Ereignisses wurden für einen Vorhersagezeitraum von 5 Tagen untersucht. Simuliert wurden die Fälle, bei welchen das Ereignis 2 Tage früher als vorhergesagt (Prognose zu spät), bzw. 2 Tage später (Prognose zu früh) eintritt (Abb. A5.1b). Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Abb. A5.3 dargestellt. Tritt das Ereignis später ein als vorhergesagt, verlängert sich die Phase der Prognoseregulierung und es wird dadurch mehr Rückhaltevolumen geschaffen. Die Höchststände liegen in diesem Fall generell etwas tiefer als bei einer zeitlich korrekten Prognose. Tritt das Ereignis früher ein als prognostiziert, kann weniger Retentionsvolumen geschaffen werden und es resultieren höhere Seestände. Der Neuenburgersee reagiert diesbezüglich vor allem für die Szenarien mit den Zuflüssen von 1944, 1955 und 2007 sensitiv.

Zeitpunkt des Ereignisses

Unabhängig davon, ob ein Ereignis 2 Tage früher oder später als vorhergesagt eintritt, können mit der Prognoseregulierung die Höchststände an allen drei Seen im Vergleich zur Regulierung gemäss dem Reglement 1980/82 signifikant gesenkt werden.

**Abb. A5.3 > Sensitivität der maximalen Seestände bezüglich prognostiziertem Zeitpunkt des Ereignisses**



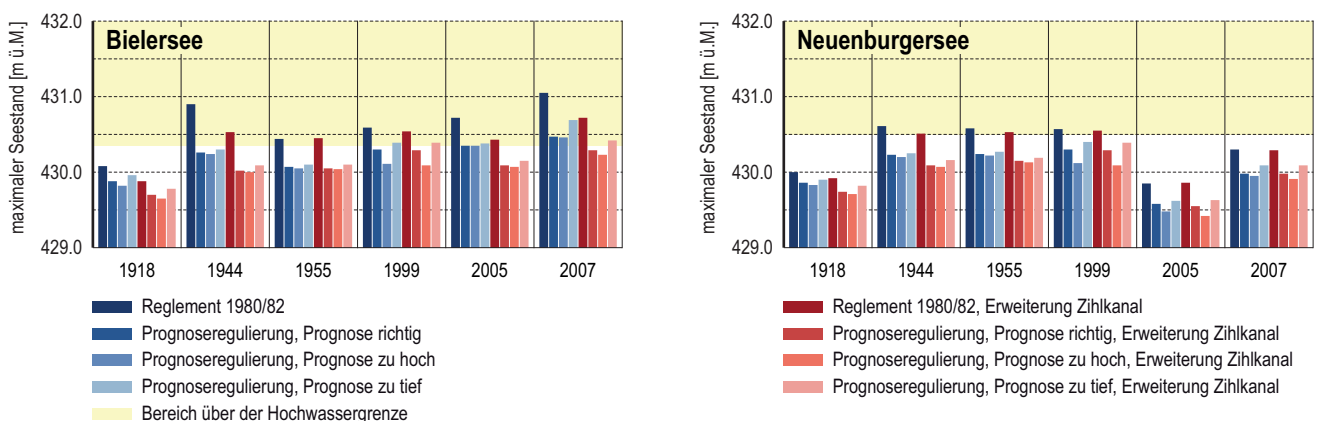
Zur Beurteilung der Empfindlichkeit hinsichtlich der Grösse des vorhergesagten Abflusses wurde davon ausgegangen, dass der Ablauf des Ereignisses zeitlich korrekt vorhergesagt wird, der prognostizierte Abfluss jedoch 20 % grösser (Prognose zu hoch), bzw. 20 % kleiner (Prognose zu tief) als der tatsächliche Abfluss ist (Abb. A5.1c). Die Ergebnisse der entsprechenden Simulationsrechnungen sind in Abb. A5.4 dargestellt. Sind die vorhergesagten Abflüsse zu hoch, so fällt die Vorabsenkung – sofern nicht durch den minimal einzuhaltenden Seestand limitiert – markanter aus. Es resultieren dadurch tiefere Höchststände als für den Fall einer korrekten Prognose. Werden zu tiefe Abflüsse vorhergesagt, resultieren entsprechend höhere Höchststände. Ausgeprägt ist dieser Effekt beispielsweise für das Hochwasser 1999, bei dem der Zufluss zu den Jurarandseen hauptsächlich aus der Aare stammt (Abb. 5.21). Die Ermittlung des während der Prognoseregulierung am Wehr Port einzustellenden Abflusses basiert im Wesentlichen auf der Vorhersage des Abflusses der Aare bei Hagneck (vgl. Kap. 5.5.2 sowie Anhang A6). Falls also der Zufluss zu den Jurarandseen vor allem durch die Aare bestimmt ist, wirkt sich eine Unter- bzw. Überschätzung des Abflusses stärker aus als bei den übrigen Szenarien.

Grösse des Abflusses

Die Prognoseregulierung sollte deshalb nicht ausschliesslich auf der Vorhersage des Zuflusses aus der Aare basieren, sondern sollte auch die Zuflüsse zum Neuenburger- und Murtensee berücksichtigen. Bei der Umsetzung der Prognoseregulierung (vgl. Anhang A6) wurde diesem Umstand entsprechend Rechnung getragen.

Unabhängig davon, ob in der Prognose die tatsächlichen Abflüsse um 20 % über- oder unterschätzt werden, können mit der Prognoseregulierung die Höchststände im Vergleich zur Regulierung gemäss dem Reglement 1980/82 signifikant gesenkt werden.

**Abb. A5.4 > Sensitivität der maximalen Seestände bezüglich prognostizierter Grösse des Abflusses**



---

Um die Robustheit der Prognoseregulierung zu beurteilen, wird schliesslich noch der Fall einer Fehlprognose betrachtet. Als Fehlprognose wird dabei eine Vorhersage bezeichnet, bei der entweder

Fehlprognose

- > kein Ereignis vorhergesagt wird, jedoch ein grosses Hochwasser eintritt,
- > ein grosses Ereignis vorhergesagt wird, das jedoch anschliessend nicht eintritt.

Im ersten Fall würde aufgrund der Vorhersage nicht zur Prognoseregulierung übergegangen und die Regulierung während des Ereignisses gemäss dem Regulierreglement 1980/82 erfolgen. Es findet keine temporäre Vorabsenkung statt und das Potenzial der Prognoseregulierung kann somit nicht genutzt werden. Gegenüber der bisherigen Regulierpraxis ergeben sich allerdings auch keine nachteiligen Auswirkungen, d. h. keine höheren Seestände.

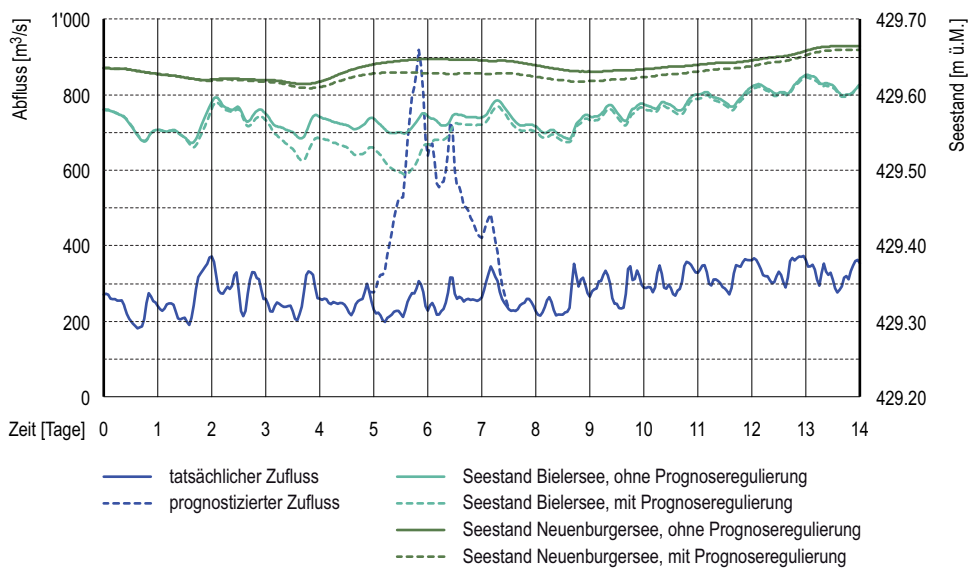
Der zweite Fall soll anhand der Ergebnisse einer Simulation für ein mittleres Hochwasser illustriert werden (Abb. A5.5). Ohne Prognoseregulierung bleibt der Pegel des Bielersees bis zum Tag 8 im Mittel konstant und steigt danach infolge der zunehmenden Zuflüsse kontinuierlich an. Die Variation des Bielerseepegels ist bedingt durch Schwankungen im Zufluss (Effekt der Kraftwerke im Einzugsgebiet der Saane). Der Neuenburgersee steigt am 4. und 5. Tag aufgrund von Zuflüssen aus dem Jura leicht an. Wird gemäss Abb. A5.5 für die Tage 5 bis 7 ein Hochwasser vorhergesagt (welches jedoch dann nicht eintritt) führt die Prognoseregulierung zunächst zu einer Absenkung des Bielersees. Aufgrund der sich vergrössernden Wasserspiegeldifferenz zwischen den Seen wird auch der Neuenburgersee leicht abgesenkt, bzw. er steigt nicht so stark wie im Fall ohne Prognoseregulierung.

Das Beispiel verdeutlicht, wie der kleinere Bielersee rasch und stärker auf die Prognoseregulierung reagiert. Nach einer «unnötigen» Vorabsenkung aufgrund einer Fehlprognose stellt sich innert weniger Tage wieder der ursprüngliche Seestand ein. Demgegenüber ist die Vorabsenkung im grösseren Neuenburgersee deutlich geringer und die Zeit bis er seinen ursprünglichen Pegel wieder erreicht auch entsprechend länger.

**Abb. A5.5 > Auswirkung der Prognoseregulierung bei einer Fehlprognose bei Nichteintreten eines vorhergesagten Ereignisses**

Die ausgezogenen Linien zeigen den tatsächlichen Zufluss zum Bielersee durch den Hagneck-Kanal sowie die Ganglinien der Seestände des Bieler- und Neuenburgersees bei einer Regulierung gemäss dem Reglement 1980/82.

Die gestrichelten Linien zeigen den vorhergesagten Zufluss sowie die Ganglinien der Seestände für den Fall, dass das vorhergesagte Hochwasser nicht eintritt, jedoch aufgrund der Prognoseregulierung eine Vorabsenkung stattfindet.



## A6 Umsetzung der Prognoseregulierung

Der folgende Text ist eine Zusammenfassung der ausführlichen Beschreibung zur Umsetzung der Prognoseregulierung (BAFU et. al 2008).

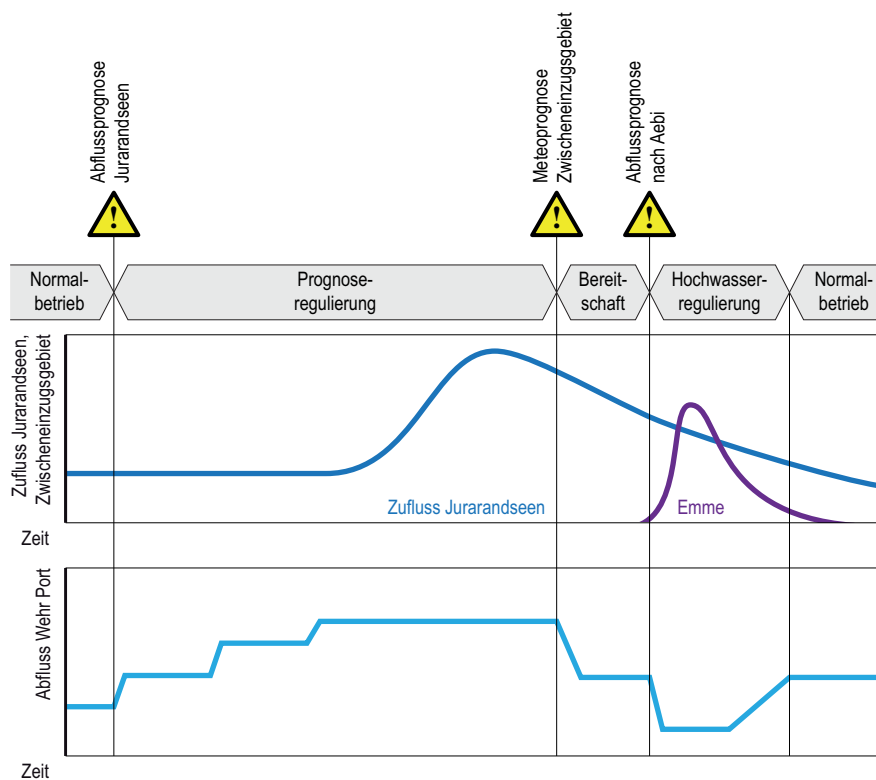
Bei der Prognoseregulierung handelt es sich um ein vorläufiges Konzept, welches den grundsätzlichen Ablauf regelt und provisorische Grenz- und Schwellwerte vorsieht, die in Folgeprojekten noch genauer quantifiziert werden. Daher sind die für die operative Umsetzung definierten Werte eher konservativ angesetzt. Allfällige Über- oder Unterschreitungen dieser Werte können im Rahmen gemeinsamer Telefonkonferenzen zwischen den Kantonen Freiburg, Waadt, Neuenburg, Bern, Solothurn (JGK-Kantone), dem Kanton Aargau sowie dem Bundesamt für Umwelt BAFU vereinbart werden.

Genauere Quantifizierung der Grenz- und Schwellwerte in Folgeprojekten

Gemäss Abb. A6.1 ist bei prognostizierten volumenreichen Zuflüssen in die Jurarandseen eine kurzzeitige Vorabsenkung des Bielersees vorgesehen. Im Falle eines sich ankündigenden Hochwassers aus der Emme oder dem übrigen Zwischeneinzugsgebiet zwischen Bielersee und Murgenthal muss der Abfluss am Wehr Port rechtzeitig auf einen Wert gedrosselt werden, der bei Bedarf einen schnellen Übergang in die Hochwasserregulierung gemäss bisherigem Reglement erlaubt.

Regulierphasen

**Abb. A6.1 > Konzept für die Vorabsenkung der JGK-Seen und den Übergang zur Hochwasserregulierung**



Grundsätzlich lassen sich gemäss Abb. A6.1 folgende Phasen unterscheiden.

- > *Normalbetrieb*  
Regulierung gemäss Linienreglement, während der neu eine laufende Beurteilung der Lage aufgrund der Abflussprognose stattfindet.
- > *Prognoseregulierung*  
Temporäre Vorabsenkung des Bielersees, falls aufgrund der Abflussprognose grosse Zuflüsse zu den Jurarandseen und damit ein übermässiger Seeanstieg zu erwarten sind.
- > *Bereitschaft*  
Reduktion des Abflusses auf einen dem Linienreglement entsprechenden Wert, falls aufgrund der Meteoprognose ein grösseres Hochwasser der Emme zu erwarten ist.
- > *Hochwasserregulierung*  
Drosselung des Abflusses beim Wehr Port bei einem Hochwasser der Emme gemäss bisherigem Reglement, d. h. auf der Basis der Abflussprognose für die Aare bei Murgenthal nach Aebi, neu mit der Möglichkeit einer schnelleren Drosselung sowie einer Vorgabe für den Minimalabfluss am Wehr Port.
- > *Normalbetrieb*  
Regulierung gemäss Linienreglement, während der neu eine laufende Beurteilung der Lage aufgrund der Abflussprognose stattfindet.

Für die Übergänge von einer Phase in die nächste gibt es Kriterien für den Zeitpunkt sowie für die Zielgrössen oder Randbedingungen für Seewasserstände oder Abflüsse, wie sie nachfolgend aufgeführt sind.

#### A6-1 **Prognoseregulierung**

Massgebend für den Übergang vom Normalbetrieb (Regulierung gemäss Linienreglement) zur Prognoseregulierung ist die 5-Tages-Prognose der Zuflüsse in die Jurarandseen<sup>13</sup>. Diese führt täglich zu einer neuen Beurteilung, ob zur Prognoseregulierung übergegangen wird. Sobald die Prognoseregulierung in Kraft tritt, wird sie durchgeführt, bis die Regulierung des Bielerseeausflusses wieder dem Linienreglement entspricht oder aber aufgrund der Meteoprognose grosse Zuflüsse aus dem Zwischeneinzugsgebiet erwartet werden müssen und deshalb in die Phase der Bereitschaft übergegangen wird.

Tägliche Beurteilung der Lage

Zur Beurteilung, ob zur Prognoseregulierung übergegangen werden soll, wird wie folgt vorgegangen:

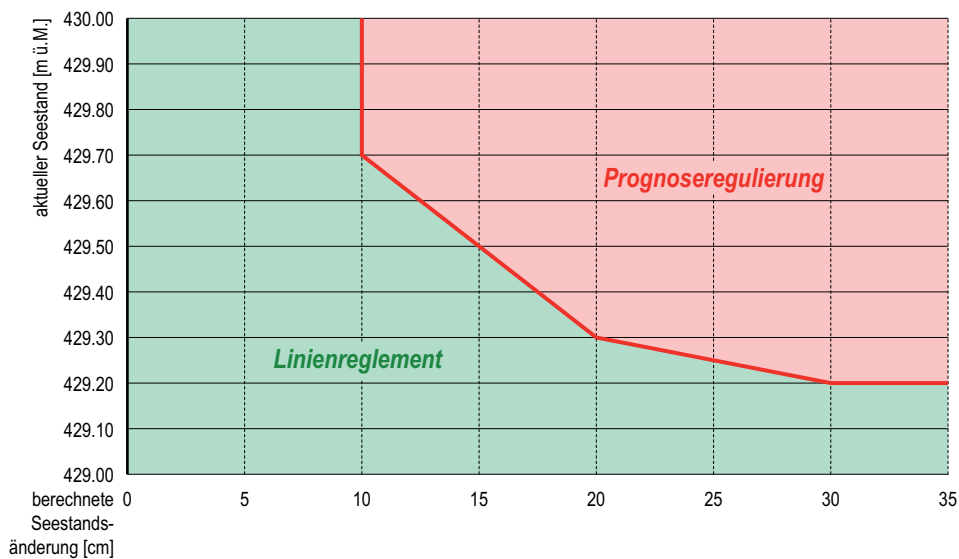
Kriterien für den Übergang zur Prognoseregulierung

1. Ermittlung des zu erwartenden mittleren Zuflusses über die folgenden 5 Tage für die Aare bei Hagneck und für die Zuflüsse in den Neuenburgersee aus den vorhergesagten Abflussganglinien.

<sup>13</sup> Operationelle Abflussprognose des BAFU (von Montag bis Freitag einmal täglich; bei Hochwassergefahr mehrmals täglich und auch am Wochenende).

2. Ist der unter 1. berechnete mittlere Zufluss aus dem Hagneck-Kanal grösser als der aktuell gemäss Linienreglement vorgeschriebene Ausfluss beim Wehr Port, wird die zu erwartende Seestandsänderung im Bielersee für die nächsten 24 Stunden berechnet. Dabei werden vereinfachend nur der prognostizierte mittlere Zufluss der Aare bei Hagneck sowie der aktuelle Wert für den Ausfluss beim Wehr Port gemäss Linienreglement berücksichtigt.
3. In Abhängigkeit der berechneten Seestandsänderung und des aktuellen Bielerseestands wird mit Hilfe von Abb. A6.2 entschieden, ob zur Prognoseregulierung überzugehen oder weiter gemäss dem Linienreglement zu regulieren ist. Falls aufgrund der berechneten Seestandsänderung und des aktuellen Bielerseestands die Voraussetzungen für den Übergang zur Prognoseregulierung gemäss Abb. A6.2 zwar noch nicht gegeben sind, die prognostizierten Zuflüsse in den Neuenburgersee jedoch aussergewöhnlich hoch sind, kann die Prognoseregulierung dennoch eingeleitet werden. Grundlage für diese Entscheidung ist eine gemeinsame Telefonkonferenz.

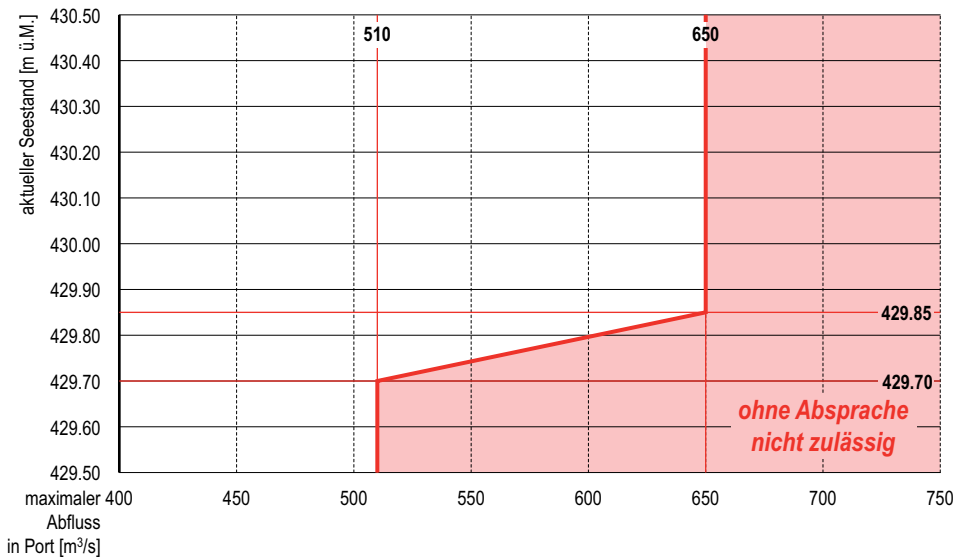
**Abb. A6.2 > Kriterium für den Übergang zur Prognoseregulierung in Abhängigkeit des aktuellen Bielerseestands und der für die folgenden 24 Stunden berechneten Änderung des Bielerseestands**



Während der Prognoseregulierung wird der zu erwartende mittlere Zufluss der Aare bei Hagneck als Ausfluss beim Wehr Port eingestellt. Sind die prognostizierten Zuflüsse in den Neuenburgersee jedoch aussergewöhnlich hoch, kann der Ausfluss entsprechend erhöht werden. Bei der Festlegung des Ausflusses beim Wehr Port sind – ohne entsprechende Absprachen – die maximal zulässigen Ausflüsse in Port gemäss Abb. A6.3 einzuhalten.

Bielerseeausfluss während der Prognoseregulierung

**Abb. A6.3 > Zielgrösse für den maximalen Ausfluss am Wehr Port während der Prognoseregulierung in Abhängigkeit des aktuellen Bielerseestands**

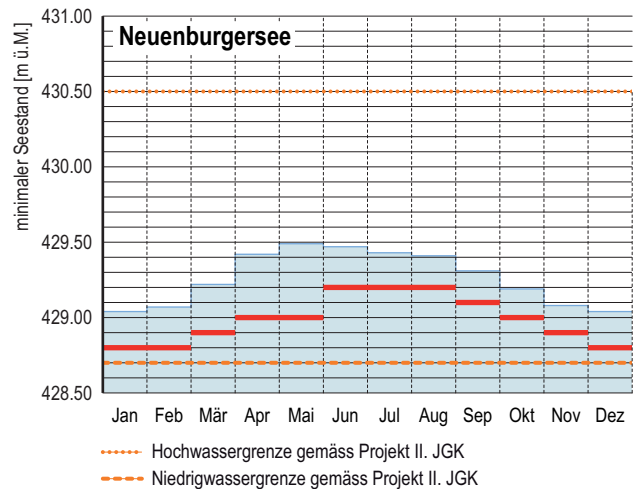
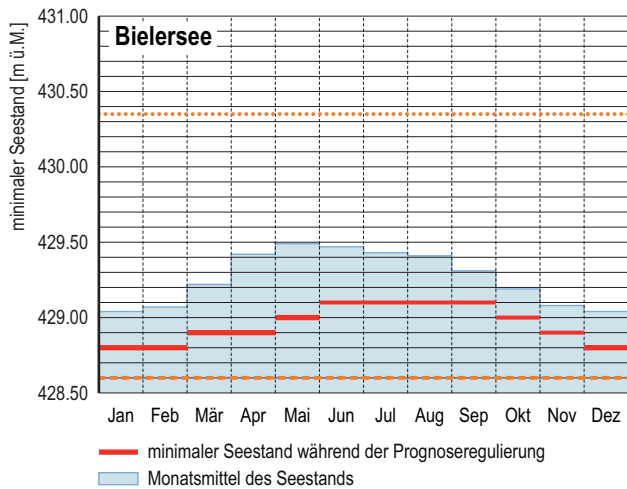


Während der Prognoseregulierung gelten hinsichtlich der Seestände folgende Randbedingungen:

Seewasserstände während der Prognoseregulierung

1. Die zulässige Differenz zwischen der Wasserspiegellage im Neuenburgersee und dem Bielersee darf maximal 40 cm betragen.
2. Während der Prognoseregulierung ist die temporäre Vorabsenkung durch die in Abb. A6.4 dargestellten minimalen Seestände limitiert.

**Abb. A6.4 > Zielgrössen für die minimalen Seestände des Bieler- und des Neuenburgersees während der Prognoseregulierung**



Der durch mögliche Vorabsenkungen im Einzugsgebiet des Bielersees (z. B. Schiffenensee, Entlastungsstollen am Thunersee) entstehende Mehrzufluss in den Bielersee kann durch entsprechende Steigerung des Abflusses beim Wehr Port kompensiert werden.

Besondere Fälle

Vorsorgliche Abweichungen vom Reglement sind auch in folgenden Fällen möglich:

- > Bei grossen Schneemengen im Einzugsgebiet der Jurarandseen (Jura, Voralpen, Alpen) wie z. B. während der Schneeschmelze im Frühling 1999 oder 2009 (vgl. Kap. 5.3.1).
- > Bei genereller Hochwassergefahr infolge hoher Abflussbereitschaft der Böden (Durchnässung der Böden und/oder gefrorene Böden).

Vorabsenkungen aufgrund dieser beiden Kriterien erfordern einen Beschluss per Telefonkonferenz.

**A6-2 Bereitschaft**

Während der Prognoseregulierung ist der Abfluss beim Wehr Port erhöht. Ist in dieser Situation aufgrund der Meteoprognoze mit einem Hochwasser aus dem Zwischeneinzugsgebiet zu rechnen, wird der Abfluss beim Wehr Port auf den gemäss Linienreglement vorgegebenen Wert reduziert. Damit wird die Bereitschaft erstellt, um bei Bedarf auf das bestehende Reglement zur Hochwasserregulierung nach Aebi überzugehen. Die Voraussetzungen für die Einleitung dieser Phase sind gegeben, wenn die Warnungen von MeteoSchweiz

Kriterien für den Übergang in die Bereitschaftsphase

- > grosse ausgedehnte Niederschläge im Bereich des Zwischeneinzugsgebiets Bielersee-Murgenthal, insbesondere der Emme, innerhalb der folgenden 24 Stunden (Niederschlagssummen von über 50 mm) oder
- > Gewitter für das Einzugsgebiet der Emme innerhalb der folgenden 24 Stunden (über 25 mm Niederschlag innert einer Stunde)

beinhalten. Als weiteres Kriterium dienen die Abflussprognosen des BAFU für die Emme bei Emmenmatt (Abflüsse über 100 m<sup>3</sup>/s innerhalb der nächsten 24 Stunden) und für die Aare bei Murgenthal (Abflüsse über 750 m<sup>3</sup>/s innerhalb der nächsten 24 Stunden).

Die maximale Drosselungsgeschwindigkeit beträgt 50 m<sup>3</sup>/s pro Stunde. Falls jedoch aufgrund einer sich sehr rasch ändernden Niederschlagsprognose eine Verschärfung der Lage und damit ein nahtloser Übergang zur Hochwasserregulierung erwartet werden muss, ist eine maximale Drosselungsgeschwindigkeit von 100 m<sup>3</sup>/s pro Stunde zulässig.

Drosselungsgeschwindigkeit

Während der Bereitschaftsphase soll der Abfluss am Wehr Port der Summe der gemessenen Zuflüsse der Aare bei Hagneck, der Zihl bei Gampelen und der Schüss bei Biel entsprechen, insgesamt jedoch maximal 400 m<sup>3</sup>/s betragen.

Abfluss beim Wehr Port während der Bereitschaftsphase

Die Phase der Bereitschaft wird entweder beendet durch:

- > den Übergang zur Hochwasserregulierung bei einem Hochwasser der Emme oder
- > die Rückkehr zur Prognoseregulierung im Fall einer entsprechenden Vorhersage für die Zuflüsse in die Jurarandseen oder
- > den Übergang zur Regulierung gemäss dem Linienreglement im Falle einer Beruhigung der Situation; dabei wird angestrebt, das Niveau der jeweiligen Monatsmittelergebnisse der Seestände zu erreichen.

Beendigung  
der Bereitschaftsphase

### A6-3 Hochwasserregulierung

Der Übergang zur Hochwasserregulierung erfolgt wie bisher, wenn die dafür im Reglement 1980/82 vorgesehenen Kriterien erfüllt sind. Als Anpassung wird jedoch die bisherige Begrenzung der Drosselungsbeschränkung von bisher 50 m<sup>3</sup>/s pro Stunde auf 100 m<sup>3</sup>/s pro Stunde erhöht, um dadurch bei rasch ablaufenden Ereignissen schneller reagieren zu können.

Neu wurde in Ergänzung zu den bestehenden Bestimmungen auch der Minimalabfluss am Wehr Port während der Hochwasserregulierung definiert. Dieser bemisst sich gemäss Tab. A6.1 in Abhängigkeit des Bielerseestands.

**Tab. A6.1 > Minimalabfluss am Wehr Port während der Phase der Hochwasserregulierung**

Bielerseestand [m ü.M.]	Minimalabfluss beim Wehr Port [m <sup>3</sup> /s]
unter 430.00	200
zwischen 430.00 und 430.34	250
über 430.35	300

Die obigen Zielwerte basieren auf ökologischen Überlegungen (Einhalten eines Minimalabflusses in der Aare unterhalb des Wehrs Port), auf Sicherheitsüberlegungen (Uferstabilität in der Aare unterhalb des Wehrs Port) und gewährleisten eine gewisse Ausgewogenheit des Schutzes von Unter- und Oberliegern.

Der Übergang von der Hochwasserregulierung zur Regulierung gemäss Linienreglement erfolgt wie bisher.

#### Literatur

BAFU (Bundesamt für Umwelt), Kantone Freiburg, Waadt, Neuenburg, Bern, Solothurn und Aargau, «Optimierung der Hochwasserregulierung der Juragewässerkorrektion – Sofortmassnahmen für die Regulierung des Wehrs Port». Konzept beschlossen von der Begleitgruppe zur

Ereignisanalyse 2007 anlässlich der Sitzung vom 4. Juli 2008.  
Von der eingesetzten Arbeitsgruppe konkretisiert am 15. Juli 2008 und überarbeitet am 27. August 2008.  
Verabschiedet von der Begleitgruppe zur Ereignisanalyse 2007 anlässlich der Sitzung vom 3. Oktober 2008.

**A7 Abfluss-Abfluss-Modellsystem für die Aare bei Murgenthal**

Nachfolgend werden die Anforderungen an ein Abfluss-Abfluss-Modellsystem (AA-Modellsystem) formuliert, das als möglicher Ersatz der im Verfahren nach Aebi enthaltenen Bilanzierungsmethode dienen kann (vgl. Kap. 5.5.4). Ein solches System soll:

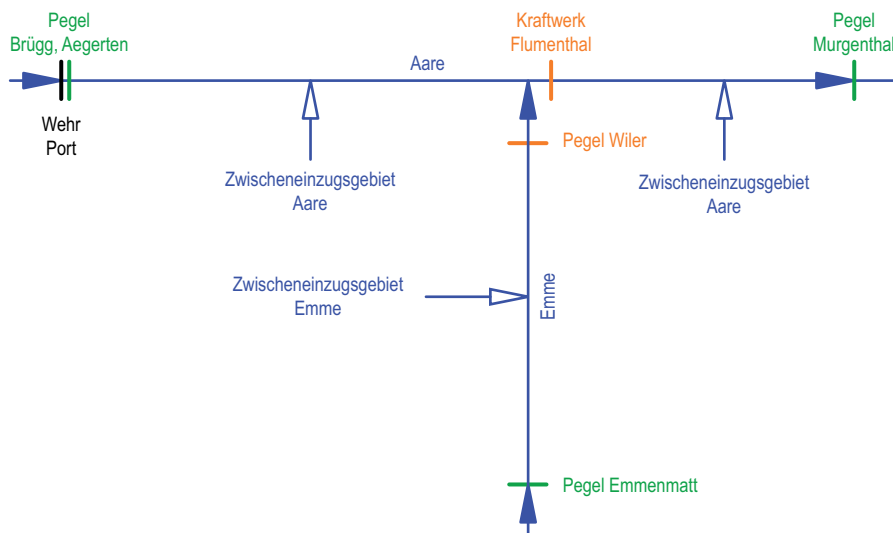
Anforderungen

- > die wesentlichen hydraulischen Prozesse abbilden,
- > mit den vorhandenen Eingabegrößen auskommen,
- > möglichst einfach zu handhaben sein,
- > klare Vorgaben für die Einstellung des Abflusses beim Wehr Port liefern,
- > die Kraftwerke (zumindest das Kraftwerk Flumenthal) in die Überlegungen einbeziehen.

In Abb. A7.1 ist ein mögliches Modellsystem schematisch dargestellt. Es enthält folgende Modellknoten:

- > Zuflüsse: Aare beim Wehr Port und Emme bei Emmenmatt
- > Wegfluss: Aare bei Murgenthal
- > Seitenzuflüsse: Zwischeneinzugsgebiete von Emme und Aare
- > Kontrollquerschnitte: Emme bei Wiler und Kraftwerk Flumenthal

**Abb. A7.1 > Aufbau des Abfluss-Abfluss-Modellsystems**



Die Beschreibung des Gerinneabflusses erfolgt mit den eindimensionalen Flachwassergleichungen von de Saint-Venant (Cunge et al. 1980), welche eine genaue Verfolgung der Hochwasserwellenausbreitung in offenen Gerinnen erlauben. Dieses Vorgehen, welches den Einsatz eines numerischen Gleichungslösers erfordert, wird auch als Flood-Routing bezeichnet.

Beschreibung des Gerinneabflusses

Im Rahmen der *Kalibrierung* werden die unbekanntes Modellgrößen (Zuflüsse aus den Zwischeneinzugsgebieten von Emme und Aare) ermittelt. Als Kontrollgrößen dienen dazu die Abflussdaten der Stationen Emme-Wiler und Aare-Murgenthal.

Kalibrierung und Betrieb

Im Rahmen der *Prognose* wird die Entwicklung des Abflusses in Murgenthal berechnet. Da auf die bekannten Zuflüsse von Emme-Emmenmatt und Aare-Brügg zurückgegriffen wird, beträgt der Vorhersagezeitraum wie beim bisherigen Bilanzierungsverfahren nach Aebi 4 Stunden. Für das Zwischeneinzugsgebiet sind Annahmen über die Entwicklung der Zuflüsse zu treffen. Im Verfahren nach Aebi (vgl. Kap. 5.3.2) wird angenommen, dass sich diese Zuflüsse über die nächsten 4 Stunden nicht ändern. Der Bezug weiterer Indikatoren (z. B. die Entwicklung der Niederschlagssummen aus gemessenen Radardaten) könnte hier hilfreich sein, um diese Annahmen zu verifizieren beziehungsweise um als Eingangsgrößen Verwendung zu finden.

Das hier vorgestellte AA-Modellsystem soll für einen Vorhersagezeitraum von 4 Stunden zuverlässigere Abflussprognosen für den Pegel Murgenthal liefern können. Das Modell bildet die Abflussdynamik im Gerinnesystem sehr genau ab und stellt damit gegenüber der bisherigen einfachen Bilanzrechnung einen deutlichen Fortschritt dar. Gleichzeitig kann auch der Kraftwerksbetrieb in die Betrachtungen einbezogen werden. Allerdings verbleiben die Unsicherheiten in Bezug auf die Entwicklung der Zuflüsse aus dem ungemessenen Teil des Zwischeneinzugsgebiets.

Prognosegüte und  
Vorhersagezeitraum

Um die Abflussprognose für den Pegel Murgenthal zu verbessern, ist eine Abfluss-Abflussmodellierung mit einem Routing-Ansatz notwendig. Nur dadurch lassen sich die nicht-linearen Effekte der Gerinneretention abbilden. Ein solches Modell kommt mit den bereits heute vorhandenen Messdaten aus, erlaubt jedoch keine Erweiterung des Vorhersagezeitraums. Für die Abschätzung der Entwicklung der ungemessenen Zuflüsse im Prognosezeitraum (4 Stunden) ist der Einbezug von Niederschlagsdaten (z. B. Radar) zu prüfen.

Folgerungen

**Literatur**

Cunge J.A., Holly F.M., Verwey A. 1980. Practical Aspects of Computational River Hydraulics. Pitman Advanced Pub. Program, Boston: 420 S.

# > Verzeichnisse

## Abbildungen

<b>Abb. 1.1</b> Entwicklung der Unwetterschäden 1972–2008 (teuerungsbereinigt, Preisbasis 2007)	30	<b>Abb. 2.5</b> Tägliche Niederschlagssummen vom 6.–9. August 2007, jeweils für den Zeitraum von 06:00 bis 06:00 UTC am Folgetag	45
<b>Abb. 1.2</b> Ausmass der Unwetterschäden im gesamten Jahr 2007 auf Gemeindeebene	31	<b>Abb. 2.6</b> Mehrtages-Niederschlagssummen	45
<b>Abb. 1.3</b> Zeitliche Verteilung der Schäden durch Hochwasser und Murgänge sowie durch Rutschungen und Sturzprozesse von Juni bis August 2007	31	<b>Abb. 2.7</b> 2-Tages-Niederschlagssummen	47
<b>Abb. 1.4</b> Ausmass der Unwetterschäden vom 8./9. August 2007 auf Gemeindeebene	32	<b>Abb. 2.8</b> Geschätzte Jährlichkeit der 1-Tages-Niederschlagssummen am 6., 7., 8. und 9. August 2007 an den Stationen mit mindestens 40 Jahre langen Beobachtungsreihen seit 1961	49
<b>Abb. 1.5</b> Aarauer Schachen und Pferderennbahn am 9. August 2007 um 18 Uhr	33	<b>Abb. 2.9</b> Geschätzte Jährlichkeit der 2- und 4-Tages- Niederschlagssumme vom 7. zum 8., respektive vom 6. zum 9. August 2007 an den Stationen mit mindestens 40 Jahre langen Beobachtungsreihen seit 1961	50
<b>Abb. 1.6</b> Mühlemattstrasse Aarau am 9. August 2007 um 8.10 Uhr	33	<b>Abb. 2.10</b> Extremwert-Diagramme für die Stationen Basel-Binningen, Aesch, Bern-Zollikofen, Gryon; Beziehung zwischen 4-Tages Niederschlagssumme und Jährlichkeit	51
<b>Abb. 1.7</b> Überschwemmung des Städtchens Laufen am 9. August 2007	34	<b>Abb. 2.11</b> Deterministische, operationelle COSMO-7 Niederschlagsvorhersage für den 8.8.2007	53
<b>Abb. 1.8</b> Ausuferung der Birs oberhalb von Zwingen am 9. August 2007 um 14 Uhr	34	<b>Abb. 2.12</b> Deterministische COSMO-2 Niederschlagsvorhersage für den 8.8.2007	55
<b>Abb. 1.9</b> Kleinboothafen und überschwemmte Strandpromenade in Biel am Morgen des 10. August 2007 um 06:30 Uhr	35	<b>Abb. 2.13</b> Deterministische, operationelle COSMO-7 Niederschlagsvorhersage für den 9.8.2007	56
<b>Abb. 2.1</b> Wetterübersicht für den 7., 8. und 9. August 2007, 12 UTC	41	<b>Abb. 2.14</b> Deterministische COSMO-2 Niederschlagsvorhersage für den 9.8.2007	57
<b>Abb. 2.2</b> Niederschlagsverlauf an diversen SMN-Stationen vom 6.8.2007 bis 9.8.2007	42	<b>Abb. 2.15</b> COSMO-LEPS Wahrscheinlichkeitsvorhersage vom 5.8.2007 12 UTC für 48h-Niederschlagssummen vom 7.8. 06 UTC bis 9.8. 06 UTC	58
<b>Abb. 2.3</b> Niederschlagsablauf vom 6. bis 9. August 2007	43		
<b>Abb. 2.4</b> Tägliche Niederschlagssumme aus der Radaranalyse (berechnet jeden Tag um 06:00 UTC), 6.–9. August 2007	44		

<b>Abb. 2.16</b> COSMO-LEPS Wahrscheinlichkeitsvorhersage vom 6.8.2007 12 UTC für 48h-Niederschlagssummen vom 7.8. 06 UTC bis 9.8. 06 UTC	59	<b>Abb. 4.4</b> Vergleich der Niederschlagssummen vom 08.08.2007 07:00 MEWZ bis zum 09.08.2007 07:00 MEWZ für verschiedene Teileinzugsgebiete, siehe Abb. 4.3	86
<b>Abb. 2.17</b> COSMO-LEPS Wahrscheinlichkeitsvorhersage vom 6.8.2007 12 UTC für 24h-Niederschlagssummen vom 8.8. 06 UTC bis 9.8. 06 UTC	60	<b>Abb. 4.5</b> Vergleich der Niederschlagssummen vom 09.08.2007 07:00 MEWZ bis zum 10.08.2007 07:00 MEWZ für verschiedene Teileinzugsgebiete, siehe Abb. 4.3	86
<b>Abb. 2.18</b> COSMO-LEPS Wahrscheinlichkeitsvorhersage vom 7.8.2007 12 UTC für 24h-Niederschlagssummen vom 8.8. 06 UTC bis 9.8. 06 UTC	61	<b>Abb. 4.6</b> Vergleich der stündlichen Niederschlagssummen für das Teileinzugsgebiet Emme – Emmenmatt	87
<b>Abb. 3.1</b> Abfluss ausgewählter Stationen im Einzugsgebiet der Aare, einerseits oberhalb und andererseits unterhalb des Bielersees, sowie Pegelstand des Bielersees; Stundenmittelwerte	68	<b>Abb. 4.7</b> Vergleich der beobachteten Abflüsse und Niederschläge mit den Ergebnissen der operationellen Vorhersage vom 08.08.2007 11:00 MESZ und der Vorhersage mit meteorologischen Messdaten für die Station Emme – Emmenmatt	88
<b>Abb. 3.2</b> Abfluss ausgewählter Stationen im Einzugsgebiet des Rheins bis Rheinfelden sowie von Rheinfelden bis Basel; Stundenmittelwerte	69	<b>Abb. 4.8</b> Vergleich der beobachteten Abflüsse und Niederschläge mit den Ergebnissen der operationellen Vorhersage vom 08.08.2007 11:00 MESZ und weiteren Vorhersagevarianten für die Station Aare – Murgenthal	89
<b>Abb. 3.3</b> Automatische Alarmauslösung aus Messstationen am 8.8. (links) und am 9.8. (rechts)	71	<b>Abb. 4.9</b> Vergleich des beobachteten Bielerseeausflusses bei der Station Aare – Brügg, Aegerten mit dem Ausfluss gemäss Linienreglement und dem Ausfluss, welcher für die Vorhersage vom 08.08.2007 11:00 MESZ manuell eingegeben wurde	91
<b>Abb. 3.4</b> Rangfolge der Abflussspitzen während des Hochwassers vom August 2007 innerhalb der Reihen der Jahresmaxima bei allen aktuellen eidgenössischen Abflussmessstationen	72	<b>Abb. 4.10</b> Mittelfristvorhersagen basierend auf dem EZMWF-Modell im Vergleich mit den beobachteten Abflüssen für die Station Rhein – Rheinfelden	93
<b>Abb. 3.5</b> Übersicht über die für die Hochwasserspitze vom August 2007 berechneten Jährlichkeiten (statistische Wiederkehrperiode in Jahren)	73	<b>Abb. 4.11</b> Beobachteter Abfluss im Vergleich mit den COSMO-2- Vorhersagen für die Station Emme – Emmenmatt	94
<b>Abb. 4.1</b> Vorhersage vom 08.08.2007, 20:00 MESZ – Prozentuale Abweichung der vorhergesagten von der beobachteten Höhe des Spitzenabflusses	83	<b>Abb. 4.12</b> Beobachter Abfluss im Vergleich mit den COSMO-2- Vorhersagen für die Station Thur – Andelfingen	95
<b>Abb. 4.2</b> Vorhersage vom 08.08.2007 20:00 MESZ – Abweichung des vorhergesagten vom beobachteten Zeitpunkt des Spitzenabflusses	83	<b>Abb. 4.13</b> Vergleich der Abflussvorhersagen für die Station Rhein – Rheinfelden basierend auf den Wettermodellen COSMO-7, EZMWF und COSMO-LEPS	96
<b>Abb. 4.3</b> Hydrologische Teileinzugsgebiete und Messstationen im Untersuchungsgebiet	84	<b>Abb. 5.1</b> Lage und Grösse des Einzugsgebiets der drei Jurarandseen bis zur Abflussmessstation Aare – Brügg, Aegerten und des Zwischeneinzugsgebiets von Brügg bis zur Messstelle Aare – Murgenthal	102

<p><b>Abb. 5.2</b> Längenprofil der Aare zwischen dem Bielersee und dem Kraftwerk Ruppoldingen 104</p> <p><b>Abb. 5.3</b> Jurarandgewässer vor der ersten Juragewässerkorrektion; modifiziert nach Kühne (2004) und Nast (2006) 105</p> <p><b>Abb. 5.4</b> Erste Juragewässerkorrektion 1868–1891; nach Müller (1974) 106</p> <p><b>Abb. 5.5</b> Zweite Juragewässerkorrektion 1962–1973; nach Müller (1959, 1974) 109</p> <p><b>Abb. 5.6</b> Jährliche Höchst-, Niedrigst- und Mittelwasserstände des Neuenburger- und Bielersees 110</p> <p><b>Abb. 5.7</b> Wehr Port; Blick vom Unterwasser mit dem Bielersee im Hintergrund 111</p> <p><b>Abb. 5.8</b> Beziehung zwischen dem Pegel des Bielersees und dem Abfluss beim Wehr Port für verschiedene Jahreszeiten 112</p> <p><b>Abb. 5.9</b> Regulierdiagramm des Regulierreglements 1980/82 113</p> <p><b>Abb. 5.10</b> Gliederung des Zwischeneinzugsgebiets von Port bzw. der Messstation Brügg, Aegerten bis Murgenthal für die Prognoserechnung nach Aebi 117</p> <p><b>Abb. 5.11</b> Jahresgang des Bielerseepegels von 1983 bis 2008 sowie Mittelwert des Seepegels für jeden Tag des Jahres (Tagesmittel) 119</p> <p><b>Abb. 5.12</b> Ganglinien der Zuflüsse und der Seestände des Hochwassers vom August 2005 (Tagesmittel) 121</p> <p><b>Abb. 5.13</b> Ganglinien der Zuflüsse und der Seestände des Hochwassers vom April 2006 (Tagesmittel) 121</p> <p><b>Abb. 5.14</b> Drosselung des Bielerseeausflusses am Wehr Port beim Emmehochwasser vom 9./10. November 2002 zur Verhinderung eines Abflusses über 850 m<sup>3</sup>/s in der Aare bei Murgenthal (Zeitangaben in Winterzeit) 122</p> <p><b>Abb. 5.15</b> Jahresmaxima des Abflusses der Aare in Murgenthal seit 1916 123</p>	<p><b>Abb. 5.16</b> Berechnete und beobachtete Wasserstände während des Ereignisses vom August 2007 für die Jurarandseen 126</p> <p><b>Abb. 5.17</b> Berechnete und beobachtete Abflüsse im Zihl- und Broyekanal sowie in der Aare unterhalb des Wehrs Port während des Ereignisses vom August 2007 127</p> <p><b>Abb. 5.18</b> Ergebnisse der hydraulischen Modellierung für den Abfluss der Aare bei Murgenthal und für den Gesamtzufluss aus dem Zwischeneinzugsgebiet (Zeitangaben in Winterzeit) 128</p> <p><b>Abb. 5.19</b> Vergleich der beobachteten Abflussganglinien und der rekonstruierten Ganglinien bei strikter Anwendung aller Reguliervorschriften während des Hochwassers vom 8./9. August 2007 für den Ausfluss am Wehr Port (oben) und am Pegel Murgenthal (unten) (Zeitangaben in Winterzeit) 130</p> <p><b>Abb. 5.20</b> Vergleich des Abflusses der Aare in Murgenthal mit der Abflussprognose gemäss Aebi-Rechnung (Zeitangaben in Winterzeit) 131</p> <p><b>Abb. 5.21</b> Zuflüsse zu den Jurarandseen bei ausgewählten grossen Hochwassern (Tagesmittel) 132</p> <p><b>Abb. 5.22</b> Abhängigkeit des Speicherbedarfs der Jurarandseen von der Jährlichkeit und der Dauerstufe; aus Petrascheck (2008) 134</p> <p><b>Abb. 5.23</b> Maximale simulierte Seestände für die ausgewählten Extremereignisse gemäss der Studie «Extremhochwasser im Einzugsgebiet der Aare» des Kantons Bern (BVE 2007) 135</p> <p><b>Abb. 5.24</b> Vergleich der Hochwasserabflüsse 2005 und 2007 an den beiden Pegelstellen der Emme (Stundenmittel; Zeitangaben in Winterzeit) 136</p> <p><b>Abb. 5.25</b> Die 19 grössten Zuflüsse aus dem Zwischeneinzugsgebiet zwischen dem Wehr Port und Murgenthal (Tagesmittel; Messperiode 1922 bis 2008) 137</p> <p><b>Abb. 5.26</b> Jahresmaxima des Abflusses der Emme beim Pegel Wiler (Messperiode 1922–2008) 137</p>
--	--

<b>Abb. 5.27</b> Handlungsfelder und Ziele zur Verbesserung der Hochwassersituation im System der Jurarandgewässer	140	<b>Abb. A1.1</b> D-PHASE Plattform, wie sie sich am 8.8.2007 um 14:00 Lokalzeit für die Region «Central Alps» präsentiert hat (level 2)	172
<b>Abb. 5.28</b> Schematische Darstellung der bisherigen Regulierpraxis im Vergleich zum Vorgehen bei der Prognoseregulierung	141	<b>Abb. A4.1</b> Beispiel der Zuordnung von Klassenfunktionen für die Zielbereiche Hochwasserschutz und Ufervegetation	189
<b>Abb. 5.29</b> Ermittlung des Bielerseeausflusses während der Prognoseregulierung	142	<b>Abb. A5.1</b> Betrachtete Fälle zur Prüfung der Sensitivität der Prognoseregulierung hinsichtlich Unschärfen der Prognose	191
<b>Abb. 5.30</b> Den Simulationen zugrunde liegende Zuflussszenarien und variierte Randbedingungen	144	<b>Abb. A5.2</b> Sensitivität der maximalen Seestände bezüglich Länge des Vorhersagezeitraums	192
<b>Abb. 5.31</b> Ganglinien des Seestands am Bieler- und Neuenburgersee für die Zuflüsse des Hochwassers von 1944	144	<b>Abb. A5.3</b> Sensitivität der maximalen Seestände bezüglich prognostiziertem Zeitpunkt des Ereignisses	193
<b>Abb. 5.32</b> Maximalwasserstände am Bieler- und Neuenburgersee für verschiedene Szenarien im heutigen Zustand und mit aktueller Regulierung, mit Prognoseregulierung sowie einer Erhöhung der maximalen Abflüsse beim Wehr Port und in Murgenthal	145	<b>Abb. A5.4</b> Sensitivität der maximalen Seestände bezüglich prognostizierter Grösse des Abflusses	194
<b>Abb. 5.33</b> Vergleich der in Abb. 5.32 gezeigten Ergebnisse mit den Resultaten der Simulationen für einen erweiterten Zihlkanal	147	<b>Abb. A5.5</b> Auswirkung der Prognoseregulierung bei einer Fehlprognose bei Nichteintreten eines vorhergesagten Ereignisses	196
<b>Abb. 5.34</b> Ganglinien der Seestände im Bieler- und Neuenburgersee, simuliert für die Zuflüsse vom August 2007 bei Regulierung gemäss Reglement 1980/82, gemäss Prognoseregulierung ohne Einschränkungen und gemäss umgesetzter Prognoseregulierung	149	<b>Abb. A6.1</b> Konzept für die Vorabsenkung der JGK-Seen und den Übergang zur Hochwasserregulierung	197
<b>Abb. 5.35</b> Häufigkeit des Übergangs zur Prognoseregulierung, abgeschätzt anhand der Jahresganglinien des Bielersees von 1983 bis 2008	150	<b>Abb. A6.2</b> Kriterium für den Übergang zur Prognoseregulierung in Abhängigkeit des aktuellen Bielerseestands und der für die folgenden 24 Stunden berechneten Änderung des Bielerseestands	199
<b>Abb. 5.36</b> Vergleich der Ganglinien der Emme bei Emmenmatt mit den Ganglinien weiterer Stationen im Zwischeneinzugsgebiet sowie ausgewählter Stationen angrenzender Einzugsgebiete für die Hochwasser 2005 und 2007 (Stundenmittel; Zeitangaben in Winterzeit)	152	<b>Abb. A6.3</b> Zielgrösse für den maximalen Ausfluss am Wehr Port während der Prognoseregulierung in Abhängigkeit des aktuellen Bielerseestands	200
<b>Abb. 5.37</b> Beispiel einer Abflussreduktion von 400 m <sup>3</sup> /s auf 200 m <sup>3</sup> /s am Wehr Port mit einer Drosselungsgeschwindigkeit von 50 m <sup>3</sup> /s pro Stunde (bisher) bzw. von 100 m <sup>3</sup> /s pro Stunde (neu)	153	<b>Abb. A6.4</b> Zielgrössen für die minimalen Seestände des Bieler- und des Neuenburgersees während der Prognoseregulierung	200
		<b>Abb. A7.1</b> Aufbau des Abfluss-Abfluss-Modellsystems	203

**Tabellen**

**Tab. 2.1**

Niederschlags-Gebietsmittel in mm (Tagessummen von 06 UTC bis 06 UTC vom Folgetag) in für spezielle Abflussanalysen ausgewählten Einzugsgebieten 54

**Tab. 2.2**

Warnungen der MeteoSchweiz von Montag 6. bis Donnerstag 9. August 63

**Tab. 3.1**

Vergleich der Abflussspitzen ausgewählter Messstationen 75

**Tab. 4.1**

Vom BAFU eingesetzte Wettermodelle im Rahmen des Forschungsprojekts MAP D-PHASE 79

**Tab. 4.2**

An die Kantone ausgegebene Abflussvorhersagen vom 06.08.2007 bis 09.08.2007 82

**Tab. 5.1**

Wichtigste Kenndaten der Jurarandseen (Periode 1983–2007) 102

**Tab. 5.2**

Im Rahmen der II. JGK festgelegte Hoch- und Niedrigwassergrenzen der drei Jurarandseen (Müller 1959) 114

**Tab. 5.3**

Einzugsgebietsflächen der berücksichtigten Messstationen im Zwischeneinzugsgebiet 118

**Tab. 5.4**

Mittlerer Gesamtzufluss zu den Jurarandseen der Hochwasser 2005 und 2006 für verschiedene Dauerstufen 120

**Tab. 5.5**

Ranglisten der gemittelten Zuflüsse zu den Jurarandseen für verschiedene Dauerstufen der 12 grössten Ereignisse 133

**Tab. A1.1**

In den Beurteilungsprotokollen aufgeführte Modelle und Häufigkeit der Erwähnungen pro Tag und insgesamt; die grau hinterlegten Modelle waren Teil von MAP D-PHASE 175

**Tab. A3.1**

Qualität der Spitzenabflussbestimmung für die vom Auguthochwasser 2007 betroffenen Stationen 180

**Tab. A3.2**

Chronologie der Hochwasseralarme 8./9. August 2007 183

**Tab. A3.3**

Übersicht über die Abflussspitzen vom 8.–13. August 2007 (in m<sup>3</sup>/s; Zeitangaben in Winterzeit) und deren statistische Einordnung 184

**Tab. A6.1**

Minimalabfluss am Wehr Port während der Phase der Hochwasserregulierung 202