

07  
07

# > Ereignisanalyse Hochwasser 2005

*Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung*



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU





07  
—  
07

# > Ereignisanalyse Hochwasser 2005

*Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung*

*Editoren: Gian Reto Bezzola, Christoph Hegg*

## **Impressum**

### **Herausgeber**

Bundesamt für Umwelt BAFU, 3003 Bern  
Das BAFU ist ein Amt des Eidgenössischen Departements für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).  
Eidg. Forschungsanstalt WSL, 8903 Birmensdorf

### **Projektleitung**

Dr. Gian Reto Bezzola, BAFU, Abteilung Gefahrenprävention  
Dr. Christoph Hegg, WSL, Programmleiter

### **Redaktion**

Dr. Gian Reto Bezzola, BAFU, Abteilung Gefahrenprävention  
Dr. Christoph Hegg, WSL, Programmleiter  
Anja Koschni, WSL, Forschungseinheit Gebirgshydrologie und  
Wildbäche

### **Autoren**

Aller Risk Management, 8057 Zürich:  
Dörte Aller  
AquaVision Engineering, 1015 Lausanne:  
Dr Stéphanie André, Dr. Erik Bollaert  
Eidg. Forschungsanstalt WSL, 8903 Birmensdorf:  
Dr. Christoph Hegg, Nadine Hilker, Dr. Daniel Köchli,  
Prof. Dr. Dieter Rickenmann, Christian Rickli, Flurin Sutter,  
Tilo Usbeck, Dr. Peter Waldner  
Bundesamt für Umwelt, 3003 Bern:  
Dr. Gian Reto Bezzola, Robert Dietzig, Adrian Eberhard,  
Eva Gertsch, Dr. Domenico Alessandro Grasso, Dr. Adrian Jakob,  
Caroline Kan, Dr. Hugo Raetzo, Beat Sigrist,  
Prof. Dr. Manfred Spreafico, Stephan Vogt  
Petrascheck Wasserwirtschaftsberatung, 5408 Ennetbaden:  
Dr. Armin Petrascheck  
Hydrologie-Wasserbau, 3322 Urtenen-Schönbühl:  
Dr. Christoph Lehmann  
MeteoSchweiz, 8044 Zürich:  
PD Dr. Mathias Rotach, Peter Albisser, PD Dr. Christof Appenzeller,  
Dr. Stefan Bader, Olivier Duding, Dr. Pierre Eckert,  
PD Dr. Christoph Frei, Dr. Urs Germann, Patrick Hächler,  
Dr. Mark Liniger, Francis Schubiger,  
Dr. André Walser, Peter Zbinden  
Schälchli, Abegg + Hunzinger, 3007 Bern:  
Dr. Lukas Hunzinger  
Service conseil Zones alluviales, 1400 Yverdon-les Bains:  
Anne Claude Cosandey  
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie,  
8092 Zürich:  
Lukas Schmocker

## **Zitiervorschlag**

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. 215 S.

## **Gestaltung**

Ursula Nöthiger-Koch, 4813 Uerkheim

## **Titelfoto**

Sarnersee, 23.08.2005, Oberforstamt Kanton OW

## **Bezug**

BAFU  
Dokumentation  
CH-3003 Bern  
Fax +41 (0) 31 324 02 16  
docu@bafu.admin.ch  
[www.umwelt-schweiz.ch/uw-0707-d](http://www.umwelt-schweiz.ch/uw-0707-d)

## **Bestellnummer / Preis**

UW-0707-D / CHF 25.– (inkl. MWSt)

© BAFU / WSL 2007

# > Inhalt

<b>Abstracts</b>	<b>5</b>		
<b>Vorwort</b>	<b>7</b>		
<b>Zusammenfassung</b>	<b>9</b>		
<b>Einleitung</b>	<b>15</b>		
<hr/>			
<b>1</b>	<b>Meteorologie</b>	<b>19</b>	
1.1	Einleitung	19	
1.2	Meteorologischer Verlauf	19	
1.2.1	Synoptische Situation und Niederschlagsentwicklung	20	
1.2.2	Klassifikation der synoptischen Lage	25	
1.3	Klimatologische Einordnung	27	
1.3.1	Niederschlagsmengen	27	
1.3.2	Wie sind die Niederschläge im klimatologischen Vergleich einzuordnen?	30	
1.3.3	Starkniederschläge und die Klimaänderung	34	
1.4	Vergleichbare Ereignisse in der Vergangenheit	35	
1.5	Erkenntnisse	36	
<hr/>			
<b>2</b>	<b>Hydrologie Fließgewässer</b>	<b>39</b>	
2.1	Einleitung	39	
2.2	Datenerfassung	39	
2.3	Qualität der Messwerte	42	
2.4	Übersicht über den Verlauf des Hochwassers	48	
2.5	Statistische Einordnung des Ereignisses	51	
2.5.1	Methodik	51	
2.5.2	Resultate der statistischen Auswertungen	54	
2.6	Gebietsbilanzen	59	
2.6.1	Methodik	59	
2.6.2	Gebietsniederschläge	60	
2.6.3	Spitzenabflüsse und spezifische Spitzenabflüsse	62	
2.6.4	Abflussvolumina	64	
2.6.5	Volumenabflusskoeffizienten	66	
2.6.6	Rückschlüsse auf die Qualität der Eingangsdaten	69	
2.7	Erkenntnisse	69	
<hr/>			
<b>3</b>	<b>Hydrologie Seen</b>	<b>71</b>	
3.1	Einleitung	71	
3.2	Das Verhalten der Seen bei Hochwasser	72	
3.2.1	Grundsätzliches	72	
3.2.2	Kenndaten der untersuchten Seen	74	
3.3	Beobachtungsreihen und statistische Einordnung der Seestände	75	
3.4	Der Ablauf des Ereignisses	77	
3.5	Das Verhalten der einzelnen Seen	79	
3.5.1	Walensee	79	
3.5.2	Sarnersee	81	
3.5.3	Der Vierwaldstättersee	82	
3.5.4	Der Zürichsee	84	
3.5.5	Die Juragewässer Bielersee, Neuenburgersee, Murtensee	86	
3.5.6	Der Brienersee	90	
3.5.7	Der Thunersee	91	
3.5.8	Der Zugersee	93	
3.5.9	Der Lauerzersee	94	
3.6	Erkenntnisse	95	
<hr/>			
<b>4</b>	<b>Effet des ouvrages d'accumulation</b>	<b>99</b>	
4.1	Objectifs et Méthodologie	99	
4.2	Volumes stockés par les ouvrages d'accumulation	100	
4.3	Réduction de la pointe de la crue par les ouvrages d'accumulation	102	
4.4	Effet des ouvrages d'accumulation sur les lacs naturels	104	
4.5	Bilan	106	
<hr/>			
<b>5</b>	<b>Niederschlags- und Abflussvorhersage</b>	<b>107</b>	
5.1	Einleitung	107	
5.2	Wettervorhersagen von MeteoSchweiz	108	
5.2.1	Vorhersage der synoptischen Lage	108	
5.2.2	Das hoch aufgelöste numerische Modell COSMO	109	
5.2.3	Probabilistische Vorhersagen	111	
5.2.4	Synthese der Wettervorhersagen	114	
5.3	Abflussvorhersagen der Abteilung Hydrologie des BAFU	115	
5.3.1	Vorhersagesystem	116	
5.3.2	Vorhersagetätigkeit	116	
5.3.3	Vorhersagegüte	121	

5.3.4	Synthese Abflussvorhersagen	123	<b>9</b>	<b>Schwemmholz</b>	<b>181</b>
5.4	Erkenntnisse	124	9.1	Einführung	181
<hr/>			9.2	Angefallene Schwemmholzmengen	183
<b>6</b>	<b>Schäden</b>	<b>127</b>	9.3	Schwemmholzprozesse in Wildbächen	184
6.1	Einleitung	127	9.4	Zusammensetzung von Schwemmholzablagerungen	186
6.2	Datengrundlagen	127	9.5	Erkenntnisse und Ausblick	192
6.3	Zuordnung der Daten	128	<hr/>		
6.4	Schadensübersicht	130	<b>10</b>	<b>Rutschungen</b>	<b>195</b>
6.5	Schadensprozesse und betroffene Regionen	132	10.1	Einleitung	195
6.6	Dokumentation der Prozesse und der Schäden nach Kantonen	135	10.2	Mittel- bis tiefgründige Rutschprozesse	197
6.7	Vergleich mit früheren Ereignissen	144	10.3	Flachgründige Rutschprozesse	204
6.8	Erkenntnisse	147	10.4	Erkenntnisse und Ausblick	209
<hr/>			<hr/>		
<b>7</b>	<b>Feststoffbeobachtungen</b>	<b>149</b>	<b>11</b>	<b>Fazit</b>	<b>211</b>
7.1	Einleitung	149	<hr/>		
7.2	Geschiebebeobachtungen	149			
7.2.1	Beschreibung des Messnetzes	149			
7.2.2	Methodik	151			
7.2.3	Ergebnisse der Erhebungen	151			
7.2.4	Einordnung	154			
7.3	Schwebstoffmessungen	155			
7.3.1	Das Schwebstoffmessnetz	155			
7.3.2	Messtechnik	155			
7.3.3	Stationen im betroffenen Gebiet	156			
7.3.4	Ermittlung der Konzentration anhand von Trübungsmessungen	157			
7.3.5	Ermittlung der Frachten	157			
7.3.6	Einordnung	160			
7.4	Erkenntnisse	160			
<hr/>					
<b>8</b>	<b>Gerinneprozesse</b>	<b>163</b>			
8.1	Einleitung	163			
8.2	Wildbäche	164			
8.3	Gebirgsflüsse	167			
8.4	Talflüsse	172			
8.5	Veränderungen in Auengebieten	175			
8.6	Diskussion und Bewertung	177			
8.7	Erkenntnisse	178			
8.8	Ausblick	179			

## > Abstracts

The flood of August 2005 resulted in six casualties and caused total property damages of three billion Swiss Francs. With regard to the damages the event is thus without parallels within the last three decades. Continuing precipitations over large areas led to exceptionally large discharges and high lake levels. Flooding, erosion, overbank sedimentation, landslides and debris flow deposition were the dominant damage causing processes. When considering the entire event and a longer period of time, the event is rare, but not exceptional. Therefore, flood events of similar magnitude and extent have to be expected in the future.

Das Hochwasser vom August 2005 forderte in der Schweiz 6 Todesopfer und verursachte Sachschäden in der Höhe von insgesamt 3 Mrd. Franken. Hinsichtlich der Schäden ist es somit innerhalb der letzten drei Jahrzehnte ohne Parallele. Grossflächige und lang anhaltende Niederschläge führten zu aussergewöhnlichen Abflüssen und Seeständen. Überflutung, Erosion, Übersarung, Rutschungen und Übermürung waren die massgebenden Schadensprozesse. In seiner Gesamtheit und über eine längere Zeitperiode betrachtet, ist das Ereignis aber nicht als aussergewöhnlich, sondern höchstens noch als selten zu bezeichnen. Mit dem wiederholten Auftreten ähnlicher Hochwasser muss auch in Zukunft gerechnet werden.

La crue d'août 2005 a causé la mort de 6 personnes et provoqué des dommages matériels à hauteur de 3 milliards de francs. Du point de vue de ces dommages, aucun parallèle ne peut être tiré avec un autre événement de ces 3 dernières décennies. Les précipitations étendues et persistantes ont conduit à des débits et à des niveaux des lacs extraordinaires. Inondation, érosion, épandages d'alluvions, glissements ou dépôts de laves torrentielles furent les processus déterminants pour les dégâts. En considérant son intégralité et une longue période de temps, l'événement n'est pas exceptionnel, mais au pire peut être qualifié de rare. Il faut compter avec la répétition de telles crues dans le futur.

L'alluvione dell'agosto 2005 ha provocato 6 morti e danni per circa 3 miliardi di franchi. Per l'ampiezza dei danni è stato l'evento più grave degli ultimi trenta anni. Le piogge estese e di lunga durata hanno prodotto deflussi e livelli dei laghi eccezionali. Le inondazioni, le erosioni, gli alluvionamenti, le frane e le colate detritiche sono stati i processi dannosi principali. Nella sua totalità e un intervallo di tempo più lungo, notiamo che l'evento non è eccezionale, al massimo può essere considerato raro. Alluvioni simili si verificheranno anche in futuro.

**Keywords:**

Flood

Rare natural event

Total damages of 3 billion Swiss Francs

**Stichwörter:**

Hochwasser

seltenes Naturereignis

3 Mrd. Franken Gesamtschäden

**Mots-clés :**

Crue

Événement naturel rare

Dommages totaux de 3 milliards de francs

**Parole chiave:**

Alluvione

evento raro

danni complessivi di 3 miliardi di franchi



---

## > Vorwort

Wasser spendet als unverzichtbares Element nicht nur Leben. Es kann auch zerstörerische Kräfte freisetzen, die den Menschen und seinen Lebensraum bedrohen. Im August 2005 bestätigte sich diese alte Wahrheit einmal mehr in erschreckendem Ausmass. Das durch intensive und grossflächige Niederschläge am Alpennordhang ausgelöste Hochwasser forderte 6 Todesopfer und verursachte Schäden von insgesamt 3 Mrd. Franken. Vom Ereignis betroffen waren neben der Schweiz auch Österreich bis in die Region Salzburg sowie Südbayern in Deutschland.

Derartige Grossereignisse bieten eine gute Gelegenheit, um solch seltene Naturkatastrophen umfassend zu untersuchen. Unmittelbar nach dem Hochwasser 2005 erteilte deshalb das Eidgenössische Departement für Umwelt, Verkehr und Kommunikation UVEK dem damaligen Bundesamt für Wasser und Geologie BWG den Auftrag, die Ursachen und Auswirkungen des Ereignisses zu analysieren. Gleichzeitig wurde beschlossen, Teile des BWG mit dem damaligen Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL zum neuen Bundesamt für Umwelt BAFU zusammenzuführen. Ein wesentliches Ziel dieser Zusammenführung ist die Stärkung der Gefahrenprävention. Die Analyse des Hochwassers vom August 2005 bildet deshalb einen ersten Meilenstein für die im Rahmen dieser Reorganisation entstandene Abteilung Gefahrenprävention des BAFU. Das aus der Analyse resultierende bessere Verständnis der Prozesse und die Erkenntnisse zur Wirksamkeit unterschiedlicher Massnahmen werden eine zentrale Grundlage für den zukünftigen Hochwasserschutz in der Schweiz bilden, für den diese Abteilung auf der Bundesebene die Verantwortung trägt.

Analysieren bedingt aber vor allem das in Frage stellen von bestehenden Konzepten und Hypothesen. Dies ist eine Kernaufgabe der Forschung. Forschungsinstitutionen spielen deshalb auf allen Ebenen der Analyse eine zentrale Rolle. Analysieren und Verstehen allein genügt jedoch nicht. Die gewonnenen Erkenntnisse und erarbeiteten Grundsätze für den Schutz vor seltenen grossen Ereignissen müssen auch umgesetzt werden. Die Bearbeitung der einzelnen Teilprojekte der Ereignisanalyse erfolgt deshalb partnerschaftlich durch die betroffenen Fachstellen des Bundes und Partnern aus dem universitären bzw. dem privatwirtschaftlichen Bereich. Dieses Vorgehen gewährleistet auch eine direkte Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse in der Verwaltung. In diesem Sinne erfolgt auch die Leitung der Ereignisanalyse partnerschaftlich durch das BAFU und die Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL.

Die Ergebnisse der Ereignisanalyse werden in zwei Dokumentationsberichten sowie einem anschliessenden Synthesebericht beschrieben. Der vorliegende erste Band gibt eine Übersicht der abgelaufenen Prozesse, der entstandenen Schäden und analysiert die Niederschlags- und Abflussvorhersagen. Weiter wird eine erste Einordnung des Ereignisses vorgenommen. Der zweite Bericht wird eine vertiefte Analyse ausgewählter Prozesse beinhalten und schwergewichtig den Bereichen Intervention, Verhalten und Wirksamkeit von präventiven Massnahmen sowie Gefahrengrundlagen gewidmet sein.

---

Mit diesem ersten Bericht soll nicht zuletzt für den zweiten Teil der Analyse eine gemeinsame Ausgangsbasis geschaffen werden.

Die Unterzeichnenden danken allen an der Analyse der Hochwasser vom August 2005 direkt oder indirekt Beteiligten für die geleistete Arbeit und den partnerschaftlichen Geist, in dem der Schweizerische Hochwasserschutz im Rahmen dieser Analyse weiterentwickelt wird.

Andreas Götz  
Vizedirektor  
Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Dr. Jakob Roost  
Direktor a. i.  
Eidg. Forschungsanstalt für Wald,  
Schnee und Landschaft (WSL)

---

## > Zusammenfassung

Mit Gesamtschäden von rund 3 Mrd. Franken übertrifft das Hochwasser vom August 2005 deutlich alle anderen Naturereignisse seit 1972, dem Beginn der systematischen Erfassung der Unwetterschäden. Das Hochwasser forderte 6 Todesopfer und führte mancherorts zu einer Überforderung der lokalen Einsatzkräfte. In der Schweiz war der gesamte Alpennordhang zwischen der Sarine und dem Alpenrhein betroffen. Nach Osten erstreckte sich das betroffene Gebiet bis in die Region Salzburg / Österreich hinein und nach Norden bis Südbayern / Deutschland.

Ereignisse wie das Hochwasser vom August 2005 bieten eine gute Gelegenheit, aussergewöhnliche Naturereignisse umfassend zu untersuchen. Im Rahmen der Ereignisanalyse Hochwasser 2005 werden – entsprechend dem Modell des integralen Risikomanagements – neben den Naturprozessen die Güte der Gefahrengrundlagen und ihre Umsetzung analysiert, das Verhalten und die Wirkung der Schutzmassnahmen untersucht, sowie die Effizienz der Vorhersagen, Warnungen, Alarmierungen und des Krisenmanagements überprüft. Die Dokumentation der Ergebnisse erfolgt in drei Berichten. Der vorliegende erste Band gibt eine Übersicht der abgelaufenen Prozesse, der entstandenen Schäden, analysiert die Niederschlags- und Abflussvorhersagen und enthält eine erste Einordnung des Ereignisses. Der zweite Bericht wird eine vertiefte Analyse ausgewählter Prozesse beinhalten und schwergewichtig den Bereichen Intervention, Verhalten und Wirksamkeit von präventiven Massnahmen sowie Gefahrengrundlagen gewidmet sein. Der abschliessende Synthesebericht wird die Erkenntnisse, Konsequenzen und Empfehlungen für den zukünftigen Umgang mit Naturgefahren in der Schweiz für ein breiteres Publikum zusammenfassen.

Motivation und Ziele

Auslöser für die grossflächigen Starkniederschläge im August 2005 war ein stabiles Tiefdrucksystem südlich der Alpen, welches feuchte Luftmassen an den Alpennordrand führte. Am Alpennordhang ergaben sich dadurch am 21. und 22. August weiträumig Niederschläge von deutlich über 100 mm in 48 Stunden. Auf einer Fläche von gut 1200 km<sup>2</sup> fiel ein Niederschlag von mehr als 200 mm. Das gesamte Niederschlagsvolumen über den Gebieten, die mehr als 100 mm erhalten haben, beträgt rund 1 km<sup>3</sup>. Dies entspricht etwa einem Viertel des Volumens des Zürichsees oder dem 12-fachen mittleren Tagesabfluss des Rheins bei Basel. An einigen Stationen resultierten Niederschläge, wie sie in den teilweise über 100 Jahre langen Messreihen bisher nicht beobachtet wurden. Entsprechend wurden für einzelne Stationen im Berner Oberland und der Zentralschweiz teilweise sehr lange statistische Wiederkehrperioden von mehreren hundert Jahren ermittelt. Dies bedeutet jedoch nicht a priori, dass das Ereignis als Ganzes aussergewöhnlich selten ist. Ausser in kleinen Einzugsgebieten ist für den Abfluss primär nicht der an den Niederschlagsstationen gemessene Punktniederschlag massgebend, sondern der Niederschlag über dem gesamten Gebiet. Die Wiederkehrdauer des Gebietsniederschlags über dem gesamten betroffenen Gebiet beträgt knapp 80 Jahre. Entsprechend ist das Niederschlagsereignis vom August 2005 zwar selten, aber nicht aussergewöhnlich. Mit vergleichbaren Niederschlagsereignissen muss

Meteorologie

demnach auch in näherer Zukunft gerechnet werden. Wie die Auftretenswahrscheinlichkeit derartiger Ereignisse durch die Klimaänderung beeinflusst wird, lässt sich zum heutigen Zeitpunkt noch nicht schlüssig beantworten.

Das Hochwasser vom August 2005 stellt insgesamt das grösste Ereignis dar, welches das Schweizer Abflussmessnetz bisher registriert hat. Spitzenwerte wurden vor allem an den Abflussmessstationen in der Innerschweiz und im Berner Oberland registriert, also im Zentrum des Niederschlagsgebietes. Relativ stark betroffen war auch das gesamte Einzugsgebiet der Aare im Schweizer Mittelland, wo sich die Abflüsse aus den vom Niederschlagszentrum betroffenen Regionen vereinen. Nach dem Zusammenfluss mit dem Rhein, dessen Einzugsgebiet vom Niederschlag weniger betroffen war, nahm die Bedeutung des Ereignisses rasch ab. Im betroffenen Gebiet liegen 94 Abflussmessstationen. An 32 Stationen wurden neue Höchstwerte gemessen, bei 16 Stationen lag der Abfluss sogar mehr als 25% über dem bisherigen Maximum. Unter den Stationen mit längeren Messreihen fallen vor allem die Engelberger Aa bei Buochs und die Sarner Aa bei Sarnen auf. An der Engelberger Aa lag der Abfluss im August 2005 rund 85% über dem zuvor beobachteten Maximum. In der Sarner Aa, wo die Abflüsse seit 1923 gemessen werden, floss im August fast 2.5-mal mehr Wasser als beim bisher grössten Ereignis ab. Die statistische Einordnung solcher hohen Abflusswerte ist schwierig und Unsicherheiten im Bereich eines Faktors 2 und mehr sind möglich. Ein Abflusswert, der sich statistisch kaum einordnen lässt, muss aber nicht unbedingt falsch sein. Solche Werte können zustande kommen, wenn ab einer gewissen Niederschlagsmenge andere Abflussbildungs- und Konzentrationsprozesse ablaufen, die sich nur durch aufwändige hydrologische Detailuntersuchungen identifizieren lassen. Beispiele dazu und Möglichkeiten ihrer statistischen Bearbeitung werden im zweiten Teil der Ereignisanalyse beschrieben.

Hydrologie Fließgewässer

Das hydrometrische Messnetz hat sich 2005 generell bewährt. Probleme bei der Verbreitung der erhobenen Informationen während des Ereignisses wurden erkannt und sind teilweise bereits behoben worden. Die Qualität der erhobenen Daten kann als befriedigend bis gut bezeichnet werden. Mittels Gebietsbilanzen erfolgte eine Plausibilisierung der Abfluss- und Niederschlagsdaten. Der Vergleich der Gebietsniederschläge, Spitzenabflüsse, Abflussvolumen und Volumenabflusskoeffizienten der vom Hochwasser 2005 betroffenen Gebiete zeigt, dass die erhobenen Abfluss- und Niederschlagsdaten weitgehend plausibel sind. Sehr hohe oder sehr tiefe Volumenabflusskoeffizienten lassen sich in der Regel durch entsprechende Niederschläge, Rückhalt oder anthropogene Eingriffe erklären. Bei wenigen Einzugsgebieten lassen sich heute keine plausiblen Erklärungen für auffallend grosse oder kleine Werte finden. Dies trifft besonders für die Gebiete Alp-Einsiedeln, Minster-Euthal und Kleine Emme-Werthenstein zu. Für diese Gebiete müssen noch weitere Abklärungen getroffen werden.

Güte der Messwerte

Für die grossen Voralpenseen war das Hochwasser vom August 2005 ein aussergewöhnliches Ereignis, das vor allem am Sarnersee, Brienersee, Thunersee und Bielersee zu Rekordwasserständen führte. Die Intensität des Ereignisses nahm gegen Osten hin ab. Der Vierwaldstättersee blieb knapp unter der bisherigen Rekordmarke von 1910 und der Zürichsee erreichte den dritthöchsten Stand seit 1953. Ausserordentlich waren im August 2005 die grossen Zuflussvolumina innerhalb von 2–5 Tagen, die zu extrem

Hydrologie Seen

raschen Seeanstiegen führten. Am Walensee, Sarnersee und Brienersee betrug der Seeanstieg über 1 m am Tag, am Vierwaldstättersee, Thunersee und Bielersee zwischen 60 und 80 cm. Die maximalen täglichen Zuflussvolumina waren zum Teil doppelt so hoch wie die bisher beobachteten Werte. Durch den Rückhalt in den Seen wurden diese Zuflüsse markant gedämpft, so dass die Ausflüsse im Mittel nur noch halb so gross waren. Über alle Seen betrachtet, betrug der Rückhalt rund 720 Mio. m<sup>3</sup>. Dies entspräche z.B. einer Überflutung des ganzen Kantons Solothurn um gut 90 cm. Letztlich sind bei jedem See sowohl der Speicherraum als auch die Ausflusskapazität begrenzt. Das Ereignis vom August 2005 hat in vielen Fällen diese Grenzen aufgezeigt. Je grösser der Zufluss zu einem See ist, desto weniger kann der sich ergebende Seestand beeinflusst werden. Deshalb ist es wichtig, dass sich Seeanstösler durch eine geeignete Abdichtung ihrer Gebäude gegen hohe Grundwasserstände und hohe Seespiegel schützen.

Die Analyse der Einzugsgebiete der Sarine, der Aare bis zum Brienersee, der Urner Reuss und der Glarner Linth zeigt einen massgeblichen Einfluss der Kraftwerkspeicher auf die Abflüsse während des Hochwassers vom August 2005. So führte der Rückhalt in den Speicherseen zu einer Reduktion der Abflussspitzen in der Sarine bei Laupen von 12%, in der Aare bei Brienzwiler von 24%, in der Reuss bei Seedorf von 11% und in der Linth bei Mollis von 22%. Ohne den Einfluss der Kraftwerksspeicher wären in den natürlichen Seen noch höhere Seestände erreicht worden. Die Minderung der maximalen Seestände infolge des Rückhalts in den Speicherseen betrug beim Walensee und Brienersee rund 30–35 cm, beim Thuner- und Bielersee rund 10 cm und beim Vierwaldstättersee 4 cm. Wegen des grossen Dämpfungseffekts war der Einfluss der Kraftwerksspeicher flussabwärts der grossen Voralpenseen relativ bescheiden. Bemerkenswert ist der Umstand, dass die Wirkung der Kraftwerke selbst bei einem derartigen Grossereignis noch nicht erschöpft war. Im Fall des Grimselsees wurde dies durch den Umstand begünstigt, dass infolge Revision der Seestand zu Beginn des Ereignisses aussergewöhnlich tief war.

**Einfluss der Kraftwerkspeicher**

Das Ereignis vom August 2005 hat deutlich die Probleme und Grenzen aufgezeigt, die heute in der Vorhersage von seltenen Naturereignissen bestehen. Der Vergleich der Ergebnisse der meteorologischen Vorhersagemodelle zeigt, dass die Aussagegenauigkeit der heutigen deterministischen Modelle begrenzt ist und die Ergebnisse in Bezug auf ein lokales Ereignis manchmal sogar widersprüchlich sein können. Die Ursache dafür ist nicht in einer schlechten Qualität der Modelle zu suchen, sondern vor allem im chaotischen Verhalten des Systems Atmosphäre und in der immer vorhandenen Unsicherheit über die Anfangsbedingungen beim Beginn der Simulation. Deshalb wird heute vermehrt mit so genannten «Ensemble Vorhersagen» gearbeitet.

**Niederschlags- und Abflussvorhersagen**

Die Unsicherheit in der Wettervorhersage wirkt sich vollumfänglich auf die Abflussvorhersagen aus. Ausserdem sind die räumlichen Massstäbe der Meteorologie und der Hydrologie grundsätzlich verschieden. Die hydrologischen Modelle bräuchten für präzise Vorhersagen einzugsgebietsscharfe quantitative Niederschlagsvorhersagen. Allerdings ist es nicht möglich mit meteorologischen Vorhersagemodellen diese Genauigkeiten jemals zu erreichen. Vor allem im Bereich der kurzzeitigen Vorhersagen (Nowcasting) sind zwar künftig erhebliche Verbesserungen zu erwarten. Unsicherhei-

ten werden aber bleiben. Im Umgang mit diesen Unsicherheiten brauchen Entscheidungsträger auf allen Stufen fachliche Unterstützung durch Naturgefahrenspezialisten.

Das Hauptproblem bei den Abflussvorhersagen im August 2005 war aber primär von struktureller Art. So waren die technischen Systeme zur Verbreitung der Informationen nicht auf die aufgetretenen Belastungen ausgelegt. Ausserdem waren diese Systeme nicht redundant verfügbar und der Personalbestand war viel zu klein.

Das Hochwasser vom August 2005 stellt mit 3 Mrd. Franken Schäden bezüglich finanzieller Auswirkungen das schwerste Unwetterereignis seit Beginn der systematischen Erfassung der Unweterschäden im Jahre 1972. Die verhältnismässig kleine Zahl von Todesfällen ist primär einer effizienten Notfallplanung (unter anderem Alarmierung und Evakuationen) zu verdanken. Rund 25 % der Gesamtschäden resultierten allein im Kanton Bern. In den fünf am stärksten betroffenen Kantonen Bern, Luzern, Uri, Obwalden und Nidwalden sind zusammen rund 75 % der Gesamtschäden zu verzeichnen. Werden die Schäden der Kantone pro Fläche bzw. pro Einwohner betrachtet, so resultieren für den Kanton Obwalden mit über 700'000 Franken pro km<sup>2</sup> und über 10'000 Franken pro Einwohner die höchsten Werte. Rund 900 Gemeinden – also fast ein Drittel aller Gemeinden der Schweiz – waren im August 2005 betroffen. Dabei lässt sich kein eindeutiger Schadensschwerpunkt feststellen. Gesamtschweizerisch beträgt der Anteil der Infrastrukturschäden rund 25 %, wobei die Schäden im Bereich Wasserbau den Hauptanteil ausmachen. 92 % der Gesamtschäden wurden durch Hochwasser, Überschwemmung, Übersarung, aufsteigendes Grundwasser oder abfliessendes Hangwasser verursacht. Dabei sorgten hauptsächlich die grossen Flüsse und Seen für lang anhaltende, aber meist geschiebearme Überschwemmungen und führten vor allem im Siedlungsgebiet zu grossen Schäden. Murgänge spielten mit nur 3 % Schadensanteil insgesamt eine eher untergeordnete Rolle. 5 % aller Schäden sind auf Rutschungen und Hangmuren zurückzuführen. Gut ein Jahr nach dem Ereignis konnten noch nicht restlos alle Schäden erfasst und lokalisiert werden. Erst 2007 kann mit präziseren Zahlen auf Versicherungs-, Fonds- und Spendenseite gerechnet werden.

Schäden

Das Geschiebebeobachtungsnetz der Gruppe für operationelle Hydrologie (GHO) und das Schwebstoffmessnetz des Bundesamts für Umwelt BAFU umfassen unterschiedliche Gewässer. Während das Geschiebebeobachtungsnetz auf Wildbäche fokussiert ist, umfasst das Schwebstoffmessnetz grössere Flüsse. Entsprechend unterschiedlich waren im August 2005 die beiden Messnetze betroffen.

Feststoffbeobachtungen

So zeigt die Übersicht der Ereignisse im Geschiebebeobachtungsnetz, dass auch im Kerngebiet des Niederschlages nur wenige Bäche aussergewöhnliche Feststofffrachten aufwiesen. Dies ist ein Indiz dafür, dass die Niederschlagsintensitäten im August 2005 nur in wenigen Wildbacheinzugsgebieten die kritischen Schwellenwerte überschritten, welche für die Mobilisierung grosser Feststoffmengen notwendig sind.

Bei den Schwebstoffmessstationen lagen die maximalen Tageswerte der Schwebstoffkonzentrationen zwischen 12.5 kg/m<sup>3</sup> und 16.7 kg/m<sup>3</sup>. Im Vergleich mit den grössten bisher gemessenen Konzentrationen bei diesen Messstationen sind dies sehr hohe Werte. Am Alpenrhein bei Diepoldsau wurde während des Hochwassers ein Schweb-

stoffvolumen transportiert, das der Grössenordnung der mittleren Jahresfracht entspricht. An der Lütschine bei Gsteig und der Aare bei Brienzwiler lagen die während des Hochwassers vom August 2005 transportierten Schwebstoffmengen im Bereich des 3–4.5-fachen der mittleren Jahresfrachten dieser beiden Flüsse.

Insgesamt waren die Wildbäche im betroffenen Gebiet nur mässig aktiv. So waren in etwa 25 Einzugsgebieten grössere Murgangereignisse zu verzeichnen. Die Anzahl der Einzugsgebiete mit ausserordentlich grossen fluvialen Feststoffumlagerungen ist sogar noch etwas kleiner. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die gebietspezifischen Niederschlags-Schwellwerte zur Auslösung von Murgängen bzw. zur Mobilisierung grösserer Feststofffrachten nur in vereinzelt Gebieten erreicht oder überschritten wurden.

#### Gerinneprozesse

Im Niederschlagsgebiet waren praktisch alle Gebirgsflüsse von Geschiebetransport und Seitenerosion betroffen, die Abflusskapazität wurde in der Regel nicht überschritten. Geschiebeablagerungen und Verklausungen führten jedoch lokal zu Ausuferungen und Überflutungen. Die Kategorie der betroffenen Gebirgsflüsse umfasst rund 20 Gewässer oberstrom der Voralpenseen mit einer Gerinnelänge von insgesamt 220 km.

Bei den Talflüssen flussabwärts der Alpenrandseen (z.B. Aare flussabwärts von Thun, Reuss flussabwärts von Luzern) führte trotz der ausgeprägten Dämpfung durch die Seen primär die Überschreitung der Abflusskapazität zu Schäden. Im Gegensatz dazu waren in den übrigen Talflüssen (z.B. Emme, Kleine Emme, Linth) die Seitenerosion und teilweise auch die Überschreitung der Abflusskapazität die dominierenden Prozesse.

Durch Verklausungen von Schwemmholz an Brücken und Wehren kam es an verschiedenen Orten zu Gerinneausbrüchen und Überschwemmungen. Die umgelagerte Schwemmholzmenge betrug mindestens 110'000 m<sup>3</sup>. Da viele kleinere Ablagerungen nicht erfasst wurden, dürfte die gesamte während des Ereignisses angefallene Menge diesen Wert deutlich übersteigen. In vier Wildbächen lief bereits vor dem Ereignis 2005 eine Fallstudie zur Schwemmholzsituation. In diesen Wildbächen konnten deshalb vergleichende Erhebungen nach dem Hochwasser durchgeführt werden. Da die betrachteten Wildbäche im August 2005 keine extremen Abflüsse führten, war der Schwemmholztransport in diesen Bachläufen klein. Durch Rutschungen und Ufererosion wurden aber grössere Holzmassen in die Gerinne verlagert und dadurch das Schwemmholzpotenzial für zukünftige Ereignisse erhöht. Auf Grund der Niederschlagsituation dürfte dies auch für viele andere Wildbäche mit kleinen Einzugsgebieten (unter 3 km<sup>2</sup>) zutreffen. In den untersuchten grossen Schwemmholzablagerungen zeigt der Anteil an frischem Holz, dass grosse Mengen erst während des Hochwassers in die Gewässer eingetragen wurden. Gesamthaft lag der Frischholzanteil bei rund 60% und der Bau- und Brennholzanteil bei knapp 10%. Damit ist die Zusammensetzung mit jener vom Hochwasser im August 1987 im Goms vergleichbar. Rund 15% des Schwemmholzes wies Borkenkäferspuren auf, wie sie bei Totholz häufig anzutreffen sind. Im Prättigau, in Sarnen, am Brienz- und Thunersee war der Anteil der Baumarten hoch, welche für Uferbestockungen entlang von Flussläufen typisch sind.

#### Schwemmholz

Dies belegt, dass ein beachtlicher Anteil des Schwemmhholzes aus frischen Uferanbrüchen bzw. Seitenerosionen entlang der betreffenden Gewässer stammt.

Insgesamt wurden annähernd 5000 Rutschungen unterschiedlicher Grösse registriert. Die ersten Ergebnisse aus der Untersuchung zu den mittel- bis tiefgründigen Rutschungen zeigten, dass diese Prozesse oftmals in Gebieten mit kritischer geologischer Disposition auftraten. Es bestätigen sich Erkenntnisse aus früheren Ereignissen, wonach Hanginstabilitäten zu einem sehr grossen Teil innerhalb bestehender, teils alter Rutschzonen und geologischer Störungszonen auftreten. Die Analyse der flachgründigen Rutschungen erfolgte in drei Untersuchungsperimetern an Hand eines kleinen Ausschnittes der abgelaufenen Prozesse. Diese Analysen sind noch im Gang. Ergebnisse bezüglich der Neigungsverhältnisse am Standort der Rutschungen, der Rutschvolumina und zum Auslauf der Rutschmassen stimmen mehrheitlich mit jenen früherer Untersuchungen überein.

**Rutschungen**

Das Gesamtbild des Ereignisses vom August 2005 entspricht letztlich dem, was bei solchen Grossereignissen zu erwarten ist. Für den Zeitraum seit 1972, für den verlässliche Schadenszahlen vorliegen, ist es zwar ohne Parallele. Bei der Betrachtung einer längeren Zeitperiode verliert das Ausmass der Schäden vom August 2005 jedoch die Einzigartigkeit, welche es innerhalb der letzten 30 Jahre aufweist. Das Ereignis 2005 führte zwar lokal zu aussergewöhnlichen Niederschlägen, Abflüssen, Seeständen und Schäden, über das gesamte betroffene Gebiet und einen längeren Zeitraum betrachtet, ist das Ereignis jedoch nicht mehr als aussergewöhnlich, sondern höchstens noch als selten zu bezeichnen. Das Hochwasser vom August 2005 ist insgesamt kein singuläres Ereignis und mit dem wiederholten Auftreten ähnlicher Ereignisse muss auch in Zukunft gerechnet werden.

**Erste Einordnung**

Die Schweiz muss sich darauf einstellen, dass vergleichbare oder gar grössere Naturereignisse auch in Zukunft auftreten können. Um zu verhindern, dass dabei ähnliche oder noch grössere Schäden auftreten, ist die konsequente Fortsetzung einer umfassenden Hochwasserschutzpolitik notwendig. Grundlage dafür bilden die Gefahrenkarten, welche aufzeigen, wo mit welchen Ereignisausmassen gerechnet werden muss. Damit können die notwendigen vorbeugenden Massnahmen getroffen werden, seien diese raumplanerischer oder baulicher Art. Auch nach der Realisierung der Massnahmen ist mit Ereignissen zu rechnen, welche grösser als das Dimensionierungsereignis sind. Schutzmassnahmen müssen daher in ihrem Verhalten robust und überlastbar sein. Um ein unkontrolliertes Anwachsen der Schäden zu verhindern, sind gefährdete Gebiete zu meiden, bestehende Gebäude und Neubauten durch Objektschutzmassnahmen zu verstärken und Notfallmassnahmen vorzubereiten. Das Hochwasser 2005 stellt eine ausserordentliche Prüfung für alle Massnahmen und Gefahrengrundlagen dar. Deshalb werden diese im zweiten Teil der Analyse detailliert untersucht.

**Erkenntnisse und Ausblick**

Gian Reto Bezzola, Christoph Hegg

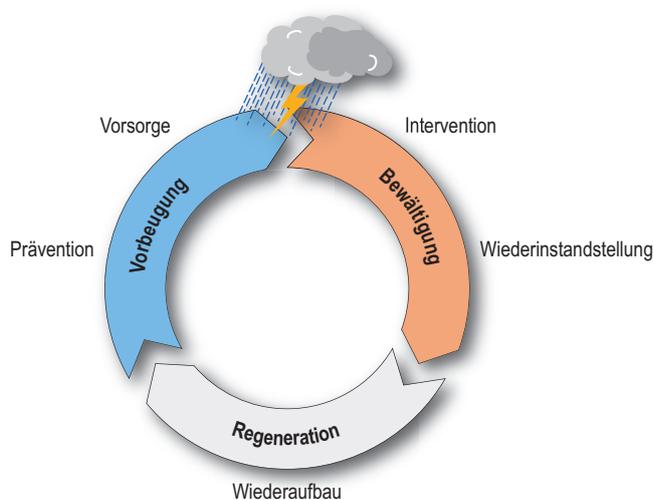
## > Einleitung

Mit Schäden von rund 3 Mrd. Franken ist das Hochwasser vom August 2005 in der jüngeren Zeit ohne Parallele. Neben den ausserordentlichen Schäden forderte das Hochwasser 6 Todesopfer und führte mancherorts zur Überforderung der lokalen Kräfte. Hochwasser wie jenes vom August 2005 bieten – so tragisch sie für die Betroffenen sind – eine einmalige Gelegenheit, ausserordentliche Naturereignisse umfassend zu untersuchen. Es ist die Aufgabe der Behörden, solche Ereignisse zu analysieren und daraus Lehren für den Umgang mit aussergewöhnlichen Naturereignissen zu ziehen.

Waren die Analysen der Hochwasserereignisse von 1987 (EVED, 1991a, 1991b), 1999 (BWG, 2000) und 2000 (BWG, 2002) primär auf die Naturprozesse fokussiert, bietet das Hochwasser 2005 Gelegenheit und Anlass zu einer Standortbestimmung und Erfolgskontrolle der aktuellen Hochwasserschutzpolitik. Aus diesem Grund hat das Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK unmittelbar nach dem Hochwasser vom August 2005 beschlossen, das Ereignis zu analysieren. Entsprechend dem Modell des integralen Risikomanagements werden neben den Naturprozessen auch die Güte der vorhandenen Gefahrengrundlagen und deren Umsetzung analysiert, das Verhalten und die Wirkung der Schutzmassnahmen untersucht sowie die Effizienz der Warnungen und des Krisenmanagements überprüft. Im Rahmen der Ereignisanalyse wird der Wiederaufbau, der sich über eine deutlich längere Zeit erstrecken wird als die Analyse des Ereignisses nicht betrachtet.

Motivation und Konzept

**Kreislauf des integralen Risikomanagements (nach PLANAT, 2003).**



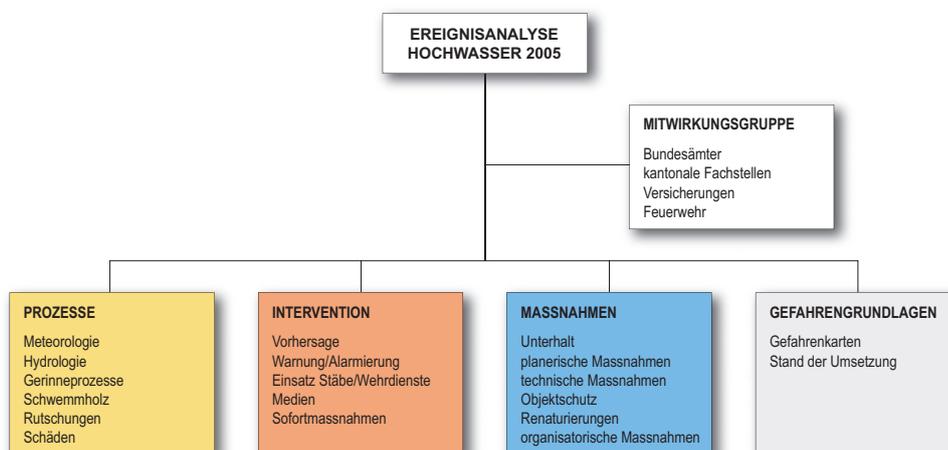
Ziele der Ereignisanalyse sind ein besseres Verständnis der Prozesse sowie Erfolgskontrollen hinsichtlich der vorhandenen Grundlagen, der Wirkung von präventiven Massnahmen, der Massnahmen zur Vorsorge und Warnung und des Einsatzes der Interventionskräfte. Auf der Basis der aus der Analyse gewonnenen Erkenntnisse und Grundsätze resultieren Folgerungen und Lehren für zukünftige Massnahmen im Umgang mit Naturgefahren. Schliesslich bietet das Ereignis vom August 2005 die beste Gelegenheit, um mittels gut dokumentierter Beispiele das Bewusstsein der beteiligten Akteure für die von der Natur ausgehenden Gefahren zu sensibilisieren und den risikobewussten Umgang mit Naturgefahren zu fördern.

#### Ziel der Ereignisanalyse

Die Bearbeitung der einzelnen Teilprojekte erfolgt partnerschaftlich durch die betroffenen Fachstellen des Bundes und Partner aus dem universitären bzw. dem privatwirtschaftlichen Bereich. Die massgebenden Experten sind direkt in die Projektorganisation eingebunden und wirken als Leiter von Teilprojekten. Damit wird eine möglichst grosse Objektivität bei der Untersuchung sichergestellt. Gleichzeitig gewährleistet dieses Vorgehen auch eine direkte Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse in der Verwaltung. Die Anliegen der nicht direkt in der Projektorganisation vertretenen Fachstellen von Bund und Kantonen sowie weiterer Institutionen werden durch eine Koordinations- und Mitwirkungsgruppe eingebracht.

#### Organisation

#### Struktur des Projektes Ereignisanalyse Hochwasser 2005.



Die Dokumentation der Ergebnisse der Ereignisanalyse erfolgt in drei Berichten. Der vorliegende erste Band gibt eine Übersicht der abgelaufenen Prozesse, der entstandenen Schäden und analysiert die Niederschlags- und Abflussvorhersagen. Weiter wird eine erste Einordnung des Ereignisses vorgenommen. Der zweite Bericht wird eine vertiefte Analyse ausgewählter Prozesse beinhalten und schwergewichtig den Bereichen Intervention, Verhalten und Wirksamkeit von präventiven Massnahmen, sowie Gefahrengrundlagen bearbeiten. Der abschliessende Synthesbericht fasst die Erkenntnisse, Konsequenzen und Empfehlungen für den zukünftigen Umgang mit Naturgefahren

#### Dokumentation der Ergebnisse

---

ren in der Schweiz für ein breiteres Publikum zusammen. Mit diesem ersten Bericht soll zudem für die weiteren Arbeiten eine gemeinsame Ausgangsbasis geschaffen werden.

Die Umsetzung der Konsequenzen und Empfehlungen aus der Ereignisanalyse Hochwasser 2005 muss anschliessend analog zum Vorgehen bei früheren Ereignissen im Rahmen weiterer Projekte erfolgen.

**Umsetzung der Ergebnisse**

**Literatur:**

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

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

EVED 1991a: Ursachenanalyse der Hochwasser 1987 – Ergebnisse der Untersuchungen. Mitteilung des Bundesamtes für Wasserwirtschaft Nr. 4, Mitteilung der Landeshydrologie und -geologie Nr. 14, EDMZ, Bern.

EVED 1991b: Ursachenanalyse der Hochwasser 1987 – Schlussbericht. Mitteilung des Bundesamtes für Wasserwirtschaft Nr. 5, Mitteilung der Landeshydrologie und -geologie Nr. 15, EDMZ, Bern.

PLANAT 2003: Strategie Naturgefahren Schweiz. Bern.



Mathias Rotach, Christof Appenzeller, Stefan Bader, Christoph Frei, Urs Germann, Mark Liniger, Peter Zbinden

# 1 > Meteorologie

*Ein Tiefdrucksystem, dessen Zentrum über lange Zeit weitgehend stabil südlich der Alpen lag, führte im August 2005 zu grossflächigen intensiven Niederschlägen am Alpennordhang von den Berner Alpen über die Zentralschweiz und Teile Graubündens bis nach Österreich und Bayern. In der Schweiz wiesen die Niederschläge bei vielen Stationen sehr kleine Wahrscheinlichkeiten auf, vor allem im Berner Oberland. Für den Gebietsniederschlag im gesamten Gebiet wurde aber eine Wiederkehrdauer von deutlich weniger als 100 Jahren bestimmt.*

## 1.1 Einleitung

Die meteorologische Entwicklung, die Vorhersage und Analyse des Starkniederschlagsereignisses im August 2005 wurde in einem Arbeitsbericht der MeteoSchweiz (MeteoSchweiz, 2006) eingehend dokumentiert. Dabei wurde im Detail auf die verschiedenen Aspekte wie Wetterentwicklung, Niederschlagscharakteristik, Modellierung und Vorhersage des Ereignisses und dessen historische Einbettung eingegangen. Für die vorliegende Ereignisdokumentation sind die wichtigsten Erkenntnisse in Bezug auf die Ereignisbeschreibung zusammengefasst und ergänzt worden. An dieser Stelle wird insbesondere darauf verzichtet, Details zur jeweils verwendeten Methodik auszuführen. So sind weder die verschiedenen Formen der Niederschlagsmessungen, noch die Prinzipien der numerischen Modellierung oder die statistischen Grundlagen zur Schätzung von Wiederkehrperioden im Detail ausgeführt. Für all diese Fragen sei auf MeteoSchweiz (2006) verwiesen.

Nachfolgend wird der meteorologische Verlauf, zusammen mit der Charakteristik der Niederschläge diskutiert, gefolgt von der klimatologischen Einordnung des Ereignisses. Am Ende des Kapitels folgt ein Vergleich mit früheren, ähnlichen Ereignissen.

## 1.2 Meteorologischer Verlauf

Das Starkniederschlagsereignis dauerte vom 18.–23. August, wobei die grössten Niederschlagsmengen in der Schweiz am 21. und 22. August fielen. Die folgende Analyse zeigt, dass das Hauptereignis vier Tage dauerte, während der 18. August als «Vorphase» und der 23. August als «Endphase» (Niederschläge nur noch ganz im Osten der Schweiz) hier nur am Rande betrachtet werden. Es ist wichtig festzustellen, dass bereits die erste Hälfte des Monats August 2005 von verschiedenen Niederschlagsereignissen geprägt war (MeteoSchweiz, 2005). Bis zum 15. August sind in weiten

Hauptereignis und Vorgeschichte

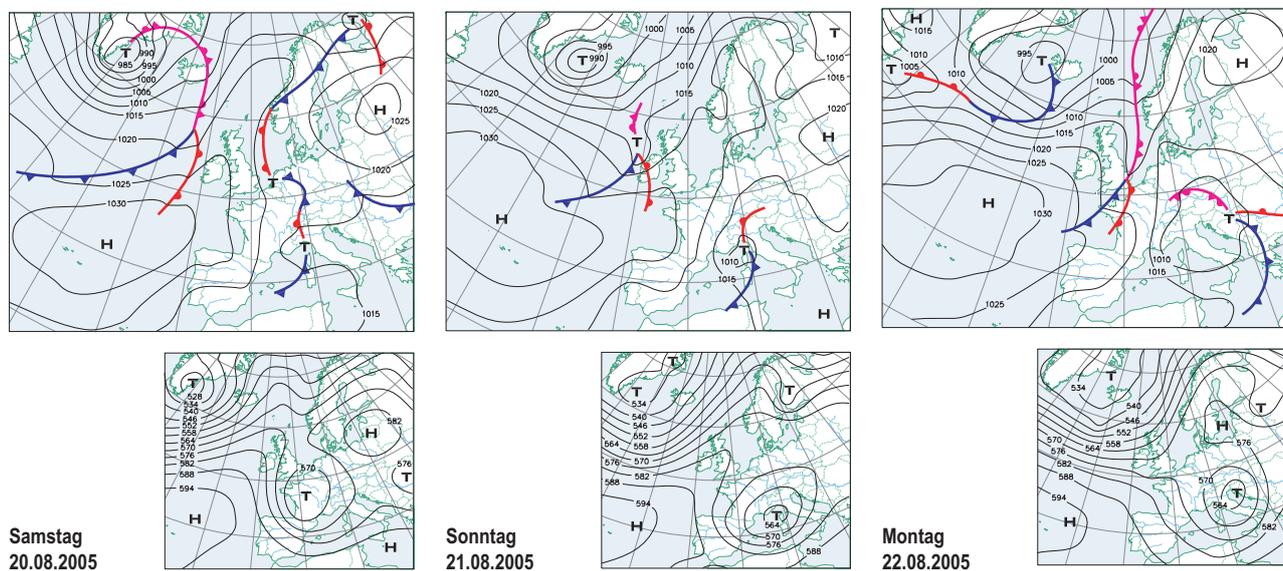
Teilen der nördlichen Voralpen der Zentral- und Ostschweiz bereits über 75% der durchschnittlichen August-Regenmenge gefallen. Dazu hat insbesondere auch eine ergiebige Niederschlagsperiode am 14./15. August beigetragen, die nur wenige Tage vor dem eigentlichen Starkniederschlagsereignis am zentralen Alpennordrand Niederschläge von 40 mm und mehr gebracht hat (Abb. 1.2). Der insgesamt niederschlagsreiche Monatsanfang und die erwähnten ergiebigen Niederschläge um die Monatsmitte haben die hydrologische Ausgangslage im Boden mitgeprägt.

### 1.2.1 Synoptische Situation und Niederschlagsentwicklung

Im Folgenden wird kurz die meteorologische Situation der einzelnen Tage diskutiert, und die dabei gefallenen Niederschläge charakterisiert. Eine Zusammenstellung der relevanten Druckkarten ist in Abb. 1.1 gegeben, während Abb. 1.2 die Tagesniederschläge zeigt, die aus den Beobachtungen als gegitterte Information vorliegen. Abb. 1.3 und 1.4 zeigen ausgewählte Radarbilder bzw. aus Radarbildern aufsummierte Niederschläge.

**Abb. 1.1** > Wetterübersicht für den 20. (links), 21. (Mitte) und 22. (rechts) August 2005 (MeteoSchweiz, 2005).

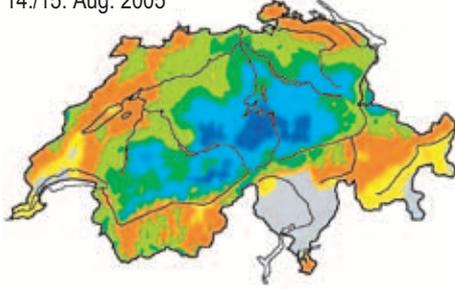
Die obere Karte zeigt jeweils das Bodendruckfeld mit eingezeichneten Fronten. Auf den unteren Karten sind die Höhendruckfelder bei 500 hPa dargestellt.



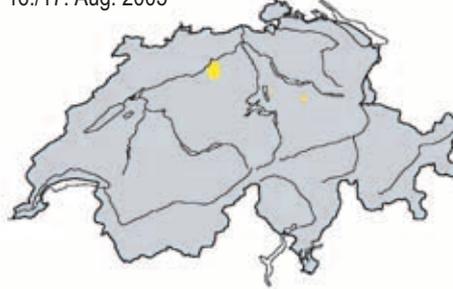
**Abb. 1.2 > Verlauf der täglichen Niederschlagssummen [mm] vom 14.–23.08.2005.**

Die Tagessummen beziehen sich auf den Zeitraum 06:00–06:00 UTC des Folgetages  
d.h. von 08:00–08:00 Uhr Mitteleuropäische Sommerzeit.  
Die obersten beiden Diagramme zeigen Niederschlagssummen über jeweils 2 Tage.

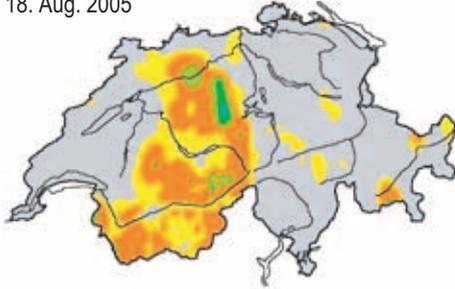
14./15. Aug. 2005



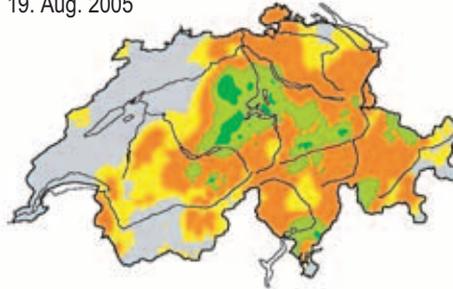
16./17. Aug. 2005



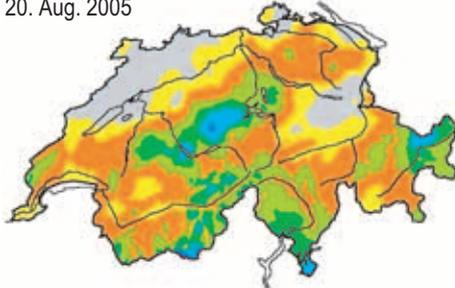
18. Aug. 2005



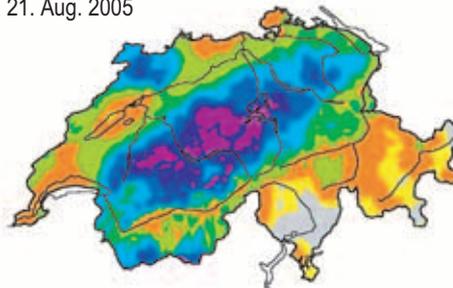
19. Aug. 2005



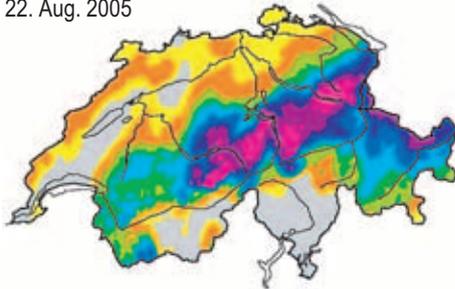
20. Aug. 2005



21. Aug. 2005



22. Aug. 2005



23. Aug. 2005

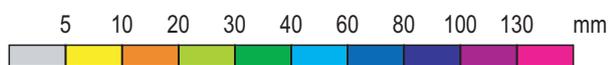
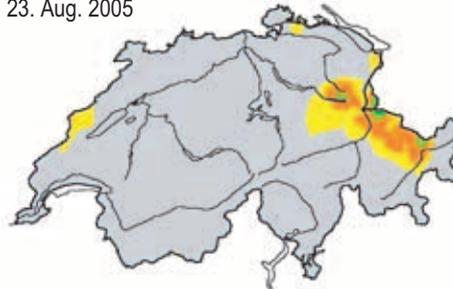
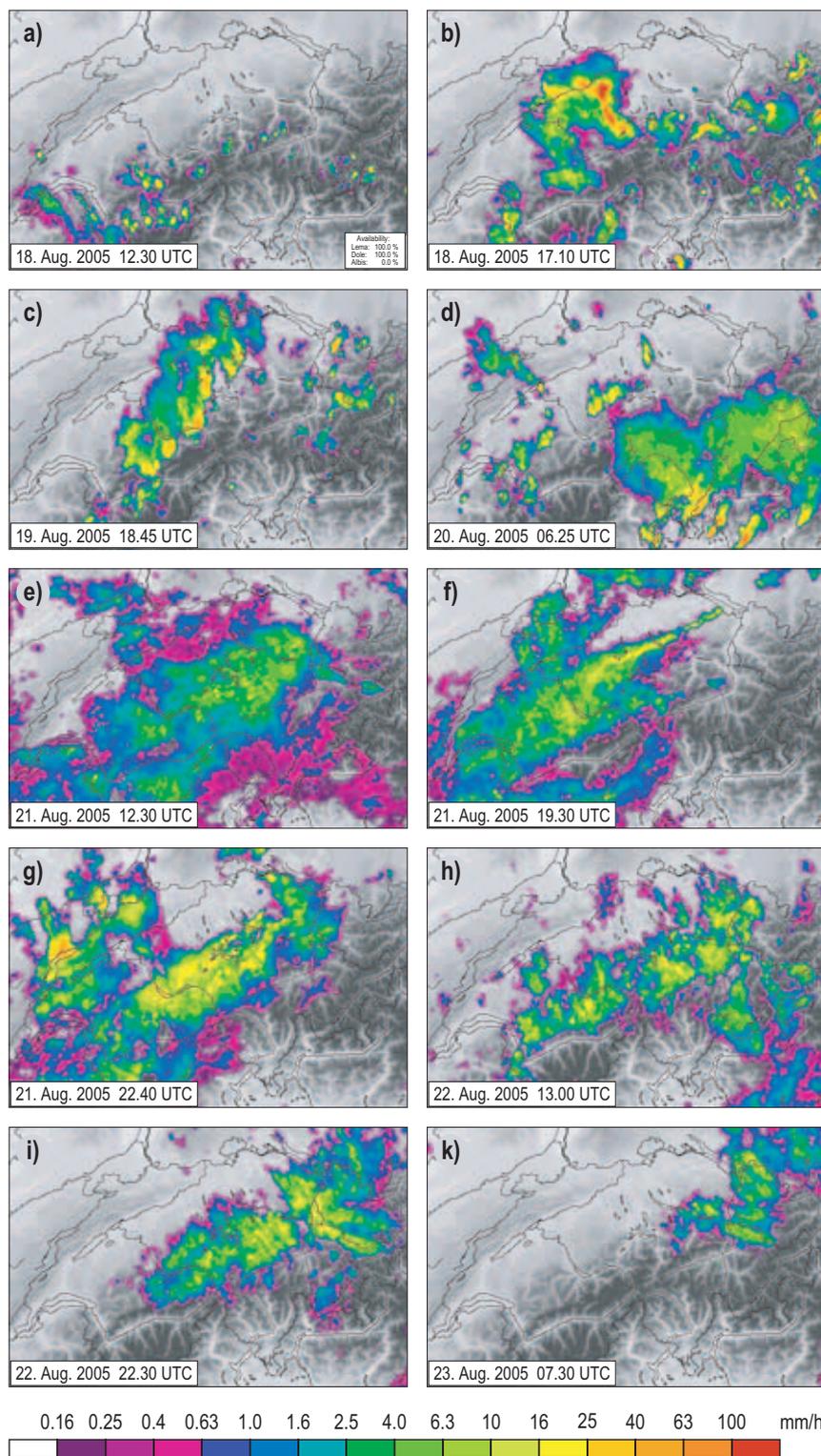


Abb. 1.3 > Radarbilder für ausgewählte Zeitpunkte zwischen dem 18. und 23. August 2005.



---

Am Freitag, den 19. August, lag über Westeuropa ein Tief mit Kern über den Niederlanden. Es wurde durch einen Höhentrog überlagert, dessen Achse etwa auf dem Nullmeridian lag. Im Bereich einer südwestlichen Höhenströmung kam es zu verbreiteten Niederschlägen mit oft konvektivem Charakter.

19. August 2005

Mehrere konvektive Zellen zogen im Verlauf des Tages isoliert, später vereint als Regenfront, Richtung Nordosten über die Schweiz hinweg (Abb. 1.3c). Ab ca. 20:00 UTC (Weltzeit; mitteleuropäischen Sommerzeit – 2 Stunden) waren die meisten in der Front eingebetteten Gewitter vorbei und die maximalen Regenintensitäten gingen auf unter 20 mm/h zurück. Am späten Abend überquerte die Front die Alpen und verursachte im Piemont und Tessin noch letzte Gewitter. Dieser Gewittertag verursachte über dem zentralen Mittelland und den Voralpen eine Niederschlagssumme von 20–40 mm.

Am Samstag, den 20. August, war das Tief im Raum der Benelux-Länder nur noch schwach ausgeprägt, der Schwerpunkt der zyklonalen Aktivität hatte sich aber nach Norditalien verlagert. Dort entwickelte sich ein sekundäres Bodentief. Im Höhenfeld konnte ein Abschnürprozess beobachtet werden, wobei der Kern des Höhentiefs wenig südlich von Paris lag (Abb. 1.1 links). In der Schweiz kamen nordöstliche Winde auf, nur in grosser Höhe herrschte noch Südwind. Beidseits der Alpen wurden ergiebige Niederschläge registriert. Grossflächig fielen mehr als 20 mm, in den zentralen Voralpen, im Tessin und in Teilen von Graubünden sogar mehr als 40 mm (Abb. 1.2). Im Verlauf des Morgens waren südlich der Alpen teilweise gewittrige Stauniederschläge auszumachen, die auch ins Alpeninnere (Gotthard, Graubünden) hineinreichten (Abb. 1.3d). Im Mittelland und in den nördlichen Voralpen herrschten Schauer und flächige Niederschläge vor. Im Zusammenhang mit der Ausbildung des für das spätere Wettergeschehen bedeutenden Sekundär-Tiefs über Norditalien änderte sich die Zugrichtung der Niederschlagssysteme in den Mittagsstunden markant von Südwest auf Nordost.

20. August 2005

Am Sonntag, den 21. August, intensivierte sich das Tiefdrucksystem südlich der Alpen weiter (Abb. 1.1 Mitte). Sein Kern lag nun über dem Golf von Genua und in der Höhe entstand eine stark zyklonale Situation. Dabei waren nun Boden- und Höhentief nahezu konzentrisch. Aus der Sicht der konventionellen Synoptik ist das ein Hinweis darauf, dass keine schnelle Weiterentwicklung zu erwarten war. In der Nacht zum 22. August erreichte das Höhentief seine maximale Ausprägung.

21. August 2005

In den frühen Morgenstunden des 21. Augusts beruhigte sich das Niederschlagsgeschehen vorübergehend. Erst kurz vor Mittag setzten die grossflächigen und intensiven Niederschläge ein, welche rund 40 Stunden anhielten und für die ausserordentlichen Gesamtmengen verantwortlich waren. Zuerst entwickelte sich über dem zentralen und östlichen Mittelland ein grossflächiges Niederschlagsgebiet mit noch vergleichsweise geringen Intensitäten. Später erfasste es auch die westlichen Landesteile (Abb. 1.3e). Im Laufe des Nachmittags verstärkten sich die Niederschläge aber besonders entlang der Voralpen vom Toggenburg über die Zentralschweiz ins Berner Oberland grossflächig (Abb. 1.3f).

In den Radarsequenzen ist die quasi-stationäre Anströmung aus Nordosten in der Verlagerung von Niederschlagssystemen sichtbar. Sie dürfte für die andauernden durch Staueffekte dominierten Niederschläge in der zweiten Tageshälfte verantwortlich gewesen sein. Aber das Niederschlagsmuster war nicht allein durch stationären Stau-niederschlag charakterisiert. Auch das Mittelland wurde von diversen heranziehenden oder sich organisierenden Niederschlagssystemen erfasst, so dass davon ausgegangen werden kann, dass auch thermodynamische Effekte das Wettergeschehen beeinflussten. Ein besonders markantes System entwickelte sich am späteren Abend des 21. Augusts in Form eines langen schmalen Bandes, welches sich vom Bodensee über den Zürichsee zum Zugersee erstreckte. Dieses Band blieb mit hohen Intensitäten über zwei Stunden erhalten und verschob sich erst im Laufe der frühen Nacht langsam in die Voralpen hinein. Dadurch nahmen die Niederschlagsintensitäten in den Voralpen wieder zu und der Dauerniederschlag erfasste auch die westlichen Voralpen (Simmental, Freiburger Alpen) und den Jura (Abb. 1.3g). In dieser Phase wurden entlang des Alpennordrandes die höchsten Niederschlagsintensitäten während des Ereignisses erreicht. Die Niederschlagsakkumulation (Abb. 1.4) war in dieser Phase grossflächig, erfasste Voralpen und Mittelland und zeigte auch eingebettete feinskalige Strukturen.

Das gesamte Tiefdruck-System bewegte sich in den frühen Stunden des 22. Augusts ostwärts, so dass es am Mittag konzentrisch über der nördlichen Adria lag (Abb. 1.1 rechts). Damit drehten die Höhenwinde auf der Alpennordseite auf Nord, was zu einem zunehmenden Stauereffekt führte.

22. August 2005

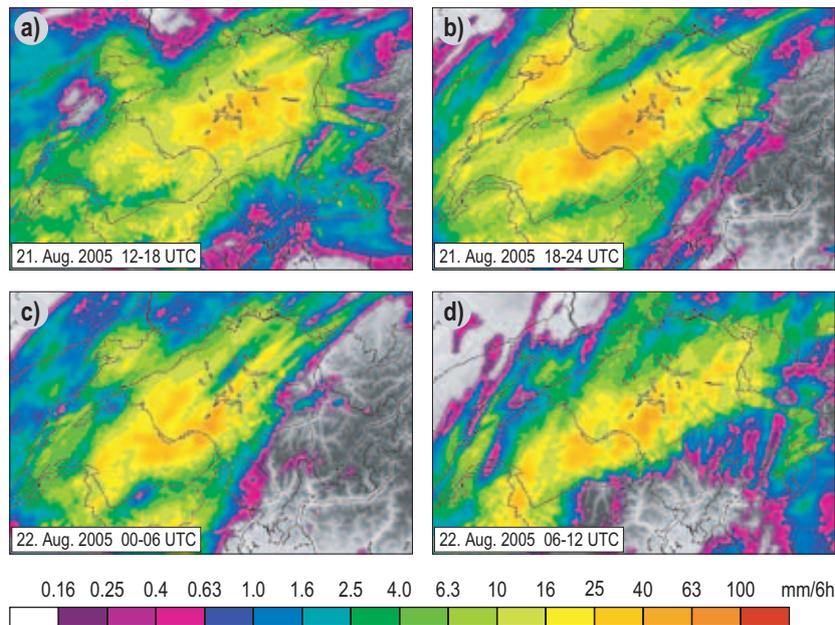
Während die Regenintensität im Mittelland deutlich abnahm, hielten die intensiven und grossflächigen Niederschläge in den nördlichen Voralpen den ganzen Tag an. In der Nacht zogen vorerst weitere, als Bänder organisierte, Niederschlagszonen von Nordosten über das Mittelland gegen die Voralpen (Abb. 1.4). Die Anströmungsrichtung änderte sich aber im Laufe des Morgens von Nordost auf Nord, und damit verschoben sich die hohen Intensitäten von den Voralpen weiter gegen den Alpenkamm (Abb. 1.3h). In Graubünden reichten die Niederschläge nun in inneralpine Gebiete hinein. Vorerst war noch der gesamte Bereich vom Genfer- bis Bodensee betroffen. Im Zuge einer weiteren Drehung der Anströmung auf Nord-Nordwest im Laufe des Nachmittags, beschränkte sich die Niederschlagsaktivität aber zunehmend auf die zentralen und östlichen Alpen. Schliesslich waren in der Nacht zum 23. August besonders Liechtenstein, Vorarlberg und das Prättigau betroffen (Abb. 1.3i).

Am Dienstag, den 23. August, kam die Tiefdruckzone über Ungarn zu liegen. Die feuchtesten Luftmassen lagen nun nicht mehr zentral über der Schweiz, so dass die intensiven Niederschläge nur noch in der Ostschweiz bis in den Morgen des 23. Augusts anhielten und vor allem noch in der Churfürsten-Region und im Prättigau zu nennenswerten Mengen führten (Abb. 1.3k). In den betroffenen Gebieten kamen so noch einmal 10–30 mm Niederschlag zusammen (Abb. 1.2). Anschliessend verschob sich die Niederschlagsaktivität weiter ostwärts in die nördlichen Alpen von Österreich und Süddeutschland, was hier weiterhin zu starken Niederschlägen führte (Meteo-Schweiz, 2006; Rudolf et al., 2006). Am Nachmittag und Abend des 23. Augusts zogen nur noch vereinzelte konvektive Zellen von Nordwesten in die West- und Zentralschweiz.

23. August 2005

**Abb. 1.4 > Akkumulierte Niederschlagssummen aus Radarmessungen für 6-Stundenintervalle (in mm pro 6 Stunden).**

- a) 21.08. 12–18 UTC  
 b) 21.08. 18–24 UTC  
 c) 22.08. 00–06 UTC  
 d) 22.08. 06–12 UTC



### 1.2.2 Klassifikation der synoptischen Lage

In vielen Kommentaren wurde der Wetterlagenverlauf des Hochwasserereignisses im Sinne der Systematik von J. van Bebber (zitiert nach Liljequist und Cehak, 1974) als «Vb-Lage» bezeichnet. Allerdings zog das dominierende Tief von Norditalien her nur unwesentlich nordwärts ab, sondern eher ostnordöstlich. Es erfasste Polen nur am Rande und zog zur Ukraine, wo es sich auffüllte. Damit entsprach die Zugbahn nicht derjenigen der klassischen Vb-Lage und muss als «zwischen Vb und Vd» eingeordnet werden.

Keine typische «Vb Lage»

Die Niederschläge des Ereignisses vom August 2005 waren massgeblich durch die Präsenz der Alpen bestimmt. Dies wurde in MeteoSchweiz (2006) anhand eines einfachen numerischen Experiments demonstriert. Dabei wurden mit dem numerischen Wetterprognosemodell COSMO-LEPS (Montani et al., 2003; Marsigli et al., 2005), wie es routinemässig für die Unterstützung der Prognostiker an allen Wetterdiensten verwendet wird, folgende zwei Szenarien gerechnet: eine Referenzprognose in genau der Konfiguration, wie sie auch tatsächlich zum Einsatz kam und eine Prognose «ohne Alpen». In dieser zweiten Simulation wurde das Gebiet der Alpen inklusive Jura und Vogesen durch eine Ebene mit Oberflächencharakteristik des schweizerischen Mittellandes ersetzt. Abb. 1.5 zeigt als Beispiel die Simulation für den 21. August. Die

Gebirgsfluss massgeblich

Resultate zeigen klar, dass ohne die Präsenz der Alpen deutlich weniger Niederschlag gefallen wäre, und es damit kaum Hochwasser gegeben hätte. Wichtig ist die Erkenntnis, dass die deutliche Reduktion der Niederschläge am Alpennordhang nicht mit grösseren Mengen in anderen Regionen kompensiert wird. Im vorliegenden Fall ist es überdies sogar so, dass sich die Strömungscharakteristik auf der Alpennordseite an den beiden betrachteten Tagen durch die fehlenden Alpen kaum ändert. Dies ist konsistent mit der kaum veränderten Synoptik im Modelllauf ohne Alpen verglichen mit dem Referenzlauf. Das einfache numerische Experiment zeigt, dass die Präsenz der Alpen eine dominierende Rolle in der Bildung des exzessiven Niederschlags während des Ereignisses im August 2005 gespielt hat. Der erzwungenen Hebung am Alpenbogen kommt damit eine entscheidende Bedeutung zu und es scheint, dass die thermodynamische Disposition allein die gewaltigen Niederschlagsmengen, wie sie beobachtet wurden, nicht hätte produzieren können.

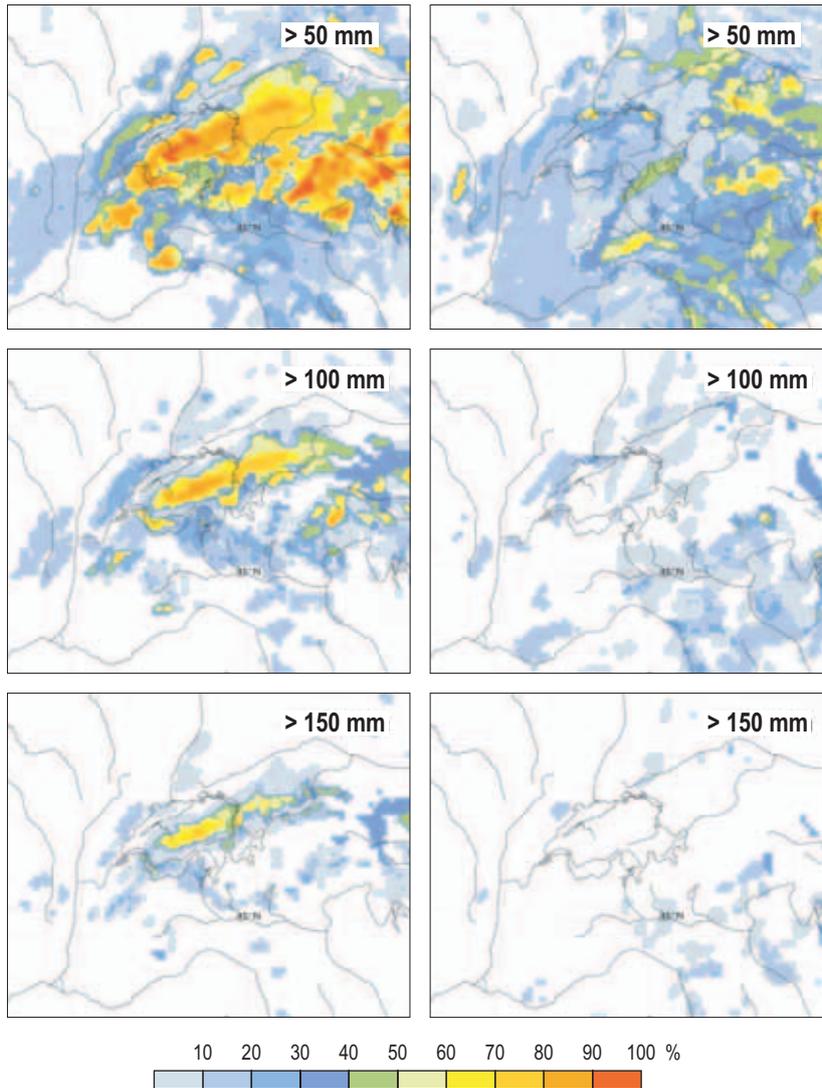
Für die Frage, ob in der Schweiz noch bedeutendere Niederschläge als im August 2005 möglich wären, ist die Art des Niederschlags von einer gewissen Bedeutung. Vereinfachend wird «Stauniederschlag» oft einzig und allein auf die Tatsache zurückgeführt, dass eine gewisse Luftmasse auf ein Gebirge geführt wird und dann auf Grund der Hebung bei der Überströmung insbesondere auf der Luvseite des Gebirges ausregnet. Auf der anderen Seite werden rein frontale Niederschläge so aufgefasst, dass die thermodynamische Schichtung der Atmosphäre und die Verteilung der Luftmassen zu entsprechenden Niederschlagszonen führen. In dieser vereinfachenden Darstellung sind Stauniederschläge eng ans Gebirge gebunden, während frontale Niederschläge auch weitab davon auftreten können.

Aus meteorologischer Sicht greift diese Unterscheidung für Gebiete, die durch grössere Gebirgszüge dominiert sind zu kurz. Die Bildung von bedeutendem Niederschlag erfordert immer die Kombination ungünstiger dynamischer und thermodynamischer Faktoren und diese sind in der Regel auf höchst nicht-lineare Weise miteinander verknüpft. So kann der thermodynamische Charakter durch einen grossen Gebirgszug wie die Alpen massgeblich beeinflusst werden, genauso wie die thermodynamische Schichtung dann auch die Hebung (den «Stau effekt») wesentlich begünstigen oder behindern kann. In diesem Sinn ist eine einfache Kategorisierung nicht möglich und auch nicht sinnvoll. In den vorangehenden Erläuterungen wurde jeweils dann von Stau effekten oder Stauniederschlag gesprochen, wenn die Hebung ein wichtiger Auslöser war, auch wenn thermodynamische Effekte einen gewissen Einfluss gehabt haben mögen.

Hebung und Thermodynamik  
überlagern sich

**Abb. 1.5** > Resultate der COSMO-LEPS Simulationen für den 19.08.2005 12:00 UTC mit operationell verwendeter Orographie (links) und ohne Alpenbogen (rechts).

Dargestellt sind Wahrscheinlichkeiten für 72 h-Niederschlagssummen (20.08. 06:00 UTC–23.08. 06:00 UTC) grösser als 50, 100 und 150 mm.



### 1.3 Klimatologische Einordnung

#### 1.3.1 Niederschlagsmengen

Die Niederschläge werden in der Schweiz von MeteoSchweiz auf zwei Arten gemessen. Zum einen steht ein Pluviometer-Messnetz mit zurzeit 440 Stationen zur Verfügung, von denen 70 automatisch betrieben werden. Die daraus erhaltenen Daten werden vorwiegend für klimatologische Analysen benutzt (Zeitreihenanalysen, Wieder-

Pluviometer- und  
Radarmessungen

kehrperioden, etc.). Im Rahmen der hier vorliegenden Ereignisanalyse wurde vor allem die gegitterte Analyse vorangetrieben, um aus den Punktmessungen flächenhafte Informationen zu gewinnen. Auf der anderen Seite stehen Radarmessungen der drei Radars Albis, La Dôle und Monte Lema zur Verfügung, die eine hohe zeitliche Verfügbarkeit und eine gute räumliche Auflösung von ca. 1 km aufweisen. Eine quantitative Niederschlagsbestimmung aus Radarmessungen ist in einem Alpenland wie der Schweiz ziemlich anspruchsvoll (Germann et al., 2006). Das Pluviometermessnetz liefert genaue, aber räumlich und zeitlich relativ schlecht aufgelöste Informationen, während das Radarmessnetz eine gute Auflösung bei schlechterer absoluter Genauigkeit gewährt. Die hier präsentierten, über 24 Stunden und länger gemittelten Niederschlagskarten, stammen aus den gegitterten Pluviometerdaten. Im Rahmen der Ereignisanalyse wurden auch Niederschlagsinformationen mit stündlicher Auflösung produziert, die auf einer Kombination der beiden Datensätze beruht.

Die höchsten Tagessummen der gesamten Starkniederschlagsepisode wurden am 22. August gemessen (Abb. 1.2), da der Niederschlag über die gesamten 24 Stunden anhielt. In einem zusammenhängenden Gebiet der Nordalpen vom Berner Oberland bis zum St. Galler Rheintal und dem Prättigau brachte der Tag mehr als 100 mm, regional mehr als 130 mm Niederschlag. Die höchsten lokal an diesem Tag registrierten Tagessummen wurden in Weesen (242 mm), Gadmen (233 mm, interkantonales Mess- und Informationssystem IMIS), Amden (203 mm, IMIS), auf dem Säntis (187 mm) und im Schächental (198 mm IMIS, Unterschächen: 184 mm) registriert.

**Tagessummen ausgewählter Stationen**

Aufaddiert über 2 Tage, also während 48 Stunden, wurden die grössten Niederschläge von 06:00 UTC des 21. Augusts bis 06:00 UTC des 23. Augusts registriert. In dieser Phase sind in einem grossen, zusammenhängenden Gebiet vom Genfersee bis zum Bodensee mehr als 100 mm Niederschlag gefallen (Abb. 1.6). Die Achse dieses Gebiets lag entlang des Alpennordrandes. Es reichte aber auch bis in die inneralpinen Gebiete Berner Oberland, Vorderrhein und Prättigau bzw. zum Teil bis weit ins Schweizer Mittelland beim Zürichsee, der Unteren Reuss und Oberraargau. Niederschlagsmengen von mehr als 220 mm/48h fielen in diesem Zeitraum grossflächig über den Berner Alpen, im Emmental und Entlebuch, in den Kantonen Obwalden, Uri und Schwyz und am Walensee.

**Gebietsniederschläge**

Gemäss der in Abb. 1.6 dargestellten Niederschlagsanalyse sind während der beiden Haupttage auf 28% der Gesamtfläche der Schweiz Niederschläge von mehr als 100 mm gefallen. Die 200 mm Marke wurde auf gut 3% der Fläche überschritten. Das gesamte Niederschlagsvolumen über jenen Gebieten, die mehr als 100 mm erhalten haben (der oben beschriebene Streifen entlang der Voralpen) beträgt rund 1 km<sup>3</sup>. Diese Menge entspricht etwa einem Viertel des Volumens des Zürichsees oder dem 12-fachen des mittleren Tagesabflusses des Rheins bei Basel.

**Niederschlagsvolumen**

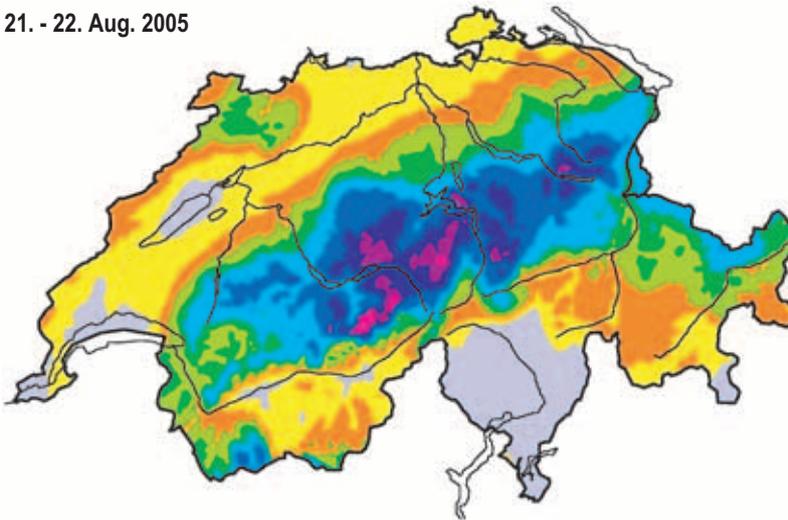
Die markantesten 3-Tages-Summen zeigt die Periode vom 20.–22. August (Abb. 1.6), wobei die räumliche Verteilung sehr ähnlich aussieht wie die der 2-Tages-Summen, ausser dass 20–60 mm mehr Niederschlag registriert wurden. Der gesamte Niederschlag über der gesamten Schweiz während dieser drei Tage entspricht rund 60% des Zürichseevolumens.

Die gegitterten Niederschlagsanalysen von Abb. 1.2 und 1.6 zeigen die grossräumige Verteilung, die aus der Analyse von jeweils mehreren umliegenden Stationsmessungen berechnet wurde. Im Allgemeinen variiert Niederschlag aber sehr stark über kurze Distanzen, weshalb die gegitterten Analysen zum Teil beträchtlich von den Messungen an Einzelstationen abweichen. Insbesondere gibt die Analyse nicht die punktuellen Spitzenwerte der Einzelbeobachtungen wieder. Mehr Informationen zur kleinräumigen Variabilität finden sich in MeteoSchweiz (2006).

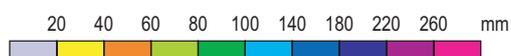
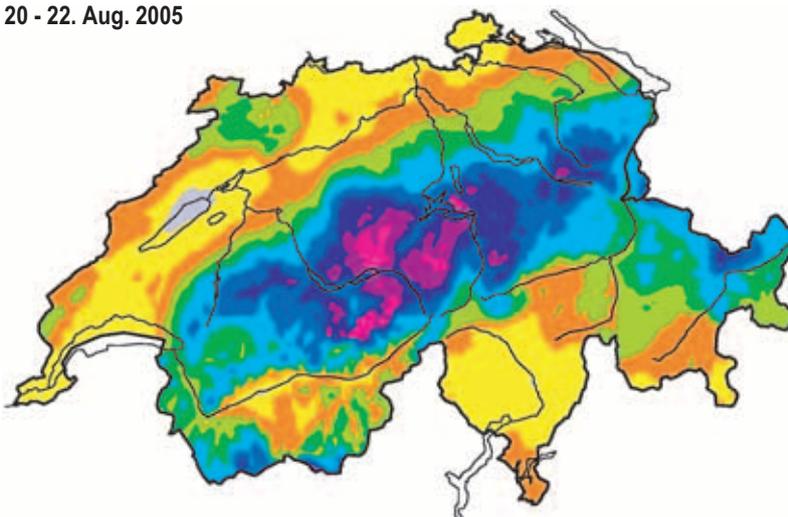
Räumliche Variabilität

**Abb. 1.6** > Verteilung der Niederschlagssummen [mm] über 2 Tage (21.–22.08.2005, 06:00–06:00 UTC, oben) und über 3 Tage (20.–22.08.2005, 06:00–06:00 UTC, unten).

21. - 22. Aug. 2005



20 - 22. Aug. 2005



### 1.3.2 Wie sind die Niederschläge im klimatologischen Vergleich einzuordnen?

Die Starkniederschläge vom August 2005 waren in Bezug auf Intensität und Ausdehnung im langjährigen Vergleich aussergewöhnlich. Die über die 48 Stunden aufsummierten Niederschläge vom 21./22. August haben an insgesamt 22 Messstationen der MeteoSchweiz mit Messreihen bis ins frühe 20. Jahrhundert die bisher höchsten Werte seit Messbeginn erreicht oder übertroffen. In Meiringen, Weesen und Wimmis wurden die bisherigen Rekorde sehr deutlich übertroffen. Auch bei Stationen mit Messreihen, die bis zurück ins 19. Jahrhundert reichen, wurden Rekordwerte verzeichnet. Rekordniederschläge wurden insbesondere an Stationen im Emmental, Entlebuch und in Teilen des Berner Oberlandes gemessen, regional auch von der Innerschweiz bis Liechtenstein. Für diese Vergleiche wurden auch handschriftliche, bisher nicht digitalisierte Niederschlagswerte von zusätzlichen langen Stationsreihen berücksichtigt. Teilweise kam es auch zu Rekorden in den 24 h-Summen. Bei insgesamt 13 Stationen mit langjährigen Beobachtungsreihen wurde der frühere Rekord überschritten.

Rekordwerte an zahlreichen Stationen

Im Vergleich zu den Stationen in der Südschweiz sind die im August 2005 beobachteten Punkt-Niederschlagsmengen der Stationen im betroffenen Gebiet allerdings nicht einzigartig. Die absolut grössten schweizerischen Niederschläge wurden im Tessin, Simplongebiet und Mesolcina beobachtet, wo auch im gesamtalpinen Vergleich besonders häufig Starkniederschläge vorkommen (z.B. Schär et al., 1998; Frei und Schmidli, 2006). In den digital verfügbaren Messreihen der MeteoSchweiz liegen die bisherigen Rekordwerte der 48 h-Summe im Tessin zwischen 250 und 450 mm, und diejenigen der 72 h-Summe zwischen 350 und 600 mm. Die schweizweiten Rekorde wurden mit 495 mm in Simplon-Dorf (48 h-Summe, 13.–14. September 2000) und mit 615 mm in Mosogno (72 h-Summe, 14.–16. Oktober 2002) gemessen. Es ist möglich, dass in nicht digital verfügbaren Messreihen diese Werte sogar noch übertroffen werden.

Keine schweizweiten Rekorde

Eine statistische Schätzung der Seltenheit der im August 2005 gefallenen Niederschläge lässt sich mit den Methoden der Extremwertstatistik herleiten. Mit dieser kann die Jährlichkeit (Wiederkehrperiode) für ein bestimmtes Ereignis geschätzt werden. Eine Jährlichkeit von T Jahren bedeutet, dass innerhalb eines betrachteten Jahres ein Extremum gleicher oder grösserer Niederschlagsmenge mit einer Wahrscheinlichkeit von  $1/T$  zu erwarten ist.

Die Schätzung der Jährlichkeit, basierend auf der Referenzperiode von 1901–2005, ergibt für einzelne Stationen mehrere hundert Jahre. So wird die Wiederkehrperiode des Niederschlags bei Engelberg auf ca. 300 Jahre und bei Meiringen auf mehr als 1000 Jahre geschätzt. Die Schätzungen sind für so seltene Ereignisse trotz der langen Datenreihen mit grossen Unsicherheiten verbunden. Das 95%-Konfidenzintervall für Engelberg reicht zum Beispiel von 110 Jahren bis zu mehreren Tausend Jahren. Genaue Angaben zur Jährlichkeit machen also wenig Sinn.

Hohe Jährlichkeiten an einigen Stationen

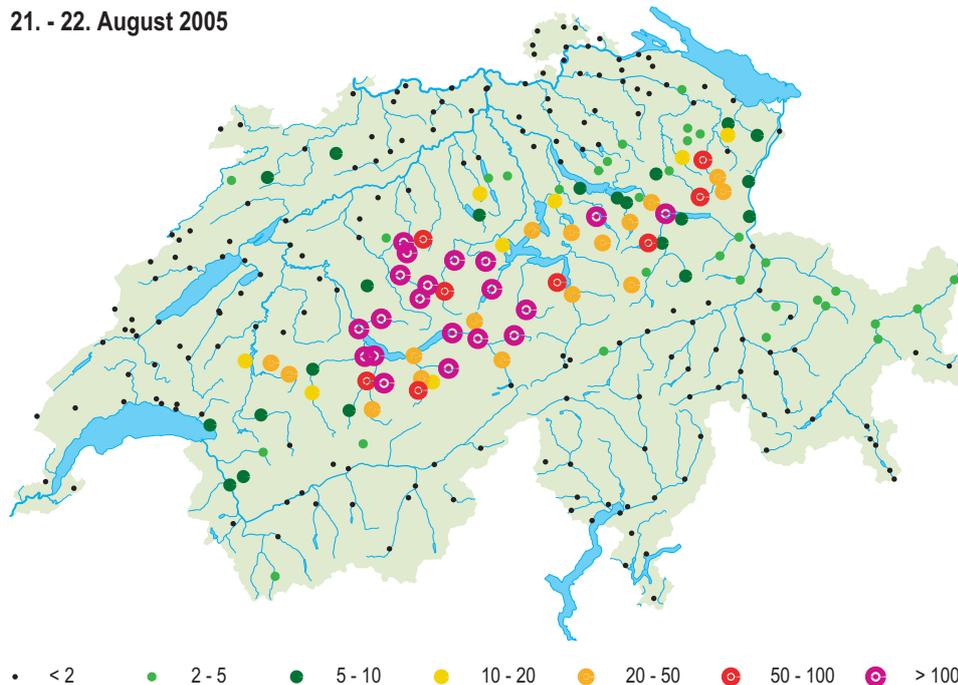
Summarisch lässt sich aber sagen, dass die Augustniederschläge in Meiringen lokal einem möglicherweise mehr als 500-jährlichen Ereignis, in Engelberg einem mehr als hundertjährigen Ereignis entsprachen. Das Resultat für Meiringen ist ein Extremfall, das Beispiel Engelberg ist typisch für eine Reihe von Stationen in der Zentralschweiz.

Aussergewöhnlich hohe Jährlichkeiten an einzelnen Stationen sollten nicht überbewertet werden. Sie beschreiben zwar die Seltenheit eines Ereignisses für die lokalen Verhältnisse, aber dies entspricht nicht der Seltenheit in einem regional übergeordneten Rahmen. Niederschlag ist eine räumlich sehr variable Grösse. Es ist deshalb möglich, dass Ereignisse, die überregional gesehen nicht sehr selten sind, durch ihre feinskaligen Unterschiede aber an einzelnen Stationen zu überproportional grossen Jährlichkeiten führen können. Im Extremfall, bei dem die typische räumliche Skala von Starkniederschlägen viel kleiner als der typische Abstand zwischen Stationen ist, würde in einem Messnetz von 100 Stationen im Durchschnitt jedes Jahr einen Jahrhundertniederschlag registriert werden. Eine Betrachtung der Jährlichkeiten im gesamten Messnetz bietet deshalb einen besseren Einblick in die Statistik.

Jährlichkeiten im gesamten  
Messnetz

**Abb. 1.7 > Geschätzte Jährlichkeit [Jahre] der beobachteten 48h-Niederschlagssumme (21.–22.08.2005) für Schweizer Niederschlagsstationen mit einer mindestens 40 Jahre langen Beobachtungsreihe nach 1961.**

21. - 22. August 2005



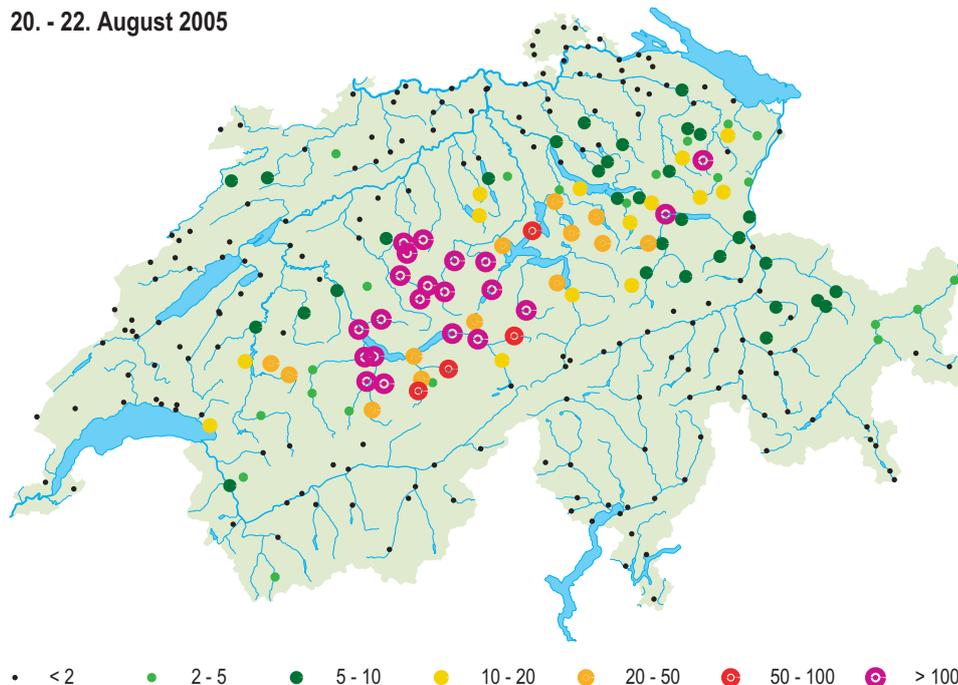
Kartengrundlage: Digitale Übersichtskarte der Schweiz (K606-01 © 2004 swisstopo)

Die Abb. 1.7 und 1.8 zeigen die Jährlichkeiten des Ereignisses für alle Schweizer Niederschlagsstationen mit mindestens 40-jährigen Messreihen nach 1961. Die 48 h-Summe der zwei Tage 21. und 22. August (Abb. 1.7) sowie die 72 h-Summe der drei Tage vom 20.–22. August (Abb. 1.8), weisen für praktisch alle Stationen im unteren Berner Oberland, dem Emmental und Entlebuch sowie dem Kanton Obwalden eine Jährlichkeit von mehr als 100 Jahren auf. In den östlichen Voralpen vom Vierwaldstättersee zum Bodensee wurden noch Jährlichkeiten zwischen 10 und 50 Jahren erreicht. Schweizweit war die 48 h-Summe bei 20 Stationen ein Jahrhundert-Ereignis.

20 Stationen mit mindestens 100-  
jährlichen Niederschlagsmengen

Abb. 1.8 > Geschätzte Jährlichkeit [Jahre] der beobachteten 72 h-Summe (20.–22.08.2005) für Schweizer Niederschlagsstationen mit einer mindestens 40 Jahre langen Beobachtungsreihe seit 1961.

20. - 22. August 2005



Kartengrundlage: Digitale Übersichtskarte der Schweiz (K606-01 © 2004 swisstopo)

Die Abb. 1.7 und 1.8 zeigen auch, dass die Starkniederschläge im August 2005 besonders für die zentralen Voralpen westlich und südlich des Vierwaldstättersees aussergewöhnlich waren, während die östlichen Landesteile weniger hohe Jährlichkeiten aufwiesen. Dies ist nur teilweise durch die dort geringer ausgefallenen Niederschlagsmengen zu erklären. Ein weiterer Faktor ist die Tatsache, dass die östlichen Voralpen wesentlich häufiger von Starkniederschlägen betroffen sind. Zur Besonderheit der Starkniederschläge hat also auch beigetragen, dass die hohen Niederschlagsmengen in einer Region der Schweiz gefallen sind, die seltener von Starkniederschlägen betroffen ist.

Bei der Beurteilung eines Extremereignisses mit Auswertungen für Einzelstationen erhalten in der Regel jene Stationen mit den grössten Jährlichkeiten besondere Beachtung. Dies ist aber eine subjektive Auswahl und die Seltenheit eines Ereignisses auf einer überregionalen Ebene wird auf diese Weise massiv überschätzt. Genauere Anhaltspunkte über die Wiederkehrperiode auf einer übergeordneten Raumskala können mit Analysen für Gebietsniederschläge gewonnen werden.

Abb. 1.9 zeigt ein Beispiel einer solchen Analyse. Dabei wurden die Niederschläge zunächst unter Benützung eines räumlichen Gitterungsverfahrens (MeteoSchweiz, 2006) über den gesamten Alpennordrand gemittelt, und die resultierende Zeitreihe des Gebietsniederschlags (1966–2005) mittels Extremwertanalyse untersucht. Das Ge-

Statistische Einordnung  
des Gebietsniederschlags

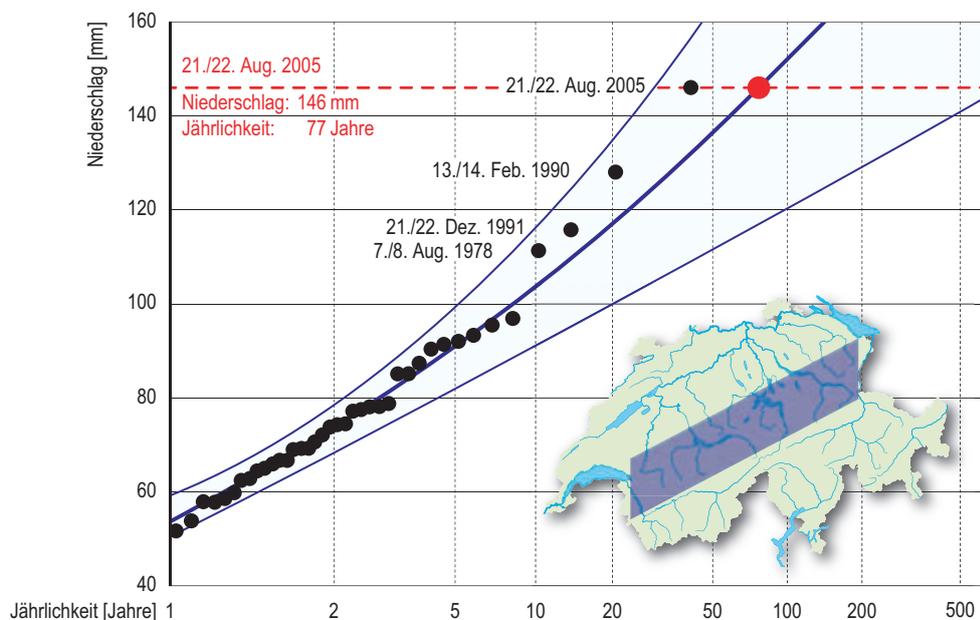
bietsmittel von 146 mm für den 21.–22.08.2005 entspricht tatsächlich der grössten Menge, die seit 1966 an zwei aufeinander folgenden Tagen in diesem Gebiet gefallen ist. Die Gebietsniederschläge bei früheren Ereignissen waren zwar geringer aber zumindest in der Grössenordnung vergleichbar mit den Verhältnissen im August 2005. Die frühere Rekordmenge aus dem Februar 1990 (ein Starkniederschlag im Vorfeld der Stürme Viviane und Wiebke) wurde nur um 14% übertroffen. Gemessen am Gebietsniederschlag (2-Tages-Summe) über dem gesamten Alpennordrand der Schweiz wird die Jährlichkeit des Starkniederschlags im August 2005 auf 77 Jahre mit einem 90%-Konfidenzintervall zwischen 30 und rund 500 Jahren geschätzt.

Während der August 2005 zwar an vielen Stationen und in verschiedenen Regionen der Schweiz tatsächlich Jahrhundert-Niederschläge gebracht hat, können seine Mengen auf der grossen, nationalen Skala nicht unbedingt als Jahrhundertereignis bezeichnet werden. Bei dieser Einordnung ist allerdings zu beachten, dass die zwei bisher grössten Gebietsniederschlags-Ereignisse (Abb. 1.9) im Winter aufgetreten sind und somit ein grösserer Teil des Niederschlags als Schnee gefallen und damit nicht unmittelbar zum Abfluss gekommen ist, was die hydrologischen Auswirkungen dieser beiden Ereignisse gemildert haben dürfte.

Gebietsniederschlag selten, aber nicht aussergewöhnlich

**Abb. 1.9** > Frequenzdiagramm nach Gumbel für den maximalen 2-Tages-Gebietsniederschlag über dem Schweizer Alpennordrand.

*Datengrundlage sind alle Schweizer Niederschlagsmessungen in der Periode 1966–2005. Die eingefügte Karte zeigt das Gebiet, für welches die Gebietsniederschläge berechnet wurden.*



Kartengrundlage: Digitale Übersichtskarte der Schweiz (K606-01 © 2004 swisstopo)

### 1.3.3 Starkniederschläge und die Klimaänderung

Im Rahmen der Ereignisanalyse stellt sich die Frage nach dem Zusammenhang des Ereignisses vom August 2005 mit dem Phänomen der globalen Klimaänderung und seinen anthropogenen Ursachen (IPCC, 2001). Dazu ist zunächst festzuhalten, dass ein einzelnes Ereignis nie einer einzigen Ursache, wie der globalen Klimaänderung, zugeordnet werden kann. Die globale Klimaänderung verändert allenfalls die Häufigkeit oder die statistischen Eigenschaften (z.B. Dauer, Ausdehnung, saisonales Auftreten) eines bestimmten Typs von Ereignissen und daraus liess sich im Nachhinein ein statistischer Beitrag für ein Einzelereignis ableiten (Allen, 2003).

Ob sich die Häufigkeit von Starkniederschlägen im Alpenraum in jüngster Zeit verändert hat, lässt sich für aussergewöhnliche Ereignisse wie jenes vom August 2005 aus den Datenreihen kaum feststellen. Ihre Seltenheit verhindert statistisch gesicherte Aussagen. Auch wenn grosse Veränderungen in ihrer Wahrscheinlichkeit tatsächlich stattgefunden haben sollten, so ist es unwahrscheinlich, dass diese sich aus den Messungen bereits schlüssig nachweisen lassen (Frei, Schär, 2001). Das Wissen über Veränderungen und Trends in Starkniederschlägen beruht deshalb auf häufigeren – also nicht so extremen – Ereignissen, die nicht notwendigerweise zu Schäden führen.

Untersuchungen der letzten Jahre haben für verschiedene Regionen von Zentral- und Nordeuropa zunehmende Trends in der Häufigkeit von intensiven Niederschlägen nachgewiesen (z.B. Klein Tank, Können, 2003; Haylock, Goodess, 2004). In der Schweiz, nördlich der Alpen, wurde für das 20. Jahrhundert eine Zunahme im 90%-Quantil der Tagesniederschläge gefunden (Schmidli, Frei, 2005). Dies gilt für den Herbst und den Winter. Für den Sommer sind bisher keine Trends nachgewiesen worden.

Es kann heute nicht abschliessend beurteilt werden, ob aussergewöhnliche Niederschlagsereignisse, wie diejenigen im August 2005, mit der fortschreitenden globalen Klimaänderung in Zukunft häufiger auftreten werden. Eine Reihe von Studien versucht Klimaszenarien unter Verwendung von verschiedenen Klimamodellen zu analysieren und zu vergleichen. Dabei zeigen sich gerade für den Sommer grosse Unterschiede. Anhand von probabilistischen Szenarien aus regionalen Klimamodellen für das Jahr 2050 ergibt sich eine Abnahme der mittleren Sommerniederschläge, allerdings mit einem grossen Unsicherheitsbereich zwischen 7% und 31% (Frei, 2005). Trotz dieser Abnahme der mittleren Niederschläge wird jedoch eine Zunahme in der Häufigkeit von Extremniederschlägen nördlich der Alpen festgestellt (Christensen, Christensen, 2003; Frei et al., 2006). Wie abhängig solche Szenarien von den gegenwärtig verwendeten globalen Klimaszenarien sind, und ob die Resultate auch für dynamisch bestimmte Starkniederschläge wie das Ereignis im August 2005 gelten, werden zukünftige Untersuchungen zeigen müssen. Eine allgemeine Zusammenfassung über den Zusammenhang zwischen verschiedenen Typen von Extremereignissen und globaler Klimaänderung findet sich in OcCC (2003).

Aussagen zu Klimaänderung und Einzelereignissen kaum möglich

Intensive Niederschläge haben zugenommen

Szenarien über Starkniederschläge im Sommer sehr unsicher

## 1.4 Vergleichbare Ereignisse in der Vergangenheit

Extremniederschlagsereignisse, welche in ausgedehnten Gebieten zu grossen Niederschlagssummen und Schäden führen, haben in den meisten Fällen einen individuellen Charakter. Als wesentliche Gemeinsamkeit gilt, dass sie im Alpenraum primär durch Advektion verursacht werden, d.h. durch quasi-horizontales Aufgleiten einer feuchten Luftmasse in der freien Atmosphäre oder am Gebirge. Typisch sind dann grossflächige Dauerniederschläge über mehrere Tage mit Extremwerten in den Tagessummen in der Grössenordnung von ca. 250 mm nordalpin und ca. 400 mm südalpin. Extremniederschläge auf der Alpennordseite können sich bei verschiedenen Strömungslagen entwickeln und sind damit weniger an systematisch wiederkehrende Bedingungen gebunden. Die erforderlichen Hebungsraten bei den Ereignissen der vergangenen Jahrzehnte sind in verschiedenen Zirkulationsanordnungen zustande gekommen, in denen die einzelnen Komponenten, die zum Niederschlag beitragen, unterschiedlich ausgeprägt waren (Grebner, 1996; Rudolf, Rapp, 2002). Entsprechend sind in der verfügbaren Messperiode seit 1864 nur wenige Ereignisse zu finden, welche bezüglich der synoptischen Lage und der damit verbundenen regionalen Niederschlagsverteilung mit dem Ereignis vom August 2005 direkt vergleichbar sind.

Typische Strömungslagen

Hochwasser mit einer ähnlichen synoptischen Lage traten in den vier Fällen vom Mai 1999, Juli 1977, Juli 1987 und Juni 1910 auf, die speziell für die Schweiz bedeutsam waren. Bedeutende hydrologische Ereignisse am Ende des 19. Jahrhunderts lassen sich auf Grund der spärlichen synoptischen Daten nur schwierig klassifizieren.

Nur wenige gut dokumentierte Vergleichsereignisse

Das Ereignis Juni 1910 war dem Ereignis 2005 sowohl synoptisch wie auch in der Niederschlagsverteilung ähnlich. Der Hauptunterschied liegt in der Dauer des Ereignisses (damals dauerten die sehr starken Niederschläge im Wesentlichen 24 Stunden) und der Vorgeschichte. Während die Anfeuchtung des Bodens im August 2005 von wesentlicher Bedeutung war, ergaben sich 1910 die grossen Abflüsse vor allem aus einer unmittelbar vor dem Ereignis stattfindenden Periode intensiver Schneeschmelze. Damit war bei beiden Ereignissen die «hydrologische Vorbelastung», wenn auch aus unterschiedlichen Gründen, von entscheidender Bedeutung für die ausserordentlichen Auswirkungen der starken Niederschläge.

Juni 1910

Das Ereignis von Ende Juli 1977 zeigte (vor allem am 31. Juli 1977) das bekannte Muster von aus Nordosten herangeführten feuchten Luftmassen, welche auf der Alpennordseite auf kühlere Luft stiessen. Die damit verbundenen Aufgleitvorgänge in Kombination mit dem Nordstau lösten vor allem von der Innerschweiz über das Zürcher Oberland bis ins Thurgau massive Niederschläge aus. Das Niederschlagszentrum lag im Raum Schächental und Sihlsee. Im Urnerland entwickelte sich die Situation zu einer eigentlichen Unwetterkatastrophe (Schweiz. Meteorologische Zentralanstalt, 1977; Röthlisberger, 1991).

Juli 1977

Rein schematisch lässt sich auch die Witterungsentwicklung, welche zur bekannten Unwetterkatastrophe vom 17.–19. Juli 1987 führte, an die oben diskutierte Art von Zirkulationsmuster annähern (BWG, 2000). Von Nordwesten herangeführte Kaltluft

Juli 1987

traf über der Schweiz und Frankreich auf eine hoch reichende, warmfeuchte Südwestströmung. An der dazwischen liegenden Kaltfront entwickelte sich ein sekundärer Tiefdruckwirbel, welcher sich über längere Zeit im Raum Tessin/Veltlin festsetzte. Die in diesem Zirkulationssystem vorhandenen, ausserordentlich grossen Temperaturgegensätze zwischen den beteiligten Luftmassen führten zu intensiven Aufgleitvorgängen. Durch die Position des Zirkulationssystems lag das Hauptniederschlagsfeld südlich und im Innern der Alpen (BWW, 1991). Die Vorgeschichte zu dieser Unwetterkatastrophe zeigt sehr ähnliche Züge wie jene im August 2005. Über längere Zeit herrschten nasse Bedingungen, was in den Flüssen zu hohen Wasserständen führte. Neben der bereits mehrfach erwähnten nassen Vorgeschichte lagen im August 2005 die Temperaturen bis zum Unwetterereignis insgesamt deutlich unter dem Durchschnitt.

Das Ereignis vom Mai 1999 könnte als eine Art Kombination der Ereignisse vom Juni 1910 und August 2005 gesehen werden. Zunächst ergab sich in einem ersten Schub (11.–14. Mai 1999) eine ernsthafte Hochwassersituation, die im Wesentlichen auf Grund relativ warmer Temperaturen durch gleichzeitige massive Schneeschmelze verstärkt wurde. Die dadurch bereits vorbelasteten Böden waren im folgenden Starkniederschlagsereignis vom 20.–22. Mai – mit ähnlicher synoptischer Entwicklung wie im August 2005, jedenfalls in Bezug auf das Tiefdruckgebiet südlich der Alpen in seiner Endphase, das feuchte Luft von Osten gegen die Alpen geführt hat – nicht in der Lage, die gewaltigen Wassermassen aufzunehmen. Entsprechend der synoptischen Situation zeigten sich die Maximalwerte der damaligen Niederschlagsverteilung in der östlichen Zentralschweiz. Die grössten Niederschlagsmengen traten vom Säntisgebiet über den Walensee bis zum Vierwaldstättersee sowie im Prättigau auf.

Mai 1999

Beide Hochwasser vom Mai 1999 ergaben sich damit durch eine Überlagerung von Schneeschmelze und Starkniederschlägen. Die Beiträge dieser Prozesse waren je nach Region und Ereignis stark unterschiedlich. Gemäss der damaligen Ereignisanalyse entstanden die Hochwasser jedoch vor allem infolge des Niederschlages. Die Schneeschmelze wirkte dabei vor allem abflussfördernd (Bodendurchtränkung), trug aber nur in begrenztem Mass selbst zum Abfluss bei. Unter solchen Vorbedingungen entstehende Hochwasser treten seltener auf, als sich allein aus der Wiederkehrperiode des Niederschlagsereignisses errechnen lässt (BWG, 2000).

1.5

## Erkenntnisse

Grossflächige Starkniederschläge entstehen in der Schweiz dann, wenn die atmosphärische Strömung Niederschlagszonen über unser Land führt und diese Strömungsmuster über einen oder mehrere Tage stabil bleiben. Im August 2005 war der Auslöser ein stabiles Tiefdrucksystem südlich der Alpen, das feuchte Luftmassen an den Alpennordrand führte. Zwischen der Saane und dem Alpenrhein fielen in der Schweiz grossflächig Niederschläge von teilweise deutlich über 100 mm in 48 Stunden. Vergleichbare Niederschläge wurden auch in Österreich bis in den Raum Salzburg und in Deutschland in Südbayern registriert.

Grossflächige  
lang anhaltende Niederschläge

Das Ausmass der Niederschläge war massgeblich vom Gebirge beeinflusst, wobei nicht alleine die Hebung der Luftmassen am Gebirge selbst Ursache der Niederschläge war. Vielmehr überlagerten sich durch das Gebirge beeinflusste thermodynamische Vorgänge und die eigentliche Hebung zu einem komplexen System. An einigen Stationen führte dies zu Niederschlägen, wie sie in den teilweise über 100 Jahre langen Messreihen noch nicht festgestellt worden sind. Entsprechend wurden teilweise sehr lange statistische Wiederkehrdauern ermittelt.

Diese langen Wiederkehrdauern suggerieren, ebenso wie die geringe Anzahl von Vergleichereignissen in der jüngeren Vergangenheit, eine Aussergewöhnlichkeit des Ereignisses, die jedoch einer näheren Prüfung nicht standhält. Dies insbesondere auch deshalb, weil für den Abfluss in einem Einzugsgebiet nicht der mit Pluviometerstationen gemessene Punktniederschlag sondern der Niederschlag über das gesamte Gebiet massgebend ist. Die Wiederkehrdauer des Gebietsniederschlags beläuft sich, über das gesamte betroffene Gebiet analysiert, auf knapp 80 Jahre. Entsprechend muss davon ausgegangen werden, dass vergleichbare Niederschlagsereignisse auch in näherer Zukunft möglich sind. Wie genau die ablaufende Klimaänderung die Auftretenswahrscheinlichkeit derartiger Ereignisse im Sommer beeinflusst, kann zum heutigen Zeitpunkt nicht schlüssig beantwortet werden.

#### Literatur:

Allen M. 2003: Liability for climate change. *Nature*, 421, 891–892.

BWG 2000: Hochwasser 1999. Analyse der Ereignisse. Studienbericht Nr. 10/2000, Bundesamt für Wasser und Geologie. 148 S.

BWW 1991: Ursachenanalyse der Hochwasser 1987. Schlussbericht. Mitteilung des Bundesamtes für Wasserwirtschaft Nr. 5, Bern.

Christensen J., Christensen O. 2003: Severe summertime flooding in Europe. *Nature*, 421, 805–806.

Frei C. 2005: Die Klimazukunft der Schweiz – Eine probabilistische Projektion. Arbeitspapier zum Projekt «Die Schweiz im Jahr 2050» des OcCC (Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung).

Frei C., Schär C. 2001: Detection probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitation in the Alpine region. *J. Climate*, 14, 1564–1584.

Frei C., Schmidli J. 2006: Das Niederschlagsklima der Alpen: Wo sich die Extreme nahekommen. *promet, meteorologische Fortbildung, Deutscher Wetterdienst*, 32 (1/2), 61–67.

Frei C., Schöl R., Fukutome S., Schmid S., Vidale P. 2006: Future change of precipitation extremes in Europe: An intercomparison of scenarios from regional climate models. *J. Geophys. Res.*, 111 (D6), Art. No. D06105.

Germann U., Galli G., Boscacci M., Bolliger M. 2006: Radar precipitation measurement in a mountainous region. *Q. J. Royal Meteorol. Soc.*, 132, 1669–1692.

Grebner D. 1996: Starkniederschläge in der Schweiz – Signale einer Klimaänderung? *Klimaseminar Schweizer Rück*, 6./7. Mai 1996, Zürich, 9 S.

Haylock M., Goodess C. 2004: Interannual variability of extreme European winter rainfall and links with mean large-scale circulation. *Int. J. Climatol.*, 24, 759–776.

IPCC 2001: *Climate Change 2000: The scientific basis*. (Ed. Houghton et al.), Third Assessment Report of Working Group 1 of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 881p.

Klein Tank A.M.G., Können G. 2003: Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946–1999. *J. Climate*, 16, 3665–3680.

Liljequist G., Cehak K. 1974: *Allgemeine Meteorologie*. Vieweg Verlag.

Massgeblicher Gebirgsfluss

Mit ähnlichen Ereignissen muss auch in Zukunft gerechnet werden

- 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 2006: Starkniederschlagsereignis August 2005. *Arbeitsberichte der MeteoSchweiz* 211, 63 S.
- MeteoSchweiz 2005: Witterungsbericht August 2005. 6 S.
- Montani A., Marsigli C., Nerozzi F., Paccagnella T., Tibaldi S., Buizza R. 2003: The Soverato flood in Southern Italy: performance of global and limited-area ensemble forecasts. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 10, 261–274.
- OcCC 2003: Extremereignisse und Klimaänderung. *Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung*, Bern, 88 S.
- Röthlisberger G. 1991: Chronik der Unwetterschäden in der Schweiz. *Berichte der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL*, Nr. 330, 122 S.
- Rudolf B., Frank R., Grieser J., Müller-Westermeier G., Rapp J., Trampf W. 2006: Das Hochwasser in Südbayern im August 2005: Niederschlagsvorhersage, Warnung und klimatologische Bewertung des DWD. *Hochwasserschutz und Katastrophenmanagement*, (im Druck).
- Rudolf B., Rapp J. 2002: Das Jahrhunderthochwasser der Elbe: Synoptische Wetterentwicklung und klimatologische Aspekte. *Klimastatusbericht des DWD* 2002, 172–187.
- Schär C., Davies T., Frei C., Wanner H., Widmann M., Wild M., Davies H. 1998: Current Alpine climate. (Ed. Cebon P., Dahinden U., Davies H.C., Imboden D., Jaeger C.C.), *A view from the Alps. regional perspectives on climate change*. 21–72.
- Schmidli J., Frei C. 2005: Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20th century. *Int. J. Climatol.*, 25, 753–771.
- Schweizerische Meteorologische Zentralanstalt 1977: *Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt* 1977. 114. Jahrgang, Zürich.

Adrian Eberhard, Robert Diezig, Caroline Kan, Beat Sigrist

## 2 > Hydrologie Fließgewässer

*Die grosse räumliche Verbreitung der anhaltenden und intensiven Niederschläge vom August 2005 hat in weiten Teilen der Einzugsgebiete von Aare, Reuss und Limmat zu neuen Maximalwasserständen und Höchstabflüssen geführt, wie sie in diesem Ausmass seit 1910 nicht mehr beobachtet wurden. Einerseits war das Kerngebiet des Niederschlages betroffen und andererseits die grossen Flüsse, welche die Wassermassen ins Mittelland führten.*

### 2.1 Einleitung

Die Starkniederschläge vom 18.–23.08.2005 verursachten in grossen Teilen der Einzugsgebiete von Aare, Reuss und Limmat ausserordentlich hohe Wasserstände und Abflussmengen. In der Schweiz betreibt die Abteilung Hydrologie des BAFU ein landesweites hydrometrisches Messnetz, welches verschiedene Kantone mit eigenen Stationen ergänzt haben. Viele dieser Stationen verzeichneten im August 2005 neue Rekorde.

Das vorliegende Kapitel beschreibt die Abflüsse in den Fließgewässern beim grossräumigen Ereignis vom August 2005 anhand der Daten des nationalen Messnetzes. Weiter werden die wichtigsten Erfahrungen aus dem Betrieb des Abflussmessnetzes zusammengefasst, welches während des Hochwassers einer aussergewöhnlichen Belastung ausgesetzt war. Nachfolgend wird zuerst die Datenerfassung während des Ereignisses erläutert (Abschnitt 2.2). Daran schliesst eine Bewertung der Qualität der Abflussdaten an (Abschnitt 2.3). Nach einer kurzen Beschreibung des Ablaufs des Hochwassers (Abschnitt 2.4) werden in zwei weiteren Abschnitten die Daten analysiert und mit Hilfe der Extremwertstatistik zeitlich (Abschnitt 2.5) bzw. in ihrem gegenseitigen Vergleich in der Schweiz räumlich (Abschnitt 2.6) eingeordnet.

### 2.2 Datenerfassung

Das hydrometrische Messnetz des Bundes besteht heute aus rund 260 Stationen. Das Hochwasser 2005 war ein Härtestest für ein Grossteil dieses Messnetzes, wurde doch bei mehr als 30 Abflussstationen ein 50-jährliches Ereignis übertroffen. Grundsätzlich werden die Anlagen auf Ereignisse dieser Grössenordnung ausgelegt. Ob die mögliche Hochwassersituation richtig eingeschätzt worden ist und ob die Bauten und Installationen dem Ereignis standgehalten haben, lässt sich erst mit dem «Feldversuch», also mit einem grossen Hochwasser, definitiv beurteilen. In dem Sinne war das Hochwasser

Hochwasser vom August 2005  
war ein Härtestest

vom August 2005 äusserst aufschlussreich, zeigt es doch auf, wo allenfalls Handlungsbedarf besteht, um für zukünftige Ereignisse noch besser gerüstet zu sein.

Grundsätzlich hat das Messnetz die Belastungen dieses Hochwassers gut überstanden. Durch die hochwassersichere Anordnung von Mess- und Registriergeräten und die Ausrüstung wichtiger Stationen mit Notstromeinrichtungen konnten vielfach auch noch in überfluteten oder abgeschnittenen Gebieten weiter Daten gesammelt werden. Wo dies nicht mehr möglich war, kamen oft Einzelablesungen der Aussendienstmitarbeiter oder von Helfern vor Ort zum Tragen. Diese konnten bereits aufgezeichnete aber noch nicht übermittelte Daten noch weiterleiten bzw. die Messungen durch regelmässige Ablesungen vor Ort und telefonischer Durchgabe der Daten weiterführen.

Es hat sich gezeigt, dass in Krisensituationen wie im August 2005, wenn viele Verkehrswege unterbrochen sind, das Erreichen der Messstation zu einer Hauptschwierigkeit werden kann (Abb. 2.1). In derartigen Situationen sind lokale Beobachter, die unmittelbar bei den Stationen wohnen, und die zusätzlichen Angaben weiterer Personen vor Ort von unersetzlichem Wert.

Beobachter vor Ort sind wertvoll

**Abb. 2.1** > Die Wasserstandsmessstation am Brienersee bei Ringgenberg (am rechten Bildrand) war während des Hochwassers vom August 2005 nur noch unter erschwerten Bedingungen zugänglich.



Das bestehende hydrometrische Messnetz des Bundes wurde in den letzten Jahren immer weiter automatisiert. Heute werden rund 220 Stationen stündlich abgefragt. Die Abfragezentrale wurde in den letzten Jahren wegen der ständig steigenden Anforderungen laufend ausgebaut. Heute werden pro Stunde über 600 Diagramme erstellt und via Intra- und Internet verteilt. So können Mitarbeitende des Amtes und die interessierte Öffentlichkeit jederzeit auf die aktuellen Daten zugreifen. Über das lokale Netzwerk können sich die Mitarbeitenden zudem direkt in die Datenbank einloggen, um Daten zu visualisieren und zu bearbeiten. Daneben werden die Daten in verschiedenen anderen Formaten für weitere Anwendungen (z.B. Verbreitung auf Mobiltelefonen) bereitgestellt. Interne Datenanfragen werden automatisch bearbeitet und die gewünschten Daten in unterschiedlichen Formen für die weitere interne Verarbeitung bereitgestellt, wie z.B. für die Abflussprognose des BAFU (Kap. 5).

**Das Messnetz ist weitgehend automatisiert**

Während des Hochwassers vom August 2005 publizierte die damalige Landeshydrologie, die heutige Abteilung Hydrologie des BAFU, die aktuellen Daten als Plots und Bulletins auf der offiziellen Internetseite des damaligen BWG, welche durch das Bundesamt für Informatik und Telekommunikation (BIT) betrieben wird. Das BIT war jedoch auf dermassen viele Anfragen nicht vorbereitet. Obwohl die Daten vorhanden waren, konnte das System die Anfragen nicht mehr beantworten. In der Folge schien es, als wären keine aktuellen Daten vorhanden, was auf Seiten der Bevölkerung und anderer Behörden für einigen Unmut sorgte. Die Verantwortlichen der Abfragezentrale schalteten direkte Links auf, so dass Interessierte wieder zu den gewünschten Daten kamen. Die Datenabgabe als File via FTP-Server war nicht betroffen. Auch telefonisch konnte jederzeit über die aktuellen Pegelstände Auskunft gegeben werden.

**Datenverbreitung via Internet massiv gestört**

Insgesamt hat sich das Messnetz bei diesem Ereignis bewährt. Die Systeme funktionierten sehr gut und die Mitarbeitenden haben in dieser Stresssituation angepasst reagiert. Sehr wenig Messausfälle und kaum grosse Schäden an den Anlagen zeigen, dass die getroffenen Dispositionen bei Bau und Ausrüstung weitgehend richtig sind. Im Betrieb müssen noch zusätzliche Anstrengungen unternommen werden, damit die lokal erhobenen Daten auch jederzeit von der Zentrale eingeholt und Nutzern zur Verfügung gestellt werden können.

**Messnetz hat Belastungsprobe bestanden**

Sowohl bei der Messung als auch bei der Speicherung und Übertragung der Daten muss rasch darauf hingearbeitet werden, dass in allen Bereichen redundante Systeme zur Verfügung stehen. Dies erfordert allerdings grössere Investitionen an den Messstationen. Bis zur Umsetzung dieser Massnahmen stehen dank des dichten Messnetzes oftmals Ersatzstandorte zur Verfügung, die zur Überbrückung verwendet werden können.

**Redundanz in der Erfassung und Kommunikation ist anzustreben**

Wegen des teilweisen Ausfalls der Telefonleitungen werden neue und zusätzliche Kommunikationskanäle gesucht. Geplant ist, bei den wichtigsten Stationen eine zweite, von der normalen Telefonleitung unabhängige Übertragung, einzurichten. Dabei kommen Mobilfunk, Satellit oder Funknetze in Frage.

Schliesslich muss noch eine Verdoppelung der technischen Infrastruktur der Abfragezentrale ins Auge gefasst werden. Fällt die Zentrale aus, dann nützen alle anderen

Sicherheitsmassnahmen nichts, weshalb die Vorbereitung einer zweiten unabhängigen Zentrale an einem anderen Standort geprüft wird. Das Internet ermöglicht eine Fernverwaltung sowie einen Abgleich zweier Datenbanken, so dass mit zwei operationellen Abfragezentralen gearbeitet werden kann und der Ausfall einer Zentrale abgefangen, respektive im Hochwasserfall noch eine aktuelle Datenlage verfügbar ist. Neue Möglichkeiten ergeben sich bei einer Einbindung der Stationen ins Internet auch für die Datenabfrage und die Überwachung des Messnetzes.

Neben dem bestehenden Internetauftritt auf der Homepage des BAFU wurde ein zweiter, weitgehend redundanter Internetauftritt realisiert, der von einer unabhängigen Stelle betreut wird. Diese Seite ist primär darauf ausgelegt, höchsten Ansprüchen in Sachen Last und Geschwindigkeit zu genügen, um damit eine Wiederholung der beim Hochwasser 2005 aufgetretenen Probleme zu verhindern.

Redundante Homepage realisiert

*Offizielle Homepage des BAFU für aktuelle Messdaten:*

[www.hydrodaten.admin.ch/d/](http://www.hydrodaten.admin.ch/d/)

*Redundante Homepage für aktuelle Messdaten:*

[www.landeshydrologie.ch](http://www.landeshydrologie.ch)

[www.servicehydrologique.ch](http://www.servicehydrologique.ch)

[www.servizioidrologico.ch](http://www.servizioidrologico.ch)

[www.hydrologicalsurvey.ch](http://www.hydrologicalsurvey.ch)

2.3

## Qualität der Messwerte

Abflüsse in einem natürlichen Fließgewässer lassen sich nicht direkt messen. Deshalb wird an auf Grund der hydraulischen Bedingungen geeigneten Standorten der Wasserstand gemessen und mit Hilfe einer Wasserstands-Abfluss-Beziehung in Abflüsse umgerechnet. Diese Beziehungen müssen für jede Station individuell durch Abflussmessungen bei unterschiedlichen Wasserständen geeicht werden. Dazu werden unter anderem Flügelmessungen eingesetzt (Abb. 2.2). Für sehr hohe Wasserstände müssen diese Beziehungen nach oben extrapoliert werden, da in diesem Bereich oft kaum Messungen zur Verfügung stehen.

Abflussmessung

Auf Grund der hohen Wellen bei einem Hochwasser, stellt oft schon die korrekte Aufzeichnung eines Wasserstandes eine grosse Herausforderung dar (Abb. 2.3). Je nach lokalen Bedingungen kommen deshalb unterschiedliche Messgeräte zum Einsatz. Teilweise werden an einer Messstation gleichzeitig mehrere Sonden an verschiedenen Standorten verwendet, um für die unterschiedlichen Abflussverhältnisse bei Nieder- und Hochwasser möglichst optimale Daten erheben zu können. Vor allem Radarsensoren, die den Wasserspiegel von oberhalb des Gerinnes berührungsfrei abtasten, haben sich bei Hochwasser sehr bewährt.

Pegelmessung bei Hochwasser

**Abb. 2.2 > Abflussmessung an der Simme bei Oberwil während des Hochwassers vom August 2005.**

*An der rot-weiss gestreiften Aufhängung wird ein Messflügel ins Wasser getaucht, der die Fließgeschwindigkeit misst.*



Die Qualität einer Abflussmessung hängt somit von zahlreichen Faktoren ab. Die Beschreibung in den Tab. 2.1–2.4 versucht dies so weit wie möglich zu berücksichtigen. Die Tabellen enthalten nach dem Stationsnamen in der Spalte «Bewertung» vergleichbare Angaben über die Genauigkeit der Hochwasserbestimmung 2005. Der Prozentwert gibt an, in welchem Verhältnis der grösste durch eine Wassermessung in den letzten Jahren erfasste Abfluss im Vergleich zum Spitzenwert 2005 liegt. Die zweite Angabe ist eine subjektive Beurteilung der Genauigkeit des Spitzenabflusswertes und der Ganglinie. Dabei spielen vor allem die Gerinnestabilität im Bereich der Station, die Genauigkeit der Wasserstandsmessung, die Genauigkeit der Abflussmessungen und die

Art und der Umfang der Extrapolation der Pegel-Abfluss-Kurve eine wesentliche Rolle. Die Liste ist weitgehend auf die Stationen beschränkt, bei welchen das Hochwasser vom August 2005 eine Jährlichkeit von mindestens 20 Jahren aufweist.

**Abb. 2.3** > Das Hochwasser vom August 2005 unmittelbar unterhalb der Messstation an der Kander bei Hondrich.



**Tab. 2.1 > Bewertung der Abflussmessungen an Stationen im Aaregebiet während des Hochwassers 2005.**

Abflussmessstation	Bewertung	Bemerkungen
Aare-Brienzwiler	25 %, gut	Zwischen Meiringen und der Messstation sind erhebliche Wassermengen über den linksseitigen Damm in die Ebene ausgeflossen. Die rekonstruierte Spitze für Meiringen beträgt ca. 520 m <sup>3</sup> /s. Wie viel des ausgetretenen Wassers direkt dem Brienersee zugeflossen ist, ist nicht bekannt. Das ausgetretene Wasser ist im ausgewiesenen Spitzenabfluss nicht enthalten.
Weisse Lütschine-Zweilütschinen	44 %, mässig	Wegen grossräumigem Stromausfall ist die Station zeitweise ausgefallen. Die Wasserstandsganglinie wurde anhand von Spuren und Ablesungen vor Ort ergänzt. Durch das Hochwasser gab es Sohlenaufandung von durchschnittlich 20 cm.
Lütschine-Gsteig	46 %, mässig	Die Station wurde geflutet und fiel wegen grossräumigem Stromausfall zeitweise aus. Der Messbereich wurde überschritten. Die Wasserstandsganglinie wurde nach Spuren und benachbarten Stationen ergänzt. Erhebliche Wassermengen sind oberhalb der Messstelle linksufrig ausgebrochen. Dieses Wasser ist im berechneten Abfluss enthalten. Durch das Ereignis kam es zu einer starken Sohlenaufandung von durchschnittlich 30 cm.
Aare-Ringgenberg, Goldswil	92 %, gut	Die Station war bis zum vermutlichen Maximalabfluss in Betrieb, wurde dabei geflutet und fiel anschliessend aus. Während des Hochwassers wurden Wassermessungen durchgeführt. Der Abfluss aus dem Brienersee fand auch ausserhalb des Gerinnes statt. Diesem Umstand wurde bei der Abflussbestimmung möglichst Rechnung getragen.
Kander-Hondrich	59 %, gut	Durch meterhohe Wellen im Bereich der Messschwellen war die Wasserstandsbestimmung erschwert. Es wurde deshalb zusätzlich der Wasserstand in der Anströmstrecke zur Messstation eingemessen. Unterhalb der Messstation kam es zu grossen Erosionen, die allerdings die Messungen kaum beeinträchtigten.
Simme-Oberwil	78 %, sehr gut	Abflussmessung während des Hochwassers.
Simme-Latterbach	31 %, mässig	Die Station wurde vom Hochwasser umflossen. Die Messschwelle wurde weitgehend zerstört und die Sohle im Bereich der Station um durchschnittlich 50 cm abgesenkt. Während des Hochwassers wurden Wassermessungen durchgeführt. Erhebliche Wassermengen sind oberhalb der Station ausgebrochen und ausserhalb des Gerinnes abgeflossen. Weil die Bestimmung dieses Anteils kaum möglich war, wurde der Spitzenabfluss auf Grund einer Bilanzrechnung mit ober- und unterliegenden Stationen rekonstruiert.
Aare-Thun	92 %, sehr gut	Abflussmessung während des Hochwassers.
Gürbe-Belp	115 %, sehr gut	
Aare-Bern	88 %, sehr gut	
Sarine-Fribourg	21 %, gut	Die Station wurde geflutet. Die Pegelstand/Abfluss-Kurve wurde auf Grund von Zusatzmessungen während des Hochwassers neu bestimmt (rund 20 % mehr Abfluss). Alte Hochwasserspitzen (noch) nicht korrigiert.
Saane-Laupen	30 %, gut	Abflussmessung während des Hochwassers. Bilanzrechnung mit oben- und untenliegenden Stationen.
Aare-Hagneck	55 %, gut	Abflussmessung während des Hochwassers.
Aare-Brügg, Aegerten	90 %, sehr gut	Abflussmessung während des Hochwassers.
Emme-Eggiwil	57 %, gut	
Ilfis-Langnau	34 %, gut	
Emme-Emmenmatt	42 %, gut	
Emme-Wiler	38 %, gut	
Luthern-Nebikon	26 %, sehr gut	Abflussmessung während des Hochwassers. Die Pegelstand/Abfluss-Kurve wurde auf Grund von Hochwassermessungen im Jahr 2005 mit einer sehr grossen Reduktion des Abflusses bei hohen Pegelständen neu angepasst. Alte Hochwasserspitzen müssen ev. nachträglich noch wesentlich korrigiert (reduziert) werden.
Wigger-Zofingen	34 %, sehr gut	
Sellenbodenbach-Neuenkirch	9 %, gut	Auf Grund des Gerinneausbaus im Bereich der Messstation können die Messungen als problemlos beurteilt werden.

Tab. 2.2 &gt; Bewertung der Abflussmessungen an Stationen im Reussgebiet während des Hochwassers 2005.

Abflussmessstation	Bewertung	Bemerkungen
Schächen-Bürglen	13 %, mässig	Grosse Wasserstandsschwankungen in der gepflästerten Schussrinne infolge von Schwallwellen, die durch Teilentleerungen des oberliegenden Geschiebesammlers zu Stande kamen. Grosser Geschiebetransport mit temporären Ablagerungen.
Reuss-Seedorf	52 %, sehr gut	
Grosstalbach-Isenthal	12 %, fraglich	Die Station ist teilweise ausgefallen. Der Messbereich wurde überschritten. Die Ganglinie wurde anhand von Spuren und Ablesungen rekonstruiert.
Schlichenden Brünnen-Muotathal	18 %, gut	Die Station wurde zerstört. Die Ganglinie konnte auf Grund einer Zweitmessung der Schweizerischen Gesellschaft Hölllochforschung rekonstruiert werden.
Muota-Ingenbohl	28 %, gut	
Engelberger Aa-Buochs	21 %, mässig	Die Messschwelle wurde bei diesem Extremabfluss teilweise eingestaut. Das bei den Soll-Entlastungsstellen ausgeleitete Wasser wurde mittels hydraulischer Berechnungen abgeschätzt und ist im Spitzenwert enthalten.
Sarner Aa-Sarnen	34 %, gut	Die Station ist wegen grossräumigem Stromausfall teilweise ausgefallen. Die Ganglinie wurde auf Grund eingemessener Spuren und dem vor Ort laufend kontrollierten Wasserstandsverlauf des Sarnersees ergänzt. Wahrscheinlich fand ein leichter Rückstau auf den Pegel durch die 100 m flussabwärts der Messstation liegende Brücke statt. Dieser Effekt wurde bei der Abflussbestimmung berücksichtigt.
Chli Schliere-Alpnach	7 %, fraglich	Die Station ist wegen Überschreiten des Messbereichs und Geschiebeablagerungen zeitweise ausgefallen. Meterhohe Wellen im Gerinne, hervorgerufen durch die regelmässigen kleinen Querschwellen, erschwerten die Bestimmung des für die Abflussbestimmung massgebenden Wasserstandes stark.
Reuss-Luzern, Geissmattbrücke	79 %, sehr gut	Abflussmessung während des Hochwassers. Der hohe Abfluss aus der Kleinen Emme verursachte einen temporären Rückstau der Reuss. Für die Abflussbestimmung wurde deshalb die Wasserstandsregistrierung in Geissmattbrücke mit Hilfe der Seeganglinie korrigiert und so der Rückstau effekt faktisch eliminiert.
Kleine Emme-Werthenstein	17 %, gut	Erhebliche Überflutungen und Erosionsschäden flussabwärts, die allerdings kaum Auswirkungen auf die Station hatten. Bilanzrechnung mit untenliegender Station und Abschätzungen zu den Seitenzuflüssen.
Kleine Emme-Littau	35 %, gut	Die Station wurde geflutet. Grosse Ausuferungen oberhalb und im Bereich der Messstation. Maximale Abflussmenge bei der Messstation mit Hilfe von Bilanzrechnungen und von 2-D Berechnungen auf rund 650 m <sup>3</sup> /s festgelegt; davon sind 600 m <sup>3</sup> /s direkt in die Reuss geflossen und vermutlich 50 m <sup>3</sup> /s im Bereich der Messstation seitlich weggeflossen und verzögert in die Reuss gelangt.
Reuss-Mühlau	88 %, sehr gut	Abflussmessung während des Hochwassers. Vermutlich leichter Rückstau durch die mit Schwemmh Holz verlegte Strassenbrücke 500 m flussabwärts (in der Abflussbestimmung berücksichtigt).
Lorze-Zug	13 %, gut	
Lorze-Frauenthal	62 %, gut	
Reuss-Mellingen	75 %, sehr gut	Abflussmessung während des Hochwassers. Das Stationsgebäude wurde massiv geflutet, die Messung konnte aber aufrechterhalten werden.

**Tab. 2.3 > Bewertung der Abflussmessungen an Stationen im Linth-/Limmatgebiet während des Hochwassers 2005**

Abflussmessstation	Bewertung	Bemerkungen
Seez-Mels	79 %, gut	Abflussmessung während des Hochwassers. Die Pegel-Abfluss-Kurve wurde stark nach oben korrigiert (ca. 30 % mehr Abfluss). Ältere Abflussmessungen (noch) nicht korrigiert.
Linth-Linthal	20 %, mässig	Die Station wurde beim Hochwasser teilweise zerstört und ist zeitweise ausgefallen. Rückstau auf den Pegel durch abgelagertes Geschiebe. Das genaue Ausmass ist nicht bekannt. Die Ganglinie wurde mit Hilfe der untenliegenden Station rekonstruiert.
Linth-Mollis	79 %, sehr gut	Während des Hochwassers fanden Wassermessungen statt. Die Pegelstand/Abfluss-Kurve wurde um 20 % nach oben (mehr Abfluss) korrigiert. Ältere Abflussmessungen (noch) nicht korrigiert.
Biber-Biberbrugg	34 %, gut	
Sihl-Zürich	20 %, gut	
Limmat-Zürich	80 %, sehr gut	Abflussmessung während des Hochwassers.
Limmat-Baden	79 %, sehr gut	

**Tab. 2.4 > Bewertung der Abflussmessungen an Stationen im Rheingebiet während des Hochwassers 2005**

Abflussmessstation	Bewertung	Bemerkungen
Albula-Tiefencastel	51 %, gut	
Plessur-Chur	40 %, mässig	Station versandet und zeitweise ausgefallen. Ganglinie mit Hilfe von Landwasser-Davos, Frauenkirch und eingemessenen Spuren rekonstruiert.
Taschinasbach-Grüsch	25 %, fraglich	Station teilweise zerstört und zeitweise ausgefallen. Grosse Geschiebeablagerungen, Schacht versandet. Ganglinie fast nicht rekonstruierbar.
Landquart-Felsenbach	58 %, fraglich	Wasserstandsauzeichnung stark gestört durch sehr hohe Fließgeschwindigkeit und Geschiebe. Sehr instabile Flusssohle. Bilanzrechnung mit oben- und untenliegenden Stationen.
Liechtensteiner Binnenkanal-Ruggell	22 %, sehr gut	
Rhein-Diepoldsau	40 %, gut	Pegelmessungen im Hauptgerinne und im Hochwasservorland funktionierten einwandfrei und erlaubten die Überlagerung der respektiven Abflussanteile. Die Abflusskurve wurde im Bereich, wo das Überströmen aus dem Hauptgerinne erfolgt, anhand einer Bilanzrechnung mit oben- und untenliegenden Stationen optimiert.
Sitter-St. Gallen	29 %, gut	
Thur-Jonschwil	19 %, mässig	
Thur-Halden	56 %, gut	
Thur-Andelfingen	80 %, mässig	Abflussmessung während des Hochwassers. Grosse Unsicherheit bei der Festlegung der Pegel-Abfluss-Kurve nach Gerinneausbaggerung vor 3 Jahren. Der Vergleich mit Halden suggeriert einen erheblichen «Wasserverlust» in der Zwischenstrecke, der aber zumindest teilweise auch auf einer Dämpfung der Hochwasserspitze beruht. Ältere Hochwasserspitzen seit 2002 müssen eventuell noch korrigiert werden.

## Übersicht über den Verlauf des Hochwassers

Nach einem insgesamt durchschnittlichen Sommeranfang war der Beginn des Monats August niederschlagsreich (Kap. 1). Ergiebige Niederschläge am 14. und 15. August führten vielerorts zu stark durchfeuchteten Böden. Die extremen Niederschläge vom 18.–23. August verursachten danach das hier beschriebene Hochwasserereignis.

Einen vollständigen Überblick über die registrierten Spitzenabflüsse vermittelt Tab. 2.6 am Ende dieses Kapitels. Exemplarisch sind in Abb. 2.4 und 2.5 die Abfluss- bzw. Wasserstandsganglinien einiger vom Hochwasser stark betroffener Messstationen dargestellt. Anhand dieser Abbildungen kann der zeitliche Verlauf des Hochwasserereignisses in den Einzugsgebieten der Reuss und der Aare bis zum Bielersee verfolgt werden. Beide Darstellungen verdeutlichen den grossen Einfluss der Seen auf das Hochwassergeschehen. Im Kap. 3 wird vertieft auf diesen Aspekt eingegangen. Insgesamt konzentrierte sich das Hochwassergeschehen auf den Zeitraum zwischen dem Abend des 21. und dem Morgen des 23. Augusts. Einzig die Ausflüsse von Briener- und Thunersee, Vierwaldstättersee sowie Walensee erreichten ihr Maximum erst im Verlauf des 23. und 24. Augusts.

Die erste bedeutende Hochwasserspitze wurde am Abend des 21. Augusts in der Kleinen Emme bei Werthenstein beobachtet (Tab. 2.6). In der folgenden Nacht und am Morgen des 22. Augusts konzentrierte sich das Hochwassergeschehen auf die Einzugsgebiete rund um den Napf sowie die Region Zugersee. Mit der zunehmenden Verlagerung der Niederschlagsaktivität von den Voralpen in Richtung Alpen und gegen Osten, verschob sich auch das Zentrum des Hochwassergeschehens. Im Unterlauf der Simme und der Kander trat die Spitze am Mittag des 22. Augusts auf, in der Lütchine und in der Aare bei Brienzwiler am Abend desselben Tages. In der Nacht und am Morgen des 23. Augusts wurden in den Fliessgewässern der Innerschweiz die höchsten Werte erreicht, so etwa in der Engelberger Aa, im Schächen, in der Muota und der Sarner Aa. Am Morgen des 23. Augusts trat auch in der Linth, oberhalb der Mündung in den Walensee, die Abflussspitze auf. In der Landquart bei Felsenbach wurde der höchste Wert ebenfalls an diesem Morgen beobachtet.

Oberläufe

Die grösseren Flüsse, insbesondere jene unterhalb der Alpenrandseen, reagierten naturgemäss verzögert. Infolge des hohen Zuflusses aus der Kleinen Emme wurde am Morgen des 22. Augusts in der Reuss bei Mühlau ein neues Abflussmaximum verzeichnet. Diese Hochwasserwelle traf am Nachmittag in Mellingen ein. In der Sarine bei Fribourg trat die Abflussspitze am Abend des 22. Augusts auf. Die Aare in Bern erreichte den höchsten Wert am frühen Morgen des 23. Augusts, als Folge des hohen Ausflusses aus dem Thunersee in Kombination mit den Hochwasserspitzen aus den seitlichen Zuflüssen im Zwischeneinzugsgebiet. Bei den weiter oben gelegenen Abflussmessstationen an der Aare wurden die Abflussspitzen dagegen erst am Abend des 23. Augusts in Ringgenberg bzw. in der Nacht zum 24. August in Thun beobachtet, praktisch zeitgleich mit dem Auftreten der höchsten Wasserstände im Briener- bzw. Thunersee. Auf Grund der Retentionswirkung der Seen verzeichneten auch die Linth unterhalb des Walensees und die Reuss in Luzern erst am Morgen des 24. Augusts den höchsten Wert.

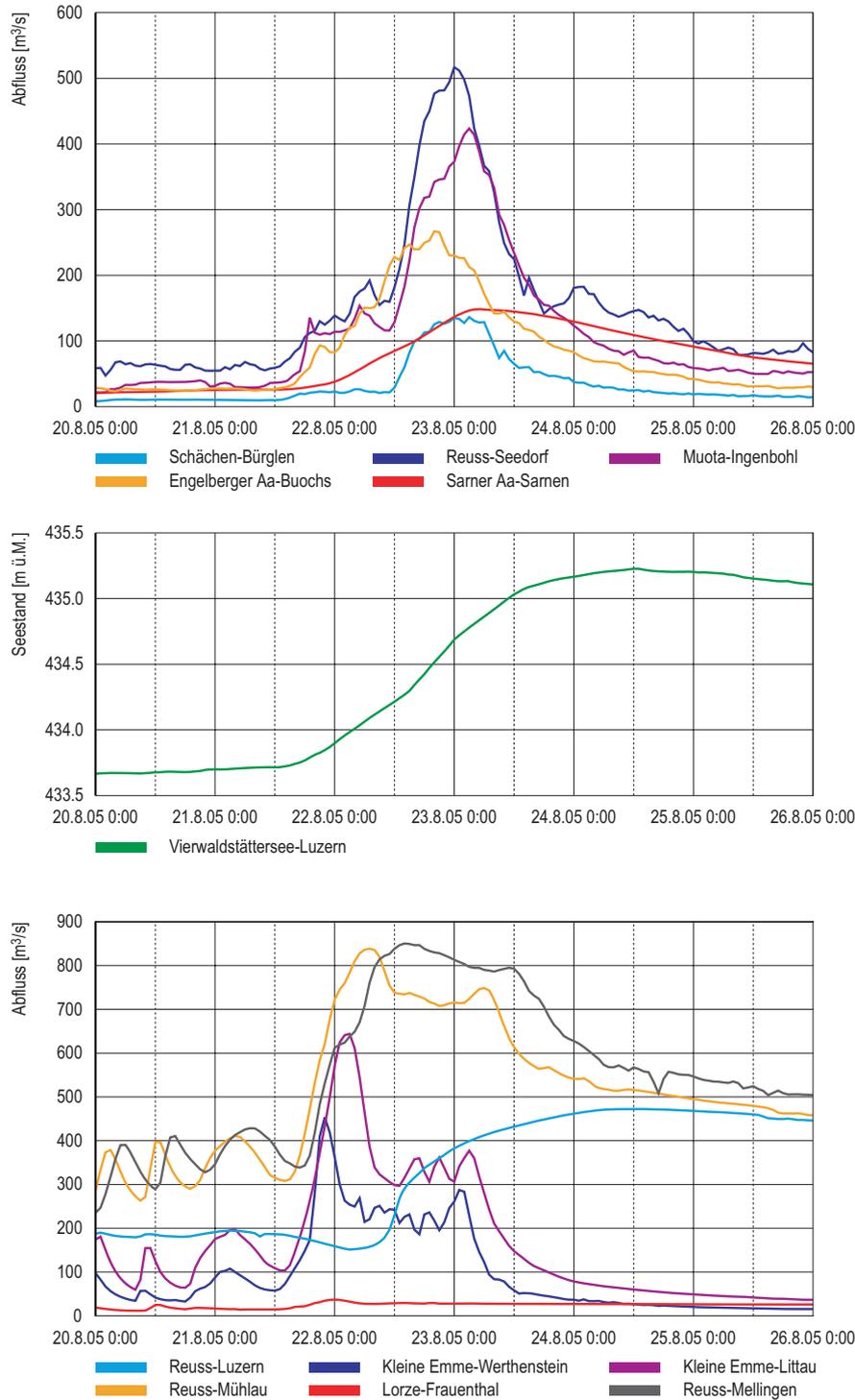
Mittel- und Unterläufe

**Abb. 2.4** >Abfluss und Seestand ausgewählter Stationen im Einzugsgebiet der Reuss; Stundenmittelwerte

Oben: im Einzugsgebiet der Reuss oberhalb des Vierwaldstättersees

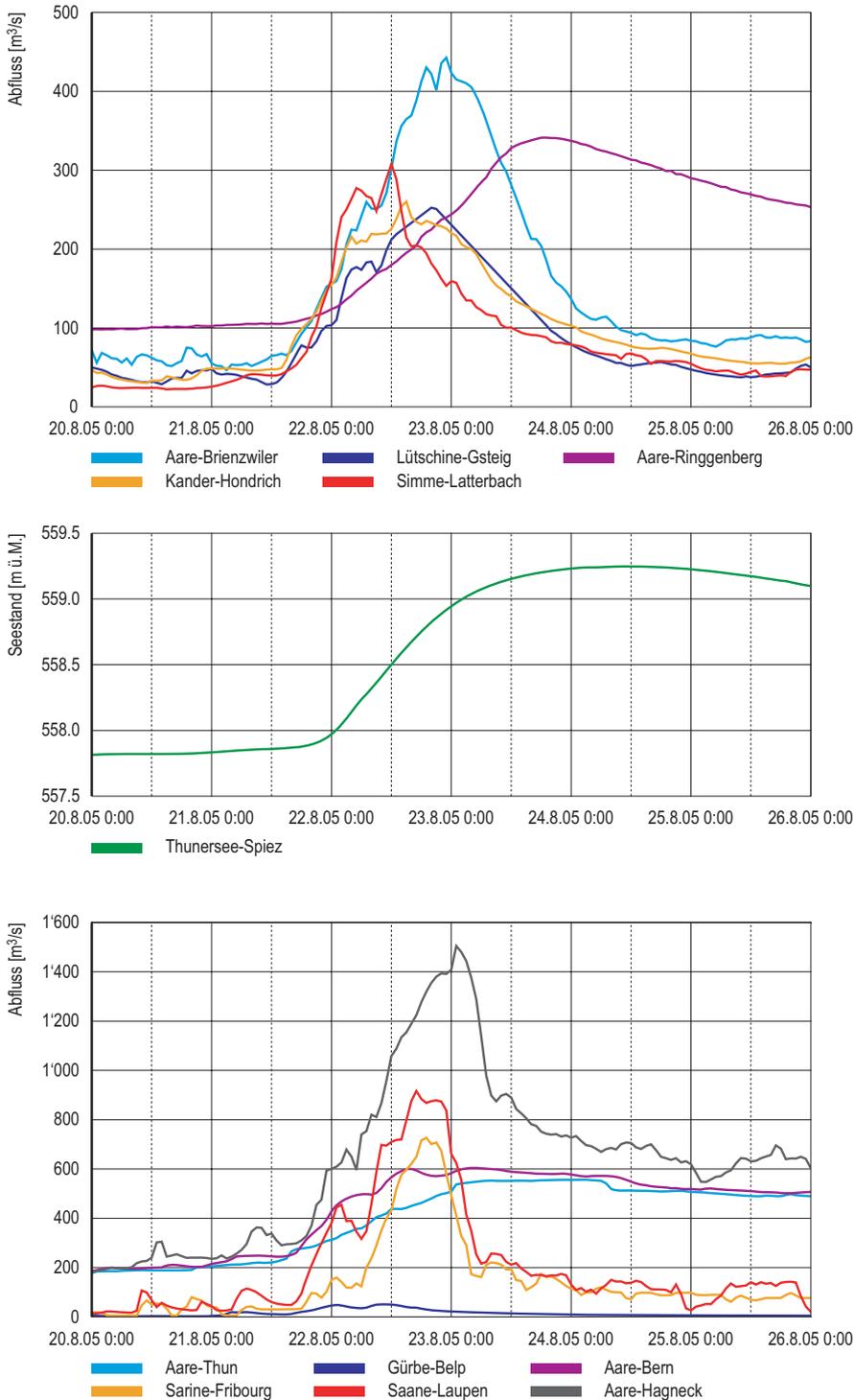
Mitte: Verlauf des Wasserstandes im Vierwaldstättersee

Unten: unterhalb des Vierwaldstättersees



**Abb. 2.5 > Abfluss und Seestand ausgewählter Stationen im Einzugsgebiet der Aare, Stundenmittelwerte**

*Oben: im Einzugsgebiet der Aare oberhalb des Thunersees  
Mitte: Verlauf des Wasserstandes im Thunersee  
Unten: unterhalb des Thunersees*



## 2.5 Statistische Einordnung des Ereignisses

### 2.5.1 Methodik

Eine systematische statistische Auswertung der Daten des Abflussmessnetzes hinsichtlich der Hochwasser erfolgte erstmals per 1984 für Messstationen mit über 30-jähriger Beobachtungsdauer (Spreafico, Stadler, 1986 und 1988) bzw. 1988 für kürzere Messreihen (Spreafico, Aschwanden, 1991a und 1991b). Nachrechnungen und Publikationen zu einzelnen Stationen erfolgten meist im Anschluss an grosse Hochwasser (Aschwanden, Schädler, 1988; LHG, 1994; BWG, 2000; Aschwanden, 2000). Im Zusammenhang mit den Auswertungen zum Hochwasserereignis 1999 wurde mit dem Aufbau einer Hochwasserstatistik-Datenbank begonnen. Unterdessen werden die Daten zur Hochwasserstatistik in dieser speziellen Datenbank verwaltet und alljährlich sowie zusätzlich bei Bedarf nachgeführt. Sie dient als Basis für die Berechnung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten, gibt aber unter anderem auch Auskunft über die Rangierung eines Hochwasserereignisses innerhalb der Zeitreihe einer Messstation.

Hochwasserstatistik-Datenbank

Die Abteilung Hydrologie des BAFU hält sich bei den Berechnungen an die «Empfehlungen zur Berechnung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten» (DVWK, 1979). Die Analyse basiert auf den jährlichen Hochwasserspitzen. Die verwendeten Maxima stimmen dabei nicht immer mit den Angaben in älteren Jahrbüchern überein, da in einigen Fällen nachträgliche Korrekturen vorgenommen wurden. Die Auswertung umfasst die deskriptive Statistik der Hochwassermessreihe mit allen notwendigen Kenngrößen für die Anpassung einer Verteilungsfunktion (je nach Parameterausprägung log-Pearson-III, Pearson-III oder Gamma) sowie die Berechnung der Hochwasserspitzenwerte für verschiedene Jährlichkeiten. Die Ausgabe der Resultate erfolgt in Form eines Resultatblatts, welches für Stationen mit einer Messreihe von mehr als 20 Jahren auf der Internetseite des BAFU publiziert wird.

Verfahren der Extremwertstatistik

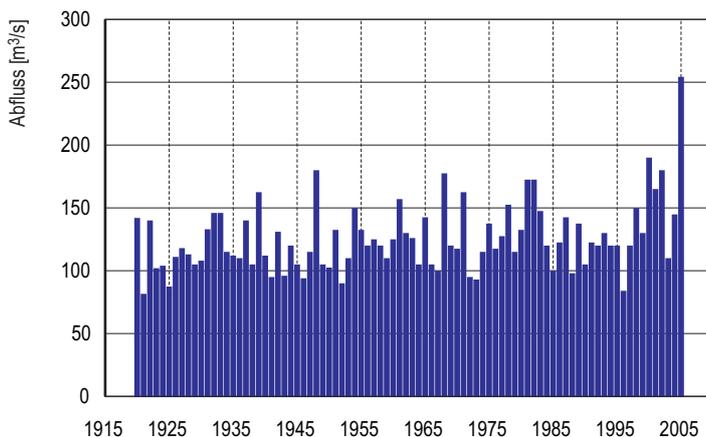
Auf spezifische Anfragen hin setzt die Abteilung Hydrologie auch neuere Verfahren der Extremwertstatistik ein (z.B. DVWK, 1999). Diese tragen der Erkenntnis Rechnung, dass es kein «richtiges» Berechnungsverfahren mit einer einzigen Lösung gibt, sondern ein Lösungsspektrum, aus welchem schliesslich ein gesuchter Bemessungswert festzulegen ist. Gegenüber dem DVWK-Verfahren von 1979, welches einen rezeptartigen Charakter aufweist, bedingt das neue Verfahren für die jährlich wiederkehrende Auswertung über das gesamte Messnetz einen wesentlich grösseren Aufwand, der für eine Überblicksbetrachtung des Ereignisses 2005 so nicht gerechtfertigt erscheint. Die Resultate der neueren Methoden unterscheiden sich zwar häufig von jenen des DVWK-Verfahrens 1979, erfahrungsgemäss liegen sie jedoch meistens innerhalb des Vertrauensbereichs des letzteren. Dem Aspekt der Unsicherheit wird insofern Rechnung getragen, indem das Vertrauensintervall im Frequenzdiagramm dargestellt wird und für Jährlichkeiten nur Bereiche angegeben werden.

Neben den oben erwähnten Überlegungen zum Aufwand spielt auch die Vergleichbarkeit mit bisherigen Arbeiten eine wichtige Rolle für die vorläufige Beibehaltung der DVWK-Methode 1979.

Die Hochwasserspitze des Jahres 2005 ist in vielen, insbesondere kürzeren Messreihen, ein statistischer Ausreisser. Die optimale Anpassung einer theoretischen Verteilungsfunktion an die empirische Verteilung der Jahresmaxima ist damit erschwert. Die Länge der Messreihe spielt ohnehin eine nicht zu vernachlässigende Rolle bei der Berechnung der Hochwasserstatistik. Methodenbedingt besteht eine Tendenz zur Unterschätzung der Jährlichkeit seltener Ereignisse in kurzen Reihen. Dies bestätigt sich, wenn anstelle der gesamten vorhandenen langen Messreihe an einer Station nur eine Teilreihe zur Berechnung beigezogen wird. So wird etwa das Hochwasser 2005 der Lutschine bei Gsteig als umso häufigeres Ereignis eingeschätzt, je kürzer die betrachtete Messperiode ist (Abb. 2.6 und Tab. 2.5).

Methodische Grenzen

Abb. 2.6 > Jahresmaxima der Abflussmessstation Lutschine-Gsteig (1920–2005).



Tab. 2.5 > Berechnete Jährlichkeit des Hochwassers 2005 bei unterschiedlicher Länge der Betrachtungsperiode.

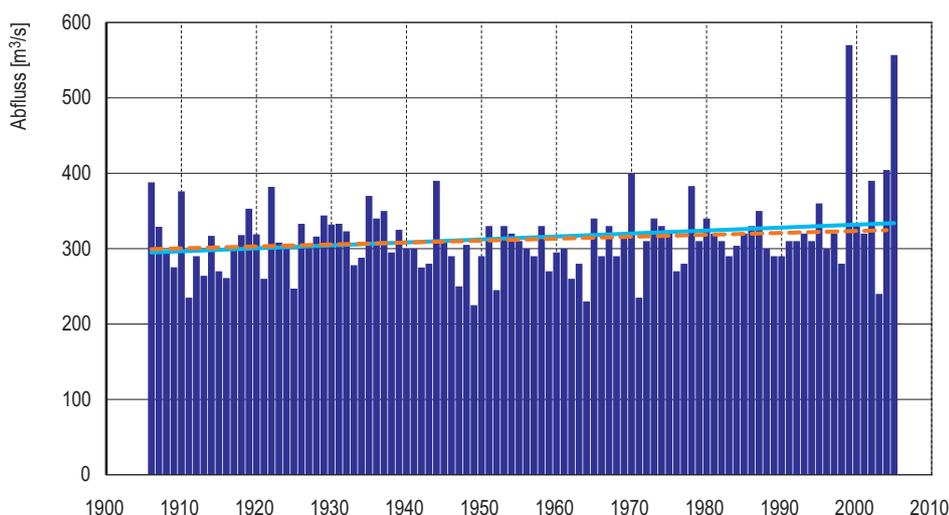
Betrachtete Periode	Jährlichkeit 2005
1920–2005	427
1930–2005	336
1940–2005	261
1950–2005	256
1960–2005	191
1970–2005	142
1980–2005	92
1990–2005	47

Allerdings spielt auch die zeitliche Verteilung der grossen Hochwasser eine Rolle. So verändert sich die geschätzte Jährlichkeit des Wertes von 2005 bei der Betrachtung der Periode von 1950–2005 gegenüber der längeren Periode von 1940–2005 nur geringfügig, weil die Hochwasserspitze von 1948 (180 m<sup>3</sup>/s, zusammen mit dem Spitzenabfluss von 2002 der dritthöchster Wert der Reihe ab 1920) aus der Statistik wegfällt. Das Beispiel zeigt die grosse Abhängigkeit der Extremwertstatistik von der vorhandenen Datengrundlage. In den Resultattabellen ist daher immer die Messperiode angegeben, die der extremwertstatistischen Auswertung zu Grunde liegt.

Grundsätzlich gilt: je länger die Messreihe, umso zuverlässiger die Schätzung der Auftretenswahrscheinlichkeit. Dazu muss jedoch eine Grundvoraussetzung der Extremwertstatistik erfüllt sein, nämlich die Stationarität der Reihe. Diese ist nur dann gegeben, wenn die Höhe des Jahresmaximums unabhängig vom Zeitpunkt des Auftretens ist. Die Reihe darf also weder einen Sprung noch einen Trend aufweisen. Im Falle eines statistisch signifikanten Sprungs wird die Reihe für die Hochwasserstatistik am betreffenden Zeitpunkt geteilt, sofern die Ursache klar definierbar ist (z.B. Stauseebau, Stationsverlegung). Dagegen werden Trends in den Daten nicht korrigiert, weil die Signifikanz von Trends stark von der betrachteten Periode abhängig ist. So wird etwa der Trend in der Jahresreihe der Maxima bei der Station Aare-Thun erst mit dem Wert 2005 statistisch signifikant (Abb. 2.7). Kleinere Jahresspitzen in den Folgejahren würden dazu führen, dass der Trend wieder nicht mehr signifikant wäre. Eine jeweilige Trendkorrektur könnte in den Resultaten der Hochwasserstatistik von Jahr zu Jahr zu grossen Sprüngen führen.

Stationäre Messreihen nötig

**Abb. 2.7** > Jahresmaxima der Abflussmessstation Aare-Thun (1906–2005) mit den Trendgeraden für die Perioden 1906–2004 (gestrichelt) sowie 1906–2005 (ausgezogen) für ein Signifikanzniveau von 5 %.



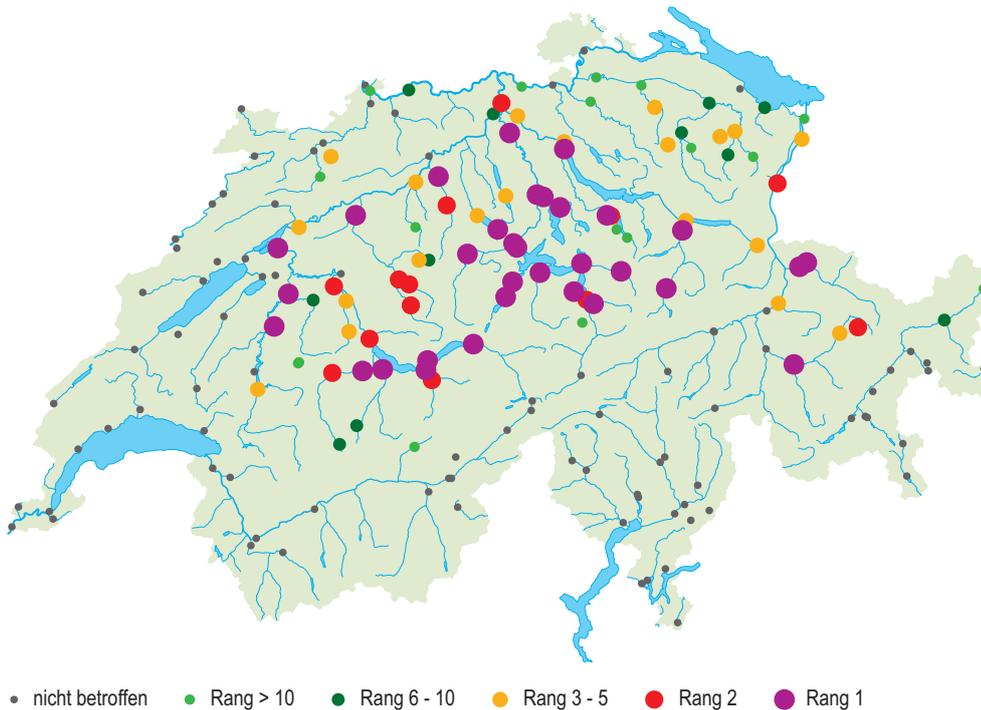
## 2.5.2 Resultate der statistischen Auswertungen

Beinahe die Hälfte der rund 200 eidgenössischen Abflussmessstationen war vom Hochwasser im August 2005 betroffen. Für diese Stationen wurde die Hochwasserstatistik-Datenbank mit den definitiven Abflussspitzen für das Ereignis nachgeführt. Tab. 2.6 enthält eine Zusammenstellung wichtiger Kennwerte. Es sind nur Stationen aufgeführt, deren Abflussmaximum im August 2005 einer Wiederkehrperiode von mindestens 2 Jahren entspricht.

Die flächenmässige Ausdehnung des Hochwassers 2005 war grösser als jene des Hochwasserereignisses 1999. Viele der damals betroffenen Regionen waren 2005 erneut betroffen. Zusätzlich traf es neue Gebiete an der Saane, in den Einzugsgebieten rund um den Napf und in Graubünden. Glimpflicher lief das Hochwasser diesmal im Jura und in Teilen der Ostschweiz ab.

Die betroffene Fläche war grösser als 1999

**Abb. 2.8** > Rang der Abflussspitzen während des Hochwassers vom August 2005 in der Reihe der Jahresmaxima bei allen aktuellen eidgenössischen Abflussmessstationen.



Kartengrundlage: Digitale Übersichtskarte der Schweiz (K606-01 © 2004 swisstopo)

Bei 32 Abflussmessstationen wurde zwischen dem 21. und 24.08.2005 ein neues absolutes Maximum beobachtet, wobei bei mehr als der Hälfte dieser Stationen die Messreihe länger als 50 Jahren ist. Wie Abb. 2.8 zeigt, waren insbesondere die Stationen in den Einzugsgebieten Aare und Reuss betroffen. Die bisherigen Höchstwerte wurden zum Teil massiv überschritten. Besonders extrem sind die Veränderungen an der Sarner Aa in Sarnen, sowie an der Engelberger Aa bei Buochs. So beträgt der neue

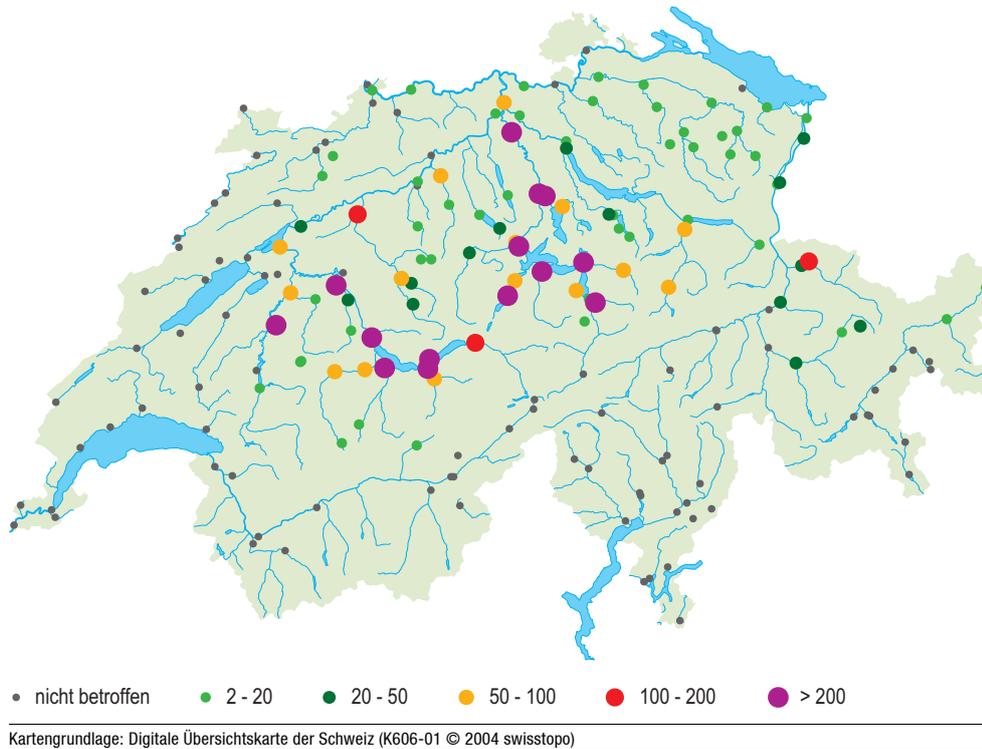
Viele Rekordwerte

Spitzenwert in Sarnen mit  $148 \text{ m}^3/\text{s}$  weit mehr als das Doppelte des bisherigen Wertes von  $61 \text{ m}^3/\text{s}$  und auch die Spitze der Engelberger Aa in Buochs übertrifft mit  $230 \text{ m}^3/\text{s}$  das bisherige Maximum um beinahe das Doppelte. Dabei handelt es sich in beiden Fällen um sehr lange Messreihen von 83 bzw. 90 Jahren.

Aussagekräftiger als der Rang des Spitzenabflusses ist die extremwertstatistische Auswertung. Abb. 2.9 zeigt für die vom Hochwasser 2005 betroffenen Stationen die berechneten Wiederkehrperioden. Bei dieser Darstellung ist, wie bei allen Vergleichen mehrerer Messstationen, zu beachten, dass die Länge der zur Verfügung stehenden Messreihen unterschiedlich ist (Abschnitt 2.5.1).

Statistische Einordnung

Abb. 2.9 > Wiederkehrperioden der Abflussspitzen (in Jahren) während des Hochwassers August 2005.

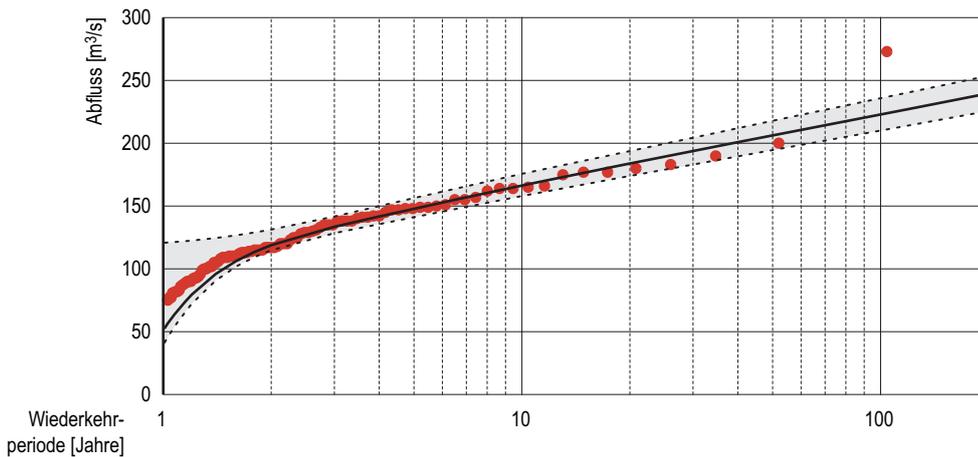


Die grössten Punkte in der Karte zeigen Abflussspitzen mit einer geschätzten Wiederkehrperiode von mehr als 200 Jahren. Auch bei dieser Auswertung konzentrieren sich die betroffenen Messstationen auf das Einzugsgebiet der Aare bis Bern und das Einzugsgebiet der Reuss. Besonders hohe Wiederkehrperioden wurden vor allem in kleineren Flüssen im Berner Oberland und der Zentralschweiz beobachtet. 1999 waren dagegen die hohen Wiederkehrperioden vor allem am Mittel- und Unterlauf der grossen Flüsse aufgetreten (BWG, 2000).

Das Frequenzdiagramm der Kander in Hondrich (Abb. 2.10) zeigt exemplarisch, als wie selten die Hochwasserspitze vom 22.08.2005 eingeschätzt wird. Die Abbildung verdeutlicht gleichzeitig das Problem, eine optimale Anpassung einer theoretischen

Verteilungsfunktion an die empirische Verteilung der Jahresmaxima zu finden, wenn die Reihe einen derartigen «Ausreisser» enthält.

**Abb. 2.10** > Frequenzdiagramm der Spitzenabflüsse an der Station Kander-Hondrich.



Rote Punkte: Jahresmaxima 1903–2005,  
schwarze Linie: theoretische Verteilungsfunktion (Log-Pearson III),  
grau hinterlegter Bereich: 80 %-Vertrauensintervall.

Der Abfluss der Aare blieb sowohl in Thun als auch in Bern unter dem Spitzenwert von 1999. Dennoch wird die Auftretenswahrscheinlichkeit als ausserordentlich selten eingeschätzt. Auffallend in diesen Einzugsgebieten ist die Häufung grosser Ereignisse in den letzten Jahren (Abb. 2.7). Bei beiden Stationen wurden die drei höchsten Jahresspitzen in den Jahren 1999, 2004 und 2005 beobachtet. Hinzu kommt ein weiterer überdurchschnittlich hoher Wert im Jahr 2002.

Bei vielen Abflussmessstationen in den Einzugsgebieten von Aare, Reuss und Limmat wurde zwischen dem 21. und 24.08.2005 eine ausserordentlich grosse Abflussspitze beobachtet. Besonders hohe Jährlichkeiten weisen einzelne Zuflüsse zu Briener- und Thunersee sowie Vierwaldstättersee auf. Aber auch für die Maxima der Aare bis zum Bielersee und der Reuss unterhalb des Vierwaldstättersees werden sehr geringe Auftretenswahrscheinlichkeiten berechnet.

Dank der Retentionswirkung der Jurarandseen traten bei den Messstationen an der Aare unterhalb des Bielersees kleinere Abflussspitzen als beim Hochwasser 1999 auf. Auch die Limmat und insbesondere das Einzugsgebiet des Rheins bis zur Mündung der Aare waren in wesentlich geringerem Ausmass vom Hochwasser betroffen. Die Abflussspitze im Rhein unterhalb des Zusammenflusses mit der Aare blieb schliesslich deutlich unter dem Wert vom Mai 1999, obwohl die Abflüsse in vielen Teileinzugsgebieten erheblich grösser waren.

**Gesamtbewertung und  
Einordnung**

**Tab. 2.6 > Übersicht der Abflussspitzen vom 21.–24. August (Zeitangaben in Winterzeit) und deren statistische Einordnung.**

*Die Qualität der Messungen beim Hochwasser vom August 2005 ist für die grau hinterlegten Stationen in den Tab. 2.1–2.4 erläutert.*

Stationsname	Periodenbeginn	Anzahl Jahre	Bisheriges Maximum [m³/s]	Datum	HQ <sub>2005</sub> [m³/s]	Datum	Zeit	Geschätzte Jährlichkeit	Rang
Aabach-Hitzkirch, Richensee <sup>1</sup>	1976	30	6	17.12.1981	5	23.08.2005	10:05	5–20	4
Aare-Bern, Schönau	1918	88	620	16.05.1999	605	23.08.2005	03:55	> 200	2
Aare-Brienzwiler	1905	101	370	31.07.1977	444	22.08.2005	22:35	100–200	1
Aare-Brugg	1916	90	1'250	12.05.1999	1'057	22.08.2005	16:45	5–20	10
Aare-Brügg, Ägerten	1905	101	761	20.05.1999	677	23.08.2005	12:25	20–50	4
Aare-Hagneck <sup>1</sup>	1984	22	1'040	14.05.1999	1'514	23.08.2005	00:30	50–100	1
Aare-Murgenthal	1916	90	1'020	12.03.1981	937	22.08.2005	15:15	5–20	3
Aare-Ringgenberg, Goldswil	1926	80	273	15.05.1999	344	23.08.2005	18:10	> 200	1
Aare-Thun	1906	100	570	15.05.1999	557	24.08.2005	02:05	> 200	2
Aare-Untersiggenthal, Stilli	1935	71	2'620	12.05.1999	2'337	22.08.2005	17:05	50–100	2
Albula-Tiefencastel	1921	85	120	06.08.1985	123	23.08.2005	08:55	20–50	1
Allenbach-Adelboden	1950	56	75	07.08.1977	33	22.08.2005	11:07	5–20	10
Alp-Einsiedeln <sup>1</sup>	1992	14	110	12.05.1999	109	23.08.2005	00:17	5–20	2
Alpbach-Erstfeld, Bodenberg	1960	46	72	31.07.1977	28	22.08.2005	18:50	5–20	11
Biber-Biberbrugg <sup>1</sup>	1990	16	35	03.06.2004	38	22.08.2005	00:47	20–50	1
Birse-Moutier, La Charrue	1912	94	65	26.09.1987	33	22.08.2005	10:05	2–5	46
Chli Schliere-Alpnach <sup>1</sup>	1979	27	59	15.08.1982	89	22.08.2005	00:57	50–100	1
Dischmabach-Davos, Kriegsmatte	1964	42	19	18.07.1975	18	23.08.2005	03:38	20–50	2
Emme-Eggiwil, Heidbüel	1975	31	245	12.06.1997	179	22.08.2005	19:52	20–50	2
Emme-Emmenmatt	1918	88	510	12.06.1997	490	22.08.2005	01:07	50–100	2
Emme-Wiler, Limpachmündung	1922	84	530	22.09.1968	583	22.08.2005	02:42	100–200	1
Engelberger Aa-Buochs, Flugplatz	1916	90	125	19.06.1960	230	22.08.2005	20:32	> 200	1
Glatt-Herisau, Zellersmühle	1961	44	120	17.07.2004	64	21.08.2005	17:30	5–20	4
Goldach-Goldach	1963	43	155	13.08.2002	53	21.08.2005	17:50	2–5	9
Grossbach-Gross, Säge	1972	34	60	25.07.1984	12	22.08.2005	11:55	2–5	20
Grosstalbach-Isenthal	1957	49	46	31.07.1977	65	22.08.2005	19:13	50–100	1
Gürbe-Belp, Mülimatt	1923	83	59	15.07.1938	52	22.08.2005	11:25	20–50	3
Gürbe-Burgstein, Pfandersmatt <sup>1</sup>	1982	24	93	29.07.1990	41	22.08.2005	07:15	5–20	3
Ilfis-Langnau <sup>1</sup>	1990	16	340	16.07.2002	335	21.08.2005	22:22	20–50	2
Inn-Martinsbruck	1904	102	580	17.09.1960	320	23.08.2005	09:02	2–5	35
Inn-Tarasp/Schuls (Scuol)	1970	36	445	19.07.1987	228	23.08.2005	07:42	2–5	10
Kander-Hondrich	1903	103	200	12.05.1999	273	22.08.2005	13:05	> 200	1
Kleine Emme-Littau, Reussbühl <sup>1</sup>	1978	28	570	16.07.2002	650	22.08.2005	02:29	50–100	1
Kleine Emme-Werthenstein, Chappelb. <sup>1</sup>	1985	21	400	16.07.2002	470	21.08.2005	20:58	20–50	1
Landquart-Felsenbach	1921	85	375	18.07.1975	391	23.08.2005	04:45	50–100	1
Landwasser-Davos, Frauenkirch	1967	39	53	18.07.1975	43	23.08.2005	03:21	5–20	5
Langeten-Huttwil, Häberenbad	1966	40	55	11.07.1978	20	21.08.2005	21:35	2–5	14
Liechtensteiner Binnenkanal-Ruggell	1975	31	59	06.08.2000	53	23.08.2005	01:45	20–50	2

Stationsname	Perioden- beginn	Anzahl Jahre	Bisheriges Maximum [m³/s]	Datum	HQ <sub>2005</sub> [m³/s]	Datum	Zeit	Geschätzte Jährlichkeit	Rang
Limmat-Baden, Limmatpromenade	1951	55	660	22.05.1999	510	22.08.2005	22:35	5–20	4
Limmat-Zürich, Unterhard	1938	68	590	22.05.1999	472	22.08.2005	19:55	20–50	3
Linth-Linthal, Ausgleichsbecken KLL	1967	39	157	23.09.1981	173	23.08.2005	04:26	50–100	1
Linth-Weesen, Biäsche	1907	99	338	16.06.1910	245	24.08.2005	09:05	5–20	4
Linth-Mollis, Linthbrücke	1914	92	400	22.08.1954	402	23.08.2005	04:05	50–100	1
Lonza-Blatten	1956	50	81	20.08.1971	34	22.08.2005	14:55	2–5	31
Lorze-Frauenthal	1914	92	35	21.05.1999	37	21.08.2005	23:55	> 200	1
Lorze-Zug, Letzi <sup>1</sup>	1983	23	64	03.06.2004	119	21.08.2005	23:55	50–100	1
Luthern-Nebikon <sup>1</sup>	1988	18	76	16.07.2002	54	22.08.2005	08:25	5–20	2
Lütschine-Gsteig	1920	86	190	15.10.2000	254	22.08.2005	20:00	> 200	1
Minster-Euthal, Rüti	1961	45	205	31.07.1977	104	23.08.2005	00:15	2–5	14
Muota-Ingenbohl	1923	83	315	31.07.1977	433	23.08.2005	02:25	> 200	1
Murg-Frauenfeld	1960	44	153	22.09.1968	74	22.08.2005	10:45	2–5	17
Murg-Wängi	1954	52	61	12.05.1999	40	22.08.2005	07:55	5–20	4
Necker-Mogelsberg, Aachsäge	1972	34	325	08.08.1978	104	22.08.2005	20:45	2–5	15
Plessur-Chur	1931	75	90	26.06.1953	83	23.08.2005	02:15	20–50	3
Rappengraben-Wasen, Riedbad	1958	48	2.3	13.06.2000	1.45	21.08.2005	20:32	5–20	6
Reuss-Luzern, Geissmattbrücke	1922	84	430	23.05.1999	473	24.08.2005	08:35	> 200	1
Reuss-Mellingen	1910	96	760	14.05.1999	854	22.08.2005	14:05	> 200	1
Reuss-Mühlau, Hünenberg	1906	100	720	14.05.1999	839	22.08.2005	06:25	> 200	1
Reuss-Seedorf	1961	45	735	25.08.1987	532	22.08.2005	23:57	20–50	2
Rhein-Basel	1891	115	5'090	12.05.1999	3'433	23.08.2005	10:45	5–20	15
Rhein-Diepoldsau, Rietbrücke	1919	87	2'665	19.07.1987	2'264	23.08.2005	04:45	20–50	4
Rhein-Rekingen	1904	102	2'250	16.06.1910	1'249	23.08.2005	07:35	2–5	36
Rhein-Rheinfelden	1933	73	4'550	12.05.1999	3'464	23.08.2005	10:05	5–20	9
Rheint. Binnenkanal-St. Margrethen	1919	87	140	22.05.1999	105	22.08.2005	18:32	5–20	11
Rietholzbach-Mosnang, Rietholz <sup>1</sup>	1976	30	12.04	06.07.1994	8.58	22.08.2005	06:05	5–20	3
Rotenbach-Plaffeien, Schweinsberg	1962	44	16.1	11.08.1997	4.48	21.08.2005	23:03	2–5	21
Saane-Laupen	1949	57	925	17.11.1950	925	22.08.2005	16:17	50–100	1
Sarine-Broc, Château d'en bas	1972	34	400	29.06.1974	326	22.08.2005	12:05	5–20	3
Sarine-Fribourg	1948	58	725	24.11.1944	750	22.08.2005	17:55	> 200	1
Sarner Aa-Sarnen	1923	83	61	14.05.1999	148	23.08.2005	03:30	> 200	1
Schächen-Bürglen	1967	39	105	31.07.1977	165	22.08.2005	23:57	> 200	1
Scheulte-Vicques <sup>1</sup>	1992	14	66	12.05.1999	48	22.08.2005	00:05	2–5	5
Schlichenden Brünnen-Muotathal <sup>1</sup>	1989	17	15.4	12.08.2002	22	23.08.2005	09:19	50–100	1
Schwändlibach-Plaffeien, Schweinsb.	1962	44	6.65	04.07.1985	3.67	21.08.2005	22:25	2–5	18
Seez-Mels	1966	40	76	01.06.1987	62	23.08.2005	03:55	5–20	3
Sellenbodenbach-Neuenkirch <sup>1</sup>	1991	15	17.6	07.06.2002	38	21.08.2005	22:45	20–50	1
Sense-Thörishaus, Sensematt	1928	78	495	29.07.1990	246	22.08.2005	00:27	5–20	6
Sihl-Zürich, Sihlhölzli	1938	68	340	09.09.1934	280	22.08.2005	21:25	20–50	1
Simme-Latterbach <sup>1</sup>	1986	20	225	12.05.1999	315	22.08.2005	11:50	50–100	1

Stationsname	Periodenbeginn	Anzahl Jahre	Bisheriges Maximum [m³/s]	Datum	HQ <sub>2005</sub> [m³/s]	Datum	Zeit	Geschätzte Jährlichkeit	Rang
Simme-Oberried/Lenk	1949	57	35	24.07.1982	23	22.08.2005	12:05	5–20	7
Simme-Oberwil	1921	85	200	23.11.1944	167	22.08.2005	11:52	50–100	2
Sitter-Appenzell	1912	94	195	12.08.1941	82	22.08.2005	17:05	2–5	35
Sitter-St.Gallen, Bruggen/Au <sup>1</sup>	1981	25	590	01.09.2002	360	22.08.2005	17:55	5–20	5
Sperbelgraben-Wasen, Kurzeneialp	1958	29	1.55	13.06.2000	1.08	22.08.2005	06:50	5–20	4
Suhre-Oberkirch <sup>1</sup>	1976	30	4.5	18.05.1999	4	23.08.2005	05:45	5–20	3
Taschinasbach-Grüsch, Wasserf. Lietha	1972	34	84	06.08.2000	122	23.08.2005	00:37	100–200	1
Thur-Andelfingen	1904	102	1'130	13.05.1999	720	23.08.2005	07:05	5–20	16
Thur-Halden	1965	41	1'170	08.08.1978	795	22.08.2005	23:35	2–5	6
Thur-Jonschwil, Mühlu	1966	40	565	31.07.1977	490	22.08.2005	22:37	5–20	6
Töss-Neftenbach	1921	85	270	26.06.1953	114	21.08.2005	21:25	2–5	42
Urnäsch-Hundwil, Äschentobel	1962	44	120	24.07.1984	89	22.08.2005	17:00	5–20	10
Weisse Lütschine-Zweilütschinen	1933	73	110	12.08.1933	109	22.08.2005	19:30	50–100	2
Werdenberger Binnenkanal-Salez	1931	75	115	06.08.2000	84	22.08.2005	21:34	5–20	16
Wigger-Zofingen <sup>1</sup>	1980	26	125	25.12.1995	158	22.08.2005	10:17	50–100	1

<sup>1</sup> Messreihen ≤ 30 Jahre.

## 2.6 Gebietsbilanzen

In diesem Abschnitt werden die regionalen Variationen der Gebietsbilanzen mit Hilfe von Karten dargestellt und die Entwicklung der Abflusskoeffizienten entlang der Flüsse im Einzugsgebiet der Aare bis zur Abflussmessstation Untersiggenthal aufgezeigt. Zudem können durch das Vergleichen und Interpretieren der Gebietsniederschläge, der Spitzenabflüsse, der Abflussvolumina und der Volumenabflusskoeffizienten der vom Hochwasser 2005 betroffenen Gebiete die erhobenen Abfluss- und Niederschlagsdaten plausibilisiert werden.

### 2.6.1 Methodik

Die Berechnungen der Gebietsniederschläge basieren auf den stündlichen Niederschlagsdaten der MeteoSchweiz. Die Gebietsniederschläge wurden mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems aus den Daten berechnet, welche in einem Gitter von 1 km Maschenweite vorhanden waren. Allen Berechnungen wurde die Periode vom **18.08.2005 12:00 Uhr – 23.08.2005 12:00 Uhr** zugrunde gelegt.

Niederschlagsdaten

Die Berechnungen der Abflussvolumina basierten auf stündlichen Daten der Landeshydrologie. Dabei wird unter dem Abflussvolumen das Gesamtabflussvolumen verstanden, d.h. die Summe des an den Stationen gemessenen Abflusses und des Rückhalts in den Seen oberhalb der jeweiligen Station. Allen Berechnungen wurde die Periode vom **19.08.2005 12:00 Uhr – 24.08.2005 12:00 Uhr** zugrunde gelegt, wodurch die Periode gegenüber den Niederschlagsberechnungen um einen Tag verschoben ist.

Abflussdaten

Die betrachtete Periode ist somit aber gleich lang wie jene der Niederschlagsberechnungen. Ausserdem waren die meisten Ganglinien am 24.08.2005 12:00 Uhr wieder auf einem ähnlichen Niveau wie vor dem Hochwasserereignis.

Der Rückhalt wurde für jene Seen bestimmt, welche Pegelmessungen aufweisen (Brienzersee, Thunersee, Neuenburgersee, Bielersee, Murtensee, Sempachersee, Hallwilersee, Baldeggersee, Sarnersee, Lauerzersee, Vierwaldstättersee, Zugersee, Ägerisee, Walensee und Zürichsee). Das in den Seen zurückgehaltene Wasservolumen wurde über die Pegeländerung und die Seefläche abgeschätzt. Dabei wurde die Seefläche als konstant angenommen, da über die Änderung der Seeflächen bei einem Anstieg der Pegel keine Informationen vorliegen. Zusätzlich zum Rückhalt in den natürlichen Seen wurden auch die zwei grössten Speicherseen der Kraftwerke Oberhasli (Speicherseen Grimsel und Oberaar) berücksichtigt.

Rückhalt in Seen

Für die Gebietsniederschläge, die Abflussvolumina und die Volumenabflusskoeffizienten wurden die Werte der Zwischeneinzugsgebiete (auch Teilgebiete bzw. Teileinzugsgebiete genannt) aus den Werten der obenliegenden Einzugsgebiete und dem Wert des gesamten Einzugsgebietes berechnet. Die spezifischen Abflussspitzen beziehen sich auf das ganze Einzugsgebiet.

Die Berechnung der Volumenabflusskoeffizienten basiert auf den Werten der Niederschlags- und Abflussvolumina für die oben beschriebenen Zeitabschnitte. Der Volumenabflusskoeffizient entspricht dem Quotienten aus Abflussvolumen und Niederschlagsvolumen.

Volumenabflusskoeffizient

Genauere Angaben zur Methodik sowie sämtliche berechneten Werte können Diezig (2006) entnommen werden.

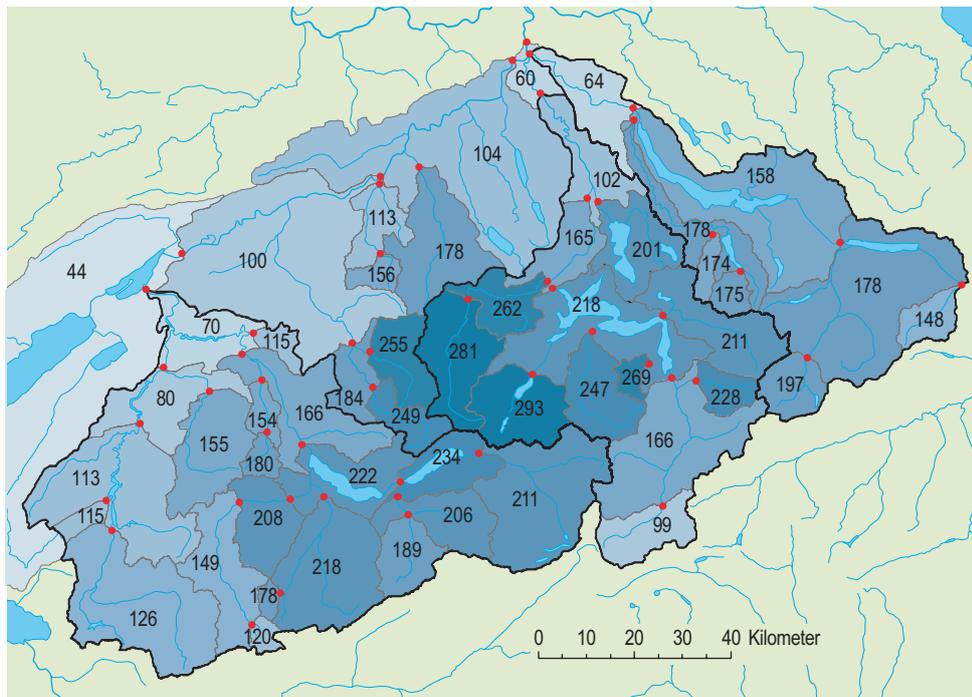
## 2.6.2 Gebietsniederschläge

Die Karte in Abb. 2.11 zeigt die berechneten 5-Tages-Gebietsniederschläge für alle Teileinzugsgebiete bis zur Messstation Untersiggenthal.

Die höchsten Gebietsniederschläge traten in den Oberläufen der Flüsse Sarner Aa, Ilfis, Emme und Kleine Emme auf. Die 5-Tages-Gebietsniederschläge bewegten sich in den betreffenden Teileinzugsgebieten zwischen 250 und 300 mm. Ausserhalb dieses Raumes wies nur das Einzugsgebiet des Grosstalbachs bis Isenthal mit 269 mm einen ähnlich hohen Gebietsniederschlag auf. In den meisten Teileinzugsgebieten des Berner Oberlandes sowie in den mittleren Regionen des Reuseinzugsgebietes zwischen Seedorf und Frauenthal bewegten sich die Gebietsniederschläge zwischen 200 und 250 mm und sind somit nicht mehr ganz so hoch wie in den am stärksten betroffenen Gebieten.

**Abb. 2.11 > Gebietsniederschläge [mm] vom 18.08.2005 12:00 Uhr – 23.08.2005 12:00 Uhr.**

*Die Zahlen beziehen sich jeweils auf das Teileinzugsgebiet.*



Kartengrundlage: Digitale Übersichtskarte der Schweiz (K606-01 © 2004 swisstopo)

Auffallend ist, dass in den hochgelegenen, südlichsten Teilen der Einzugsgebiete von Aare, Reuss und Limmat die Gebietsniederschläge kleiner waren als nördlich davon. Auch die im Westen gelegenen und die tiefer gelegenen Teile des Einzugsgebietes der Aare bis zum Hagneckkanal wiesen deutlich kleinere Niederschlagswerte auf. Ebenfalls niedrigere Gebietsniederschläge traten im Einzugsgebiet der Limmat auf (Werte zwischen 150 und 200 mm). Entlang des Unterlaufs von Aare, Reuss und Limmat sowie im Einzugsgebiet rund um die Jurarandseen waren die niedrigsten Gebietsniederschläge zu verzeichnen.

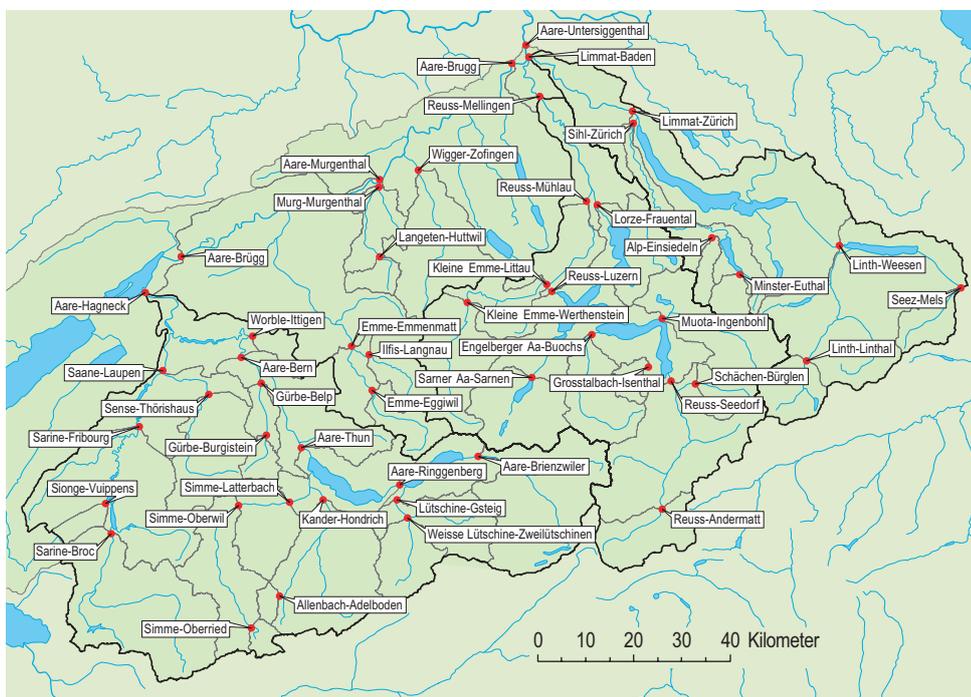
Die relativ geringen Gebietsniederschläge in den oben angesprochenen Regionen lassen sich gut mit der Niederschlagsverteilung während des Unwetters erklären (Kap. 1). Diese Regionen waren weniger stark von den intensiven Regenfällen betroffen.

Gemäss MeteoSchweiz (2006) lag die Schneefallgrenze während des Unwetters im August 2005 meist auf über 3000 m ü. M. Die in Abb. 2.11 dargestellten Gebietsniederschläge sind somit fast ausschliesslich in Form von Regen gefallen.

### 2.6.3 Spitzenabflüsse und spezifische Spitzenabflüsse

Tab. 2.6 gibt einen Überblick über die Abflussspitzen vom 21.–24. August. Abb. 2.12 zeigt zusätzlich die räumliche Verteilung der in diesem Kapitel betrachteten Messstationen und Abb. 2.13 stellt die spezifischen Spitzenabflüsse der betrachteten Einzugsgebiete dar.

**Abb. 2.12** > Betrachtete Abflussmessstationen mit den entsprechenden Einzugsgebieten.



Kartengrundlage: Digitale Übersichtskarte der Schweiz (K606-01 © 2004 swisstopo)

Für eine genaue Interpretation der Spitzenabflüsse müsste die räumliche und zeitliche Verteilung der Niederschläge innerhalb der Teilgebiete analysiert werden. Ein Grossteil der Resultate lässt sich aber bereits mit Hilfe der Gebietsniederschläge (Abb. 2.11) erklären. Viele Gebiete mit extrem hohen Gebietsniederschlägen zeigen sehr hohe spezifische Spitzenabflüsse: Beispielsweise die Einzugsgebiete an den Oberläufen der Flüsse Emme, Kleine Emme und Ilfis mit Werten zwischen 1.4 und 1.8 m<sup>3</sup>/s·km<sup>2</sup> oder das Einzugsgebiet Grosstalbach-Isenthal mit einem spezifischen Spitzenabfluss von 1.49 m<sup>3</sup>/s km<sup>2</sup>. Die generell kleineren spezifischen Spitzenabflüsse in den östlichsten und westlichsten Teilen des betrachteten Raumes können sehr gut durch die kleinen Gebietsniederschläge in diesen Regionen erklärt werden. Auch die kleinen spezifischen Spitzenabflüsse in den hoch gelegenen Gebieten entlang der Alpen lassen sich zum grossen Teil dadurch erklären, dass die Gebietsniederschläge in diesen Regionen nicht so stark ausgefallen sind wie beispielsweise in der Innerschweiz.

**Einfluss des Niederschlags auf spezifische Spitzenabflüsse**

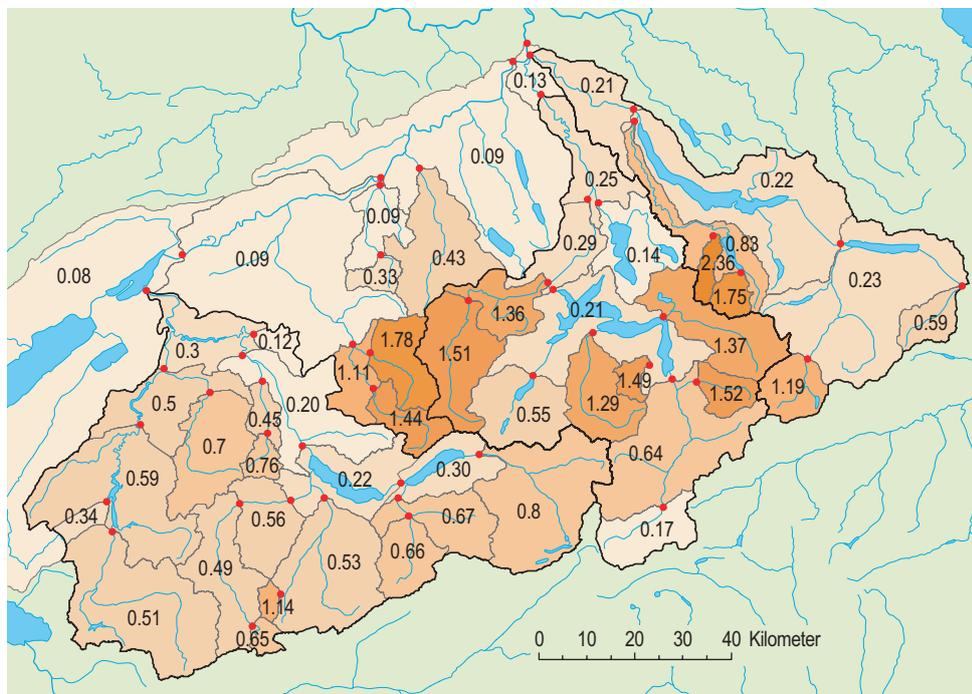
Da diese Gebiete teilweise über 3000 m ü. M. reichen, können zudem Teile des Niederschlags auch als Schnee gefallen und somit nicht zum Abfluss gekommen sein.

Neben den Gebietsniederschlägen haben aber auch die Seen einen grossen Einfluss auf die Spitzenabflüsse und die spezifischen Spitzenabflüsse. Da während des Ereignisses grosse Wassermengen in den Seen zurückgehalten wurden, wurden die Spitzenabflüsse teilweise beträchtlich reduziert. Dadurch ist der geringere Spitzenabfluss der Station Ringgenberg im Vergleich mit der Station Brienzwiler erklärbar. Die kleinen spezifischen Spitzenabflüsse der tiefer gelegenen Gebiete entlang der Aare zwischen Brienzwiler und Hagneck und der tiefer gelegenen Gebiete der Reuss und der Limmat sind auf den Rückhalt in den grossen Alpenrandseen zurückzuführen. Der vergleichsweise niedrige spezifische Spitzenabfluss an der Sarner Aa dürfte im Wesentlichen auf den Rückhalt im Sarner- und Lungernsee zurückzuführen sein. Die sehr kleinen Werte der spezifischen Spitzenabflüsse in den grossen Teileinzugsgebieten der Aare entlang des Jurarandes können teilweise auch damit erklärt werden, dass grosse Gebiete generell kleinere spezifische Spitzenabflüsse aufweisen als kleine Einzugsgebiete.

**Einfluss der Seen auf die spezifischen Spitzenabflüsse**

**Abb. 2.13 > Spezifische Spitzenabflüsse [ $\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{km}^2$ ] während des Hochwassers im August 2005.**

Die Zahlen beziehen sich jeweils auf das ganze Einzugsgebiet, inkl. aller obenliegenden Einzugsgebiete.



Kartengrundlage: Digitale Übersichtskarte der Schweiz (K606-01 © 2004 swisstopo)

Einige Werte lassen sich mit den oben beschriebenen Faktoren aber nicht oder nur ungenügend erklären, weshalb noch weitere Einflussgrößen vorhanden sein müssen. So kann z.B. der im Vergleich zum Gebietsniederschlag hohe spezifische Spitzenabfluss für das Gebiet Allenbach-Adelboden ( $1.14 \text{ m}^3/\text{s km}^2$ ) einerseits mit der kleinen Gebietsfläche begründet werden. Andererseits ist jedoch bekannt, dass dieses Gebiet vor allem auf kurze intensive Regenfälle stark reagiert und weniger auf Dauerregenereignisse (Naef et al., 1999). Allerdings sind auch während des mehrtägigen Niederschlagsereignisses im August 2005 Perioden mit sehr hohen Niederschlagsintensitäten aufgetreten, welche zu dem hohen spezifischen Spitzenabfluss in diesem Gebiet geführt haben könnten.

Andere Einflussfaktoren

Weitere Teilgebiete weisen auffallende Werte auf: Der oberste Teil des Einzugsgebiets der Gürbe bis Burgistein zeigt einen recht hohen spezifischen Spitzenabfluss ( $0.76 \text{ m}^3/\text{s km}^2$ ), während der untere Teil bis Belp einen viel kleineren Wert aufweist ( $0.45 \text{ m}^3/\text{s km}^2$ ). Für das Einzugsgebiet Langeten-Huttwil resultiert ein spezifischer Spitzenabfluss von  $0.33 \text{ m}^3/\text{s km}^2$ , während für das anschliessende Teileinzugsgebiet Murg-Murgenthal nur noch ein Wert von  $0.09 \text{ m}^3/\text{s km}^2$  resultiert. Der im Vergleich zum oberen Teileinzugsgebiet bis Burgistein kleine spezifische Spitzenabfluss der Gürbe im unteren Teilgebiet bis Belp kann damit erklärt werden, dass im flachen Teil zwischen Burgistein und Belp während Hochwasserereignissen eine grosse Retention stattfindet und somit eine wesentliche Dämpfung von Hochwasserspitzen möglich ist (Naef und Thoma, 2002). Während des Hochwasserereignisses im August 2005 ist es beispielsweise im Gebiet der Gemeinde Toffen zu Ausuferungen gekommen. Auch das flache Teilgebiet zwischen Huttwil und Murgenthal ist dafür bekannt, dass Retention auch bei lang andauernden Ereignissen zu einer wesentlichen Dämpfung der Hochwasserspitzen führt (Naef und Thoma, 2002). Der relativ geringe Gebietsniederschlag (113 mm) spielt hier aber sicher auch eine Rolle.

Die grossen spezifischen Spitzenabflüsse der Einzugsgebiete Minster-Euthal ( $1.75 \text{ m}^3/\text{s km}^2$ ) und Alp-Einsiedeln ( $2.36 \text{ m}^3/\text{s km}^2$ ) lassen sich nicht durch den Niederschlag erklären, da er in diesen Regionen nicht extrem hoch ausgefallen ist. Der Flyschanteil dieser Gebiete ist jedoch sehr hoch und die Wasserdurchlässigkeit meist gering. Ob allenfalls noch andere abflussfördernde Faktoren zu den hohen Werten geführt haben könnten, müsste in einer genaueren Analyse überprüft werden.

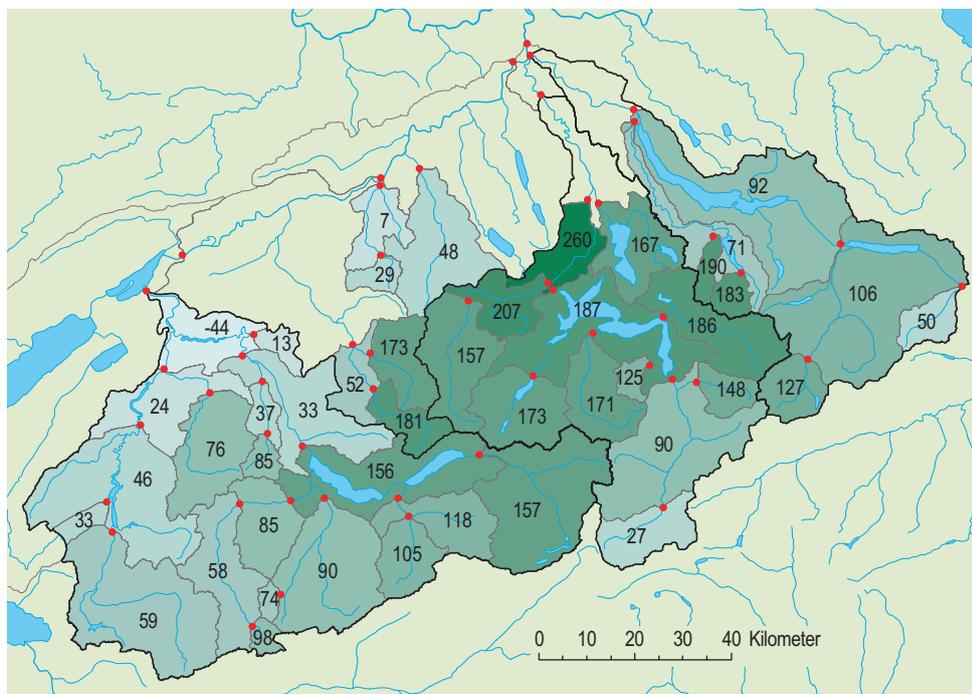
#### 2.6.4 Abflussvolumina

Abb. 2.14 gibt eine Übersicht über die Abflussvolumina der Teilgebiete auf der Alpenordseite für die fünf Tage vom 19. August 12:00 Uhr – 24. August 12:00 Uhr. Die Werte für die Teilgebiete entlang der Unterläufe von Aare, Reuss und Limmat sind in der Karte nicht dargestellt, da sich Fehler bei der Abflussbestimmung, bei der Bestimmung der Einzugsgebietsgrösse und bei der Berechnung des Rückhalts auf die Bilanzierung dieser Werte besonders stark auswirken und sich teilweise auch kumulieren. Zudem waren diese Teilgebiete durch das Unwetter viel weniger stark betroffen und sind deshalb für die vorliegende Untersuchung weniger relevant.

Für die benachbarten Teilgebiete Aare-Thun und Aare-Ringgenberg ergab die Bilanzierung sehr unterschiedliche Abflussvolumen, welche nicht plausibel erklärt werden konnten. Die Bestimmung des Rückhalts im Briener- und Thunersee ist mit Unsicherheiten verbunden, welche sich bei der Bilanzierung für die beiden Teilgebiete stark auswirken könnten. Zudem kann nicht ausgeschlossen werden, dass erhebliche Wassermengen unterirdisch vom Briener- zum Thunersee geflossen sind. Deshalb wurden diese beiden Teilgebiete in Abb. 2.14 und Abb. 2.15 zu einem Teilgebiet zusammengefasst.

**Abb. 2.14** > Abflussvolumina [mm] vom 19.08.2005 12:00 Uhr – 24.2008.2005 12:00 Uhr.

Die Zahlen beziehen sich jeweils auf das Teileinzugsgebiet.



Kartengrundlage: Digitale Übersichtskarte der Schweiz (K606-01 © 2004 swisstopo)

In Abb. 2.14 ist der Einfluss der unterschiedlich grossen Gebietsniederschläge ersichtlich: Die Gebiete mit relativ wenig Niederschlag weisen meist auch geringere Abflussvolumina als jene mit grossen Niederschlagsmengen auf. Deshalb weisen die Gebiete in der West- und Ostschweiz tendenziell kleinere Abflussvolumina auf als Gebiete in der Zentralschweiz auf.

**Einfluss des Niederschlages**

Die Abflussvolumina lassen sich aber nicht in jedem Fall mit den Gebietsniederschlägen erklären. Beispielsweise sind die Abflussvolumina der Einzugsgebiete Sarner Aa-Sarnen (173 mm) und Kleine Emme-Werthenstein (157 mm) verglichen mit anderen Gebieten mit ähnlich hohem Gebietsniederschlag sehr klein. Das kleine Abflussvolumen des Einzugsgebiets Sarner Aa-Sarnen könnte mit der nur groben Abschätzung des

**Einfluss der Retention**

Rückhalts zusammenhängen und sicherlich hatte auch der Rückhalt im Lungernsee einen Einfluss auf den Abfluss bei Sarnen. Das im Vergleich zum Gebietsniederschlag und im Vergleich zum Abflussvolumen des nachfolgenden Teileinzugsgebiets sehr kleine Abflussvolumen des Gebiets Kleine Emme-Werthenstein kann jedoch nicht plausibel erklärt werden.

Auch die Abflussvolumina der Teilgebiete Worble-Ittigen (13 mm) und Grosstalbach-Isenthal (125 mm) sind verglichen mit den entsprechenden Gebietsniederschlägen sehr gering. In diesen Gebieten kommen keine Seen oder grössere anthropogene Eingriffe vor. Auch Rückhalt in Form von Schnee kommt kaum in Frage. Das Einzugsgebiet oberhalb Isenthal reicht zwar beinahe bis auf 3000 m ü. M. Wie bereits erwähnt lag die Schneefallgrenze während des Ereignisses aber gerade bei etwa 3000 m ü. M. Bei der Worble könnte der tiefe Wert teilweise auf Ausuferungen im Gebiet Deisswil zurückzuführen sein. Dort ist die Abflusskapazität relativ klein und es stehen grössere Überflutungsräume zur Verfügung, aus welchen das Wasser nicht mehr vollständig ins Gerinne zurückfliesst. Zudem besitzt das Einzugsgebiet eine gute Wasserspeicherfähigkeit (teilweise kalkhaltiger und porenreicher Untergrund, verwitterte Sandsteine) und reagiert stärker auf Gewitter als auf Dauerregen. Ob diese Faktoren alleine für das kleine Abflussvolumen verantwortlich sind, müsste in einer genaueren Analyse untersucht werden.

Die grossen Abflussvolumen der Gebiete Alp-Einsiedeln und Minster-Euthal sind nur schwer mit dem kleinen Abflussvolumen des restlichen Einzugsgebiets der Sihl zu vereinbaren. Auf Gebietsniederschläge unterschiedlicher Grössenordnung können die grossen Unterschiede jedenfalls nicht zurückgeführt werden (Abb. 2.11). Die zahlreichen Um- und Ableitungen zwischen dem Ausfluss aus dem Sihlsee und der Station Sihl-Zürich (Margot et al., 1992) haben aber sicher auch einen Einfluss.

Andere Einflussfaktoren und Unsicherheiten

Durch die Bilanzierung ergibt sich für das Zwischeneinzugsgebiet Aare-Hagneck ein negativer Wert (-44 mm). Auch das Zwischeneinzugsgebiet Reuss-Mühlau weist mit 260 mm einen – besonders im Vergleich zu den umliegenden Einzugsgebieten – unplausiblen Wert auf. Der negative Wert für das Teilgebiet Aare-Hagneck könnte zwar teilweise darauf zurückzuführen sein, dass irgendwo entlang der Aare oder entlang der Saane ein nicht erfasster Rückhalt (z.B. durch Ausuferung) aufgetreten ist. Dennoch muss beachtet werden, dass die bilanzierten Werte für die – im Gegensatz zum gesamten Einzugsgebiet – relativ kleinen Zwischeneinzugsgebiete Aare-Hagneck und Reuss-Mühlau generell unsicher sind, da sich schon kleine Fehler durch die Bilanzierung überproportional stark auswirken können.

## 2.6.5 Volumenabflusskoeffizienten

In Abb. 2.15 sind die aus den Gesamtabflüssen der Teilgebiete und den entsprechenden Gebietsniederschlägen berechneten Volumenabflusskoeffizienten (VAK) der Teilgebiete dargestellt. Die vergleichsweise grossen Volumenabflusskoeffizienten folgender Teilgebiete fallen besonders auf: Alp-Einsiedeln (1.09), Minster-Euthal (1.04), Reuss-Mühlau (1.57), Aare-Thun (0.91) und Simme-Oberried (0.82). Im Gegensatz dazu

besitzen folgende Teilgebiete sehr kleine VAK: Allenbach-Adelboden (0.42), Worble-Ittigen (0.12), Aare-Ringgenberg (0.39), Murg-Murgenthal (0.06), Sarner Aa-Sarnen (0.59) und Sihl-Zürich (0.40). Auffallend ist zudem, dass der VAK des Gebietes Kleine Emme-Werthenstein kleiner ist als jener des nachfolgenden Teilgebiets Kleine Emme-Littau.

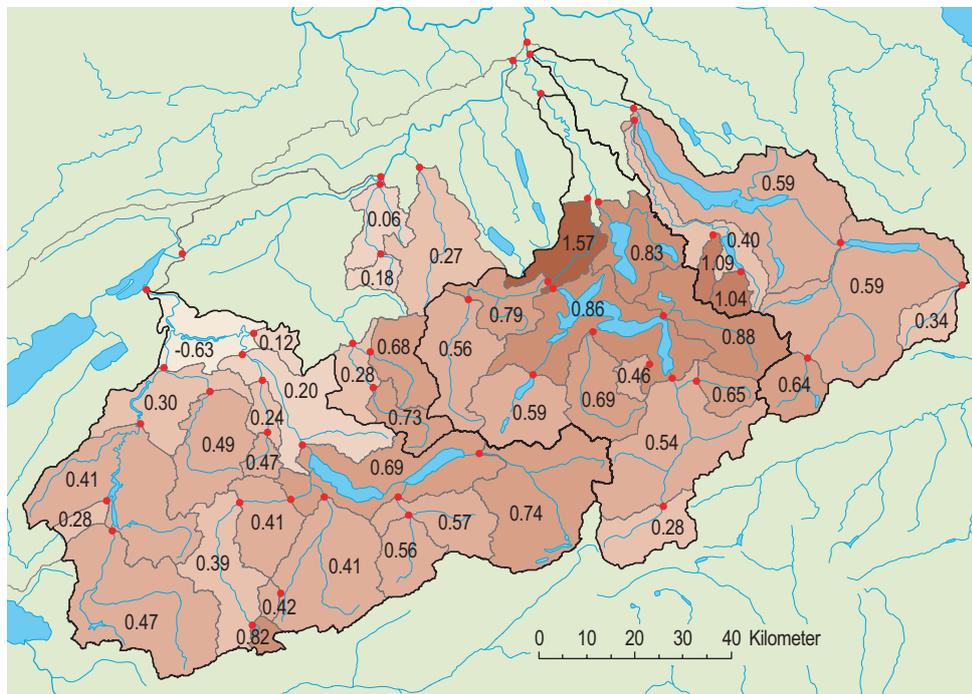
Die Gebiete mit überraschend grossen VAK sind meist schon durch grosse Abflussvolumina aufgefallen, während jene Gebiete mit sehr kleinen VAK nur kleine Abflussvolumina aufweisen (Abb. 2.14). Die sehr kleinen bzw. sehr grossen Werte können somit durch dieselben Faktoren erklärt werden, welche weiter oben bereits zur Interpretation der Abflussvolumina herangezogen wurden.

Wenn zusätzlich zum Rückhalt im Sarnersee noch ein Rückhalt von 3.3 Mio. m<sup>3</sup> Wasser im Lungernsee angenommen wird (Scherrer AG, 2006), erhöht sich der VAK des Gebiets Sarner Aa-Sarnen nur wenig von 0.59 auf 0.63. Der Rückhalt im Lungernsee ist somit nicht alleine für den tiefen VAK dieses Gebiets verantwortlich.

Unsicherheiten in den  
Datengrundlagen

**Abb. 2.15** > Volumenabflusskoeffizienten vom 18.08.2005 12:00 Uhr – 23.08.2005 12:00 Uhr.

Die Zahlen beziehen sich jeweils auf das Teileinzugsgebiet.



Kartengrundlage: Digitale Übersichtskarte der Schweiz (K606-01 © 2004 swisstopo)

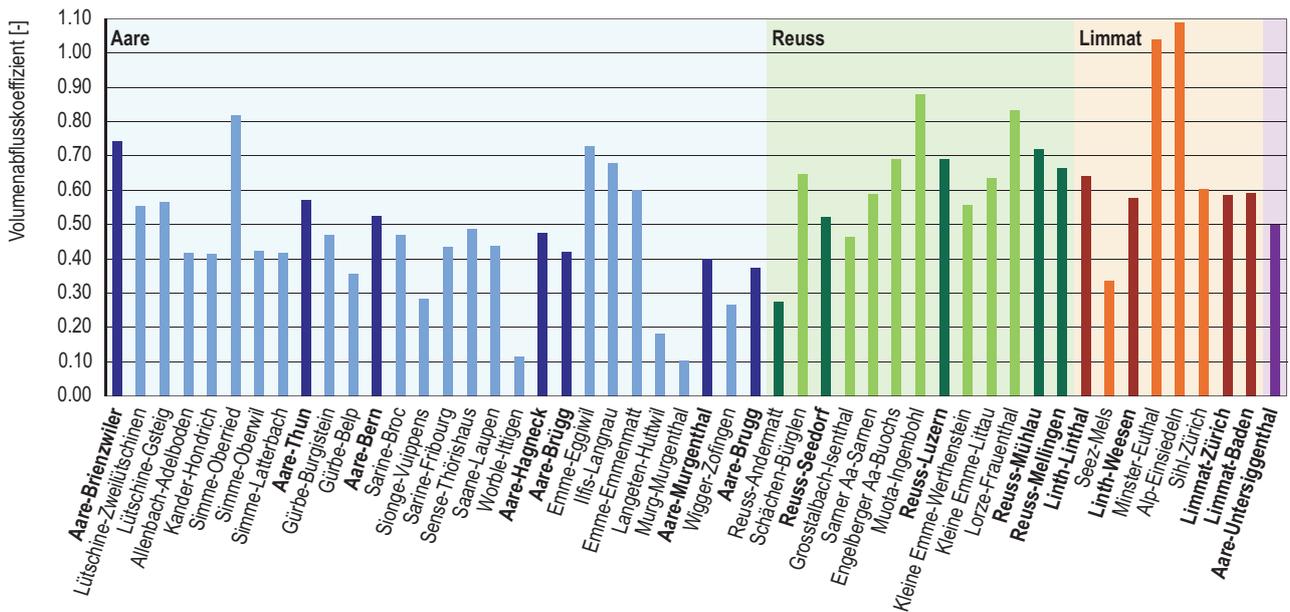
Die VAK der Einzugsgebiete Alp-Einsiedeln und Minster-Euthal sind grösser als 1, was nur durch eine Speicherentleerung – wie beispielsweise das Schmelzen einer Schneedecke – plausibel erklärt werden könnte, was in diesem Fall jedoch nicht zutrifft. Auch der kleine Wert für das Gebiet Kleine Emme-Werthenstein (0.56) lässt sich nicht plausibel erklären. Die Wahrscheinlichkeit, dass entweder die Niederschlags- oder die Abflussdaten dieser Gebiete fehlerhaft sind, ist somit gross.

Abb. 2.15 zeigt die Entwicklung der Volumenabflusskoeffizienten für die Teilgebiete entlang der Flüsse im Einzugsgebiet der Aare. Der angegebene Wert zeigt, welcher Anteil des Niederschlags in diesem Teilgebiet in der betrachteten Periode abgeflossen ist. Im Gegensatz dazu zeigt Abb. 2.16 die Entwicklung der Volumenabflusskoeffizienten jeweils für das gesamte Einzugsgebiet oberhalb der ausgewählten Messstationen. Die Volumenabflusskoeffizienten in den Einzugsgebieten entlang der Aare bis zur Messstation Brugg werden erwartungsgemäss tendenziell kleiner, je weiter flussabwärts eine Messstation liegt und je grösser somit das betreffende Einzugsgebiet ist. Im Einzugsgebiet der Reuss und der Limmat ist dieser Zusammenhang jedoch nicht feststellbar. Bei der Reuss hat die unterschiedliche Niederschlagsverteilung höchstwahrscheinlich einen grossen Einfluss auf die Volumenabflusskoeffizienten, während im Einzugsgebiet der Limmat besonders auch der Einfluss der Kraftwerke zu beachten ist. Der kleine Volumenabflusskoeffizient für das Einzugsgebiet Seez-Mels (0.34) könnte beispielsweise auf die künstlichen Ab- und Umleitungen in diesem Gebiet zurückzuführen sein (Margot et al., 1992).

Entwicklung der Volumenabflusskoeffizienten entlang grosser Flüsse

**Abb. 2.16** > Entwicklung der Volumenabflusskoeffizienten in den Einzugsgebieten entlang der Aare, der Reuss und der Limmat.

Die Zahlen beziehen sich jeweils auf das ganze Einzugsgebiet, inkl. aller obenliegenden Einzugsgebiete.



### 2.6.6 Rückschlüsse auf die Qualität der Eingangsdaten

Für den grössten Teil der Einzugsgebiete scheinen die berechneten Werte plausibel und häufig können auch sehr hohe oder sehr tiefe Werte durch Einflussgrößen wie Niederschlag, Rückhalt oder anthropogene Eingriffe plausibel erklärt werden. Auch die Geologie, der Bodentyp und weitere Einzugsgebietscharakteristika können einen grossen Einfluss auf die betrachteten Werte haben.

Werte sind generell plausibel

Bei einigen Einzugsgebieten ist die Wahrscheinlichkeit jedoch gross, dass entweder die Niederschlagsdaten oder die Abflussdaten fehlerhaft sind, da keine plausiblen Erklärungen für auffallend grosse oder kleine Werte möglich sind. Dies trifft insbesondere für die Gebiete Alp-Einsiedeln, Minster-Euthal und Kleine Emme-Werthenstein zu. Für diese Gebiete müssen noch weitere Abklärungen getroffen werden.

### 2.7 Erkenntnisse

Gesamthaft betrachtet kann das Hochwasser vom August 2005 wohl als das grösste Ereignis bezeichnet werden, welches das Abflussmessnetz in der Schweiz bis jetzt registriert hat. An vielen betroffenen Stationen wurden neue Rekorde verzeichnet. Diese wurden vor allem in der Innerschweiz und im Berner Oberland registriert, d.h. im Zentrum des Niederschlagsgebiets. Bedeutende Ausmasse hat das Hochwasser auch im gesamten Einzugsgebiet der Aare im Schweizer Mittelland angenommen, wo sich die Abflüsse aus den vom Niederschlagszentrum betroffenen Regionen vereinten. Beim Zusammenfluss mit dem vom Niederschlag viel weniger flächig betroffenen Rheineinzugsgebiet nimmt die Bedeutung des Ereignisses rasch ab.

Schwerpunkt des Ereignisses im Einzugsgebiet der Aare

Das schweizerische Messnetz hat sich bei diesem aussergewöhnlichen Ereignis bewährt. Probleme sind vor allem bei der Verbreitung der erhobenen Information erkannt und teilweise schon behoben worden. Es hat sich generell gezeigt, dass Beobachter vor Ort eine sehr wertvolle Hilfe waren. Die Qualität der erhobenen Informationen kann generell als befriedigend bis gut bezeichnet werden. Eine vertiefte Betrachtung ist noch bei einzelnen wenig plausiblen Ergebnissen nötig, die beim Vergleich mit dem Niederschlag aufgefallen sind.

Messnetz hat sich grundsätzlich bewährt, Verbesserungen sind eingeleitet

In diesem Kapitel kommen aber auch klar die Grenzen der Genauigkeit bei der Einordnung eines ausserordentlichen Ereignisses zum Ausdruck. Systembedingt ist bei der statistischen Einordnung von seltenen Ereignissen mit Unsicherheiten im Bereich eines Faktors 2 und mehr zu rechnen. Am Beispiel der Kander bei Hondrich (Abb. 2.10) heisst dies, dass ein Ereignis, das als 100-jährlich eingestuft wird, ebenso gut ein 50- oder ein 200-jährliches sein könnte. Auf Grund des gewählten Vertrauensintervalls von 80% könnte die Jährlichkeit mit 20% Wahrscheinlichkeit sogar noch kleiner bzw. grösser sein.

Grosse Unschärfen bei der Bestimmung der Eintretenswahrscheinlichkeit

Abb. 2.10 zeigt aber auch, dass seltene Ereignisse statistische Ausreisser sein können, da das Hochwasser vom August 2005 weit ausserhalb des bisher beobachteten Bereiches liegt. Die Tatsache, dass ein Abflusswert sich statistisch kaum sinnvoll einordnen

Schwellenprozesse bedingen vertiefte hydrologische Analysen

lässt, heisst nun nicht, dass er falsch sei. Viel mehr ist es oft so, dass bei der Abflussbildung so genannte Schwellenprozesse zum Tragen kommen. So wurde z.B. bei der Grossen Melchaa erstmals seit ihrer Umleitung in den Sarnersee der im Einzugsgebiet vorhandene Karstspeicher gefüllt. Derartige Phänomene lassen sich mit der statistischen Extrapolation von Beobachtungen bei kleineren Niederschlagsmengen nicht beschreiben. Solche Schwellenprozesse können nur mit aufwendigen hydrologischen Detailuntersuchungen erkannt werden. Einige Beispiele dazu und Möglichkeiten ihrer statistischen Bearbeitung werden im zweiten Teil der Ereignisanalyse durchgeführt.

#### Literatur:

- Aschwanden H., Schädler B. 1988: Hochwasserereignisse im Jahre 1987 in der Schweiz – Messdaten und ausgesuchte Auswertungen. Mitteilung der Landeshydrologie und -geologie Nr. 10, Bern.
- Aschwanden H. 2000: Hochwasser 1999 – Analyse der Messdaten und statistische Einordnung. Hydrologische Mitteilungen, Nr. 27, LHG, Bern.
- BWG 2000: Hochwasser 1999 – Analyse der Ereignisse. Studienbericht Nr. 9, Bundesamt für Wasser und Geologie, Biel.
- Diezig R. 2006: Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teilprojekt Hydrologie: Gebietsbilanzen. Bericht des Geographischen Institutes der Universität Bern, Gruppe für Hydrologie; Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU, 37 S. (unveröffentlicht).
- DVWK 1979: Empfehlungen zur Berechnung der Hochwasserwahrscheinlichkeit. Heft 101, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Verlag Paul Parey, Hamburg.
- DVWK 1999: Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Regel 251, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Bonn.
- LHG 1994: Die Hochwasser 1993 im Wallis und Tessin – Messdaten und ausgesuchte Auswertungen. Mitteilung der Landeshydrologie und -geologie Nr. 19, Landeshydrologie und -geologie, Bern.
- Margot A., Schädler B., Sigg R., Weingartner R. 1992: Beeinflussung der Fliessgewässer durch Kraftwerke und Seeregulierungen. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.3, Bern.
- MeteoSchweiz 2006: Starkniederschlagsereignis August 2005. Arbeitsberichte der MeteoSchweiz 211, 63 S.
- Naef F., Scherrer S., Zurbrugg Ch. 1999: Grosse Hochwasser – unterschiedliche Reaktionen von Einzugsgebieten auf Starkregen. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.7, Bern.
- Naef F., Thoma C. 2002: Dämpfung von Hochwasserspitzen in Fliessgewässern. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.9, Bern.
- Scherrer AG 2006: Hydrologische Grundlagen für den Hochwasserschutz am Sarnersee und an der Sarneraa. Bericht im Auftrag des Kantons Obwalden (unveröff.).
- Schmid K., Bader S., Schlegel T 2005: Starkniederschläge 19. bis 23. August 2005. MeteoSchweiz.
- Spreafico M., Stadler K. 1986: Hochwasserabflüsse in schweizerischen Gewässern: Abflussmessreihen mit mehr als 30 Jahren in den Einzugsgebieten des Rheins und der Aare. Mitteilung der Landeshydrologie und -geologie Nr. 7, Band I, Bern.
- Spreafico M., Stadler K. 1988: Hochwasserabflüsse in schweizerischen Gewässern: Abflussmessreihen mit mehr als 30 Jahren in den Einzugsgebieten der Reuss, der Limmat, der Rhone, des Tessin, der Adda und des Inn. Mitteilung der Landeshydrologie und -geologie Nr. 8, Band II, Bern.
- Spreafico M., Aschwanden H. 1991a: Hochwasserabflüsse in schweizerischen Gewässern: Abflussmessreihen aus den Messnetzen der Landeshydrologie und -geologie, der Kantone, der Hochschulen und privater Institutionen in den Einzugsgebieten des Rheins und der Aare (Beobachtungsdauer vorwiegend zwischen 10 und 30 Jahren). Mitteilung der Landeshydrologie und -geologie Nr. 16, Band III, Bern.
- Spreafico M., Aschwanden H. 1991b: Hochwasserabflüsse in schweizerischen Gewässern: Abflussmessreihen aus den Messnetzen der Landeshydrologie und -geologie, der Kantone und der Hochschulen und privater Institutionen in den Einzugsgebieten der Reuss, der Limmat, der Rhone, des Tessin, der Adda und des Inn (Beobachtungsdauer vorwiegend zwischen 10 und 30 Jahren). Mitteilung der Landeshydrologie und -geologie Nr. 17, Band IV, Bern.

Armin Petrascheck

## 3 > Hydrologie Seen

*Das Hochwasser vom August 2005 liess die Spiegel der grossen Voralpenseen um bis zu 2.5 m ansteigen. Die Hochwassergrenze wurde teilweise um mehr als 1 m überschritten. Die Spitzenwerte der Zuflüsse lagen bis zu einem Faktor 2 über den bereits sehr hohen Seezuflüssen des Jahres 1999. Das führte zu neuen Rekordwasserständen und grossen Schäden entlang der Seeufer. Der positive Effekt dieser Seeanstiege war eine Abminderung der Abflüsse auf 30–60 % der Zuflüsse.*

3.1

### Einleitung

Die Rolle der Seen bei extremen Hochwassern ist zwiespältig. Einerseits tragen sie durch ihren Rückhalt wesentlich zur Abflussminderung für die Unterlieger bei, andererseits verursachen sie Überschwemmungen an ihren Ufern. Da die Seeufer ein hoch geschätzter Siedlungsraum sind, entstehen hohe Sachschäden. Seen sollen Hochwasserspitzen dämpfen und brauchen dafür Speicherraum. Vereinfachend kann das Volumen oberhalb des mittleren Sommerwasserstandes bis zur Hochwassergrenze dem Hochwasserrückhalt zugewiesen werden.

Rolle der Seen

Das Ziel der vorliegenden Untersuchung besteht darin, das Ereignis im Vergleich mit früheren Grossereignissen einzuordnen, die Prozesse aufzuzeigen, die bei diesem Ereignis zu den ausserordentlich hohen Seeständen geführt haben und daraus Schlussfolgerungen für Strategien zur Verminderung der Hochwassergefahren zu ziehen. Hierfür sind jedoch noch weiterführende statistische Untersuchungen der Seezuflüsse erforderlich, die in einer zweiten Phase durchgeführt werden. Alle Vorschläge sind als Hinweise aus der Sicht des Hochwasserschutzes zu verstehen. Eine Projektplanung muss unter Einbezug aller Interessen, der technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit von den verantwortlichen Kantonen durchgeführt werden.

Ziel der Untersuchung

Es wurden nur jene Seen untersucht, die 2005 vom Hochwasser betroffen waren und für die das BAFU über eine ausreichende Datengrundlage verfügt.

Auswahl der Seen

Die Seezuflüsse wurden als Summe der gemessenen Ausflüsse plus der Änderung im Seevolumen errechnet. Für alle Berechnungen wurden Tagesmittelwerte und konstante Seeflächen verwendet, was zu numerischen Abweichungen, insbesondere bei den angegebenen Maximalwerten, führen kann. Es ist auch möglich, dass sich durch die Mittelbildung die Maximalwerte um einen Kalendertag verschieben. Berechnungen mit kürzeren Zeitschritten sind dagegen mit grossen Unsicherheiten bei der Bildung der Differenzen aus den Ablesungen der Seespiegel behaftet, die beispielsweise infolge Windeinwirkung schwanken können.

Methodik

## 3.2 Das Verhalten der Seen bei Hochwasser

### 3.2.1 Grundsätzliches

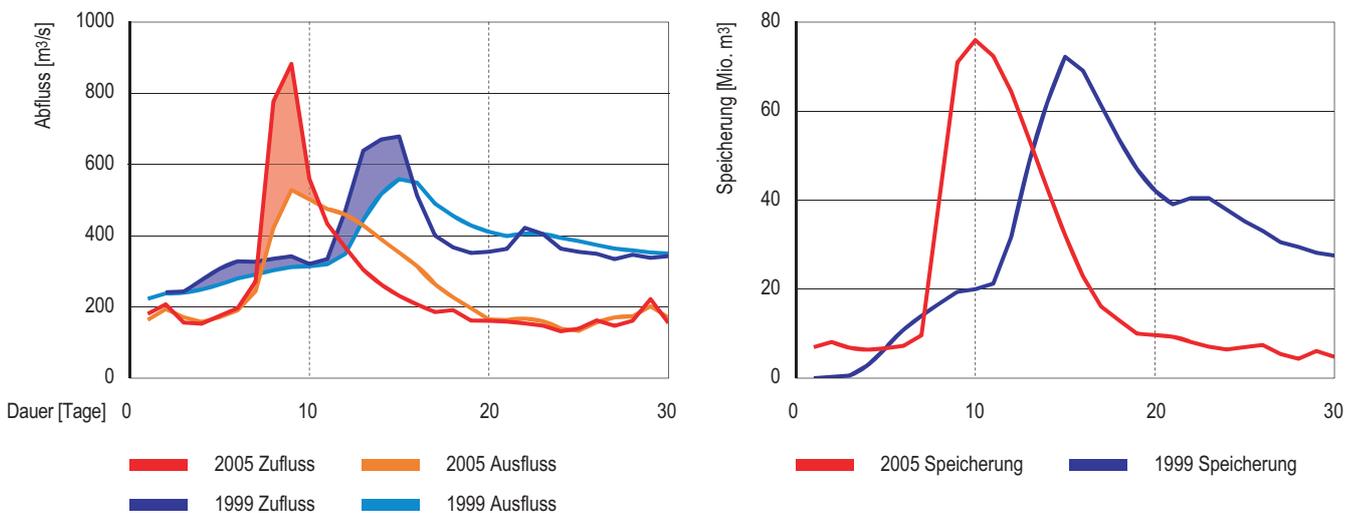
Seen dämpfen die Abflüsse, wie am Beispiel zweier unterschiedlicher Hochwasser am Thunersee in Abb. 3.1 gezeigt wird. Ein hoher Zufluss führt zu einem Ansteigen des Sees und damit zu einer Erhöhung des Ausflusses aus dem See. Der Maximalstand wird erreicht, wenn Zu- und Ausfluss gleich gross sind. Die Schnelligkeit des Anstieges hängt von den momentanen Zuflüssen ab, die Höhe des Anstieges vom Volumen, wobei jedoch nicht die absoluten Werte, sondern die Differenz zwischen Zu- und Ausfluss massgebend sind. Gleiche Seehochstände können daher durch unterschiedliche Hochwassertypen entstehen.

Retentionswirkung von Seen

Abb. 3.1a > Zu- und Ausflüsse des Thunersees während der Hochwasserereignisse von 2005 und 1999.

Abb. 3.1b > Speicherung im Thunersee während der Hochwasserereignisse von 2005 und 1999.

Die hinterlegte Fläche entspricht dem im See gespeicherten Wasservolumen.



Bei nicht regulierten Seen besteht eine nicht beeinflussbare Beziehung zwischen Seestand und Ausfluss. Die Seestände entsprechen daher immer den Zuflussbedingungen. Dies ergibt ein grosses Rückhaltevolumen für Hochwasser. Die tiefen Seestände sind aber meist nicht im Interesse von Umwelt, Schifffahrt und Tourismus, die in der Regel einen möglichst hohen Seestand fordern.

Nicht regulierte Seen

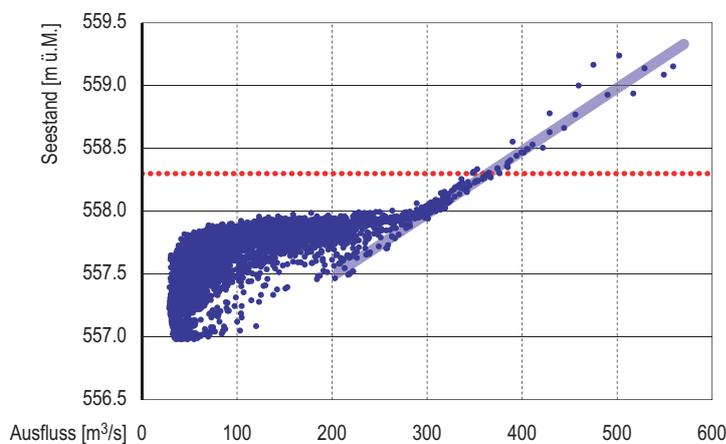
Das Ziel einer Regulierung ist es, ohne Verlust an Hochwassersicherheit, die Niedrigwasserstände im See anzuheben. Wäre Hochwasserschutz die einzige Zielsetzung, so wäre der Seespiegel dauernd möglichst tief zu halten. Um einen Interessensausgleich herzustellen, wurden Reglemente ausgearbeitet, die je nach Jahreszeit und Seewasserstand Abflussmengen festlegen. Dadurch wird einerseits flussabwärts eine Mindestab-

Regulierte Seen

flussmenge gewährleistet und andererseits der Anstieg des Seespiegels begrenzt, um einen freien Raum für Hochwasser zu haben. Bei regulierten Seen kann der Abfluss durch die Wehranlage gegenüber den natürlichen Abflussbedingungen verringert, aber nicht erhöht werden. Ist die Wehranlage ganz geöffnet, herrschen gleiche Bedingungen wie bei einem unregulierten See, da die weitere Entwicklung der Seestände einzig von den Zuflüssen abhängig ist. Beispielhaft sind in Abb. 3.2 die Verhältnisse für den Thunersee aufgezeigt. Im Bereich unterhalb der Reguliergrenze von 558.0 m ü. M. werden die Abflüsse entsprechend dem Wasserstand und der Jahreszeit reguliert, wobei ein Mindestabfluss von 30 m<sup>3</sup>/s eingehalten wird. Spätestens ab dem Seestand 558.0 m ü. M. sind die Wehranlagen ganz geöffnet und die Abflüsse variieren nur noch in einem schmalen Band. Die Abflusskapazität erreicht bei Kote 558.0 m ü. M. ungefähr 300 m<sup>3</sup>/s und erhöht sich mit steigendem Seewasserstand auf 380 m<sup>3</sup>/s bei der Hochwassergrenze (Tiefbauamt des Kantons Bern, 2004 und 2005).

**Abb. 3.2** > Beobachtete mittlere Tagesausflüsse aus dem Thunersee in Abhängigkeit des Seewasserstands.

Die breite ausgezogene Linie zeigt den Verlauf des Ausflusses bei geöffneten Wehranlagen, die gepunktete Linie bezeichnet die Hochwassergrenze.



Die Hochwassergrenze oder Schadensgrenze bezeichnet jenen Seestand, bei dem es gerade noch nicht zu nennenswerten Hochwasserschäden kommt. Auch andere Bezeichnungen, wie obere Reguliergrenze oder Alarmgrenze, sind zur Bezeichnung dieses Seestands gebräuchlich. Unabhängig von der Bezeichnung ist, dass der Raum unter dieser Grenze dem See als Rückhalteraum zur Verfügung stehen soll und dass sie bei aussergewöhnlichen Ereignissen überschritten werden kann. Nachfolgend wird dieser Grenzwert des Seestandes einheitlich als Hochwassergrenze bezeichnet und in allen nachfolgenden Graphiken als rot gepunktete Linie dargestellt.

**Bedeutung der Hochwassergrenze**

### 3.2.2 Kenndaten der untersuchten Seen

Das Verhalten eines Sees bei Hochwasser hängt von seinen Speichermöglichkeiten, der Kapazität seines Auslaufs und den Zuflüssen ab. Jeder See hat somit unterschiedliche Möglichkeiten, dämpfend auf das Hochwasser zu wirken. Die wichtigsten Kenndaten sind aus Tab. 3.1 ersichtlich. Da Seehochwasser wegen der Schneeschmelze besonders häufig im Mai oder Juni auftreten, wurden die mittleren Juniwerte zur Charakterisierung des Rückhaltevermögens bzw. der Fülltage verwendet.

#### Charakteristika der Seen

**Tab. 3.1 > Charakteristika der vom Hochwasser 2005 betroffenen grossen Alpenvorlandseen.**

Seename	Einzugsgebiet [km <sup>2</sup> ]	Seefläche		Mittl. Abfluss Juni [m <sup>3</sup> /s]	Mittl. Seestand Juni [m ü. M.]	Hochwassergrenze [m ü. M.]	Hochwasserrückhalt		Fülltage <sup>3</sup>
		[km <sup>2</sup> ]	[% des EG]				[cm]	[Mio. m <sup>3</sup> ]	
Walensee <sup>1</sup>	1'061	24.1	2.3	106.0	419.94	422.00	206	50	5.5
Zürichsee	1'840	90.1	4.9	142.0	406.05	406.60	55	50	4.1
Vierwaldstättersee	2'251	113.6	5.1	213.0	433.83	434.45	62	70	3.8
Sarnersee <sup>1</sup>	267	7.5	2.8	14.4	469.65	470.50	85	6.4	5.1
Zugersee	259	38.3	14.8	8.8	413.67	414.60	93	36	47
Brienzersee	1'129	29.8	2.6	114.0	564.24	565.30	110	32	3.3
Thunersee	2'490	48.4	1.9	209.0	557.86	558.30	44	21	1.2
Murtensee	697	23.0	3.3	11.1	429.51	430.85	119	27	
Neuenburgersee	2'672	217.9	8.2	49.1	429.50	430.50	85	185	
Bielsee	8'317	39.8	0.5	345.0	429.43	430.35	107	33	
JGK <sup>2</sup>	8'317	280.7	3.4	345.0				245	8.2
Lauerzersee <sup>1</sup>	72	3.1	4.3		447.27	448.70	143	4.4	

<sup>1</sup> nicht regulierte Seen

<sup>2</sup> Die Juragewässerkorrektion besteht aus dem Murten-, Neuenburger- und Bielsee, die als eine zu bewirtschaftende Einheit zu betrachten sind.

<sup>3</sup> Als Fülltage wird jene Anzahl von Tagen bezeichnet, die das Rückhaltevolumen bei mittlerem Sommerzufluss auffüllen würden.

EG: Einzugsgebiet

Das für den Hochwasserschutz wichtige Rückhaltevolumen muss relativ zum Einzugsgebiet bzw. zum Zufluss gesehen werden. Deshalb sind in Tab. 3.1 auch die Anzahl mittlerer Tageszuflüsse angegeben, die in diesem Volumen gespeichert werden können. Je grösser diese Anzahl von Fülltagen, desto wirkungsvoller können grosse Hochwasser, deren Zufluss ja ein Vielfaches eines normalen Tageszuflusses beträgt, gedämpft werden. Das Rückhaltevolumen kann im Ereignisfall von diesen mittleren Werten beträchtlich abweichen. Es kann geringer sein, wenn der Ausgangswasserspiegel über dem mittleren Seespiegel liegt oder die Hochwassergrenze nicht erreicht wird. Bei tieferem Ausgangswasserstand oder bei Überschreiten der Hochwassergrenze ist das Rückhaltevolumen grösser. Die kleinste Rückhaltekapazität hat der Thunersee, was einerseits auf ein ungünstiges Verhältnis von Seefläche und Einzugsgebiet, und andererseits auf einen geringen Wasserspiegelunterschied zwischen dem mittleren Wasserspiegel und der Schadensgrenze zurückzuführen ist. Die mit Abstand grösste dämpfende Wirkung hat der Zugersee.

#### Das Rückhaltevolumen

### 3.3 Beobachtungsreihen und statistische Einordnung der Seestände

Das Augusthochwasser 2005 verursachte bei mehreren Seen neue Rekordwasserstände. In Tab. 3.2 wird die Wiederkehrperiode der im August 2005 beobachteten Seestände aufgezeigt. Zur Berechnung der Eintretenswahrscheinlichkeit der Seestände kann nur die ungestörte Periode verwendet werden. Die Berechnung der Wiederkehrperiode erfolgte nach der Verteilungsfunktion von Gumbel. Für die sehr seltenen Extremwerte ist nur die Angabe von Bereichen der Wiederkehrperioden möglich. Die Wahrscheinlichkeit des Seestandes kann sich von der Eintretenswahrscheinlichkeit der Zuflüsse unterscheiden, da sie auch vom Ausgangswasserstand abhängig sind.

**Tab. 3.2 > Übersicht der maximalen Seestände.**

			August 2005				Maximum	
	Beobachtet seit [Jahr]	unverändert seit [Jahr]	Seestand [m ü. M.]	Diff. z. Hoch- wassergrenze [m]	Wiederkehr- periode [Jahre]	Rang <sup>3</sup>	Seestand [m ü. M.]	Jahr
Walensee	1911	1911	421.72	- 0.28	20–50	3	422.16	1999
Zürichsee	1811	1952	406.66	0.06	20–50	3	407.01	1817
Vierwaldstättersee	1916	1916	435.23	0.78	100–300	2	435.25	1910
Sarnersee	1903	1903	472.42	1.22	> 300	1	472.42	2005
Zugersee	1877	1877	414.35	- 0.25	20–50	4	414.49	1999
Brienzersee	1868	1868	566.05	0.75	> 300	1	566.05	2005
Thunersee	1904	1904	559.25	0.95	> 300	1	559.25	2005
Murtensee <sup>1</sup>	1905	1972	429.82	- 1.03	2–5	16	431.83	1944
Neuenburgersee <sup>1</sup>	1856	1972	429.83	- 0.67	2–10	12	433.84	1874
Bielersee <sup>1</sup>	1890	1972	430.69	0.34	100–300	1	431.26	1944
Lauerzersee <sup>2</sup>	1984	1984	449.65			1	449.65	2005

<sup>1</sup> Juragewässerkorrektion

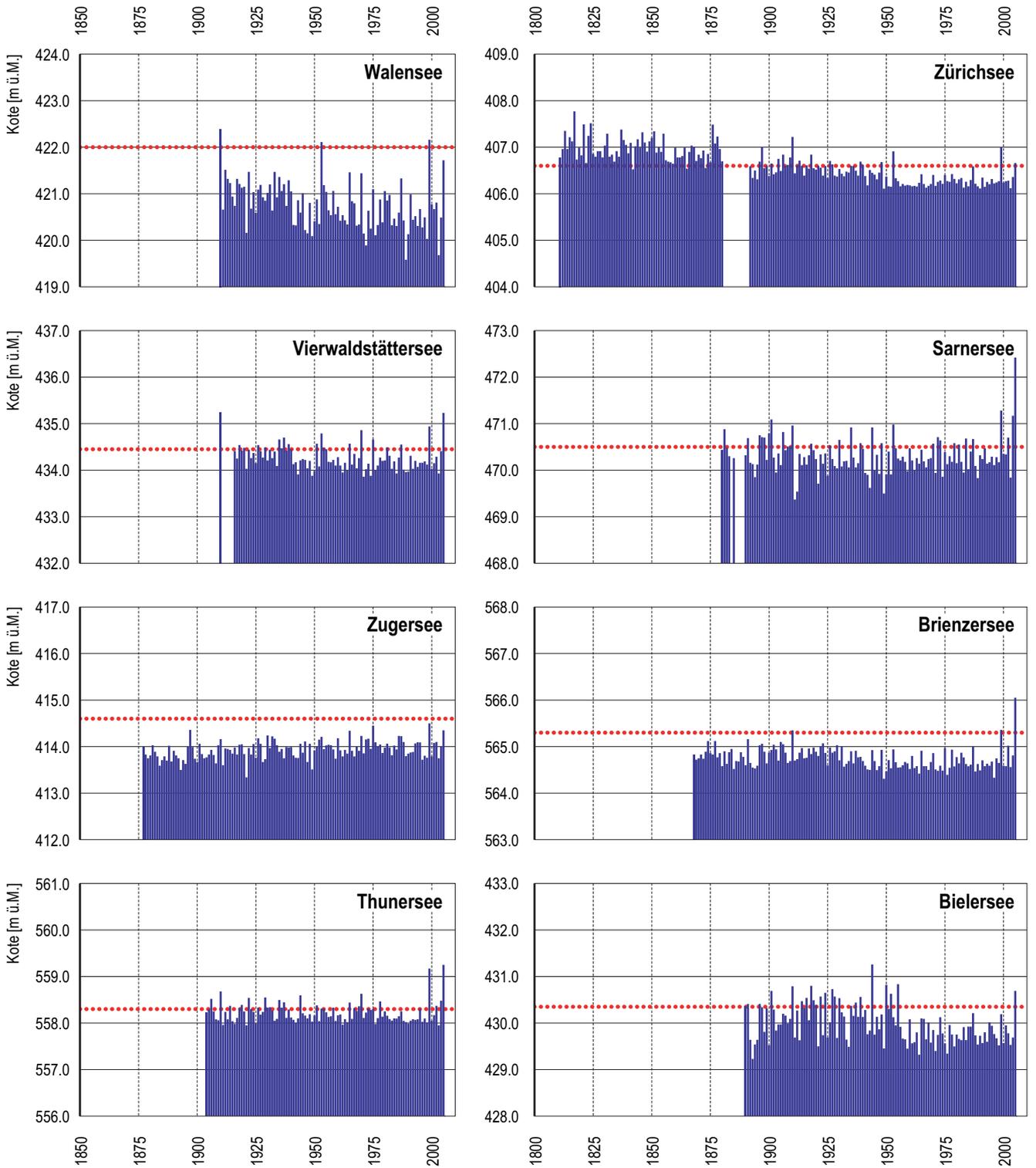
<sup>2</sup> Messreihe ist zu kurz für die Angabe einer Wiederkehrperiode

<sup>3</sup> Rang bezogen auf die Periode ohne Veränderung

In Abb. 3.3 werden die jährlichen Höchststände verschiedener Seen gezeigt. Deutlich erkennbar ist beim Zürichsee der Einfluss der Verbesserung im Abfluss der Limmat durch die Massnahmen um 1870 und 1950, sowie beim Bielersee die zwischen 1960 und 1972 ausgeführte zweite Juragewässerkorrektion. Bei den anderen Seen kann von einem stationären Verhalten gesprochen werden. Der Zugersee (Tab. 3.1) weist durch sein hohes Speichervermögen zwischen den Extremwerten nur eine Differenz von ca. 1 m auf. Beim unregulierten Walensee beträgt dieser Schwankungsbereich jedoch 2.5 m. Beim Thunersee zeigt sich der Einfluss der Regulierung. Die mittleren Seestände werden hoch gehalten, so dass der Seestand 558 m ü. M. praktisch jedes Jahr erreicht wird und zur Hochwassergrenze nur 30 cm Abstand bleiben. Auffallend ist, dass sich diese Regulierung fast 100 Jahre bewährt hat und nur 1999 und nun 2005 die Hochwassergrenze bedeutend überschritten wurde. Analoges gilt für den Brienzersee. Dass der extreme Wasserstand nicht eine Frage der Regulierung ist, zeigt der unregulierte Sarnersee, der gleichfalls einen Spitzenwert erreichte, der weit über allen bekannten Ereignissen liegt.

**Nicht immer ist die gesamte  
Messperiode auswertbar**

Abb. 3.3 > Chronik der Seehöchststände.



Die gepunkteten Linien bezeichnen die entsprechenden Hochwassergrenzen

## 3.4

**Der Ablauf des Ereignisses**

Bis Mitte August 2005 waren die Wasserstände in den Seen eher tief, was eine günstige Ausgangslage bedeutete. Die Vorregen vom 14. und 15. August führten zu keinem merklichen Ansteigen der Seestände. Erst nach dem Einsetzen der Starkniederschläge, insbesondere am 21. und 22. August, wurden die Abflusskapazitäten der Seen überschritten. Diese stiegen rasch an und erreichten ihr Maximum am 23. oder 24. August. Die Anstiegsphase der Seen dauerte einheitlich 4–5 Tage und da die Niederschläge am 23. August im Wesentlichen beendet waren, gingen die Seestände auch rasch wieder zurück. Spätestens Mitte September, also 2–3 Wochen nach dem Beginn des Hochwassers, waren die Ausgangswasserspiegel wieder erreicht.

Am Sarnersee wurde der bisher beobachtete Höchststand um 114 cm übertroffen und die Hochwassergrenze um mehr als 120 cm überschritten. Am Brienzensee lag der Wasserstand um 70 cm über dem Wert von 1910 und 69 cm über jenem von 1999. Am Thunersee überschritt der Wasserspiegel die Hochwassergrenze um 95 cm, doch ist dieses Ereignis nicht derart singulär, weil 1999 mit 87 cm ein ähnlicher Wert erreicht wurde. Am Vierwaldstättersee lag der Höchstwert nur 2 cm unterhalb dessen von 1910. Der Bielersee erreichte infolge der hohen Zuflüsse vom Hagneckkanal den höchsten Stand seit der Fertigstellung der zweiten Juragewässerkorrektur im Jahre 1972. Neuenburger- und Murtensee stiegen jedoch nur wenig an, da in ihrem eigenen Einzugsgebiet kaum Niederschlag fiel und wegen der kurzen Dauer nur begrenzte Volumina vom Bielersee durch den Zihlkanal in den Neuenburgersee umgelagert werden konnten. Keine Höchststände, aber aussergewöhnlich hohe Seestände traten beim Zugersee und dem Walensee auf. Zwar erreichten die Zuflüsse neue Rekordwerte, wegen der günstigen Ausgangslage blieben die Seestände jedoch unter den bisherigen Höchstmarken.

Höchstwasserstände sind aber nur ein Parameter. Andere wichtige Kenngrößen sind Anstiegshöhe und Minderung der Abflussspitzen. Um die verschiedenen Werte zu beurteilen, wurden in den Tab. 3.3–3.5 auch die Werte des zweitwichtigsten Hochwassers, jenes des Jahres 1999, beigelegt. Dieses wurde als Vergleichshochwasser gewählt, weil es sich, wie aus Abb. 3.1 ersichtlich, um einen grundlegend anderen Typ Hochwasser mit niederschlagsreicher Vorgeschichte, langer Dauer und zwei Spitzen handelt.

Tab. 3.3 zeigt die maximalen Tageswerte, die im Laufe des jeweiligen Ereignisses auftraten. Das Datum des grössten Ausflusses aus dem See ist nicht identisch mit dem Datum des grössten Zuflusses. Der Vergleich zeigt jedoch am besten die abflussmindernde Wirkung der Seen. Die Spalte «Anstieg» zeigt den grössten Seeanstieg an einem Tag, sagt jedoch nichts über die Höhe der Überschreitung der Hochwassergrenze aus, da der grösste Anstieg in der Anfangsphase bei noch tiefem Seestand erfolgt.

Zeitlicher Ablauf

Rekordwasserstände

**Tab. 3.3 > Maximale Tageswerte von Zu- und Abfluss, Anstieg und Rückhalt sowie Abflussreduktion bei den Hochwassern von 2005 und 1999.**

Seename	Einzugs- gebiet [km <sup>2</sup> ]	August 2005					Mai 1999				
		Zufluss [mm]	Anstieg [m]	Rückhalt [mm]	Abfluss [mm]	Reduktion [%]	Zufluss [mm]	Anstieg [m]	Rückhalt [mm]	Abfluss [mm]	Reduktion [%]
JGK <sup>1</sup>	8'317	12.9	0.602	7.1	6.5	<b>50 %</b>	12.5	0.297	5.9	7.6	39 %
Thunersee	2'490	30.6	0.635	12.3	18.4	<b>40 %</b>	23.4	0.348	6.7	19.4	17 %
Vierwaldstättersee	2'251	54.9	0.736	37.3	18.0	<b>67 %</b>	28.5	0.287	14.5	16.3	43 %
Zürichsee	1'840	22.3	0.219	10.7	8.6	<b>61 %</b>	28.7	0.304	14.9	17.7	38 %
Brienzersee	1'129	50.2	0.994	26.2	24.0	<b>52 %</b>	24.8	0.313	8.2	20.5	17 %
Walensee	1'061	52.2	1.583	36.0	19.7	<b>62 %</b>	39.0	0.749	17.1	22.8	42 %
Sarnersee	267	65.9	1.400	39.3	38.6	<b>41 %</b>	29.2	0.400	10.1	19.1	35 %
Zugersee	259	58.7	0.335	49.4	9.3	<b>84 %</b>	36.7	0.192	28.6	10.4	72 %

<sup>1</sup> Als Anstiegshöhe wurden die Werte vom Bielersee genommen. Die Berechnung der Volumina erfolgte als Summe der drei Seen.

Mit Ausnahme des Zugersees und seinem gewaltigen Rückhaltevermögen, kann festgestellt werden, dass 2005 die Abflüsse zwischen 40 % und 67 % der Zuflussspitzen betragen. Die geringsten Abflussminderungen wurden am Thunersee und am Sarnersee erreicht. In beiden Fällen führten Ausuferungen zu deutlich höheren Abflüssen, als sie dem System normalerweise entsprechen. Bei der Juragewässerkorrektur (JGK) bewirkte der ausserordentlich hohe Zufluss vom Hagneckkanal einen extrem raschen Anstieg des Bielersees, so dass die Kapazität des Zihlkanals die Entlastung in den Neuenburgersee begrenzte, weshalb das Speichervermögen dieses Sees nicht optimal genutzt werden konnte.

**Spitzenzuflüsse wurden halbiert**

Werden nicht nur die grössten Tageswerte betrachtet, sondern die gesamte Anstiegsphase, verringert sich die abflussmindernde Wirkung (Abb. 3.4). Im Mittel ist nach 5 Tagen noch etwa die Hälfte des zugeflossenen Volumens im See gespeichert. Die Zuflusswerte von 2005 und 1999 nähern sich, der Rückhalt ist 2005 jedoch immer noch höher.

**Tab. 3.4 > 5-Tageswerte während der stärksten Anstiegsphase von Zu- und Abfluss, Anstieg, Rückhalt und Abflussreduktion der Hochwasser 2005 und 1999.**

Seename	Einzugs- gebiet [km <sup>2</sup> ]	19.–23. August 2005					11.–15. Mai 1999				
		Zufluss [mm]	Anstieg [m]	Rückhalt [mm]	Abfluss [mm]	Reduktion [%]	Zufluss [mm]	Anstieg [m]	Rückhalt [mm]	Abfluss [mm]	Reduktion [%]
JGK <sup>1, 2</sup>	8'317	29.1	1.199	12.9	16.2	<b>44.3 %</b>	43.6	0.720	16.6	27.0	38.1 %
Thunersee	2'490	79.9	1.334	26.0	54.0	<b>32.4 %</b>	96.9	1.079	21.0	75.9	21.7 %
Vierwaldstättersee <sup>2</sup>	2'251	144.0	1.556	78.9	65.1	<b>54.8 %</b>	111.3	0.945	47.9	63.4	43.0 %
Zürichsee <sup>2</sup>	1'840	72.0	0.538	26.3	45.7	<b>36.6 %</b>	106.9	0.829	40.6	66.3	38.0 %
Brienzersee	1'129	108.4	1.728	46.8	61.6	<b>43.2 %</b>	105.0	0.957	25.2	79.7	24.1 %
Walensee <sup>2</sup>	1'061	109.6	2.475	56.6	53.0	<b>51.7 %</b>	120.3	1.385	31.9	88.4	26.5 %
Sarnersee	267	159.6	2.556	71.9	87.6	<b>45.1 %</b>	101.5	0.991	28.1	73.4	27.7 %
Zugersee <sup>2</sup>	259	139.0	0.682	100.8	38.2	<b>72.5 %</b>	117.8	0.533	78.8	39.0	66.9 %

<sup>1</sup> Als Anstiegshöhe wurden die Werte vom Bielersee genommen. Die Berechnung der Volumina erfolgte als Summe der drei Seen.

<sup>2</sup> Periode vom 20.–24. August 2005

Nach 14 Tagen war das Ereignis 2005 bei den meisten Seen beendet (Tab. 3.5). Die Seen waren wieder nahe beim Ausgangszustand, weshalb sich die Zu- und Ausflüsse ausglich. Nur bei den sehr grossen Speichern wie JGK, Vierwaldstättersee und Zugersee wurden noch grössere Restvolumina zurückgehalten.

**Tab. 3.5 > 14-Tageswerte während der stärksten Anstiegsphase von Zu- und Abfluss, Anstieg, Rückhalt und Abflussreduktion der Hochwasser 2005 und 1999.**

Seename	Einzugsgebiet [km <sup>2</sup> ]	19. August–1. September 2005					10.–23. Mai 1999				
		Zufluss [mm]	Anstieg [m]	Rückhalt [mm]	Abfluss [mm]	Reduktion [%]	Zufluss [mm]	Anstieg [m]	Rückhalt [mm]	Abfluss [mm]	Reduktion [%]
JGK <sup>1,2</sup>	8'317	81.5	0.19	9.2	72.3	11 %	113.5	0.692	22.4	91.1	19.8 %
Thunersee	2'490	175.1	0.14	2.7	172.4	1 %	218.2	0.43	8.3	209.8	3.8 %
Vierwaldstättersee <sup>2</sup>	2'251	217.8	0.525	26.6	191.2	12 %	252.6	1.17	60.7	191.9	24.0 %
Zürichsee <sup>2</sup>	1'840	158.7	0.04	2.0	156.7	1 %	247.4	0.903	44.2	203.2	17.9 %
Brienzersee	1'129	204.6	0.165	4.3	200.3	2 %	217.5	0.496	13.2	204.3	6.1 %
Walensee <sup>2</sup>	1'061	169.7	0.496	11.0	158.5	7 %	282.5	1.66	37.7	244.8	13.3 %
Sarnersee	267	213.5	0.28	7.9	206.0	4 %	186.1	0.3	8.6	177.5	4.6 %
Zugersee <sup>2</sup>	259	186.9	0.52	80.3	106.2	43 %	208.1	0.633	93.8	114.3	45.1 %

<sup>1</sup> Als Anstiegshöhe wurden die Werte vom Bielersee genommen. Die Berechnung der Volumina erfolgte als Summe der drei Seen.

<sup>2</sup> Periode vom 20. August–2. September 2005

### 3.5 Das Verhalten der einzelnen Seen

Die Hochwasser der Jahre 1910, 1987, 1999 und 2005 sind bei allen Seen ausgeprägt und eignen sich daher für einen Vergleich. Für 1910 sind nicht immer vollständige Datensätze für die Rekonstruktion vorhanden. Bei einigen Seen führten auch die Hochwasser der Jahre 1935, 1944, 1953, 1955, 1970 und 2004 zu ausserordentlichen Seeständen und wurden je nach Erfordernis in die Analyse einbezogen. Mit Ausnahme von 1955 und 1944 handelte es sich jeweils um Sommerhochwasser.

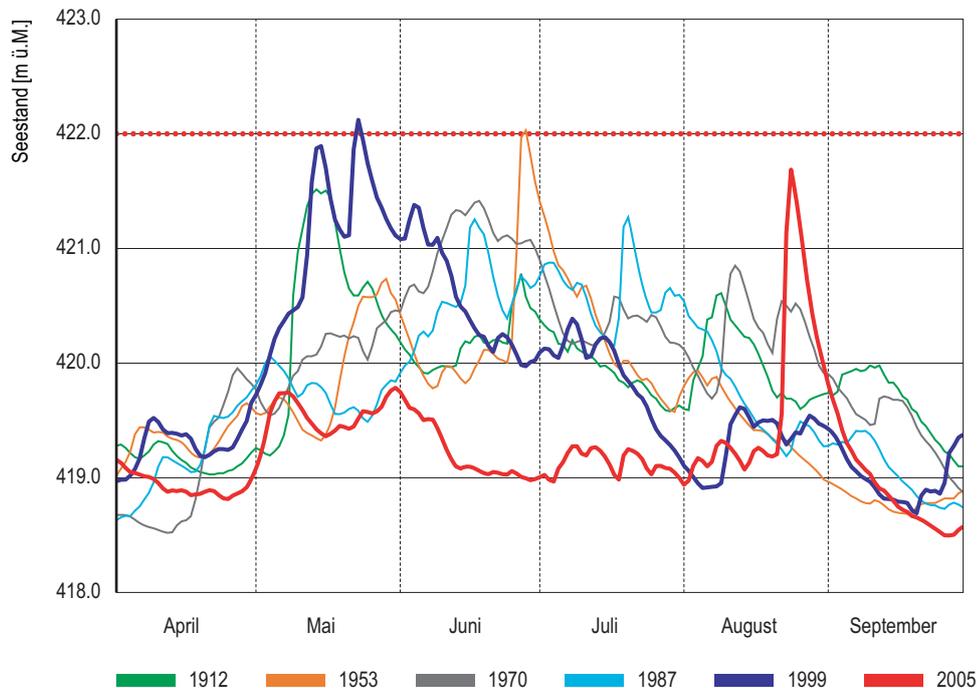
#### 3.5.1 Walensee

Im 19. Jahrhundert wurde die Linth in den Walensee umgeleitet und das Einzugsgebiet um 600 km<sup>2</sup> auf 1061 km<sup>2</sup> vergrössert. Mit 50 Mio. m<sup>3</sup> oder 47'000 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> steht ein bedeutender Rückhalteraum zur Verfügung. Die Hochwassergrenze von 422.0 m ü. M. wurde in der Beobachtungsperiode 1910 mit 422.39 m ü. M., 1999 mit 422.16 m ü. M. und 1953 mit 422.11 m ü. M. überschritten. Am Walensee lassen sich die Eigenschaften eines nicht regulierten Sees mit grossem Rückhaltevolumen deutlich aufzeigen. Aus Abb. 3.4 ist das Verhalten des Sees bei verschiedenen Hochwassertypen erkennbar. Im Winter stellt sich wegen der kleinen Zuflüsse ein tiefer Seespiegel ein, der mit dem zunehmenden Schmelzwasser im Frühjahr ansteigt, was besonders deutlich für das Jahr 1999 zu sehen ist. Im Jahr 2005 blieb der Wasserspiegel bei Zuflüssen zwischen 60 und 80 m<sup>3</sup>/s bis Mitte August ungewöhnlich tief. Am 22. August erhöhten sich die

**Walensee mit grossem Rückhaltevermögen**

Zuflüsse schlagartig. Der Seeanstieg betrug 1.58 m pro Tag, was einer Speicherung von 38 Mio. m<sup>3</sup> oder einer Verminderung des Abflusses um 440 m<sup>3</sup>/s entspricht. Die Ausflusskapazität im Bereich der Seestände von 421–422 m ü. M. beträgt 180–280 m<sup>3</sup>/s. Die Hochwasser 1912, 1953 und 2005 wurden durch eine grosse etwa drei bis fünf Tage andauernde Spitze gebildet. Hingegen setzten sich die Hochwasser von 1935 und 1999 jeweils aus zwei Wellen zusammen. Dass nicht nur die Zuflussspitze, sondern das Zuflussvolumen über einen längeren Zeitraum wichtig ist, zeigt der Wasserspiegelverlauf von 1970. Ohne ein besonderes Ereignis, sondern nur durch lang andauernde hohe Zuflüsse, die einen gleichförmigen Seeanstieg bewirkten, wurde der achthöchste Seestand erreicht.

Abb. 3.4 > Ganglinien des Seespiegels für ausgewählte Jahre am Walensee.



Tab. 3.6 > Kenngrössen ausgewählter Hochwasser am Walensee (Basis: Tageswerte).

Jahr	1912	1935	1953	1970	1987	1999	2005
Datum	14.05.	31.10.	28.06.	18.06.	19.07.	23.05.	24.08.
Höchststand [m ü. M.]	421.52	421.36	422.11	421.44	421.33	422.16	421.69
max. Anstieg pro Tag [m]	1.04	1.07	1.01	0.16	0.79	0.75	1.58
max. Tageszufluss [m <sup>3</sup> /s]	435	417	560	237	417	479	640
max. 3-Tageszufluss [m <sup>3</sup> /s]	322	334	420	234	281	347	400
max. 5-Tageszufluss [m <sup>3</sup> /s]	298	254	328	230	217	284	300
max. 14-Tageszufluss [m <sup>3</sup> /s]	212	124	216	215	155	253	151
max. Abfluss [m <sup>3</sup> /s]	237	186	285	224	203	280	242

Das Hochwasser vom August 2005 zeigte den deutlich höchsten Tageszufluss (Tab. 3.6), erreichte aber wegen des tiefen Seespiegels keinen Höchststand und klang schnell ab. Die rasche Folge von zwei Hochwasserwellen, wie 1999, stellt die ungünstigste Kombination dar. Wegen der unzureichenden Stabilität der alten Dämme des Linthkanals ist die Dauer der hohen Abflüsse ein wichtiger Risikofaktor, auch dann, wenn kein Rekordwasserstand im See erreicht wird.

### 3.5.2 Sarnersee

Das Einzugsgebiet des unregulierten Sarnersees wurde 1880 durch die Einleitung der grossen Melchaa um 73 km<sup>2</sup> auf 269 km<sup>2</sup> vergrössert. Nach der erfolgten Umleitung wurden verschiedene Varianten zur Erhöhung der Abflusskapazität der Sarner Aa diskutiert, aber nie verwirklicht. Aus der Zeit vor 1880 sind zwar nur wenige und nicht sehr zuverlässige Daten vorhanden, es deutet aber nichts auf ein vergleichbares Hochwasser wie 2005 hin (Scherrer, 2006). Das Verhältnis der Seefläche zum Einzugsgebiet ist eher ungünstig. Das verfügbare Rückhaltevolumen bis zur Hochwassergrenze beträgt dank des normalerweise tiefen Seespiegels 24'000 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>. Die Wirksamkeit des Rückhaltevolumens hängt eng mit der Abflusskapazität zusammen. Diese beträgt beim mittleren Seespiegel von 469.41 m ü. M. rund 10 m<sup>3</sup>/s und bei der Hochwassergrenze von 470.5 m ü. M. etwa 34 m<sup>3</sup>/s. Letzteres entspricht etwa dem Tagesdurchschnitt des jährlichen Hochwassers bzw. dem Doppelten des mittleren Abflusses im Juni. Wie die verschiedenen Projekte zur Vergrösserung der Abflusskapazität zeigen, wurde diese als gering beurteilt, obwohl grosse Schadensereignisse bis 1999 ausgeblieben sind. Die nachfolgende Tab. 3.7 gibt eine Übersicht der Kenngrössen ausgewählter Hochwasser des Sarnersees.

Umleitung vergrössert das Einzugsgebiet

**Tab. 3.7 > Kenngrössen ausgewählter Hochwasser am Sarnersee (Basis: Tageswerte).**

Jahr	1910	1935	1944	1953	1999	2004	2005
Datum	16.6.	30.10.	23.11.	27.06.	14.05.	04.06.	23.08.
Höchststand [m ü. M.]	470.96	470.92	470.92	470.98	471.28	471.17	472.33
Anstieg [m]	1.13	156	127	107	1.08	1.55	2.27
max. Tageszufluss [m <sup>3</sup> /s]		134	130	118	112	170	340
max. 3-Tagesmittel [m <sup>3</sup> /s]	49	43	45	43	56	51	95
max. 5-Tagesmittel [m <sup>3</sup> /s]	44	39	40	39	52	45	80

Das Ereignis vom August 2005 liegt, sowohl in Bezug auf Spitzenzuflüsse als auch bezüglich Zuflussvolumina über mehrere Tage, weit ausserhalb aller Erfahrungswerte. Bei einem derart extremen Zuflussvolumen sind die Rückhaltemöglichkeiten erschöpft. Nur durch eine massive Steigerung der Abflusskapazitäten zusammen mit einer Vergrösserung des Rückhaltes kann ein derartiges Hochwasser mit geringen Schäden beherrscht werden.

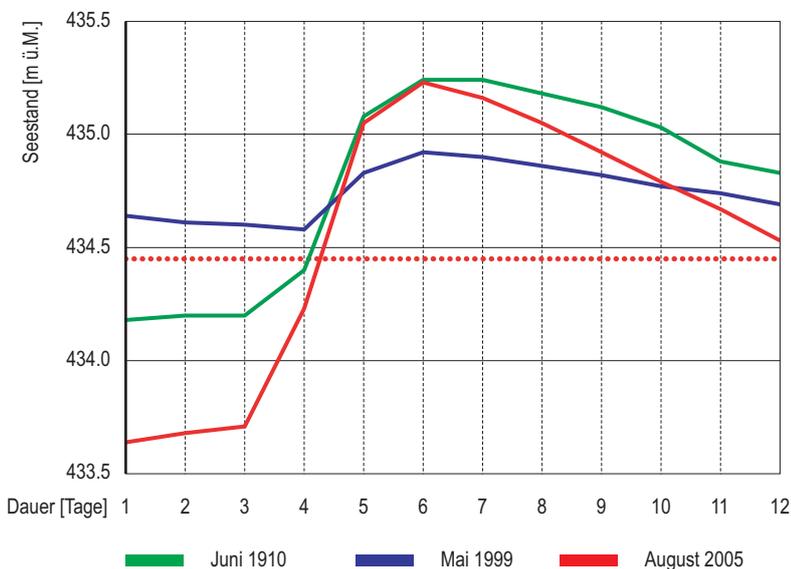
### 3.5.3 Der Vierwaldstättersee

Der 114 km<sup>2</sup> grosse Vierwaldstättersee hat, bezogen auf das 2251 km<sup>2</sup> grosse Einzugsgebiet, mit 31'000 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> eine hohe Speicherkapazität. Kritische Seestände werden daher vor allem bei grossflächigen Niederschlägen und den damit verbundenen grossen Zuflussvolumina erreicht.

Am 24. August wurde mit 435.23 m ü. M. die bisherige Höchstmarke vom 16./17.06.1910 um nur zwei Zentimeter verfehlt, der Pegelstand des Jahres 1999 aber um 31 cm übertroffen. Aus Abb. 3.5 wird erkenntlich, dass nur Dank des tiefen Ausgangswasserspiegels ein neuer Höchstwasserstand vermieden wurde. Die extrem hohen Zuflüsse zeigten sich im raschen Anstieg des Wasserspiegels. Alle Zuflüsse ausser der Reuss verzeichneten neue Höchstwerte bei den Abflussspitzen, so die Muota, die Engelberger Aa und die Sarner Aa. Am 22. August wurde an der Kleinen Emme mit 764 m<sup>3</sup>/s ebenfalls ein neuer Rekordwert gemessen, welcher den bisherigen Höchstwert um 194 m<sup>3</sup>/s übertraf. Dies ist von Bedeutung, da die Kleine Emme bei hohem Wasserstand durch Rückstau den Ausfluss aus dem Vierwaldstättersee massgebend verringert.

Kein Höchststand dank tiefer Ausgangslage

**Abb. 3.5** > Verlauf der Seepegels bei den Hochwassern von 1910, 1999 und 2005 am Vierwaldstättersee (nach beffa tognacca GmbH, 2005a).



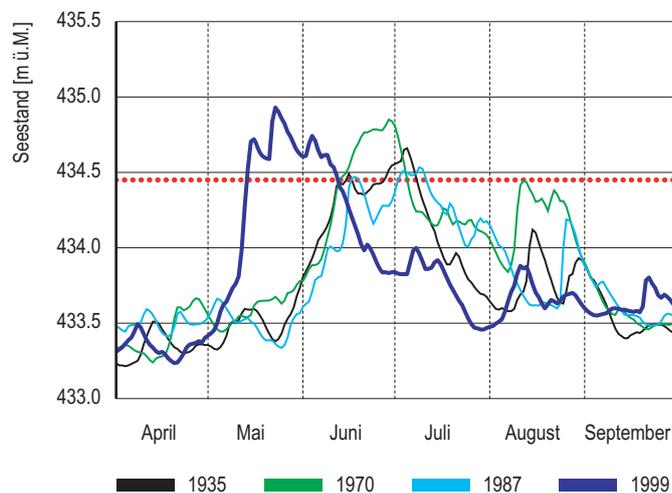
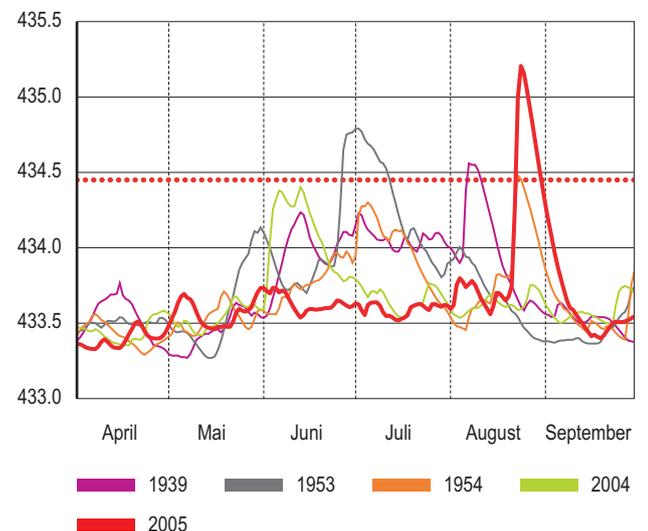
Wie Tab. 3.8 zeigt, bewirkte der Tageszufluss von 1430 m<sup>3</sup>/s im August 2005 einen Anstieg des Sees von 75 cm. Nur 1910 finden sich mit einem Zufluss von 1300 m<sup>3</sup>/s und einem Anstieg von 60 cm vergleichbare Werte (SWV, 1911). 1999 war der maximale Tageszufluss halb so gross wie 2005. Werden die Zuflüsse über eine Dauer von 30 Tagen betrachtet, so ist 1999 das wichtigste Ereignis, gefolgt von 1970, 1935, 1987 und 1953.

**Tab. 3.8 > Kenngrößen ausgewählter Hochwasser am Vierwaldstättersee (Basis: Tageswerte).**

Jahr	1910	1935	1953	1970	1987	1999	2004	2005
Datum Höchststand	17.06.	05.07.	02.07.	29.06.	09.07.	23.05.	13.06.	24.08.
Höchststand [m ü. M.]	435.23	434.66	434.79	434.85	434.53	434.93	434.40	435.21
max. Tageszufluss [m³/s]	1'300	490	862	645	709	742	665	1'430
5-Tageszufluss [m³/s]		391	564	439	430	600	497	784
14-Tageszufluss [m³/s]		363	424	393	346	481	371	417
30-Tageszufluss [m³/s]		342	318	352	325	414	270	297
max. Abfluss [m³/s]		376	386	373	337	426	325	470

Bei den Hochwassern am Vierwaldstättersee können zwei Grundtypen unterschieden werden:

- > Sommerhochwasser mit Abflüssen über 300 m³/s während 30 Tagen (Abb. 3.6a)
- > Hochwasser infolge Starkregen mit mehr als 50 cm Seeanstieg pro Tag (Abb. 3.6b)

**Abb. 3.6a > Lang andauernde Sommerhochwasser am Vierwaldstättersee.****Abb. 3.6b > Durch kurze Starkregen verursachte Hochwasser am Vierwaldstättersee.**

Bei kurz dauernden Hochwassern wie jenem von 2005 kann durch Vorabsenkung eine Verbesserung erzielt werden. Allerdings war der Ausgangswasserspiegel bereits sehr tief, so dass auch ein um 3 Tage früheres Öffnen des Stirn- und Längswehres in Luzern lediglich eine Reduktion um 8 cm bewirkt hätte. Dies hätte allerdings zu einer Erhöhung des bereits sehen Abflusses der Reuss geführt. Bei lang andauernden Hochwassern, wie jenem von 1999 begrenzt die geringere Abflusskapazität bei tiefen Seeständen den Effekt dieser Massnahme.

Eine Verbesserung des Hochwasserschutzes beim Vierwaldstättersee ist vor allem durch eine Erhöhung der Ausflusskapazitäten möglich. Das Speichervolumen ist gross und kann plötzliche Zuflüsse stark dämpfen. Zurzeit werden verschiedene Studien zum Umbau des Wehres und zur Änderung des Reglements durchgeführt. Nachrechnungen (beffa tognacca GmbH, 2005a) zeigten, dass der geplante Umbau des Wehres und die Neufassung des Reglements eine Absenkung des maximalen Wasserstands um 20 cm ermöglicht hätte. Ein neues Wehr würde es ermöglichen, durch mehrfache Änderung der Wehreinrichtung den Ausfluss besser den Zuflussbedingungen und der Wasserführung der Kleinen Emme anzupassen, damit der Abfluss in der Reuss nicht erhöht wird.

Verbesserung durch den Wehrneubau

3.5.4 Der Zürichsee

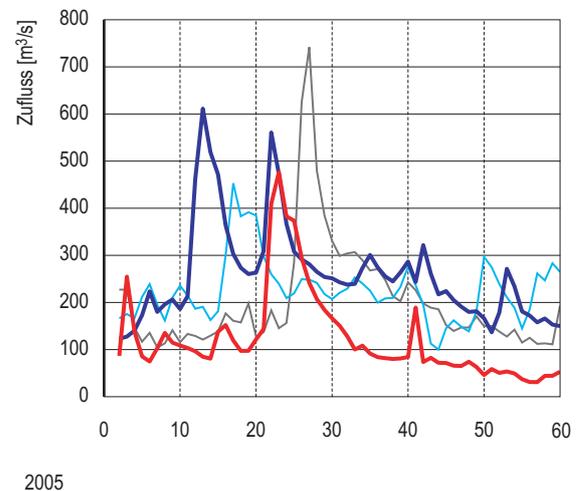
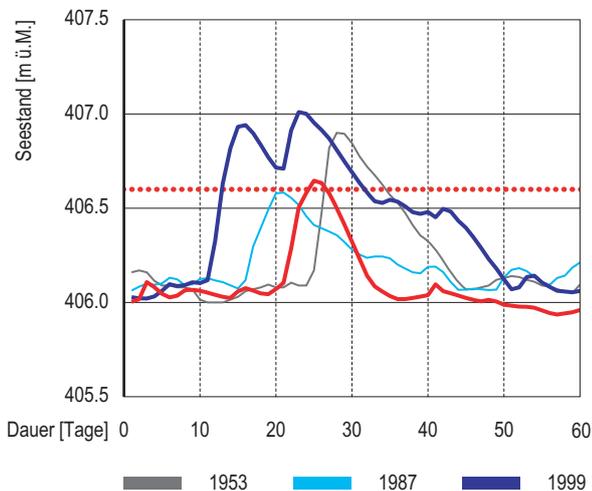
Der Ausfluss des Zürichsees war lange Zeit durch zahlreiche Einbauten eingeschränkt, was zu hohen Wasserständen im See führte. Veränderungen der Höchststände des Sees sind nach dem 1880 erfolgten Umbau der Rathausbrücke und der Vertiefung des Flussbettes der Limmat sowie nach dem 1952 erfolgten Neubau des Wehres Letten eingetreten. Nach 1953 wurde die Hochwassergrenze von 406.60 m ü. M. nur 1999 um 41 cm und 2005 um 6 cm überschritten. 1987 war sie 1 cm darunter.

Bis 1952 Abflusshindernisse im Stadtgebiet

Der Zürichsee ist ein System mit grossen Speichermöglichkeiten. Bezogen auf das gesamte Einzugsgebiet stehen 27'000 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> zur Verfügung. Wird das Speichervolumen auf das Einzugsgebiet ohne den Walensee bezogen, so erhöht es sich auf 64'000 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>, da rund 60% der Zuflüsse bei Hochwasser bereits gedämpft aus dem Walensee kommen. Dies führt zu einer günstigen Überlagerung mit den Zuflüssen aus dem eigenen Einzugsgebiet, welche jenen aus dem Linthkanal vorauslaufen. Bis zur Kote 406.15 m ü. M. wird der Zürichsee so reguliert, dass der Abfluss 220 m<sup>3</sup>/s nicht überschreitet.

Abb. 3.7a > Wasserstände für die bedeutendsten Hochwasser seit 1953 am Zürichsee.

Abb. 3.7b > Zuflüsse für die bedeutendsten Hochwasser seit 1953 am Zürichsee.



Bei den in Abb. 3.7 gezeigten Hochwassern fällt das von 1999 durch die lange Überschreitungsdauer der Hochwassergrenze auf. Der Höchststand wurde erst bei der zweiten Hochwasserwelle erreicht, obwohl deren Zuflussspitze etwas kleiner war. Auffallend sind weiter die deutlich höheren Seezuflüsse im Jahr 1953. Der Vergleich der zufließenden Volumina (Tab. 3.9) zeigt, dass das Hochwasser 1999 erst bei der Betrachtung eines längeren Zeitraumes das Ereignis von 1953 übertrifft. Das Hochwasser von 2005 weist einen hohen Seestand auf und ist mit dem von 1987 gut vergleichbar. Es ist jedoch eindeutig kleiner als die Hochwasser von 1999 und 1953.

Drittgrösstes Ereignis

**Tab. 3.9 > Zuflussvolumina für die bedeutendsten Hochwasser seit 1953 zum Zürichsee.**

Hochwasser		1953	1987	1999	2005
Datum Höchststand		28.06.	21.06.	23.05.	25.08.
1-Tageszufluss	[Mio. m <sup>3</sup> ]	64	39	53	41
7-Tageszufluss	[Mio. m <sup>3</sup> ]	273	213	260	206
14-Tageszufluss	[Mio. m <sup>3</sup> ]	436	354	479	292

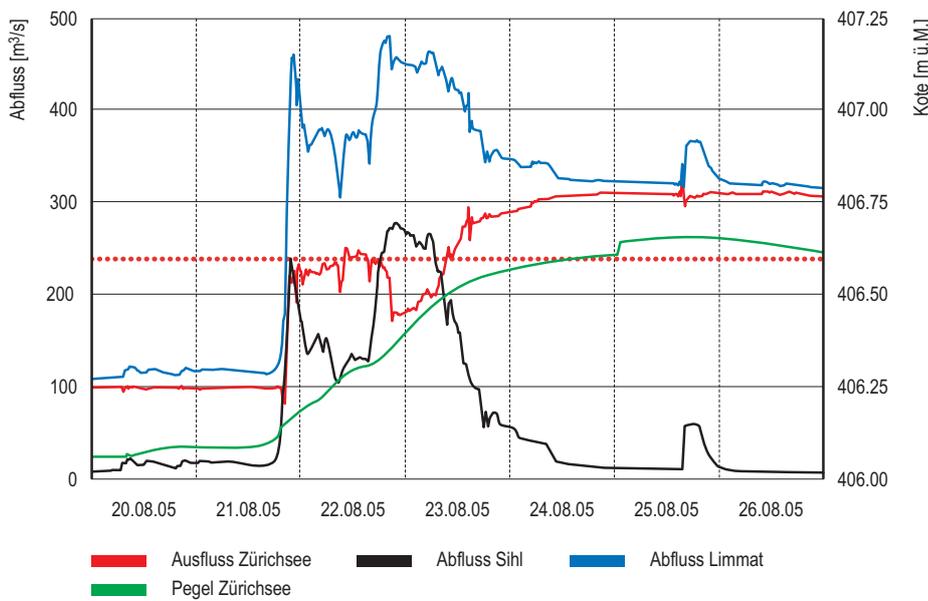
Kurz unterhalb des Wehres Letten und knapp oberhalb der Messstelle Unterhard mündet die Sihl in die Limmat und überlagert sich mit den Abflüssen aus dem See. Die Sihl führt meist nur 10–20 m<sup>3</sup>/s. Bei Hochwasser kann der Abfluss aber 200 m<sup>3</sup>/s überschreiten, wie dies 1953 und 1999 mit 250 m<sup>3</sup>/s und 2005 mit 280 m<sup>3</sup>/s der Fall war. Beim Hochwasser von 1999 ergab sich durch den Ausfluss des Zürichsees von etwa 330 m<sup>3</sup>/s eine gemeinsame Spitze von 590 m<sup>3</sup>/s.

Überlagerung der Abflüsse vom See und der Sihl

Der Zusammenfluss von Limmat und Sihl kurz unterhalb des Zürichsees ist gut mit der Situation bei der JGK vergleichbar, wo die Emme in die Aare mündet. Emme und Sihl zeigen sehr kurze aber hohe Spitzen. Bei der JGK wird auf Grund der «Murgenthal Bedingung» im Falle eines Hochwassers an der Emme der Ausfluss aus dem Bielersee gedrosselt (Abschnitt 3.5.5). Vergleichbares wurde am Zürichsee beim Hochwasser im August 2005 (Abb. 3.8) gemacht. Der Ausfluss aus dem Zürichsee stieg am 22. August von 100 m<sup>3</sup>/s auf 220 m<sup>3</sup>/s. Der gemeinsame Spitzenabfluss von Sihl und Zürichsee erreichte 450 m<sup>3</sup>/s. In der Nacht vom 22./23. August, als die zweite, grössere Spitze der Sihl eintrat, wurde der Ausfluss aus dem Zürichsee um bis zu 100 m<sup>3</sup>/s reduziert, so dass die gemeinsame Spitze nur etwa 470 m<sup>3</sup>/s erreichte. Ohne dieses Manöver wäre die Abflussspitze von 1999 übertroffen worden, da die Sihl ein deutlich grösseres Hochwasser führte. Die Schäden entlang der Limmat wurden durch diese Abminderung gegenüber 1999 verringert, so dass diese Massnahme ihr Ziel erreichte. Der zusätzliche Anstieg des Zürichsees lag infolge dieses ausserordentlichen Rückhaltes von ca. 4 Mio. m<sup>3</sup> bei nur etwa 4 cm.

**Abb. 3.8** > Regulierung des Zürichsees während des Hochwassers vom August 2005 (Oplatka, 2005).

Der Ausfluss aus dem Zürichsee wurde aus den Abflüssen der Limmat und der Sihl berechnet.



### 3.5.5 Die Juragewässer Bielersee, Neuenburgersee, Murtensee

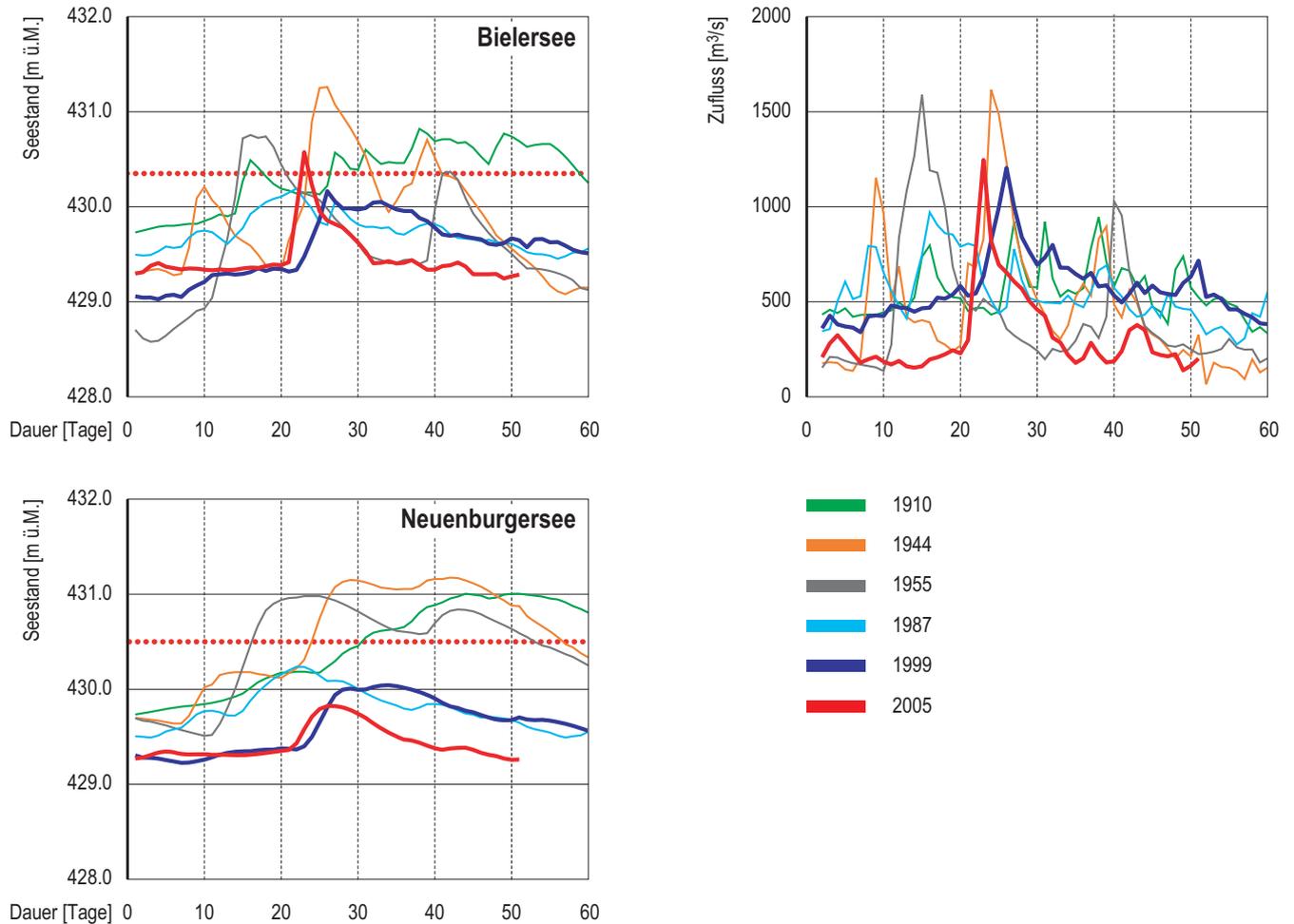
Seit der 1972 abgeschlossenen zweiten Juragewässerkorrektur wurde im August 2005 am Bielersee die Hochwassergrenze von 430.25 m ü. M. mit 34 cm erstmals deutlich überschritten. Das Schlüsselement der zweiten JGK ist der Zihlkanal. Er verbindet den Bielersee von 39.4 km<sup>2</sup> Seefläche mit dem sehr viel grösseren Neuenburgersee von 217.4 km<sup>2</sup> Seefläche. Der Unterschied der Seespiegelstände beider Seen beträgt im Mittel nur 4 cm, weshalb sich bei einem raschen Anstieg des Bielersees die Fliessrichtung im Zihlkanal ändert und der Bielersee in Richtung Neuenburgersee entlastet. So wird dessen grosses Speichervermögen genutzt. Der Broyekanal verbindet den 23 km<sup>2</sup> grossen Murtensee mit dem Neuenburgersee und auch in ihm kann das Wasser in beide Richtungen fliessen. Die wasserstandsabhängige Regulierung der Abflüsse der JGK erfolgt am Bielersee beim Wehr Port. Die Abflüsse werden bis zum Seestand 430.0 m ü. M. auf 600 m<sup>3</sup>/s und bei 430.20 m ü. M. auf 650 m<sup>3</sup>/s begrenzt (Wasserwirtschaftsamt des Kantons Bern, 2005 und 2006). Weiter soll in Murgenthal, nach der Einmündung der Emme, der gesamte Abfluss 850 m<sup>3</sup>/s nicht überschreiten. Da die Hochwasser der Emme in der Regel zwar hoch, aber nur von kurzer Dauer sind, ist eine kurzfristige Drosselung des Ausflusses beim Wehr Port ohne besondere Nachteile möglich.

Abb. 3.9 zeigt, wie sich die Hochwasser im Ausgangswasserspiegel, der Dauer und der Schnelligkeit des Anstieges unterscheiden. Das Hochwasser 1910 fällt durch lang andauernde hohe Zuflüsse auf, weist aber keine eigentlichen Spitzen auf. Zu sehen ist auch, dass die Hochwasser von 1944 und 1955 sowohl in Bezug auf die Zuflussspitze als auch in Bezug auf das Volumen alle anderen Ereignisse übertreffen.

Die Seen der JGK als  
Verbundsystem

Unterschiedliche Hochwasser

Abb. 3.9 > Seestände für verschiedene Hochwasser des Bieler- und Neuenburgersees (links) sowie Gesamtzuflüsse zur JGK (rechts).



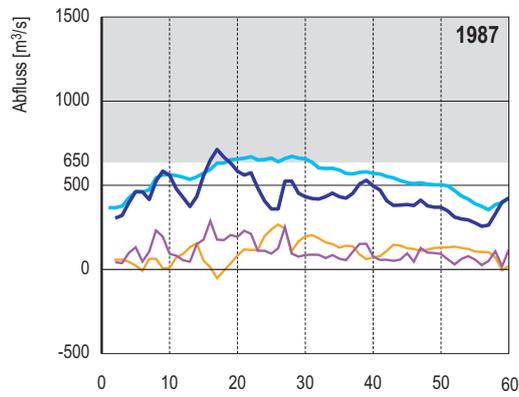
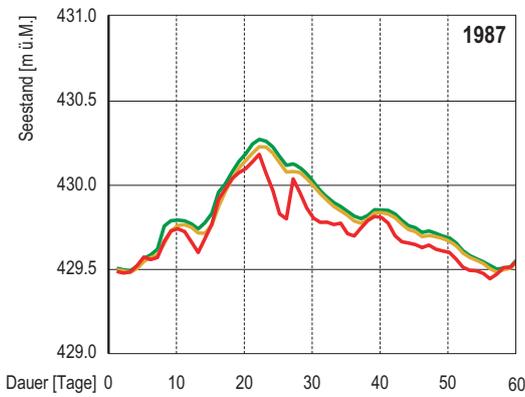
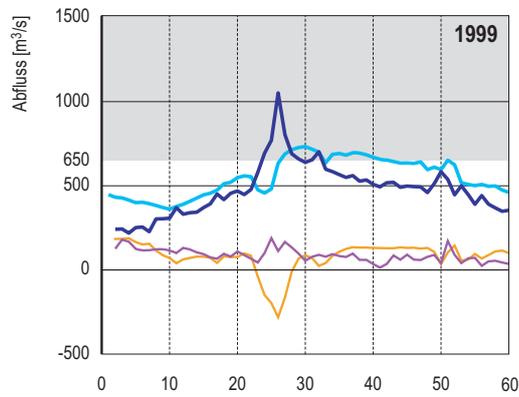
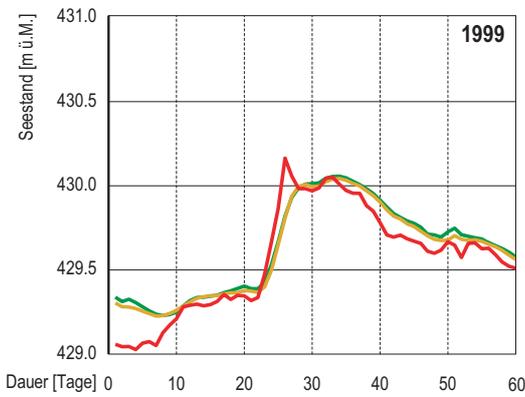
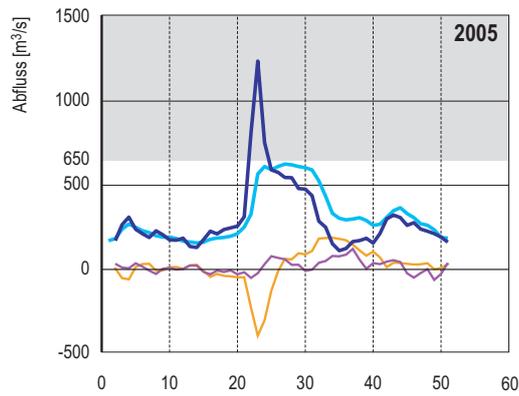
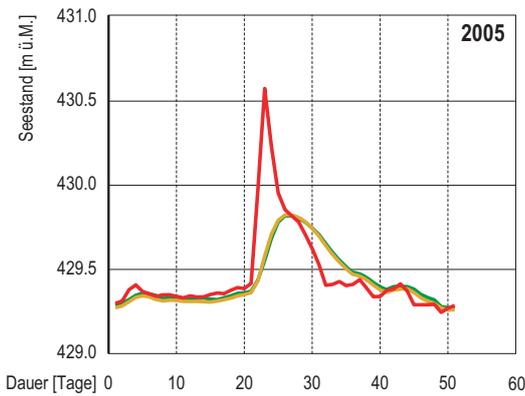
Die Wirkungsweise des Systems der JGK kann gut an den Hochwassern 1987, 1999 und 2005 gezeigt werden (Abb. 3.10). 1987 stiegen Bieler- und Neuenburgersee sehr gleichmässig an. Der Zufluss zum Bielersee konnte im Wesentlichen beim Wehr Port abgeleitet werden. Nur 5 Mio. m<sup>3</sup> wurden an zwei Tagen in den Neuenburgersee umgeleitet. Dessen Anstieg ist vor allem auf die eigenen hohen Zuflüsse zurückzuführen. Das genaue Gegenteil trat beim Hochwasser 2005 ein. Die Zuflüsse zum Neuenburgersee waren sehr niedrig. Dem Bielersee flossen von der Aare vom 21. August–28. August sehr hohe Wassermengen zu, so dass er sich mit 115 Mio. m<sup>3</sup> in den Neuenburgersee entlastete. Am 23. August flossen bei einem Spiegelunterschied von 1 m rund 390 m<sup>3</sup>/s durch den Zihlkanal in den Neuenburgersee. Erst am 31. August wurde der Gleichstand der Wasserspiegel erreicht und die Fliessrichtung kehrte sich wieder um. Da das Hochwasser nur eine, allerdings extreme, Spitze umfasste, erreichte der Neuenburgersee keinen markanten Höchststand und sank relativ rasch ab.

Wechselwirkung zwischen  
Bieler- und Neuenburgersee

**Abb. 3.10a** > Wirkungsweise der JGK für die Hochwasser von 2005, 1999 und 1987. Seestände des Bieler-, Neuenburger- und Murtensees.

**Abb. 3.10b** > Tagesmittelwerte des Zuflusses aus dem Hagneck-Kanal in den Bielersee, des Zuflusses zum Neuenburgersee und des Durchflusses durch den Zihlkanal.

Der Zufluss in den Bielersee wurde aus dem gemessenen Ausfluss beim Wehr Port, der Seespiegeländerung, sowie dem gemessenen Durchfluss im Zihlkanal berechnet. Wenn der Wasserstand im Bielersee höher als der im Neuenburgersee ist, ändert sich im Zihlkanal die Fließrichtung, was in den Diagrammen zu negativen Werten führt. Wenn der Bielersee einen Seestand von 430.2 m ü. M. erreicht, wird der Abfluss beim Wehr Port auf 650 m<sup>3</sup>/s begrenzt.



1999 stiegen die Seen stark an. Da gleichzeitig mit dem starken Anstieg der Zuflüsse auch die Emme Hochwasser führte, musste der Abfluss in Port gedrosselt werden. Der Bielersee stieg in der Folge rasch an und der Zihlkanal wechselte die Fliessrichtung. 72 Mio. m<sup>3</sup> strömten in 6 Tagen in den Neuenburgersee. Die Zuflüsse blieben an beiden Seen weiterhin auf einem hohen Niveau, weshalb der Rückgang der Seen sehr langsam erfolgte (Tab. 3.10).

Das Hochwasser von 1987 zeichnet sich dadurch aus, dass der Zufluss gleichmässiger aus dem gesamten Einzugsgebiet der JGK erfolgte und im Vergleich zu 2005 und 1999 keine ausgeprägten Spitzen aufwies. Entsprechend reagierten alle Seen ähnlich und das Rückhaltevolumen konnte optimal genutzt werden.

**Tab. 3.10 > Kenngrössen ausgewählter Hochwasser an den JGK-Seen (Basis: Tageswerte).**

Jahr		1944	1955	1987	1999	2005
Datum Höchststand (Bielersee)		26.11.	16.01.	22.06.	15.05.	23.08.
max. Tageszufluss	[m <sup>3</sup> /s]	1'615	1'590	970	1'200	1'250
7-Tageszufluss	[m <sup>3</sup> /s]	1'065	1'160	855	900	770
20-Tageszufluss	[m <sup>3</sup> /s]	730	675	690	730	460
max. Abfluss Port	[m <sup>3</sup> /s]	694	604	670	733	626

Bei der Suche nach Verbesserungsmöglichkeiten bei der JGK stehen zwei Überlegungen im Vordergrund:

#### Mögliche Massnahmen

##### > Bessere Ausnutzung des Speichervolumens durch Vorabsenkung

Um grosse Wassermengen aus dem Neuenburgersee effizient zu evakuieren, muss frühzeitig mit dem Absenken begonnen werden, damit die Abflüsse in Port 550 m<sup>3</sup>/s nicht überschreiten. Die grösste Wirkung wird bei einem Hochwasser mit einer Spitze, wie das 2005 der Fall war, erzielt. Durch eine Vorabsenkung um einen halben Meter könnte der maximale Spiegel des Bielersees unter die Hochwassergrenze gesenkt werden. Beim Hochwasser 1999 wurden wegen der erwarteten hohen Abflüsse aus der Schneeschmelze – in Abweichung vom normalen Betrieb – die Abflüsse in Port frühzeitig erhöht, was zu deutlich tieferen Seeständen führte (Kuhlmann, 2006). Generell gilt, dass der Einfluss einer Vorabsenkung umso geringer ist, je grösser die Dauer und das Volumen des Hochwassers sind.

##### > Vergrösserung der Entlastungskapazität in den Neuenburgersee

Diese Überlegung stellte sich beim Hochwasser 2005, um die vorhandenen Speichermöglichkeiten des Neuenburgersees angesichts der extremen Zuflüsse besser ausnutzen zu können. Eine Nachrechnung des Ereignisses 2005 mit einer Verbreiterung des Zihlkanals um 10 m zeigte eine Minderung des Bielerseestandes um 8 cm. Die Auswirkung einer derartigen Massnahme muss noch bei verschiedenen Hochwassertypen überprüft werden.

3.5.6 Der Brienzersee

Der Brienzer- und der Thunersee liegen zwar unmittelbar hintereinander, sind aber nicht wie die JGK hydraulisch miteinander verbunden. Die Retention der Hochwasser im Brienzersee kommt jedoch dem Thunersee zu Gute. Das Rückhaltevolumen beträgt 28'000 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>. Das Hochwasser 2005 übertraf die Hochwassergrenze um 75 cm und lag damit weit über allen vergleichbaren Werten der Jahre 1999, 1910 oder 1891. Obwohl Brienzer- und Thunersee nahe beieinander liegen, gibt es Unterschiede: So war am Brienzersee das Hochwasser 2002 grösser als jenes von 2004. Der Zufluss beim Hochwasser 2005 übertraf jenen von 1999 um 100 % während er beim Thunersee «nur» um 30 % grösser war. Das Ereignis 2005 ist daher am Brienzersee als noch extremer einzuordnen. Die hohen Schäden in Brienz wurden jedoch nicht durch den hohen Seestand, sondern vor allem durch Murgänge verursacht.

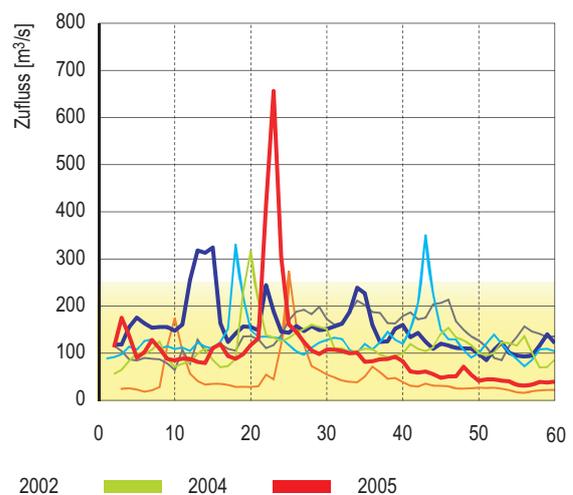
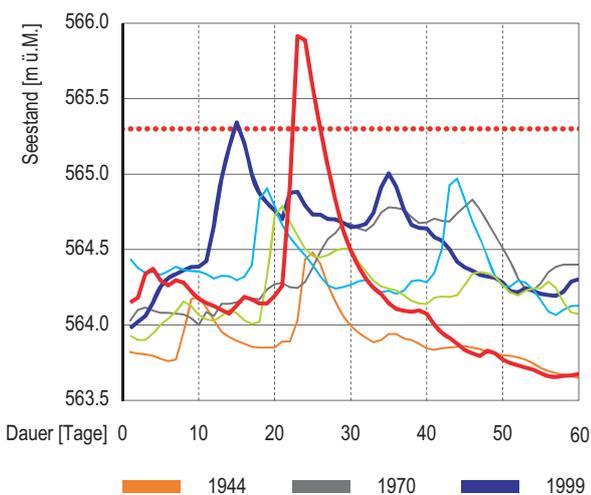
69 cm höher als alle bisherigen Werte

Die Zuflüsse von 444 m<sup>3</sup>/s aus der Aare und 254 m<sup>3</sup>/s aus der Lütchine stellen die Höchstwerte seit 1926 dar. Das Zusammentreffen von extremen Abflüssen ist für beide Gewässer selten und so waren die Zuflüsse des Brienzersees 2005 fast doppelt so hoch wie der zweitgrösste Wert in der 80 Jahre langen Reihe. In Abb. 3.11 sind die Ganglinien ausgewählter Hochwasser dargestellt. 1999 und 1970 fallen, wie bei allen Seen, durch die Dauer und die grossen Volumina auf. Der maximale Seestand des Hochwassers 1970 blieb unter der Hochwassergrenze und die Abflusskapazität von 250 m<sup>3</sup>/s wurde nicht überschritten. Auch das Hochwasser 1944, welches bei der JGK durch seine extremen Zuflüsse auffällt, erreichte am Brienzersee keine ausserordentlichen Wasserstände (Tab. 3.11).

Extreme Zuflüsse

Abb. 3.11a > Seestände für ausgewählte Hochwasser am Brienzersee.

Abb. 3.11b > Zuflüsse für ausgewählte Hochwasser am Brienzersee.



Der Bereich der regulierten Abflüsse ist im rechten Diagramm farbig hinterlegt.

**Tab. 3.11 > Kenngrößen ausgewählter Hochwasser am Brienersee (Basis: Tageswerte).**

Jahr	1944	1970	1999	2002	2004	2005
Datum Höchststand	25.11.	29.06.	15.05.	13.08.	04.06.	23.08.
Höchststand [m ü. M.]	564.48	564.83	565.34	564.97	564.79	565.92
max. Tageszufluss [m <sup>3</sup> /s]	275	214	324	351	317	656
max. 5-Tageszufluss [m <sup>3</sup> /s]	148	195	275	217	206	336
max. 14-Tageszufluss [m <sup>3</sup> /s]	86	188	139	158	134	191
max. Abfluss [m <sup>3</sup> /s]	143	198	267	211	188	314

Um die Abflüsse vom August 2005 auf 250 m<sup>3</sup>/s zu begrenzen, wäre ein Speichervolumen von 54 Mio. m<sup>3</sup> erforderlich gewesen, was einem Seeanstieg von 1.8 m entsprechen würde. Eintreten ist eine Speicherung von 59 Mio. m<sup>3</sup>, weil zum Ereignisbeginn auf Grund des noch tiefen Seestands nur 100 m<sup>3</sup>/s abfliessen konnten. Der Ausfluss steigerte sich jedoch bis zum Höchststand auf 340 m<sup>3</sup>/s. 1999 betrug das den Grenzwert von 250 m<sup>3</sup>/s überschreitende Wasservolumen 17 Mio. m<sup>3</sup> und 2002 rund 7 Mio. m<sup>3</sup>. Ereignisse wie das von 2005, die in ihren hydrologischen Parametern um nahezu 100 % über allen bisher beobachteten Werten liegen, sind nicht schadensfrei zu bewältigen. Verbesserungen können kaum durch eine Erhöhung der Abflusskapazität erreicht werden, da dies den Thunersee zusätzlich belasten würde. Zu prüfen wäre jedoch, wie weit durch eine Neugestaltung von Kanal und Schleuse zwischen Brienersee und Thunersee die Wasserspiegel im Brienersee tiefer gehalten werden könnten, um so das Rückhaltevermögen zu vergrössern, was auch gleichzeitig den Thunersee entlasten könnte.

**Massnahmen sind schwierig****3.5.7 Der Thunersee**

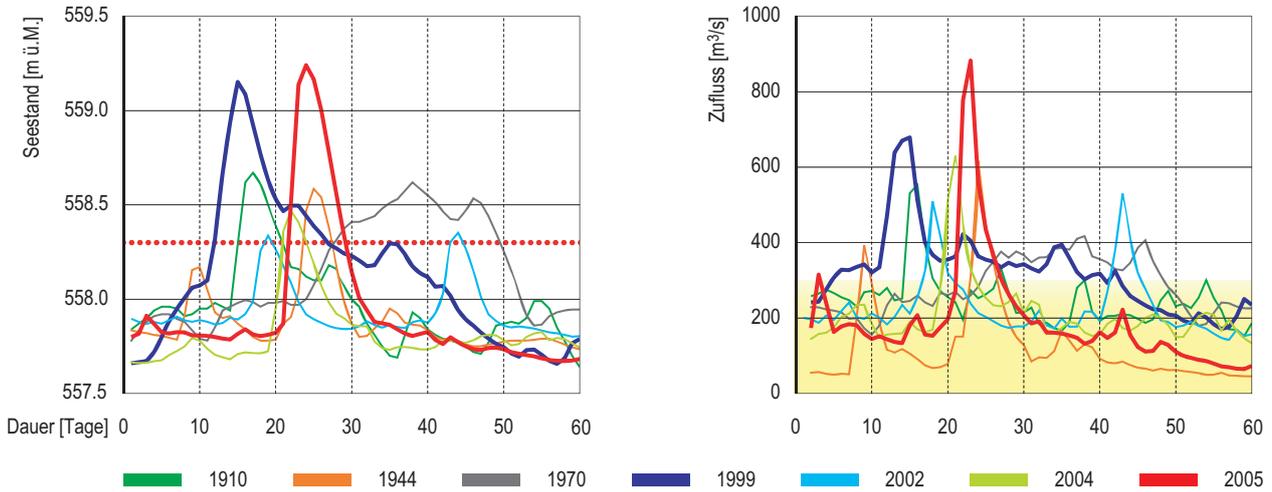
Nach den ausserordentlichen Schäden der Hochwasser von 1999 und 2005 ist der Wunsch nach Verbesserungen am Thunersee gross. Dies insbesondere, weil auch 2002 und 2004 die Hochwassergrenze überschritten wurde. Der Handlungsbedarf ist unübersehbar, wobei aber nicht nur die Häufigkeit sondern vor allem das Ausmass der Überschreitung der Hochwassergrenze das Auffallende ist.

**Häufige Überschwemmungen**

Der Verlauf einiger grosser Hochwasser ist aus Abb. 3.12 ersichtlich. Tab. 3.12 gibt eine Übersicht der wichtigsten Kennzahlen dieser Ereignisse. Der Seespiegel steigt markant an, wenn ein Zufluss von 300 m<sup>3</sup>/s überschritten wird. Deutlich erkennbar sind die verschiedenen Formen der Hochwasser. Die Extreme sind 2005 mit einer sehr hohen Spitze und 1970 mit lang andauernden hohen Abflüssen ohne eigentliche Spitze.

**Jedes Hochwasser ist verschieden**

Abb. 3.12a > Seestände für ausgewählte Hochwasser am Thunersee. Abb. 3.12b > Zuflüsse für ausgewählte Hochwasser am Thunersee.



Der Bereich der regulierten Abflüsse ist im rechten Diagramm farbig hinterlegt.

Tab. 3.12 > Kenngrößen ausgewählter Hochwasser am Thunersee (Basis: Tageswerte).

Jahr	1910	1944	1970	1999	2002	2004	2005
Datum Höchststand	16.06.	25.11.	21.06.	15.05.	13.08.	05.06.	24.08.
Höchststand [m ü. M.]	558.67	558.59	558.62	559.15	558.35	558.47	559.24
max. Tageszufluss [m³/s]	553	617	417	679	530	630	883
max. 5-Tageszufluss [m³/s]	411	395	396	594	383	441	604
max. 14-Tageszufluss [m³/s]	315	225	375	454	278	315	360
max. Abfluss [m³/s]	368	385	392	559	385	402	551

Die Problematik der Seeregulierung kann am Vergleich der Hochwasser 2005 und 1999 aufgezeigt werden (vgl. auch Abb. 3.1). Die Spitze der Zuflüsse war 1999 deutlich kleiner. Bis zum Erreichen des maximalen Seestandes flossen in den 14 Tagen vom 1.–15. Mai dem Thunersee insgesamt 476 Mio. m<sup>3</sup> zu und 404 Mio. m<sup>3</sup> ab, was eine Speicherung von 72 Mio. m<sup>3</sup> ergibt. Beim Ereignis von 2005 sind dem Thunersee in 7 Tagen insgesamt 261 Mio. m<sup>3</sup> zu- und gleichzeitig nur 191 Mio. m<sup>3</sup> abgeflossen, was eine nahezu identischen Speicherung von 70 Mio. m<sup>3</sup> ergibt. Der Höchststand wurde 2005 bereits nach 5 Tagen, 1999 erst nach 13 Tagen erreicht. Dass der Wasserspiegel 2005 um 9 cm höher lag, ist auf den leicht höheren Ausgangswasserspiegel zurückzuführen. Der Umkehrschluss, bei dem ein noch tieferer Ausgangswasserspiegel 1999 auch zu einem tieferen Höchststand geführt hätte, darf jedoch nicht gezogen werden. Die moderaten, aber immer noch über der Abflusskapazität liegenden Zuflüsse bis etwa zum 8. Tag, beanspruchten bereits Speicherraum. Ein tieferer Ausgangsspiegel hätte die Abflusskapazität, die ja vom Seespiegel abhängig ist, in dieser Periode reduziert, so dass am 9. Tag, als die eigentliche Hochwasserwelle einsetzte, nur ein unwesentlich anderer Ausgangszustand eingetreten wäre. Bei so hohen Zuflüssen wie

Problematik Seeregulierung

2005 ist wegen des raschen Spiegelanstieges und der kurzen Dauer dieser Phase die verringerte Abflusskapazität von geringerem Einfluss.

Das Dilemma am Thunersee ist, dass sowohl Speicherraum als auch Abflusskapazität begrenzt sind. Zum Schutze der Unterlieger, also der Stadt Bern, sollen die Spitzenabflüsse nicht erhöht werden und einer Vergrösserung des Speicherraumes durch eine Vorabsenkung der Seestände sind Grenzen gesetzt. Da mit der Absenkung derzeit auch eine Verringerung der Abflusskapazität verbunden ist, tritt, wie die obigen Ausführungen zeigen, bei lang andauernden Hochwassern keine Verbesserung ein. Um Handlungsmöglichkeiten zu schaffen, muss die Abflusskapazität erhöht werden. Der Kanton Bern untersucht deshalb eine Lösung mit einem Stollen, um die Abflusskapazität bei Seeständen zwischen 557.5 m ü. M. und 558.0 m ü. M. zu erhöhen. Dadurch kann vor dem Eintreffen der Zuflussspitze temporär Speicherraum geschaffen bzw. der Seeanstieg hinausgezögert werden. Um die Abflüsse der Aare in Bern zu begrenzen, ist zeitweise eine Drosselung des Stollenabflusses notwendig. Das vorliegende Projekt ermöglicht bedeutende Verbesserungen bei lang andauernden Hochwassern. Wenn bei geringen Zuflüssen aus dem Zwischeneinzugsgebiet die volle Kapazität des Stollens mit 100 m<sup>3</sup>/s bzw. 9 Mio. m<sup>3</sup>/Tag ausgenutzt wird, kann in 3–5 Tagen ein zusätzlicher Speicherraum von 30–40 Mio. m<sup>3</sup> geschaffen werden. Bei Ereignissen mit Zuflussvolumen von 140 bzw. 115 Mio. m<sup>3</sup> in zwei Tagen, wie sie 2005 bzw. 1999 beobachtet wurden, können zwar noch Verbesserungen erzielt werden, ein deutliches Überschreiten der Hochwassergrenze kann jedoch nicht verhindert werden. In Ergänzung ist zu prüfen, ob und wie weit der Brienersee in eine gemeinsame Regulierung einbezogen werden kann, um dort durch tiefere Sommerwasserstände mehr Rückhalteraum zu schaffen. Unbedingt sind in den gefährdeten Gebieten die Massnahmen des Objektschutzes weiterzuführen.

**Verbesserungsmöglichkeiten**

### 3.5.8 Der Zugersee

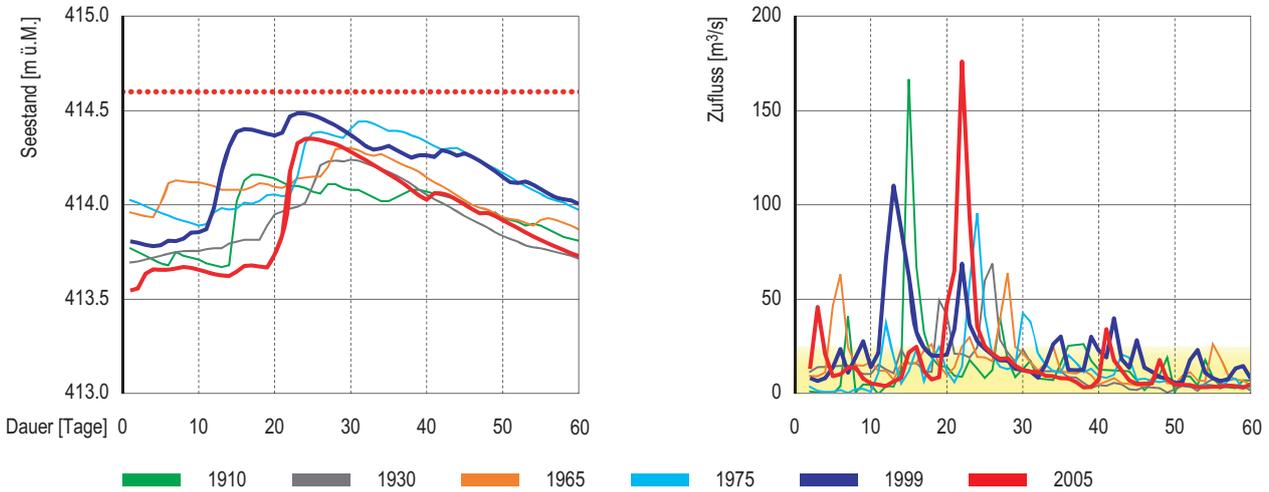
Der Zugersee weist von allen grossen Voralpenseen das grösste Speichervermögen auf und reagiert entsprechend träge auf Hochwasser. Sein Einzugsgebiet ist etwa gleich gross wie jenes des Sarnersees, aber die Seefläche ist 5-mal grösser und zudem sind auch die Zuflüsse geringer. Da nicht nahe am Wasserspiegel gebaut wurde, sind kaum Schadensereignisse bekannt und eine Hochwassergrenze wurde erst vor kurzem bei der Erstellung der Gefahrenkarten festgelegt. Diese befindet sich rund 90 cm über dem mittleren Sommerwasserspiegel und bietet ein Rückhaltevolumen von 36 Mio. m<sup>3</sup> (140'000 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>) bzw. von mehr als einem mittlern Monatszufluss (Abb. 3.13).

**Grösstes Rückhaltevermögen aller Seen**

Tab. 3.13 zeigt die Zuflüsse des Zugersees während ausgewählter Hochwasser. Im Vergleich zu den meisten anderen Seen, sind wegen des relativ kleinen Einzugsgebietes die Spitzenzuflüsse von kurzer Dauer. Der Rückgang des Seespiegels erfolgt wegen der grossen Seefläche und der begrenzten Abflusskapazität jedoch sehr langsam. Insofern ist es ein günstiger Umstand, dass die zweite Hochwasserspitze im Mai 1999 deutlich kleiner als die erste Spitze war, denn sie traf auf einen noch sehr hohen Seewasserstand. Ein Überschreiten der Hochwassergrenze scheint nur bei einer Folge von mehreren Starkniederschlägen möglich.

Abb. 3.13a > Seestände für ausgewählte Hochwasser am Zugersee.

Abb. 3.13b > Zuflüsse für ausgewählte Hochwasser am Zugersee.



Der Bereich der regulierten Abflüsse ist im rechten Diagramm farbig hinterlegt

Tab. 3.13 > Kenngrößen ausgewählter Hochwasser am Zugersee (Basis: Tageswerte).

Jahr	1910	1930	1965	1975	1999	2005
Datum Höchststand	18.6.	19.05.	12.06.	01.09.	23.05.	25.08.
Höchststand [m ü. M.]	414.16	414.24	414.30	414.44	414.49	414.35
max. Tageszufluss [m³/s]	167	68	64	96	110	176
max. 5-Tageszufluss [m³/s]	60	41	37	46	73	83
max. 14-Tageszufluss [m³/s]	32	30	25	22	46	41
max. Abfluss [m³/s]	19	20	22	21	31	29

### 3.5.9 Der Lauerzersee

Der unregulierte Lauerzersee hat ein Einzugsgebiet von 72 km² und eine Seefläche von 3.1 km². Zu- und Ausflüsse werden nicht regelmässig gemessen, sondern müssen aus den Seeständen und der Ausflussgeometrie rekonstruiert werden. Beobachtungsreihen liegen von 1914–1936 und 1984–2005 vor. Nachfolgende Tab. 3.14 zeigt die grössten Hochwasser dieser Messreihe.

Ähnliches Auftreten von Hochwasser wie am Sarnersee.

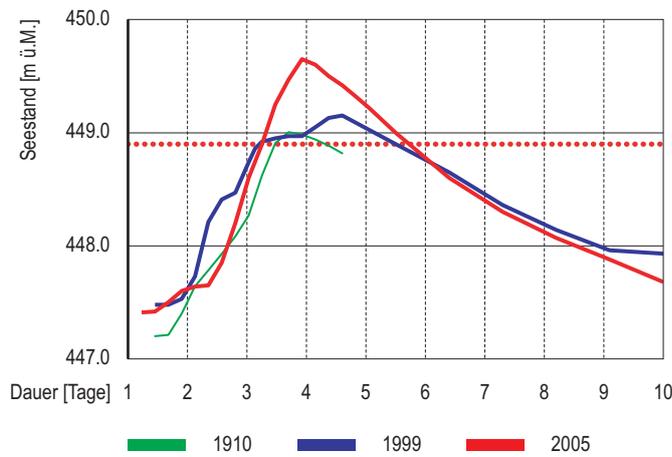
Tab. 3.14 > Wasserstände ausgewählter Hochwasser am Lauerzersee.

Jahr	1930	1935	1999	2004	2005
Höchststand [m ü. M.]	448.85	449.00	449.15	448.70	449.65

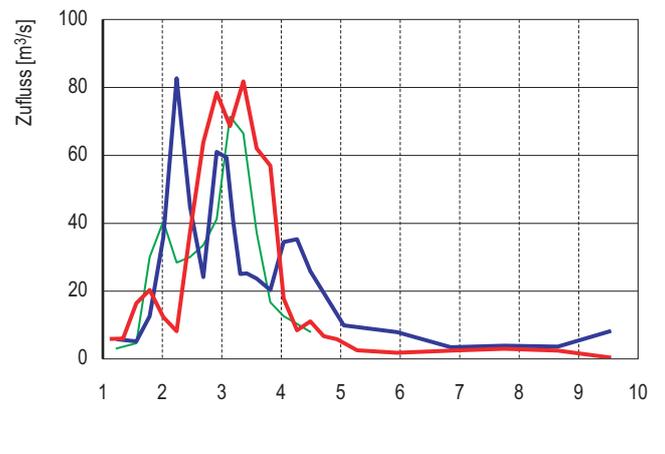
Eine Hochwassergrenze ist hier nicht definiert, liegt jedoch etwa bei 448.70 m ü. M., was ein Rückhaltevolumen von 4.4 Mio. m³ über dem mittleren Juniwasserstand ermöglicht. Bezogen auf das Einzugsgebiet ist das Speichervolumen mit rund

$60 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{km}^2$ , abgesehen vom Zugersee, grösser als bei anderen Seen, was zu einer ausserordentlichen Dämpfung der Zuflussspitzen führt. Der Verlauf des Seespiegels und der rekonstruierten Zuflüsse ist aus Abb. 3.14 ersichtlich.

**Abb. 3.14a** > Seestände für die drei grössten beobachteten Hochwasser am Lauerzersee (nach beffa tognacca GmbH, 2005b).



**Abb. 3.14b** > Zuflüsse für die drei grössten beobachteten Hochwasser am Lauerzersee (nach beffa tognacca GmbH, 2005b).



Mit über 2.2 m Anstieg liegt der Lauerzersee in der gleichen Grössenordnung wie die anderen nicht regulierten Seen Walensee und Sarnersee. Im Unterschied zum Sarnersee sind die Zuflussspitzen aller drei Ereignisse in der gleichen Grössenordnung und auch die Volumina von 2005 und 1999 unterscheiden sich nicht so deutlich. Ein Spitzenzufluss von  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  entspricht einem spezifischen Abfluss von  $1.1 \text{ m}^3/\text{s km}^2$ . Die spezifischen Zuflüsse zum Sarnersee liegen für 2005 bei  $1.26 \text{ m}^3/\text{s km}^2$  (2005) und  $0.42 \text{ m}^3/\text{s km}^2$  (1999), was die ausserordentliche Stellung des Hochwassers August 2005 am Sarnersee unterstreicht.

### 3.6

## Erkenntnisse

Für die grossen Voralpenseen war das Hochwasser vom August 2005 ein kurzes, aber sehr intensives Ereignis, das insbesondere am Sarnersee, Thunersee, Brienersee und Bielersee zu Rekordwasserständen führte. Die Intensität des Ereignisses nahm gegen Osten hin ab (Kap. 1). Der Vierwaldstättersee blieb knapp unter der bisherigen Rekordmarke von 1910, der Zürichsee erreichte den dritthöchsten Stand seit 1950 und blieb bei den Zuflüssen unter den Werten von 1953 und 1999. Der Sempachersee erreichte den vierthöchsten Wert. Im Gegensatz dazu wurde am Greifensee ein zweijährliches Ereignis nur knapp überschritten und am Bodensee konnte mit dem Rang 125 in der 140 Jahre langen Messreihe einer der tiefsten Seehöchststände überhaupt beobachtet werden.

### Höchststände

Ausserordentlich waren die grossen Zuflussvolumina innerhalb von 2–5 Tagen, die zu extrem raschen Seeanstiegen führten. Am Walensee, Sarnersee und Brienersee betrug der Seeanstieg über 1 m pro Tag, am Vierwaldstättersee, Thunersee und Bielersee zwischen 60 und 80 cm. Die maximalen täglichen Zuflussvolumina betragen zum Teil das Doppelte der bisher beobachteten Werte und erreichten, bezogen auf das Einzugsgebiet, Werte von über 50 mm/Tag.

**Zuflussvolumina**

Die Seen mit grossen Speichermöglichkeiten konnten die Ausflüsse drastisch reduzieren. Am Zugersee mit dem grössten Rückhaltevermögen betrug der maximale Ausfluss aus dem See nur 15% des Zuflusses, beim Thunersee mit dem geringsten Speichervermögen waren es 60%. Im Mittel wurden die Zuflüsse mehr als halbiert. Über alle Seen betrachtet betrug der Rückhalt an den fünf wichtigsten Tagen rund 720 Mio. m<sup>3</sup>. Dies entspräche beispielsweise einer Überflutung des Kantons Solothurn um gut 90 cm.

**Minderung der Abflüsse auf die Hälfte**

Die Möglichkeiten der Seebewirtschaftung zeigen sich beim Vergleich des Hochwassers vom August 2005 mit jenem vom Mai 1999. Letzteres war durch lange Dauer und grosse Volumina, bei vergleichsweise mässigen Zuflussspitzen gekennzeichnet, hat aber ähnliche Seestände verursacht. Hohe Zuflussspitzen müssen durch ausreichendes Speichervolumen, lang andauernde Zuflüsse und durch eine ausreichende Abflusskapazität abgefangen werden. Die kurzfristige Schaffung von Speicherraum durch Vorabsenkung kann in manchen Fällen eine Minderung bringen, erfordert jedoch auch bei tiefen Seeständen eine hohe Abflusskapazität und wirkt vor allem bei kurzen intensiven Ereignissen wie 2005.

**Möglichkeiten der Seebewirtschaftung**

In allen Fällen muss das Bewusstsein herrschen, dass sowohl der Speicherraum als auch die Abflusskapazität begrenzt sind. Das Ereignis vom August 2005 hat in vielen Fällen diese Grenzen aufgezeigt. Vereinfachend kann gesagt werden: Je grösser der Zufluss, umso weniger kann das Ereignis beeinflusst werden. Dies ist für die Betroffenen enttäuschend, wird doch gerade bei den grossen Ereignissen mit dem grössten Schaden am ehesten Schutz erwartet. Deshalb gilt für jeden, der in der glücklichen Lage ist, nahe am Seeufer zu wohnen, sich durch geeignete Abdichtung des Gebäudes gegen hohe Grundwasserstände und hohe Seespiegel zusätzlich zu schützen. In diesem Sinne schliesst beispielsweise die Gebäudeversicherung in den Kantonen Zürich und Freiburg Hochwasserschäden aus der Versicherungsdeckung aus, wenn unterhalb einer festgelegten Kote oder in einer bestimmten Zone nahe am Seeufer gebaut wird.

**Eigenvorsorge der Seeanstösser**

Seen beeinflussen den Ablauf von Hochwasser massgeblich und können daher für ein gezieltes Hochwassermanagement eingesetzt werden. Dabei sind die Anliegen der Seeanstösser und Unterlieger in gleichem Masse zu berücksichtigen. Gerade an Seen spielen neben der Hochwassersicherheit aber auch andere Aspekte (Ökologie, Landschaftsschutz, Tourismus) eine wichtige Rolle. Für den Hochwasserschutz an Seen gelten dabei folgende Grundsätze:

- > Um plötzliche hohe Zuflüsse aufzufangen, ist genügend Speicherraum erforderlich. Dieser ermittelt sich aus der Differenz zwischen den Zuflussvolumina an einem oder mehreren Tagen und den Abflusskapazitäten.

**Grundsätze des Hochwasserschutzes an Seen**

- > Ausreichende Abflusskapazitäten sind auch bei tiefen Seeständen nötig, um den Speicherraum für die wirklich grossen Hochwasserzuflüsse freihalten zu können.
- > Der Selbstschutz durch eine geeignete hochwassersichere Bauweise muss weiterhin gefördert werden, da die Natur immer wieder die von uns festgelegten Grenzwerte übertrifft.

Auch heute gilt noch, was K. Welti (1885) anlässlich der geplanten Massnahmen am Zürichsee schrieb: «Es wäre deshalb unrichtig, mit Rücksicht auf die bevorstehende Reduktion hoher Wasserstände, künftige Landanlagen und irgendwelche Bauten am Seeufer niedriger zu halten, als nach den bisherigen Erfahrungen zweckmässig erschien. Ein solches Verhalten müsste jede Verbesserung illusorisch machen, und mit Klagen über schlechte Abflussverhältnisse würde es kein Ende nehmen.» Was vor 120 Jahren Gültigkeit hatte, sollte auch noch heute befolgt werden.

Im zweiten Teil der Ereignisanalyse sollen eine systematische Statistik der Seezuflüsse in Funktion der Ereignisdauer erarbeitet und damit weiter gehende statistische Grundlagen für die Seeregulierung bereitgestellt werden. Dies erlaubt eine vertiefte Bearbeitung der Frage, ob für die verschiedenen Seen auf Grund der unterschiedlichen Dauer und der dazugehörigen Wahrscheinlichkeit die Seeregulierung eher mittels einer Erhöhung der Speicherung oder einer Erhöhung der Abflusskapazität durchzuführen ist.

Ausblick

#### Literatur:

Kuhlmann U. 2006: Regulierung des Juragewässersystems: Möglichkeiten der modellgestützten Optimierung von Betriebsparametern. Vortrag April 2006 TK Consult AG Zürich.

SWV 1991: Die Überschwemmungen im Jahre 1910. Jahrbuch des schweizerischen Wasserwirtschaftsverbandes, Zürich.

Wasserwirtschaftsamt des Kantons Bern 2006: Die Regulierung der Jurarandseen.

Wasserwirtschaftsamt des Kantons Bern 2005: Das Sommerhochwasser 2005.

Welti K. 1885: Bewegungen des Wasserstandes des Zürichsees während 70 Jahren und Mittel zur Senkung seiner Hochwasser, Zürich.

#### Unveröffentlichte Studienberichte:

beffa tognacca GmbH 2005a: Reusswehr Luzern, Hochwasser 2005, im Auftrag des Kantons Luzern.

beffa tognacca GmbH 2005b: Analyse Hochwasser 2005 im Auftrag des Kantons Schwyz.

Oplatka M. 2005: Baudirektion Kanton Zürich, AWEL, Verschiedene Berichte zum Hochwasser vom August 2005.

Scherrer AG 2006: Hydrologische Grundlagen für den Hochwasserschutz am Sarnersee und an der Sarneraa im Auftrag des Kantons Obwalden, Juni.

Tiefbauamt des Kantons Bern 2004: Koordinierter Hochwasserschutz Thun- Bern.

Tiefbauamt des Kantons Bern 2005: Studie Extremereignisse im Einzugsgebiet der Aare, Bericht über das Hochwasser 2005.



Stéphanie André, Erik Bollaert (avec une contribution de Armin Petrascheck et Gian Reto Bezzola)

## 4 > Effet des ouvrages d'accumulation

*La modélisation numérique des 4 réseaux hydrographiques de la Sarine jusqu'à Laupen, l'Aare jusqu'à Brienzwiler, la Reuss jusqu'à Seedorf et la Linth jusqu'à Mollis avec et sans ouvrages d'accumulation a permis de déterminer l'ensemble des débits entrant et sortant non mesurés dans les retenues et d'estimer l'effet de chaque retenue pendant la crue d'août 2005. Il ressort que, pendant la crue du 21 au 24 août 2005, ces ouvrages d'accumulation ont stocké de 10% (Reuss) à 22% (Aare) du volume de la crue et ont permis de laminier la pointe de la crue de 70 m<sup>3</sup>/s (Reuss) à 137 m<sup>3</sup>/s (Aare).*

### 4.1 Objectifs et Méthodologie

L'étude réalisée sous mandat de l'Office Fédéral de l'Energie (AquaVision Engineering, 2006), a pour objectif d'estimer l'influence des ouvrages d'accumulation lors des intempéries d'août 2005 sur (voir fig. 4.1) :

**But de l'étude**

- > La Sarine jusqu'à Laupen, en aval du Lac de Schiffenen,
- > L'Aare jusqu'à Brienzwiler, en amont du Lac de Brienz,
- > La Reuss jusqu'à Seedorf, en amont du Lac des Quatre Cantons,
- > La Linth jusqu'à Mollis, en amont du Walensee.

Dans ce cadre, une première étape a consisté à modéliser les quatre tronçons de rivière et leurs ouvrages d'accumulation. Le modèle numérique a été réalisé avec Routing System II (Dubois, 2005) et a été basé sur les données hydrauliques fournies par les exploitants (niveaux des retenues, débits captés, turbinés, évacués, loi hauteur-volume caractérisant la retenue), sur les débits mesurés par l'Office Fédéral de l'Environnement et sur les conclusions d'études antérieures (ARGE Geo7, Hunziker, Zarn & Partner, 2006 et Ingenieurgesellschaft IUB, Hunziker, Zarn & Partner, Emch + Berger, 2006).

**Méthodologie**

Pour chaque ouvrage, les calculs numériques ont permis de déterminer :

- > les débits naturels entrants et sortants non mesurés,
- > les volumes stockés dans les retenues pendant la crue.

De plus, par routage inverse à partir des hydrogrammes mesurés, cette étape de modélisation a permis également d'estimer les débits naturels de l'ensemble des affluents des rivières étudiées.

Dans une seconde étape, les quatre réseaux hydrographiques ont été modélisés sans ouvrages d'accumulation. Cela a consisté à :

- > supprimer les lacs artificiels et les remplacer par un tronçon de routage,
- > supprimer les débits turbinés, pompés, captés, de dotation et ne conserver que les débits naturels mesurés et/ou non mesurés,
- > reconstituer les bassins versants naturels et restituer aux rivières et aux affluents les débits captés par les prises d'eau,

Pour ce dernier point, seul le débit total capté par ouvrage est connu. Le débit capté par prise d'eau est alors supposé proportionnel à la surface du bassin versant correspondant. Ainsi, le débit total capté est réparti et restitué aux affluents et rivières concernés.

La comparaison entre l'hydrogramme sans ouvrages et l'hydrogramme avec ouvrages conduit à l'estimation de l'influence des ouvrages sur le volume de crue stocké et sur le laminage de la pointe de la crue.

#### 4.2 Volumes stockés par les ouvrages d'accumulation

A ce stade de l'étude en cours, les volumes stockés du 21 août 2005 à 0h jusqu'au 24 août 2005 à 24h, résultant de la modélisation par réseau hydrographique, sont donnés dans le tableau 4.1. Les ordres de grandeur des contributions des ouvrages d'accumulation par réseau hydrographique sont donnés aux fig. 4.1 et 4.2.

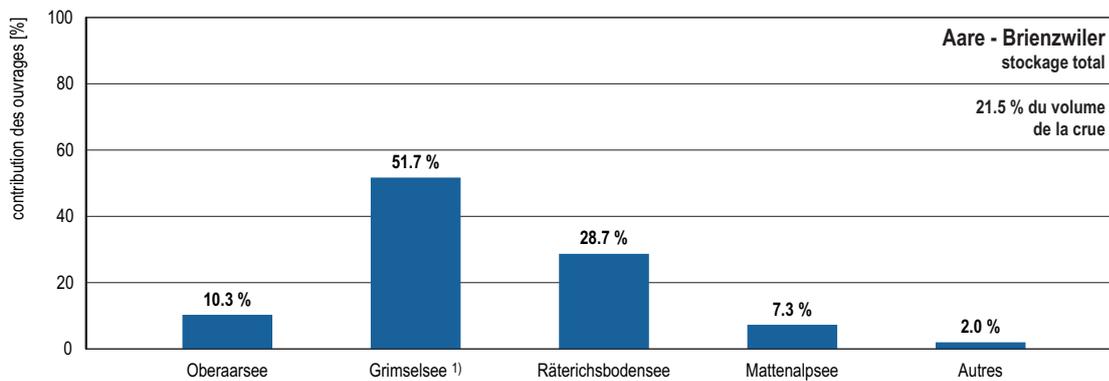
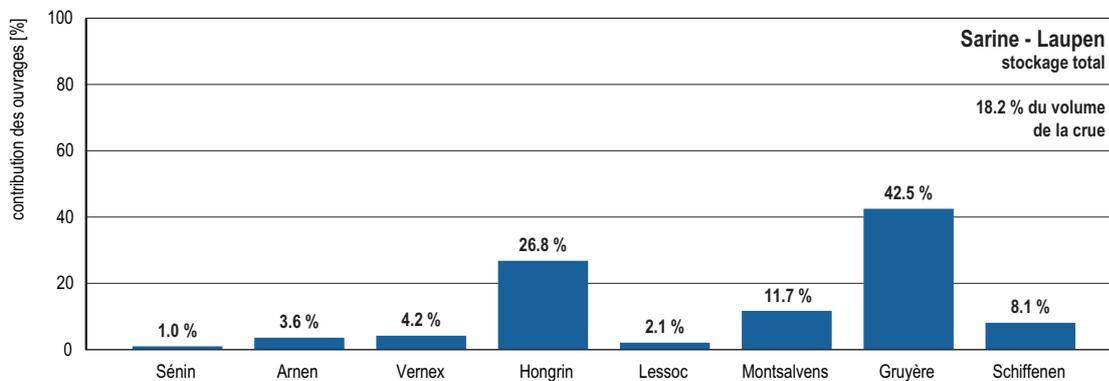
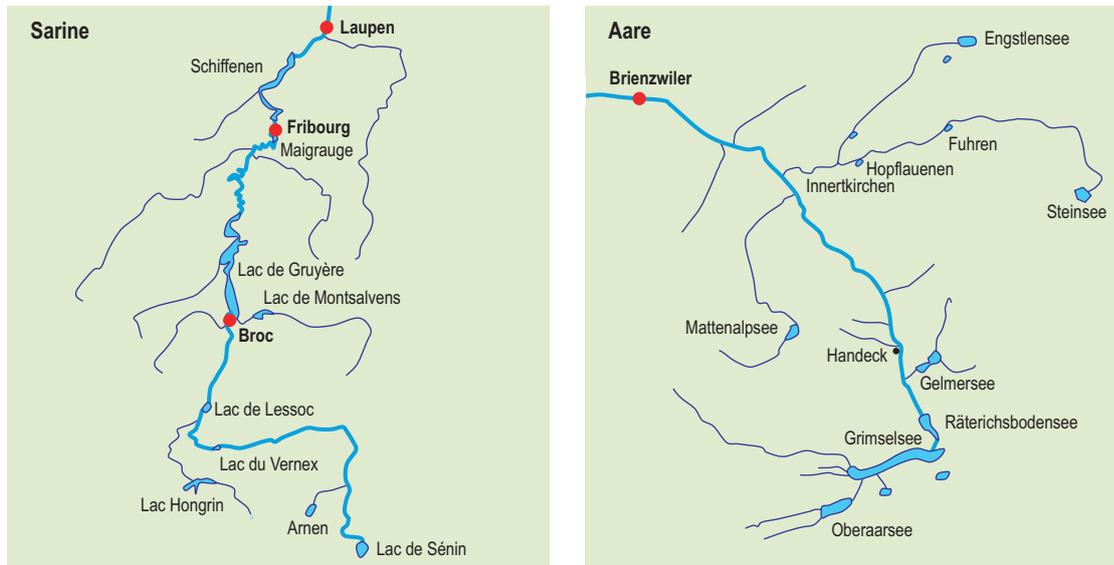
Volumes stockés  
du 21 au 24 août 2005

**Tab. 4.1 > Volume total calculé stocké par les ouvrages d'accumulation du 21 août 2005, 0h au 24 août 2005, 24h.**

Réseau hydrographique	Volume stocké [Mio. m <sup>3</sup> ]	Pourcentage du volume de crue stocké [%]
Sarine et affluents	22.3	18.2
Aare et affluents <sup>1</sup>	18.4	21.5
Reuss et affluents	8.2	10.7
Linth et affluents	10.1	15.1

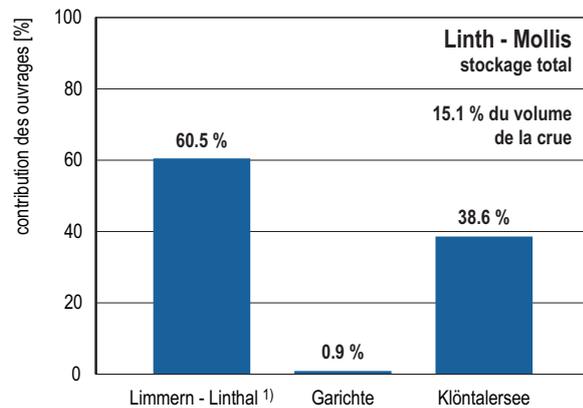
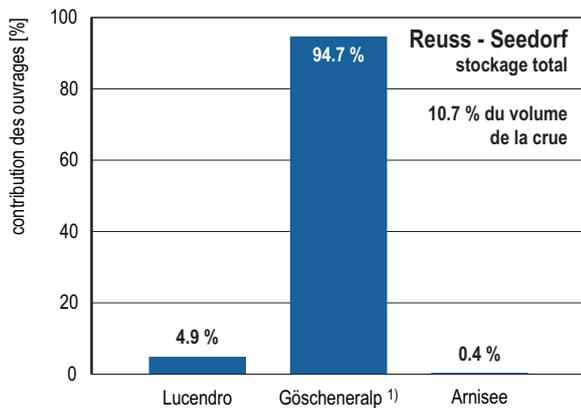
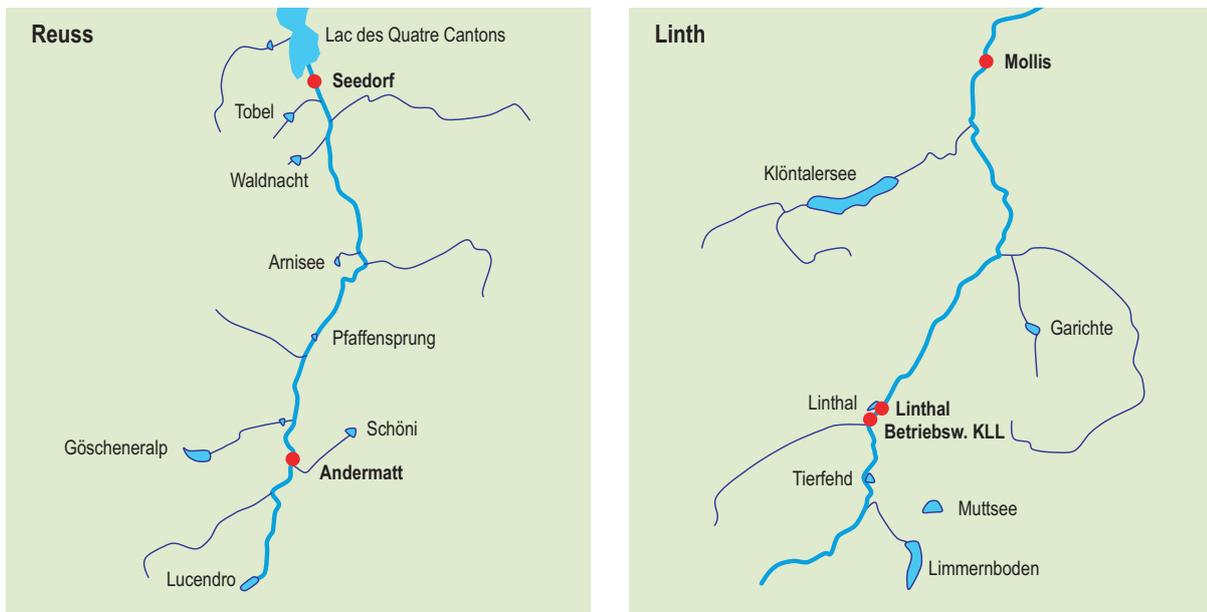
<sup>1</sup> Le niveau du Lac de Grimsel était exceptionnellement bas (environ 20 m en dessous du niveau normal d'exploitation) pendant la crue, à cause de réflexions sur l'usine Grimsel I. Ainsi, le volume stocké dans le Lac de Grimsel est exceptionnellement élevé et ne correspond pas à une situation normale d'exploitation.

**Fig. 4.1 > Bilan des contributions des ouvrages d'accumulation au stockage de la crue du 21 août 2005 (0h) au 24 août 2005 (24h) dans les bassins versants de la Sarine et de l'Aare.**



<sup>1</sup> Avec le niveau du Lac de Grimsel exceptionnellement bas

Fig. 4.2 > Bilan des contributions des ouvrages d'accumulation au stockage de la crue du 21 août 2005 (0h) au 24 août 2005 (24h) dans les bassins versants de la Reuss et de la Linth.



<sup>1</sup> Volume des prises d'eau estimés basés sur la surface des bassins versants

### 4.3 Réduction de la pointe de la crue par les ouvrages d'accumulation

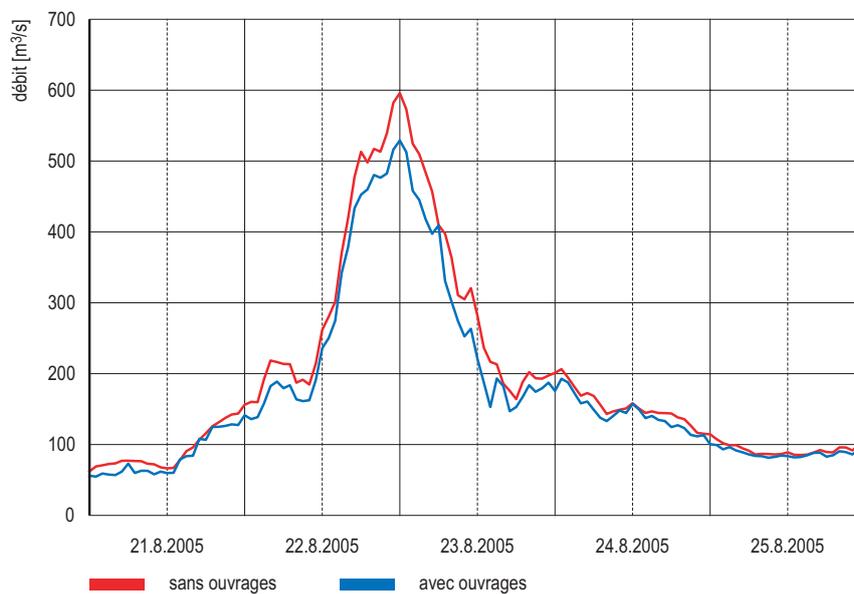
Sans ouvrages, les débits naturels entrant actuellement dans les retenues sont transportés le long des affluents ou dans la rivière même. Ces débits, qui contribuent à alimenter l'hydrogramme de crue, ne sont plus « court-circuités » par les conduites en charge des ouvrages : la vitesse de propagation et le chemin parcouru par la crue sont alors différents. L'ouvrage d'accumulation ne joue donc pas qu'un rôle de stockage, mais aussi un rôle de déphasage de l'arrivée de la pointe de la crue dans la rivière.

Influence des ouvrages sur les hydrogrammes

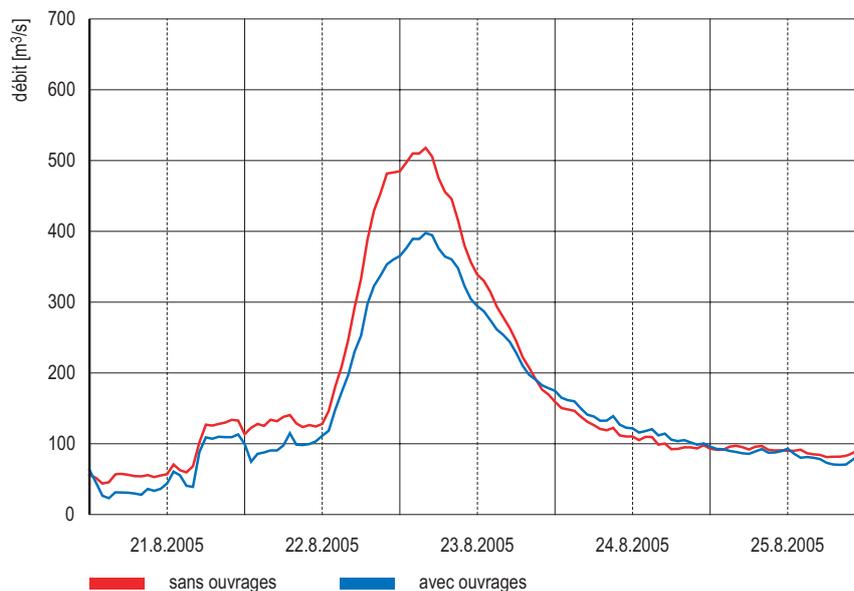
La modélisation numérique des quatre rivières et de leurs affluents sans ouvrages permet de prendre en compte ce routage et donc d'estimer les hydrogrammes naturels en aval de chaque réseau. Ces derniers, représentés à titre d'exemple aux fig. 4.3 et 4.4 pour la Reuss et la Linth, reflètent à la fois l'influence des retenues sur le volume de la crue et sur l'arrivée de la pointe de la crue.

Hydrogrammes sans effet  
des ouvrages

**Fig. 4.3 > Hydrogrammes de crue calculés avec ouvrages et sans ouvrages pour la Reuss (station Reuss-Seedorf).**



**Fig. 4.4 > Hydrogrammes de crue calculés avec ouvrages et sans ouvrages pour la Linth (station de Linth-Mollis).**



La réduction de la pointe de la crue due aux ouvrages est donnée dans le tableau 4.2 pour les quatre rivières.

Réduction des débits de pointe

**Tab. 4.2 > Réduction du débit de pointe de l'hydrogramme de crue d'août 2005 par les ouvrages d'accumulation.**

Station de mesure (voir fig. 4.1 et 4.2)	Diminution du débit de pointe [m <sup>3</sup> /s]	Réduction du débit de pointe [%]
Sarine–Laupen	129	12.2
Aare–Brienzwiler <sup>1</sup>	137	24.0
Reuss–Seedorf	67	11.2
Linth–Mollis	116	22.3

<sup>1</sup> Avec le niveau du Lac de Grimsel exceptionnellement bas

A ce stade de l'étude, les résultats montrent donc que les ouvrages d'accumulation ont eu pour effet une réduction de 11 % (Reuss) à 24 % (Aare) de la pointe de la crue et de 11 % (Reuss) à 22 % (Aare) de son volume.

4.4

#### Effet des ouvrages d'accumulation sur les lacs naturels

Les volumes stockés par les ouvrages d'accumulation ont causé une réduction des débits entrant dans les lacs naturels pendant l'événement d'août 2005. Sans cet effet, les niveaux atteints dans ces lacs auraient été plus élevés. Pour les lacs naturels régulés, les volumes stockés par les ouvrages d'accumulation entre le début de leur hausse et l'atteinte du niveau maximal sont déterminants. Cela correspond, en règle générale, à la période entre le 21 et le 24 août 2005. Pour les bassins versants analysés, les volumes stockés journaliers sont donnés dans le tableau 4.3. Pour les lacs naturels sans régulation, la réduction des débits des affluents par la rétention dans les ouvrages d'accumulation dans la phase précédent l'événement est aussi importante, car elle détermine le niveau du lac au début de l'événement.

Niveaux plus élevés sans ouvrages

Pour quantifier l'effet des ouvrages sur les niveaux du Lac des Quatre Cantons et du Walensee, les hydrogrammes du débit total entrant dans ces lacs ont été déterminés par un calcul de rétention sur la base des débits sortants et des niveaux des lacs mesurés. Ensuite, les débits entrant dans ces lacs (cf. chapitre 3) ont été augmentés par les différences entre les hydrogrammes sans et avec ouvrages montrés dans les fig. 4.3 (pour le Lac des Quatre Cantons) et 4.4 (pour le Walensee). Finalement, par un calcul de rétention avec ces nouveaux hydrogrammes, les niveaux des lacs atteints sans l'effet des ouvrages ont été déterminés. Tous ces calculs se sont effectués sur la base de valeurs horaires. L'effet des ouvrages dans le bassin versant de l'Aare sur les niveaux de Lac de Brienz a été déterminé de manière analogue. L'hydrogramme des débits sortant du Lac de Brienz pour le cas sans effet des ouvrages a ensuite été utilisé pour calculer les niveaux qui auraient été atteints dans le Lac de Thoune pour ce cas. Dû au grand effet d'atténuation obtenu dans les lacs de Brienz et de Thoune, l'influence sur l'Aare à l'aval du Lac de Thoune est plutôt modeste. Pour cette raison, les calculs pour

Quantification de l'effet des ouvrages

le Lac de Biemme tiennent seulement compte de l'effet des ouvrages dans le bassin versant de la Sarine.

Comme le rapport entre les niveaux des lacs et les débits sortant des lacs doit tenir compte de certaines incertitudes, les résultats qui sont donnés au tableau 4.3 sont à considérer comme des valeurs indicatives. En plus, elles ne sont valables que pour l'événement d'août 2005. Il faut mentionner ici, que le niveau maximal du Lac des Quatre Cantons n'a pas seulement été influencé de manière favorable par la rétention voulue dans les ouvrages du réseau de la Reuss dans le canton Uri, mais aussi par les rétentions involontaires dans les plaines de la Reuss près de Schattdorf (inondations du Schächen) et de la Sarner Aa entre Sarnen et le Lac des Quatre Cantons. De même, le niveau du Lac de Brienz a été influencé par les inondations de l'Aare près de Brienz. Le résultat donné au tableau 3 pour le Walensee tient compte du fait, que dans ce lac non-régulé le niveau aurait été de 10 cm plus haut au début de la phase principale de l'événement d'août 2005 sans l'effet des ouvrages. Pour les lacs naturels régulés, l'effet des ouvrages dans la phase précédant l'événement est insignifiant, car le niveau du lac est régulé et donc indépendant du débit entrant.

Résultats

**Tab. 4.3 > Niveau maximal atteint pendant l'événement d'août 2005 et augmentation par calcul du niveau maximal sans l'effet des ouvrages d'accumulation.**

	Niveau maximal août 2005 [m s.m.]	Augmentation sans effet des ouvrages [cm]
Lac des Quatre Cantons	435.23	4
Walensee	421.72	33
Lac de Brienz	566.05	30-35
Lac de Thoune	559.25	12
Lac de Biemme	430.69	9

L'influence sur les cours inférieurs aux lacs considérés ci-dessus est relativement modeste, dû au grand effet d'atténuation déjà réalisé. Ainsi, la pointe du débit sortant du Lac des Quatre Cantons aurait été augmentée que de 473 m<sup>3</sup>/s à environ 495 m<sup>3</sup>/s, au Lac de Thoune de 557 m<sup>3</sup>/s à environ 590 m<sup>3</sup>/s et au Walensee, l'augmentation aurait été de 245 m<sup>3</sup>/s à 274 m<sup>3</sup>/s. Pour cette raison, on a renoncé à quantifier l'influence des ouvrages sur les niveaux du Lac de Zurich et en plus considéré uniquement l'effet des ouvrages dans le bassin versant de la Sarine pour déterminer les niveaux du Lac de Biemme pour le cas sans ouvrages.

Influence modeste sur les lacs plus en aval

4.5

## Bilan

L'analyse de l'effet des ouvrages d'accumulation pendant la crue d'août 2005 dans les réseaux hydrographiques de la Sarine, de l'Aare, de la Reuss et de la Linth montre une contribution importante des ouvrages. Elle s'exprime par une réduction importante des débits dans la phase décisive de l'événement. Cette réduction a eu un effet favorable d'une part sur les conditions des rivières concernées (réduction des débits de pointe) et d'autre part sur les niveaux des premiers lacs naturels affectés directement. Cet effet s'affaiblit quand même à l'aval de ces premiers lacs.

Il est remarquable que, malgré les débits très forts en août 2005, tous les grands ouvrages d'accumulation ont retenu complètement, pendant la phase entière de montée, les débits apportés. Pour le cas du Lac de Grimsel, cela a été favorisé par les réfections sur l'usine de Grimsel I, le niveau du lac étant exceptionnellement bas.

Les ouvrages d'accumulation dans la Sarine constituent un cas particulier. Dans ce système de réservoirs en chaîne le long de la rivière principale avec des affluents importants entre les ouvrages, les possibilités de gérer les crues sont plus limitées et plus difficiles que dans un système avec des réservoirs situés dans les affluents les plus importants. Ici, des études plus approfondies doivent montrer si – et jusqu'à quel point – une optimisation pour la gestion des crues extrêmes est possible.

### Références:

AquaVision Engineering 2006: Intempéries d'août 2005 – Influence des ouvrages d'accumulation sur les cours d'eau de la Sarine, l'Aare, la Reuss et la Linth, pour l'Office Fédéral de l'Energie (OFEN), section Barrages. A paraître en 2007.

ARGE Geo7, Hunziker, Zarn & Partner 2006: Gefahrenkarten-Hydrologie im OIK I, Bericht im Auftrag des Tiefbauamts des Kantons Bern, Oberingenieurkreis I (non publié)

Dubois J. 2005 : Simulation des systèmes hydrauliques et hydrologiques complexes: Routing System II, Conférence sur la recherche appliquée en relation avec la 3e Correction du Rhône – Nouveaux développements dans la gestion des crues, Communication LCH, Volume 21, pp. 133–145.

Ingenieurgemeinschaft IUB, Hunziker, Zarn & Partner, Emch + Berger 2006: Studie Extremereignisse im Einzugsgebiet der Aare (EHW-Studie), Bericht im Auftrag des Tiefbauamts und des Wasserwirtschaftsamts Bern (non publié)

Effet favorable des ouvrages

Rétention complète pendant la phase de montée

Cas particulier de la Sarine

Mathias Rotach, Peter Albisser, Olivier Duding, Pierre Eckert, Patrick Hächler, Francis Schubiger, André Walser, Stephan Vogt, Christoph Hegg

## 5 > Niederschlags- und Abflussvorhersage

*Das Hochwasser vom August 2005 hat deutlich die Grenzen des heutigen Vorhersagesystems in der Schweiz gezeigt. Obwohl viele fachlich gute Leistungen erbracht wurden, konnte die Leistung des Gesamtsystems beim Kunden, d.h. vor allem in den Krisenstäben, nicht überzeugen. Um eine Verbesserung zu erreichen, sind sowohl bei den Vorhersagediensten als auch auf der Kundenseite Anpassungen nötig. Einige Verbesserungen wurden bereits eingeleitet, andere brauchen noch detaillierte Abklärungen.*

### 5.1 Einleitung

In der Schweiz werden von der MeteoSchweiz, der Abteilung Hydrologie des BAFU und dem Eidgenössischen Institut für Schnee und Lawinenforschung (SLF), welches zur WSL gehört, routinemässig Vorhersagen für gefährliche Naturereignisse erstellt. Die MeteoSchweiz erstellt Vorhersagen und Warnungen für alle Wetterphänomene, unabhängig davon, ob sie direkt gefährlich sind (z.B. Wind) oder die Grundlage für einen Sekundärprozess bilden (vor allem Niederschlag). Vom BAFU werden mit Hilfe der Niederschlagsvorhersagen der MeteoSchweiz für ausgewählte Stationen im Einzugsgebiet des Rheins Abflussvorhersagen erstellt. Das SLF benutzt die Niederschlagsvorhersagen für ihre Lawinenprognosen. Da beim Hochwasser im August 2005 aber kaum Schnee im Spiel war, wurde das SLF nicht tätig, so dass in diesem Kapitel nur auf die Wetter- und Abflussvorhersagen der anderen beiden Institutionen eingegangen wird.

**Wetterprognosen und deren Weiterverarbeitung**

Die rechtlichen Rahmenbedingungen sind bei den beteiligten Institutionen unterschiedlich. Artikel 9 der Alarmierungsverordnung bezeichnet die MeteoSchweiz als zuständige Institution für die Warnung vor gefährlichen Wetterereignissen wie starken flächigen Niederschlägen, das SLF ist mit der Warnung vor Lawinen betraut. Ein expliziter Auftrag für die Warnung vor Hochwasserereignissen ist dagegen nicht vorhanden. Der Vorhersagedienst am BAFU ist unter Berücksichtigung dieser Rahmenbedingungen organisiert und als Dienstleistung zu verstehen.

**Unterschiedliche rechtliche Rahmenbedingungen**

Nachfolgend werden die grundsätzlichen Vorgehensweisen der beiden Vorhersagedienste erläutert, um anschliessend ihre Arbeit während des Hochwassers im August 2005 darzulegen und zu bewerten. Anschliessend werden mögliche gemeinsame Verbesserungen und zukünftige Entwicklungen aufgezeigt.

## 5.2 **Wettervorhersagen von MeteoSchweiz**

Die vorliegende Zusammenstellung basiert auf einer ausführlichen Analyse, die in MeteoSchweiz (2006) publiziert ist. Die Wettervorhersagen werden bei MeteoSchweiz von den drei Vorhersagezentren Meteo Zürich, Meteo Genf und Meteo Locarno gemeinsam erstellt. Detaillierte lokale Prognosen und Warnungen werden dann von den einzelnen Zentren für die Gebiete ihrer Verantwortlichkeit daraus abgeleitet. Die Prognostiker haben dafür zum einen die Informationen über die synoptische Situation aus dem global ausgetauschten Netz von Messungen GTS (Global Transmission System) zur Verfügung. Darüber hinaus sind für die Schweiz eine Vielzahl von zusätzlichen Messungen aus dem automatischen Messnetz (ANETZ) vorhanden. Auf der anderen Seite sind Resultate verschiedener Wetterprognose-Modelle vorhanden, die zur detaillierten Analyse herangezogen werden. Dies sind zum einen numerische Modelle, die das Wettergeschehen auf dem ganzen Globus simulieren, welche die MeteoSchweiz vom Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage (EZMW) oder von anderen grossen Vorhersagezentren bezieht. Zum anderen betreibt die MeteoSchweiz für das Gebiet, das die Schweiz meteorologisch direkt beeinflusst, also für grosse Teile Europas, das hoch aufgelöste numerische Modell COSMO (Consortiums for Small-Scale Modelling, früher «aLMo»), das mit einer horizontalen Auflösung von 7 km arbeitet. Darüber hinaus steht das hoch aufgelöste probabilistische Modellsystem COSMO-LEPS, mit einer Auflösung von 10 km zur Verfügung. In probabilistischen numerischen Vorhersagen wird die Tatsache ausgenutzt, dass die Atmosphäre ein chaotisches System darstellt und die Prognose damit äusserst sensitiv auf die Anfangsbedingungen reagiert. Anstelle von einer einzigen («deterministischen») Prognose werden in einem probabilistischen System mehrere Simulationen mit unterschiedlichen («gestörten») Anfangsbedingungen gerechnet. Daraus lassen sich Aussagen über die Wahrscheinlichkeit einer bestimmten Wetterentwicklung ableiten.

### 5.2.1 **Vorhersage der synoptischen Lage**

Bereits mehrere Tage vor dem Unwetter zeichnete sich aus den bis dahin verfügbaren Informationen für das Wochenende vom 20./21.08.2005 eine niederschlagsreiche Wetterlage ab. Es war aber über mehrere Tage unklar, welche Zugbahn das sich absplattende Tief einschlagen würde. Erst am 19. August stand die synoptische Entwicklung weitgehend fest. Zu diesem Zeitpunkt zeichneten alle verfügbaren globalen Modelle, wie auch die synoptische Analyse, eine Entwicklung vor, wie sie dann auch tatsächlich eingetreten ist und in den Vorhersagen von MeteoSchweiz zum Ausdruck kam.

Langfristvorhersagen

Die prognostische Herausforderung für ein Ereignis wie jenes vom August 2005 liegt insbesondere darin, vorherzusagen ob die erwarteten Niederschläge «gross», «aussergewöhnlich» oder gar «extrem» ausfallen würden. Bedingt durch die Saison (Sommer) war einzig klar, dass die Schneefallgrenze, die ja in früheren Ereignissen schon eine entscheidende Rolle für die Beurteilung gespielt hatte, diesmal von untergeordneter Bedeutung in Bezug auf die hydrologische Entwicklung sein würde. Für die Entscheidungsfindung kommen zusätzliche lokale Beurteilungshilfen zur Anwendung, die im Folgenden detaillierter diskutiert werden.

### 5.2.2 Das hoch aufgelöste numerische Modell COSMO

Das operationelle Modell COSMO der MeteoSchweiz liefert zweimal täglich Vorhersagen über 72 Stunden, so dass hier von einer «Kurzfrist-Prognose» gesprochen werden kann. Die nachfolgenden Betrachtungen konzentrieren sich auf die beiden Haupttage des Ereignisses, den 21. und 22. August. Zum Vergleich sind die Beobachtungen auf das Gitter des Modells interpoliert worden.

**Abb. 5.1** > Niederschlagssumme für den 21. August 2005 (06:00–06:00 UTC).

Aus COSMO-Vorhersagen vom

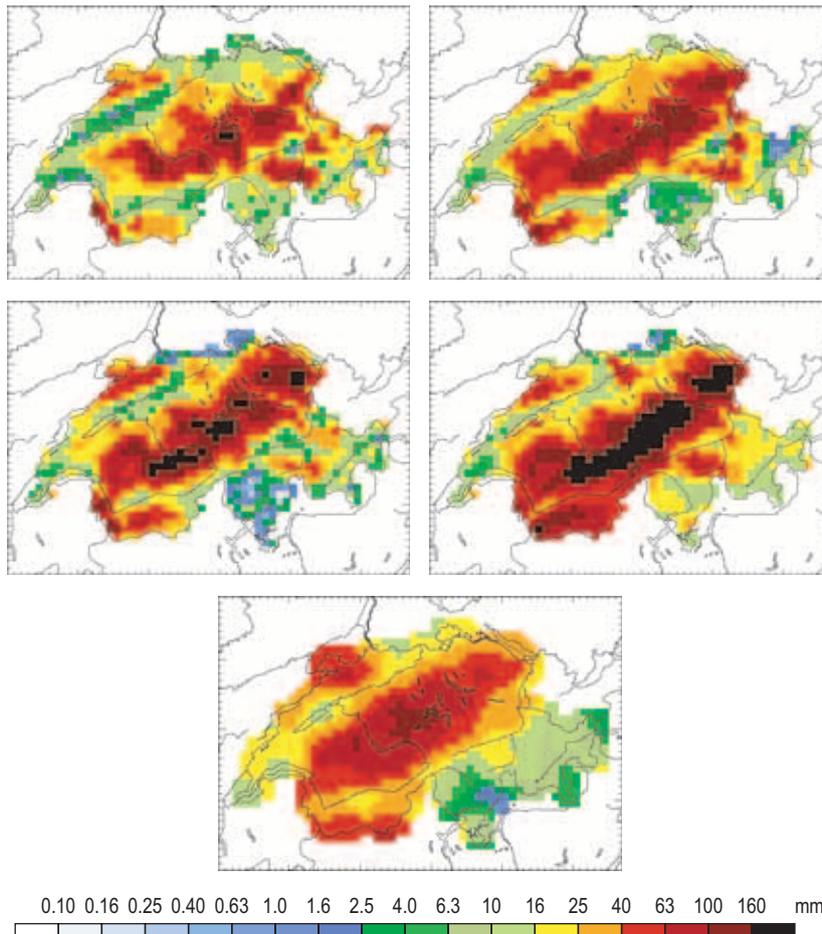
19.08. 12:00 UTC: +42 bis +66h (oben links);

20.08. 00:00 UTC: +30 bis +54h (oben rechts);

20.08. 12:00 UTC: +18 bis +42h (Mitte links);

21.08. 00:00 UTC: +6 bis +30h (Mitte rechts).

Unten: gegitterte Analyse (COSMO-Gitter) aus den gemessenen Niederschlagsdaten.



Vorhersagen und Beobachtungen der 24h-Niederschlagssummen für Sonntag, den 21. August 06:00 UTC, bis Montag, den 22. August 06:00 UTC, sind in Abb. 5.1 zusammengestellt. Dabei zeigen die verschiedenen Abbildungen Vorhersagen für denselben Zeitraum, wurden aber zu unterschiedlichen Zeitpunkten erstellt.

Modell-Vorhersagen  
für den 21. August 2005

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass alle Modell-Vorhersagen die Niederschläge dieses ersten Tages gut erfasst haben. Bereits die erste Vorhersage vom Freitag, den 19. August 12:00 UTC, zeigte ein deutliches Signal für starke Niederschläge am Sonntag, den 21. August (06:00 UTC–06:00 UTC). Ab der nächsten Vorhersage vom Samstag, den 20. August 00:00 UTC, war die Verteilung weit gehend korrekt, mit einer Überschätzung, die in der Vorhersage vom Sonntag, den 21. August 00:00 UTC, noch ausgeprägter wurde.

**Abb. 5.2 > Niederschlagssumme für den 22. August (06:00–06:00 UTC).**

Aus COSMO-Vorhersagen vom

20.08. 12:00 UTC: +42 bis +66h (oben links),

21.08. 00:00 UTC: +30 bis +54h (oben rechts),

21.08. 12:00 UTC: +18 bis +42h (Mitte links),

22.08. 00:00 UTC: +6 bis +30h (Mitte rechts).

Unten: gegitterte Analyse (COSMO-Gitter) aus den gemessenen Niederschlagsdaten.

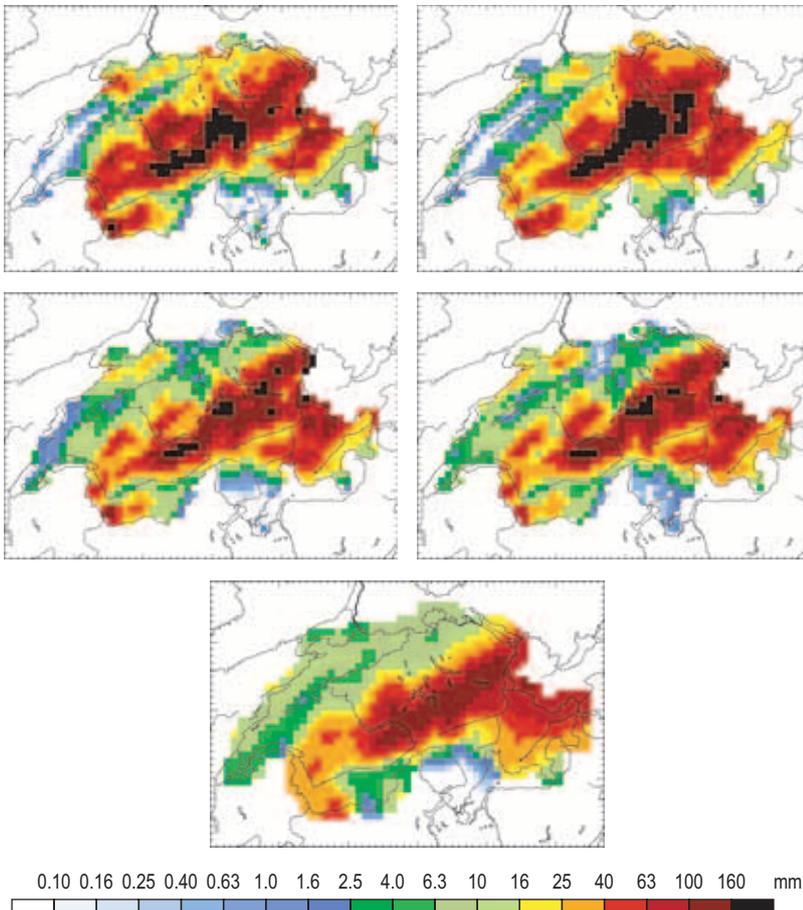


Abb. 5.2 zeigt die Vorhersagen und Beobachtungen der 24h-Niederschlagssummen für Montag, den 22. August 06:00 UTC bis Dienstag, den 23. August 06:00 UTC. Die hohen Niederschlagssummen (> 100 mm/24h) betrafen an diesem zweiten Tag ein wesentlich grösseres Gebiet als am Tag zuvor. Es erstreckte sich vom Berner Oberland bis ins Alpstein-Gebiet.

Modell-Vorhersagen  
für den 22. August 2005

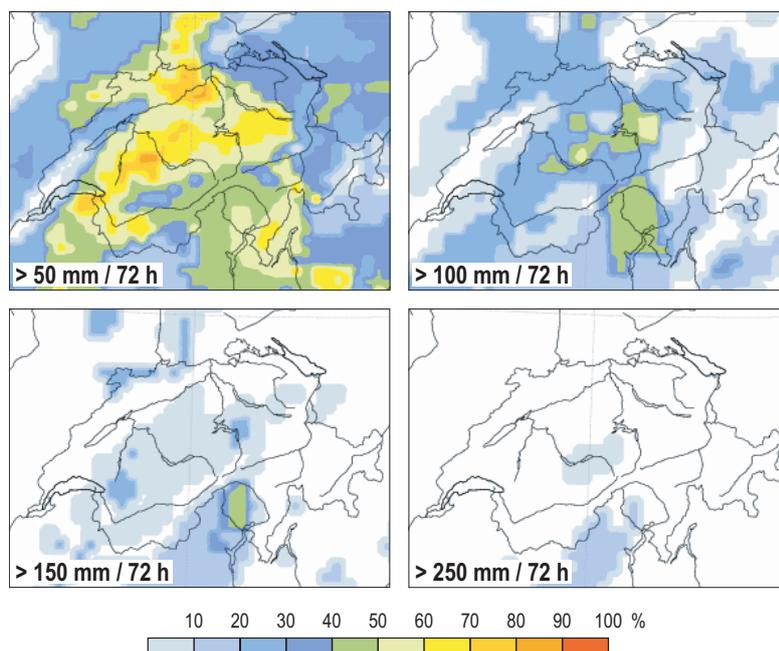
Auch für diesen zweiten Tag kann eine gute Modell-Vorhersage für alle drei Vorhersagezeiträume festgestellt werden. Die Gebiete mit starken Niederschlägen sind sowohl in Ausdehnung als auch Positionierung relativ gut vorhergesagt. Die Maxima sind jedoch zum Teil reichlich überschätzt, vor allem in den frühen Vorhersagen für diesen Tag.

Entsprechend der Resultate der hier exemplarisch dargestellten einzelnen Tage, fielen auch die Vorhersagen für die 48 h-Summen bzw. 72 h-Summen zutreffend aus. Die objektive Verifikation mit dem ANETZ über alle Vorhersagen und für den gesamten Zeitraum vom 19.–22. August, ergab für die schwachen und mittelstarken Niederschläge von 2 mm/6h und 10 mm/6h nur eine geringfügige Überschätzung von 10 -20% auf allen Höhenstufen. Einzig die sehr starken Niederschläge von mehr als 30 mm/6h wurden deutlicher überschätzt. Bei den Standorten der ANETZ-Stationen unterhalb von 800 m betrug die Überschätzung des Niederschlags ca. 30% und an den höher gelegenen Stationen der Voralpen und Alpen bis zu einem Faktor von 2.

### 5.2.3 Probabilistische Vorhersagen

Abb. 5.3 > COSMO-LEPS Vorhersage vom 18.8.2005 12:00 UTC für die Periode 20.-23.8.2005 je 06:00 UTC.

Wahrscheinlichkeiten für 72 h-Niederschlagssummen grösser als 50, 100, 150 und 250 mm.



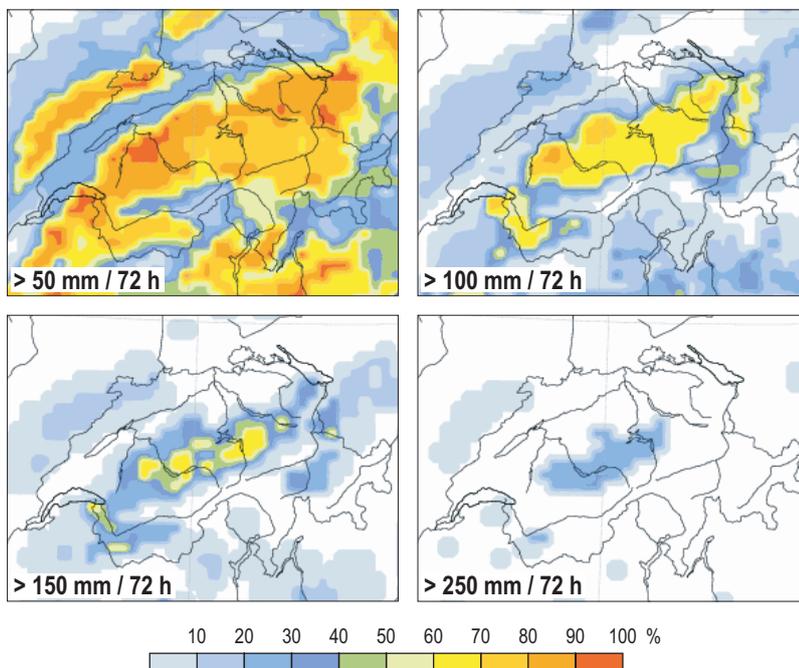
Das Ensemblevorhersagesystem COSMO-LEPS (Montani et al., 2003; Marsigli et al., 2005) rechnet täglich hoch aufgelöste probabilistische Wetterprognosen für Zentral- und Südeuropa für die kommenden fünfzehn Tage. Das Modellsystem ist optimiert für den Prognosezeitraum von 3–5 Tagen, so dass hier vor allem diese Vorhersagen betrachtet werden.

Abb. 5.3 zeigt die Vorhersage des COSMO-LEPS vom Donnerstag, den 18. August 12:00 UTC für Niederschlag von Samstag, den 20. August 06:00 UTC, bis Dienstag, den 23. August 06:00 UTC. Dargestellt ist die geographische Verteilung der Wahrscheinlichkeiten, dass für diesen Zeitraum von 72 Stunden gewisse Niederschlagssummen überschritten werden. Diese Vorhersage zeigt für die Voralpen und im Tessin Wahrscheinlichkeiten bis 60% für Niederschlagsmengen grösser als 100 mm. Niederschlagsmengen über 150 mm wurden für weite Teile der Schweiz mit nur relativ geringer Wahrscheinlichkeit (bis zu 40%) prognostiziert. Diese Art der Wahrscheinlichkeitsvorhersage ergab damit schon frühzeitig Hinweise auf das potentielle Risiko eines extremen Niederschlagsereignisses, allerdings mit einer eher höheren Wahrscheinlichkeit für die Südalpen als für den Alpennordrand.

Vorhersage vom 18. August 2005

**Abb. 5.4** > COSMO-LEPS Vorhersage vom 19.8.2005 12:00 UTC für die Periode 20.-23.8.2005 je 06:00 UTC.

Wahrscheinlichkeiten für 72 h-Niederschlagssummen grösser als 50, 100, 150 und 250 mm.



Die Vorhersage vom darauf folgenden Tag für die gleiche Vorhersageperiode von 72 Stunden ist in Abb. 5.4 abgebildet. Diese zeigt für den gesamten Alpennordhang hohe Wahrscheinlichkeiten für Niederschlag über 100 mm und zudem eine hohe Wahrscheinlichkeit für Niederschläge über 150 mm in den Berner- und zentralen Voralpen.

Vorhersage vom 19.08.2005

Zudem wird auch eine Wahrscheinlichkeit von 20–30 % für Niederschlagssummen über 250 mm in Teilen dieser Gebiete vorhergesagt. Die Regionen, für welche erhöhte Wahrscheinlichkeiten (hier über 60 %) für Niederschläge über 100 mm prognostiziert wurden, stimmen alles in allem gut mit denjenigen Gebieten überein, wo auch tatsächlich 3-Tagessummen über diesem Schwellwert gemessen wurden (Abschnitt 1.3.1). Dies gilt – allerdings mit tieferen Wahrscheinlichkeiten – auch ziemlich gut für die beiden Schwellwerte 150 mm und 250 mm.

Insgesamt haben die Vorhersagen des COSMO-LEPS deutliche Hinweise auf das Ereignis gegeben. Ab der Vorhersage vom Freitag, den 19. August 12:00 UTC, wurde eine hohe Eintretenswahrscheinlichkeit für ausserordentliche Niederschlagsmengen für einen Grossteil der schliesslich betroffenen Gebiete prognostiziert, ohne für die nicht betroffenen Gebiete fälschlicherweise einen Warnhinweis zu geben.

Der Extreme Forecast Index (EFI) wird auf Grund der Resultate des probabilistischen (globalen) Modells des Europäischen Zentrums für Mittelfristvorhersage (EZMW) erhoben. Er gibt an, inwieweit eine simulierte Grösse (hier 24 h-Niederschlagssumme über 100 mm) im Vergleich zu vielen anderen Modellsimulationen («Modell-Klimatologie») als extrem beurteilt werden kann. Ein Indexwert grösser als 0.7 wird üblicherweise als Hinweis auf ein ausserordentliches Ereignis gewertet (MeteoSchweiz, 2006).

Extreme Forecast Index (EFI)

**Abb. 5.5** > Räumliche Verteilung des «Extreme Forecast Index» (EFI) für die Niederschlagssumme in der Vorhersageperiode Montag, 22.08.2005 06:00 UTC bis Dienstag 23.08.2005 06:00 UTC (24 h-Niederschlag).

*Simulation vom*

- a) 20.08. 12:00 UTC,
- b) 21.08. 00:00 UTC,
- c) 21.08. 12:00 UTC,
- d) 22.08. 00:00 UTC.

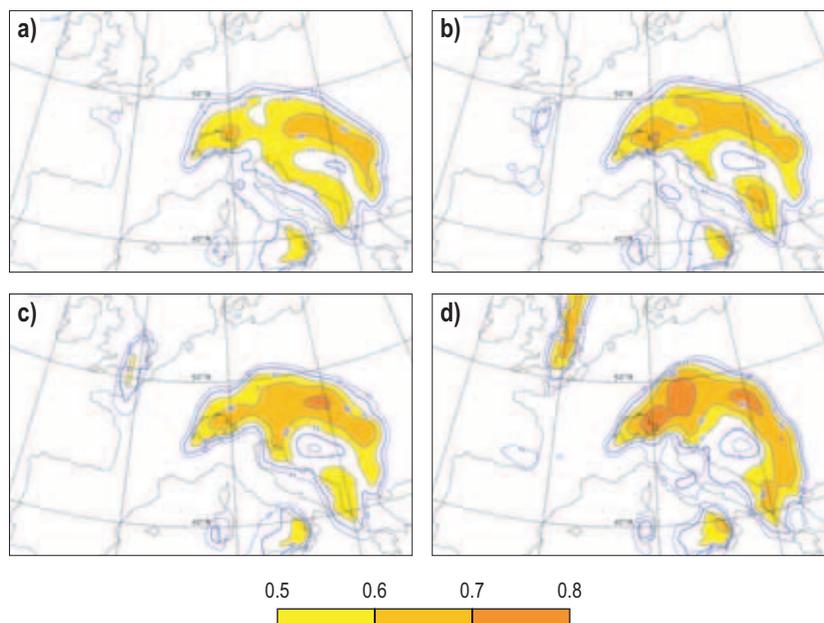


Abb. 5.5 zeigt die räumliche Verteilung des EFI für die Niederschlagssumme in der Vorhersageperiode von Montag, den 22. August 06:00 UTC, bis Dienstag, den 23. August 06:00 UTC (24 h-Niederschlag) für verschiedene Modell-Läufe. Schon die Simulation von Freitag, den 19. August, zeigt den EFI grossflächig über 0.7. Die betroffene Zone variiert jedoch mit jedem weiteren Lauf des Modells (Abb. 5.5). Werte über 0.7 finden sich jeweils in Teilen des Schweizer Mittellandes, aber auch im Vorarlberg oder in Bayern. Daraus konnte geschlossen werden, dass wesentliche Niederschlagsmengen nördlich der Alpen fallen würden, aber die präzise örtliche Zuordnung (auf Grund der Analyse des EFI) war erst recht spät möglich.

#### 5.2.4 Synthese der Wettervorhersagen

Die Niederschlagsprognosen, insbesondere der Modelle der MeteoSchweiz, gaben deutliche Hinweise auf gravierende Niederschläge – allerdings nicht im Einklang mit den Resultaten der globalen Modelle. Tab. 5.1 zeigt beispielhaft eine Zusammenstellung verschiedener Modellprognosen, die den Prognostikern am Samstag, den 19. August, für die kommenden Tage zur Verfügung standen. Vor allem das Modell des EZMW, das allgemein als relativ vertrauenswürdig in Sachen Niederschlagsmengen gilt, zeigte deutlich zu tiefe Werte.

Grosse Widersprüche  
zwischen Modellen

**Tab. 5.1 > Niederschlagsvorhersagen verschiedener numerischer Modelle, gemittelt über die Gebiete Deutsch-, West- und Südschweiz [mm/24 h], die am Samstag, den 19.08.2005, vorlagen.**

Basis 19.08.2005	Modell	Deutschschweiz	Westschweiz	Südschweiz
Für Samstag, 19.08.2005	COSMO <sup>1</sup>	25	12	18
	EZMW <sup>2</sup>	20	15	10
	GME <sup>3</sup>	15	15	10
Für Sonntag, 20.08.2005	COSMO <sup>1</sup>	30	30	4
	EZMW <sup>2</sup>	20	12	4
	GME <sup>3</sup>	15	20	12
Für Montag, 21.08.2005	COSMO <sup>1</sup>	90	30	8
	EZMW <sup>2</sup>	25	15	3
	GME <sup>3</sup>	20	15	8
Für Dienstag, 22.08.2005	COSMO <sup>1</sup>	--	--	--
	EZMW <sup>2</sup>	12	6	0
	GME <sup>3</sup>	20	4	4

<sup>1</sup> hoch aufgelöstes regionales Modell der MeteoSchweiz

<sup>2</sup> globales Modell des europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage

<sup>3</sup> globales Modell des deutschen Wetterdienstes (DWD)

Auf Grund dieser Unsicherheit in den erwarteten Niederschlagsmengen wurde die erste Niederschlagswarnung «Starkniederschläge, Gefahrenstufe 1» erst am Sonntag, den 21. August, ausgegeben, gerade noch rechtzeitig vor dem Beginn des Hauptereignisses.

Warnung erst kurz vor dem  
Ereignis

Die Warnung wurde am Montag, den 22. August, um 07:58 Uhr erneuert und somit bestätigt. In dieser Ausgabe wurde ergänzend auf den bereits sehr angefeuchteten

Boden hingewiesen, da die aufsummierten Niederschläge in den Tagen zuvor zum Teil über 100 mm betragen. Am Abend des 22. Augusts erfolgte dann die dritte Warnung und schliesslich die Entwarnung für grosse Teile der Schweiz (ausser der Ostschweiz) am Morgen des 23. Augusts

### 5.3 Abflussvorhersagen der Abteilung Hydrologie des BAFU

Seit Mitte der Achtzigerjahre erstellt die Abteilung Hydrologie des BAFU Abflussvorhersagen für das Einzugsgebiet des Rheins unterhalb der Alpenrandseen bis Rheinfelden. Diese Vorhersagen werden den Vorhersagezentren in Karlsruhe und Mainz, an verschiedene Kantone (Tab. 5.2) sowie an Privatunternehmen, wie Kraftwerksgesellschaften, geliefert.

Prognosegebiet und Kunden

**Tab. 5.2 > Liste der Vorhersagestationen und der mit Vorhersagebulletins belieferten Kantone.**

Vorhersagestationen	Belieferte Kantone
Aare-Brugg	AG
Aare-Murgenthal	AG, BE
Emme-Emmenmatt	BE
Kleine Emme-Littau	
Reuss-Mellingen	AG, ZG (seit Sommer 2006), ZH (seit Frühling 2006)
Rhein-Rekingen	AG
Rhein-Rheinfelden	AG
Thur-Andelfingen	ZH
Thur-Halden	TG
Limmat-Baden	AG, ZH

Bei normaler Abflusssituation erstellt das BAFU werktags gegen 08:30 Uhr eine Vorhersage für insgesamt 10 Abflussmessstationen. Das Vorhersagebulletin für Rhein-Rheinfelden wird täglich per Fax an die Kunden versendet. Von sieben Stationen werden Bulletins auf dem Internet publiziert. Die Vorhersagen Emme-Emmenmatt, Kleine Emme-Littau und Thur-Halden werden auf Grund der grossen Unsicherheiten bei den Vorhersagen für kleine Einzugsgebiete nicht, bzw. nur einem beschränkten Nutzerkreis zugänglich gemacht. Bei einer gemessenen, bzw. prognostizierten Überschreitung von vereinbarten Schwellenwerten wird der Vorhersagerhythmus erhöht und der Betrieb auf das Wochenende sowie auf Feiertage ausgedehnt. Durch eine Vereinbarung mit dem Land Baden-Württemberg verpflichtet sich das BAFU, bei einer Überschreitung von 3000 m<sup>3</sup>/s für die Station Rhein-Rheinfelden im Rahmen seiner Möglichkeiten einen 24 h-Betrieb mit einem 2-stündigen Vorhersageintervall zu betreiben. Ein permanenter 24 h-Betrieb ist auf Grund der personellen Besetzung der Abflussvorhersage am BAFU nicht möglich. Er kann nur für eine begrenzte Zeit gewährleistet werden. An Wochenenden und Feiertagen besteht ein Pikettdienst.

Vorhersageintervall

### 5.3.1 Vorhersagesystem

Seit Ende 1999 verwendet das BAFU das Modell HBV3-ETHZ, welches in seinen Grundzügen dem ursprünglichen HBV (Lindström et al., 1997) entspricht. Das Modell berücksichtigt das Rheineinzugsgebiet unterhalb der Alpenrandseen und ist in 40 Teilgebiete unterteilt. Der Zufluss aus den Alpenrandseen wird unter Berücksichtigung von gemessenen Abflusswerten und den erwarteten Niederschlägen durch den Prognostiker abgeschätzt und ins System eingegeben.

Ins hydrologische Modell fliessen die Daten aus dem hydrometrischen Messnetz des BAFU sowie der automatischen Stationen des ANETZ von MeteoSchweiz ein. Damit wird das Modell bis zum Vorhersagezeitpunkt nachgeführt, im Vorhersagebereich wird es durch das numerische Wettermodell COSMO von MeteoSchweiz angetrieben. Dieses steht zweimal täglich um ca. 6 Uhr und 18 Uhr MEWZ (mitteleuropäische Winterzeit) zur Verfügung. Für die Abflussvorhersage wird der direkte Modelloutput verwendet. Es findet keine Korrektur der numerischen Vorhersage statt. Sobald die Abflussvorhersage hohe Werte aufweist, nimmt der Vorhersagedienst des BAFU mit MeteoSchweiz Kontakt auf. Ergibt sich bei der Einschätzung des COSMO Modells durch den Prognostiker von MeteoSchweiz eine grössere Abweichung zu anderen Wettermodellen, so wird dies auf den Bulletins der Abflussvorhersage entsprechend erwähnt.

COSMO als Input

Seit Juni 2005 betreibt das BAFU das neue Vorhersagesystem Flood Early Warning System FEWS (Bürgi, 2002) parallel zum operationellen Modell HBV3-ETHZ. Mitte 2007 soll FEWS das alte System vollständig ablösen. Mit FEWS wird das gesamte Einzugsgebiet des Rheins bis Basel abgedeckt, wobei vor allem die Gebiete oberhalb der Alpenrandseen, aber auch die deutschen und österreichischen Teile des Einzugsgebietes im System berücksichtigt sind. Mit der Unterteilung in mehr als 60 Teilgebiete wird versucht, die alpine Hydrologie in ihrer gesamten Komplexität zu erfassen. Besondere Herausforderungen sind die anthropogene Beeinflussung des natürlichen Regimes durch die Regulierung der Alpenrandseen und die Energieerzeugung in Pumpspeicherwerken sowie die geringere Dichte des meteorologischen Messnetzes.

Neues Vorhersagesystem FEWS

### 5.3.2 Vorhersagetätigkeit

Am Freitag, den 19. August, wurde die letzte Vorhersage vor dem Beginn des Ereignisses herausgegeben, welche im normalen Betrieb erstellt wurde. Für alle im Internet publizierten Vorhersagestationen wurde, ausgehend von mittleren Abflussverhältnissen, ein geringer Anstieg des Abflusses mit einer Spitze im für die Jahreszeit normalen Schwankungsbereich gerechnet. Dementsprechend wurde nur der normale Kundenkreis mit Vorhersagen beliefert.

Freitag, 19. August

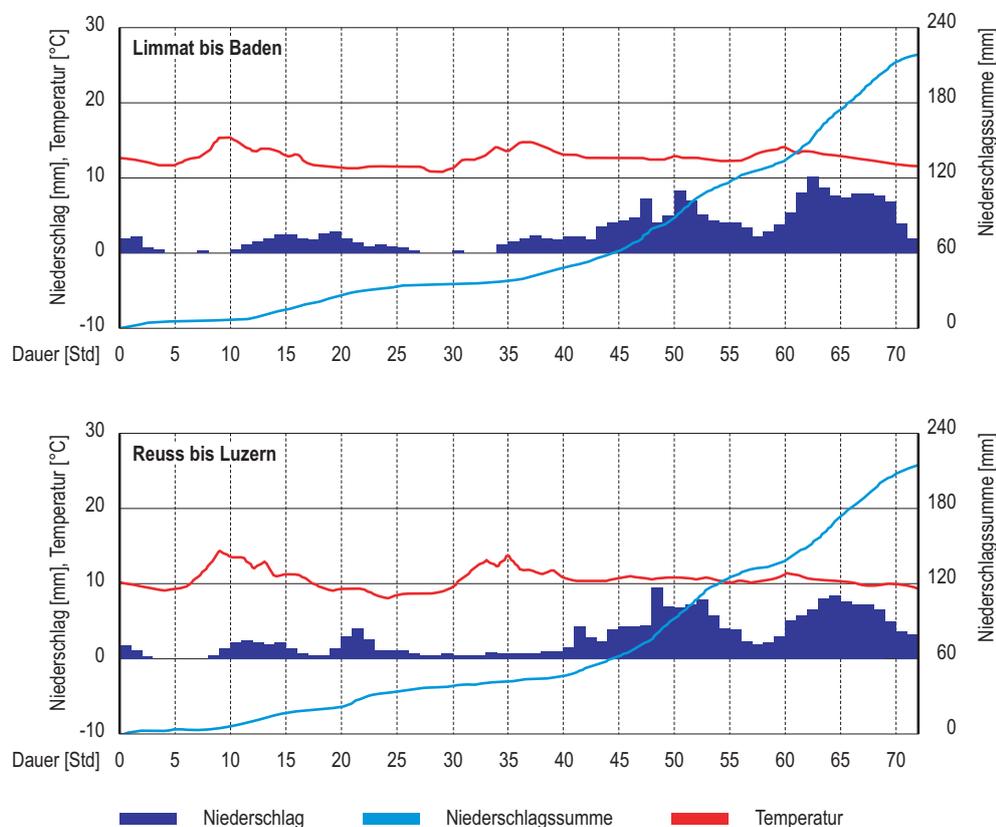
Die lokal bereits recht intensiven Niederschläge waren für den Dienst habenden Prognostiker des Vorhersagedienstes Anlass, am Morgen des 20. Augusts die ausserordentliche Prognosetätigkeit aufzunehmen. Der COSMO-Lauf vom 20. August 00:00 UTC wies für verschiedene Einzugsgebiete Gebietsniederschläge von mehr als 100 mm/72h

Samstag, 20. August

aus, für die Limmat und die Reuss bis zum Vierwaldstättersee sogar mehr als 200 mm (Abb. 5.6). Die Vorhersagen mit dem Modell HBV3-ETHZ zeigten vor allem für die Aare unterhalb der Einmündung der Emme auf noch unkritischem Niveau erhöhte Abflüsse. Für den Rhein bei Rheinfelden wurde der 2. Grenzwert von 2200 m<sup>3</sup>/s überschritten, bei welchem ein erweiterter Kundenkreis informiert wird. Für die Reuss bei Mellingen wurde eine extrem hohe Abflussspitze in der Grössenordnung eines 200-jährlichen Ereignisses für den Vormittag des 21. Augusts berechnet. Die Vorhersagen wurden an den Kanton Aargau versendet. Für die Thur war eine Überschreitung der Warnschwelle auf unkritischem Niveau für den 3. Tag des Vorhersagezeitraumes prognostiziert und der Kanton Zürich wurde entsprechend informiert. Für den Kanton Bern werden für die Regulierung des Bielersees Vorhersagen für die Emme bei Emmenmatt erstellt. Der Kanton wird bei einer Überschreitung des vergleichsweise niedrigen Schwellenwertes von 100 m<sup>3</sup>/s mit einem Bulletin beliefert, was hier der Fall war.

**Abb. 5.6 > COSMO-Lauf vom 20.08.2005 00:00 UTC: Vorhergesagter Gebietsniederschlag für die Einzugsgebiete der Limmat bis Baden und der Reuss bis Luzern.**

Die Balken zeigen die Stundenniederschläge, die blauen Linien die Summenkurven des Niederschlages und die rote Linie die Temperatur eines ausgewählten Gitterpunktes im Gebiet (Höhe der Gitterpunkte: 1154 m im Gebiet Limmat bis Baden und 1514 m im Gebiet Reuss bis Luzern).



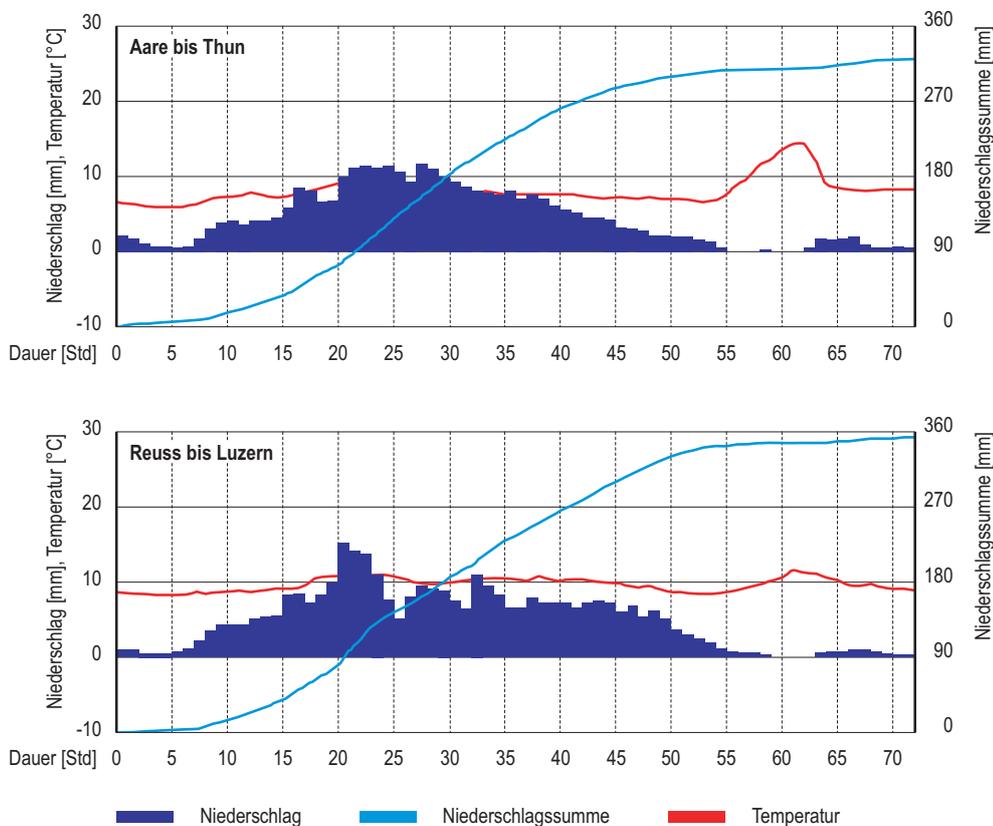
Zu diesem Zeitpunkt waren alle Kantone, welche Vorhersagen vom BAFU beziehen, mit einem Hochwasserbulletin für mindestens eine ihrer abonnierten Vorhersagestationen beliefert. Die Problematik bestand darin, dass in kleineren Gebieten (Kleine Emme, Emme) zu diesem Zeitpunkt das Ausmass und der Zeitpunkt des Eintreffens nicht abzuschätzen waren. Da die Spitzen zumeist für den 22. August vorhergesagt waren, wurde die nächste Vorhersage unter gleichzeitiger Verfolgung der meteorologischen und hydrologischen Situation auf den folgenden Tag festgesetzt.

Nachdem die neuesten Modellunterlagen vorhanden waren, wurde am Morgen des 21. Augusts eine weitere Vorhersage mit HBV3-ETHZ gerechnet. Das COSMO Modell wies im Lauf vom 21. August 00:00 UTC noch einmal höhere Niederschlagsmengen aus (Abb. 5.7), für die Aare bis Thun und die Reuss bis Luzern wurde ein Gebietsniederschlag von deutlich über 300 mm/72h, punktuell bis 500 mm/72h gerechnet.

Sonntag, 21. August

**Abb. 5.7 > COSMO-Lauf vom 21.08.2005 00:00 UTC:  
Vorhergesagter Gebietsniederschlag für die Einzugsgebiete der Aare bis Thun und der Reuss bis Luzern.**

Die Balken zeigen die Stundenniederschläge, die blauen Linien die Summenkurven des Niederschlages und die rote Linie die Temperatur eines ausgewählten Gitterpunktes im Gebiet (Höhe der Gitterpunkte: 1780 m im Gebiet Aare bis Thun und 1514 m im Gebiet Reuss bis Luzern).



Aus der Erfahrung im operationellen hydrologischen Vorhersagedienst ist die Überschätzung von Niederschlägen im COSMO Modell bekannt. Auswertungen (z.B. Rossa et al., 2003) zeigen, dass die Niederschläge am gesamten Alpennordrand, vor allem bei nördlicher Anströmung, überschätzt werden. Weniger ausgeprägt ist dies bei konvektiven Wetterlagen.

Der Dienst habende Prognostiker von MeteoSchweiz ging am Vormittag des 21. Augusts nach dem Vergleich mit weiteren Modellen von einer massiven Überschätzung der im COSMO Modell prognostizierten Niederschläge aus. In der Folge wurden die Vorhersagebulletins des BAFU mit dem Vermerk versehen, dass die Modellniederschläge überschätzt seien.

Für die Thur bei Andelfingen wurde ein 200-jährliches Hochwasser vorhergesagt. In der Folge wurde sowohl für diese Station als auch für die flussabwärts liegende Vorhersagestation Rhein-Rekingen ein Bulletin versendet. Nur für die Stationen Murgenthal und Brugg an der Aare unterhalb des Bielersees war nach den Modellrechnungen von einem Anstieg des Abflusses auf unkritischem Niveau auszugehen.

Am Abend des 21. Augusts wurde die letzte Vorhersage vor dem Eintreten des Hauptereignisses erstellt. Zwar waren die Niederschlagssummen etwas geringer, dennoch wurde in Absprache mit MeteoSchweiz wiederum die erwartete Überschätzung der Modellniederschläge auf den Bulletins vermerkt. Die Abflussspitzen wurden zumeist für die zweite Tageshälfte des 22. Augusts erwartet. Gegenüber den Vorläufen wurden tendenziell etwas niedrigere Spitzen berechnet. In Tab. 5.3 sind die Abflussvorhersagen vom Sonntagabend zusammengestellt. Für alle Vorhersagestationen sind der prognostizierte Spitzenabfluss, der Zeitpunkt seines Eintretens ausgehend von der Startzeit der Vorhersage um 17 Uhr MEWZ und die Wiederkehrperiode den höchsten während des Ereignisses gemessenen Werten gegenübergestellt. Beim Vergleich mit den Werten im Abschnitt 2.5.2 ist zu berücksichtigen, dass es sich bei den Abflusswerten um Stundenmittelwerte handelt.

Auf Grund der zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Informationen wurde entschieden, die nächste Vorhersage am Morgen des 22. Augusts zu erstellen. Folgende Überlegungen spielten eine Rolle:

- > Die im COSMO Modell prognostizierten Niederschläge wurden im aktuellen wie auch in den vorhergehenden Läufen durch die Meteorologen als massiv zu hoch eingeschätzt.
- > Mit Ausnahme der Reuss waren die Abflussspitzen in allen Einzugsgebieten im Zeitraum zwischen Montagabend bis Dienstagmorgen zu erwarten.
- > Die Vorhersagen der Reuss werden wesentlich von den Vorhersagen der Kleinen Emme beeinflusst. Die Erfahrung aus früheren Ereignissen zeigte, dass in diesem Gebiet bei der Modellierung regelmässig mit unrealistisch hohen Spitzen gerechnet werden muss.
- > Die Etablierung eines 24 h-Betriebes wurde sorgfältig abgewogen. Auf Grund der personellen Situation – 1/3 der Mitglieder des Vorhersagedienstes war in den Ferien – und der vorliegenden Vorhersagen musste dieser am ehesten vom 22. auf den 23. August in Betracht gezogen werden.

---

In der Nacht zum 22. August stiegen die Abflüsse an der Kleinen Emme und an der Emme innerhalb kürzester Zeit auf sehr hohe Werte an. Damit waren auch die Abflussvorhersagen für deren Vorfluter Reuss und Aare überholt.

Ab dem frühen Morgen des 22. Augusts wurden Vorhersagen im 2 h-Rhythmus erstellt, welche die Entwicklung immer besser erfassten.

**Montag, 22. August**

Durch die zum Teil extremen Abflüsse und Wasserstände sowie durch die Telekommunikationsunterbrüche lieferten zwischenzeitlich rund 5 % aller hydrometrischen Messstationen keine Daten mehr. Darunter waren auch solche, welche in den hydrologischen Modellen berücksichtigt und deshalb für den Vorhersagebetrieb von besonderer Wichtigkeit sind.

Am Montagmorgen wurde das Vorhersagezentrum von der Nationalen Alarmzentrale NAZ kontaktiert, welche um eine Einschätzung bezüglich Situation und Entwicklung für die elektronische Lagedarstellung zuhanden von Kantons- und Bundesbehörden bat. Diese wurde in der Folge regelmässig neu erstellt und der NAZ sowie zur internen Information zur Verfügung gestellt.

Die Erstellung dieser Lagebeurteilungen war sehr zeitaufwändig. Je nach Vorhersagerhythmus wurde dazu eine Person absorbiert. Dazu kamen im Verlauf des 22. Augusts zunehmend Anfragen von Behörden und Medien, welche ebenfalls Ressourcen banden. Eine Lagebeurteilung bringt in einer solchen Situation jedoch den Vorteil, Bewertungen der Modellergebnisse zu integrieren, wodurch viele Anfragen durch den Verweis auf die Lagebeurteilungen abgefangen und abgekürzt werden können. Auch bei optimaler interner Organisation ist der Personalbestand für die Übernahme von solchen zusätzlichen Leistungen zu knapp bemessen.

Ab dem 23. August rückten vor allem die grossen Seen ins Zentrum des Interesses, während an den Fliessgewässern, deren Abflussverhalten nicht durch Seen beeinflusst ist, eine Entspannung der Situation eintrat. Für den Bielersee und den Vierwaldstättersee wurden Einschätzungen über die weitere Entwicklung gewünscht. Im operationellen Modell HBV3-ETHZ sind diese beiden Gewässer nicht explizit berücksichtigt bzw. liegen ausserhalb des Modellgebietes. Auf der Basis von FEWS und weiteren Hilfsmitteln konnten entsprechende Abschätzungen in kurzer Zeit erstellt werden.

**Dienstag, 23. August**

**Tab. 5.3 > Vorhersagen von Sonntag, den 21.08., mit Startzeit um 17 Uhr MEWZ im Vergleich mit den höchsten während des Ereignisses gemessenen Abflusswerten.**

Station	Spitze vorhergesagt, Zeitpunkt	Jährlichkeit vorhergesagt	Bemerkung	Spitze gemessen (Stundenmittel), Zeitpunkt	Jährlichkeit gemessen
Rhein-Rheinfelden	3116 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +24h	2–5		3434 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +42h	5–10
Rhein-Rekingen	1630 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +35h	20		1212 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +41h	2–5
Aare-Murgenthal	535 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +30h	< 2	Warngrenze nicht überschritten	895 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +23h	5–10
Aare-Brugg	583 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +24h	< 2	Warngrenze nicht überschritten	1055 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +23h	5–10
Emme-Emmenmatt	177 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +26h	< 2	Nicht öffentlich, nur Kt. Bern	480 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +8h	100
Reuss-Mellingen	800 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +16h	200		850 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +21h	> 200
Kleine Emme-Littau	506 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +12h	10–20	Nicht öffentlich, Plausibilisierung Mellingen	644 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +9h	> 200
Limmat-Baden	326 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +23h	< 2		509 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +30h	10–20
Thur-Andelfingen	1114 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +33h	100–200		719 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +38h	2–5
Thur-Halden	1102 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +28h	20–50	Nicht öffentlich, nur Kt. Thurgau	789 m <sup>3</sup> /s t <sub>0</sub> +31h	5–10

### 5.3.3 Vorhersagegüte

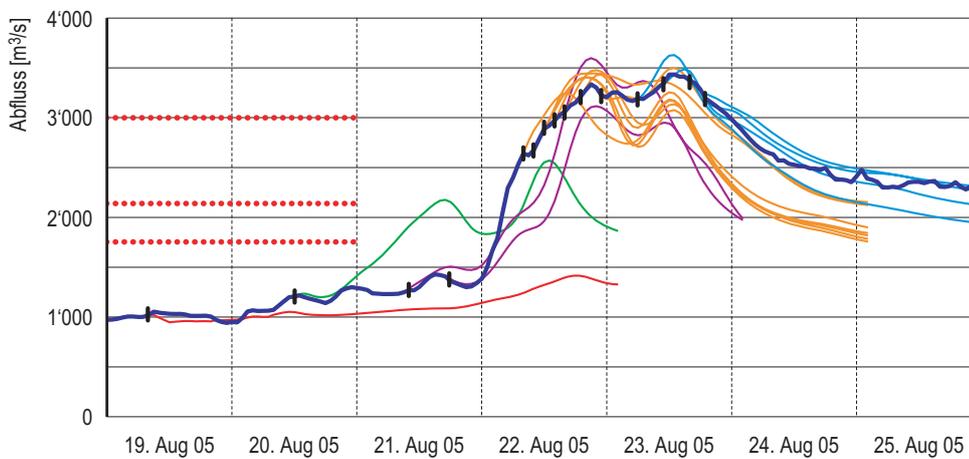
Grundsätzlich setzt sich die Unsicherheit von Abflussvorhersagen aus den Unsicherheiten der numerischen Wettervorhersage und der Unsicherheit der hydrologischen Modellierung zusammen. Die Prognosegüte ist in kleineren Einzugsgebieten geringer als für grosse Gewässer. Die Vorhersagbarkeit des Niederschlages nimmt ab und es sind zu wenig Messungen vorhanden, mit welchen ein hydrologisches Modell in genügender Genauigkeit nachgeführt und anschliessend zur Vorhersage verwendet werden kann.

Abb. 5.8 zeigt die Vorhersagen für die Station Rhein-Rheinfelden. Im heute operationellen System HBV3-ETHZ werden die Zuflüsse von ungefähr 40 hydrometrischen Stationen unterhalb der Alpenrandseen berücksichtigt. Die längsten Laufzeiten im vom Modell abgedeckten Gebiet betragen etwa 12 Stunden. 24–36 Stunden vor dem Ereignis konnte der Zeitpunkt und die ungefähre Höhe der Abflussspitze vom Modell in zufrieden stellender Genauigkeit erfasst werden. Die Geschwindigkeit des Anstieges wurde jedoch deutlich unterschätzt. Gerade im Ereignisfall ist die Güte der Vorhersage des ansteigenden Astes von besonderer Wichtigkeit. Ab dem Vormittag des 22. Augusts, kurz bevor die erste Abflussspitze gemessen wurde, wurde der Verlauf im Modell gut vorhergesagt. An den oberhalb von Rheinfelden liegenden Vorhersagestationen ist die Güte des Modells geringer. Bedingt durch die kleinere Gebietsgrösse

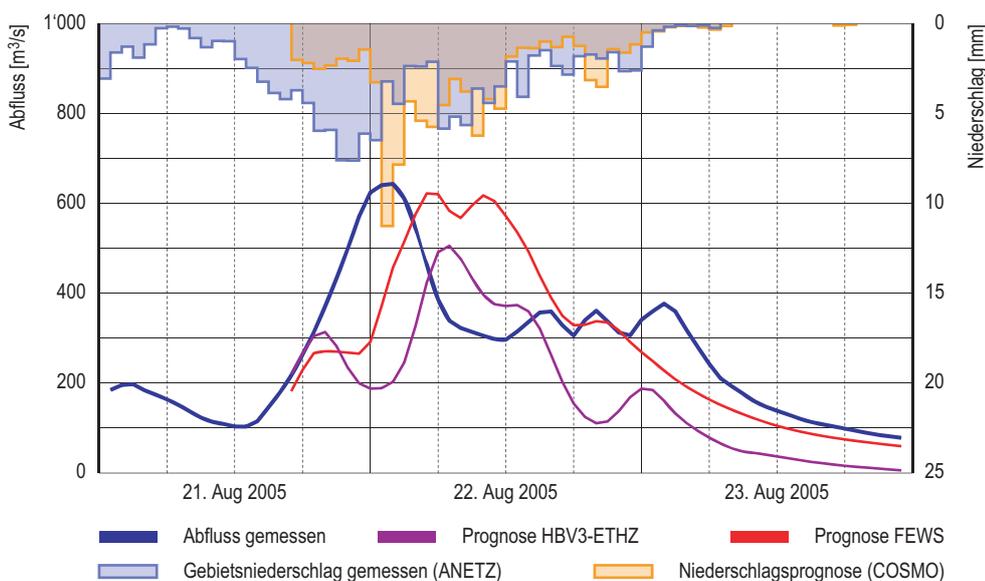
haben Reguliermassnahmen bei den Seen einen vergleichsweise grösseren Einfluss. Zudem nimmt die Vorhersagbarkeit des Niederschlages mit abnehmender Gebietsgrösse schnell ab, diesbezügliche Fehler mitteln sich weniger aus.

**Abb. 5.8** > Vergleich der gemessenen Abflüsse mit den Ergebnissen des Vorhersagesystems HBV3-ETHZ vom 19.–23. August für die Station Rhein-Rheinfelden.

Die dicke blaue Linie zeigt den gemessenen Abfluss, die dünnen farbigen Linien alle durchgeführten Vorhersagen, wobei pro Tag jeweils eine Farbe gewählt wurde. Die punktierten waagrechten Linien markieren die Vorhersage-Schwellenwerte.



**Abb. 5.9** > Vergleich der gemessenen Abflüsse und Niederschläge mit den Ergebnissen der Vorhersagesysteme HBV3-ETHZ und FEWS vom 21.08.2005 17:00 Uhr MEWZ für die Station Kleine Emme-Littau.



Am Beispiel der Kleinen Emme bei Littau soll ein Vergleich zwischen dem heute operationellen Vorhersagemodell HBV3-ETHZ und dem neuen Vorhersagesystem FEWS gezogen werden (Abb. 5.9). Beide Modelle rechnen den Scheitelabfluss zu tief und den Zeitpunkt der Spitze zu spät, wobei FEWS ein deutlich besseres Ergebnis zeigt. Neben der leicht unterschiedlichen Modellstruktur sowie unterschiedlichen Kalibrierungsperioden hat auch eine andere Aggregation der vorhergesagten Niederschläge auf das Einzugsgebiet einen Einfluss auf die Güte. Tendenziell lässt sich für das Augusthochwasser 2005 beobachten, dass FEWS höhere Spitzenabflüsse berechnet als HBV3-ETHZ. In einigen Einzugsgebieten führt dies zu einer Verbesserung der Güte, in anderen zu einer massiven Überschätzung. Ein Teil dieses Verhaltens kann auf die Überschätzung der Niederschläge im COSMO zurückgeführt werden.

#### 5.3.4 Synthese Abflussvorhersagen

Das Augusthochwasser war für den Vorhersagedienst des BAFU die grösste Bewährungsprobe seit dem Hochwasser von 1999. Im Gegensatz zu diesem, wo die ausserordentlich lange Dauer, während der sich die Abflüsse und Pegelstände auf sehr hohem Niveau bewegten, charakteristisch war, zeichnete sich das Augusthochwasser 2005 durch einen sehr raschen Anstieg und einen schnellen Rückgang der Pegelstände aus.

Bewährungsprobe

Das BAFU hat alle Kantone, welche die Abflussvorhersagen im Abonnement beziehen, frühzeitig mit Vorhersagebulletins beliefert, wenn auch nicht für alle betroffenen Vorhersagestationen. Die rechtzeitige Aufnahme des ausserordentlichen Vorhersagedienstes ist jedoch im Wesentlichen auf die Eigeninitiative des Dienst habenden Prognostikers zurückzuführen. Es sind strukturelle, organisatorische und technische Massnahmen notwendig, um möglichst zu verhindern, dass ein künftiges Ereignis verpasst oder zu spät erkannt wird.

Erhöhung des  
Vorhersageintervalls

Mit den heute vorliegenden Erkenntnissen hätte der 24 h-Betrieb am Abend des 21. Augusts aufgenommen werden müssen. Für die flussabwärts liegenden Vorhersagestationen an der Aare und der Reuss, wo in den oberen Teileinzugsgebieten gemessene Niederschläge und Abflüsse massgeblich zum Tragen kommen, hätte sich im kurzfristigen Vorhersagebereich eine Verbesserung ergeben.

Aufnahme des 24 h-Betriebes

Für kleinere Einzugsgebiete wie das der Emme bei Emmenmatt (443 km<sup>2</sup>) und der Kleinen Emme bei Littau (477 km<sup>2</sup>) stehen zu wenig hydrologische und vor allem meteorologische Messdaten zur Verfügung, um das Verhalten im Modell und die aktuelle Situation in genügender Genauigkeit wiederzugeben. Für diese beiden Einzugsgebiete wäre die Qualität der Vorhersagen nur mit zusätzlichen Messstationen und detaillierteren und häufiger aktualisierten meteorologischen Modellen zu verbessern. Die kurze Reaktionszeit bedingt in solchen Gebieten ein Nowcasting, wie es aus dem Wettervorhersagedienst bekannt ist. Für sehr kleine Einzugsgebiete ist eine vorhergesagte Ganglinie kein adäquates Endprodukt. Wohl sind prognostizierte Ganglinien für die interne Diskussion im Vorhersagedienst wichtig, gegenüber dem Kunden spiegeln sie jedoch eine Genauigkeit vor, welche mit den heute zur Verfügung stehenden Vorhersagesystemen nicht erreicht werden kann. Zum Teil wurde der Vorhersagedienst

Vorhersagen für kleine  
Einzugsgebiete

während des Augusthochwassers auch um Einschätzungen für kleine Gebiete gebeten, welche nicht explizit im hydrologischen Modell berücksichtigt sind. Hier müssen andere Wege gefunden werden, wie z.B. die Angabe einer Gefährdungstufe analog zum Lawinenvorhersagedienst.

Diverse Anfragen an den Vorhersagedienst während des Hochwassers betrafen Einschätzungen zu Seen, welche durch das heute operationelle System HBV3-ETHZ nicht abgedeckt werden. FEWS bringt insofern eine Verbesserung, indem das gesamte Rheineinzugsgebiet abgedeckt ist und auch die grösseren Seen berücksichtigt sind. Probleme bereitet auf Grund der Wasserkraftnutzung im Alpengebiet die Vorhersage der Zuflüsse zu den Seen. Die Reguliervorschriften für die Seeausflüsse sind berücksichtigt, ein institutionalisierter Informationsfluss zwischen Kantonen und Vorhersagedienst im Fall von Abweichungen ist aber zwingend notwendig, um die Vorhersagegüte der Unterlieger zu verbessern.

Vorhersagen für Seen

Anders als in der Meteorologie wird im hydrologischen Vorhersagedienst normalerweise der direkte Modelloutput in Form von prognostizierten Abflussganglinien als Endprodukt an die Kunden weitergeleitet. Das Erstellen von Lagebeurteilungen ab dem 22. August war mit erheblichem Zusatzaufwand verbunden, hat sich aber bewährt. Zumindest in kritischen Situationen sind die klassischen Vorhersagebulletins um eine Modellinterpretation bzw. eine Lagebeurteilung zu ergänzen. Besonders in kleineren Einzugsgebieten und für Prognosekunden, welche mit Niederschlags-Abfluss-Modellierungen und -Vorhersagen weniger gut vertraut sind (Feuerwehren, lokale Einsatzbehörden) ist eine Hilfestellung für die Übertragung und konkrete Anwendung der Modellresultate auf die lokalen Verhältnisse unabdingbar.

Zusätzliche Vorhersageprodukte

5.4

## Erkenntnisse

Das Ereignis vom August 2005 hat deutlich die Probleme und Grenzen aufgezeigt, welche heute in der Vorhersage von gefährlichen Naturereignissen bestehen. Ein Beispiel für grundsätzliche Grenzen ist der Vergleich der Ergebnisse der meteorologischen Vorhersagemodelle untereinander (Abschnitt 1.2). Es zeigt sich eindeutig, dass die Aussagegenauigkeit der heutigen deterministischen Modelle begrenzt ist und, dass ihre Ergebnisse in Bezug auf ein lokales Ereignis manchmal sogar widersprüchlich sein können. Die Ursache dafür ist aber nicht in einer schlechten Qualität der verwendeten Modelle zu suchen, sondern vor allem im chaotischen Verhalten des Systems Atmosphäre und in der immer vorhandenen Unsicherheit über die Anfangsbedingungen.

Die kritische Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen in einem chaotischen System wird bei so genannten «Ensemble Vorhersagen» ausgenutzt. Dabei werden die Anfangsbedingungen leicht verändert («gestört»), um anhand von mehreren Modellläufen das Spektrum der möglichen Entwicklungen zu erhalten. Damit ist es möglich, nicht nur eine meteorologische Vorhersage (z.B.: «Im Einzugsgebiet der Emme fallen in 24 Stunden 95 mm Niederschlag») zu erhalten, sondern auch noch eine Wahrscheinlichkeit für deren Eintreffen anzugeben. Diese «probabilistische» Vorhersage gibt also eine *zusätzliche* Information: neben der vorausgesagten Verteilung, Intensität etc. des

Ensemble Vorhersagen

Niederschlags auch noch die Eintretenswahrscheinlichkeit innerhalb der Vorhersageperiode.

Es versteht sich von selbst, dass sich diese Unsicherheit in der Wettervorhersage vollumfänglich auf die Abflussvorhersagen auswirkt und deshalb mit dieser weiter gearbeitet werden muss. Dabei ist auch zu beachten, dass die räumlichen Massstäbe der Hydrologie und der Meteorologie grundsätzlich verschieden sind. Während hydrologische Modelle für präzise Vorhersagen einzugsgebietsscharfe Niederschlagsvorhersagen brauchen würden, ist es meteorologischen Vorhersagemodellen auf Grund der oben erläuterten Unsicherheiten nicht möglich, diese Genauigkeiten je zu erreichen. Es sind zwar vor allem im Bereich der kurzzeitigen Vorhersagen (Nowcasting) erhebliche Verbesserungen zu erwarten, aber Unsicherheiten werden bleiben. Deshalb, aber auch wegen der Unsicherheiten in der Abflussmodellierung selbst, werden Abflussvorhersagen auch in Zukunft mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sein.

Das Hauptproblem bei den Abflussvorhersagen im August 2005 lag jedoch nicht in der Unsicherheit der meteorologischen oder hydrologischen Vorhersagen. Vielmehr haben sich im damaligen BWG, dem heutigen BAFU, sehr deutlich Grenzen struktureller Art gezeigt. Einerseits waren weder die technischen Systeme zur Verbreitung der Informationen auf die aufgetretenen Belastungen ausgelegt, was zu einem zeitweiligen Informationsausfall auf Kundenseite führte, noch waren diese Systeme redundant verfügbar. Andererseits gab es zu wenig Personal, um auch mit grösstem Einsatz die notwendige Koordination mit der MeteoSchweiz und eine adäquate Beratung der Kunden in den kantonalen Krisenstäben sicherzustellen. Um das in Zukunft zu verhindern, gilt es, die im Projekt OWARNA (Optimierung von Warnung und Alarmierung) (BABS, 2006) geforderten Massnahmen in Bezug auf Ressourcen für die Abflussvorhersage, Schaffung einer adäquaten Rechtsgrundlage für die Abflussvorhersage und das Business Continuity Management bei allen beteiligten Institutionen zügig umzusetzen.

Das Ereignis vom August 2005 hat aber auch grundsätzlich bekannte Lücken in der Koordination zwischen den beteiligten Stellen eindrücklich bestätigt, welche sich in teilweise mangelhafter Konsistenz der Aussagen auswirkten. Die Fachstellen, welche für wetterbedingte Naturgefahren relevante Informationen verbreiten, haben deshalb schon vor dem Hochwasser 2005 beschlossen, die Gemeinsame Informationsplattform Naturgefahren (GIN) aufzubauen. Auf dieser sollen bei entsprechenden Situationen gemeinsame Bulletins zusammen mit den Daten aller beteiligten Institutionen (MeteoSchweiz, BAFU, SLF/WSL) an die Einsatzorgane verbreitet werden.

Mit dieser Plattform können in Zukunft den Verantwortlichen in Bund und Kantonen die bestmöglichen Entscheidungsgrundlagen zur Verfügung gestellt werden. Wegen der erwähnten systemimmanenten Unsicherheiten, werden sie aber niemals *genau* die lokale Entwicklung voraussagen können. Zukünftig wird es sich dabei vermehrt um Ensemble Vorhersagen handeln, welche diese Unsicherheiten aufzeigen. Diese Vorhersagen können aber bei weitreichenden Entscheidungen oft nicht die alleinige Grundlage sein. Vielmehr müssen sie zusammen mit lokalen Beobachtungen und Lokalkennntnis bewertet und interpretiert werden, damit sie in lokale Handlungsanweisungen umgesetzt werden können. Dazu brauchen die Entscheidungsträger auf allen Stufen die

Unschärfen deklarieren

Gemeinsame  
Informationsplattform für  
Naturgefahren GIN

Naturgefahrenspezialisten in  
Krisenstäben notwendig

fachliche Unterstützung von Naturgefahrenspezialisten, die entsprechend geschult werden. Wie dies konkret aussehen könnte, wird im Rahmen des zweiten Teils der Ereignisanalyse studiert.

**Literatur:**

BABS 2006: Optimierung von Warnung und Alarmierung – Schlussbericht in Erfüllung des VBS-Auftrages vom 1. November 2005, Bundesamt für Bevölkerungsschutz, Bern.

Bürgi Th. 2002: Operational flood forecasting in mountainous areas. (Ed. Spreafico M., Weingartner R.) International Conference on Flood Estimation. March 6–8, 2002, Bern, Switzerland. Proceedings. Report no. II–17 of the International Commission for the Hydrology of the Rhine basin: 397–406.

Lindström G., Johansson B., Persson M., Gardelin M., Bergström S. 1997: Development and test of the distributed HBV–96 model. *J. Hydrol.* 201, 272–288.

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 2006: Starkniederschlagsereignis August 2005. Arbeitsberichte der MeteoSchweiz 211, 63 S.

Montani A., Marsigli C., Nerozzi F., Paccagnella T., Tibaldi S., Buizza R. 2003: The Soverato flood in Southern Italy: performance of global and limited-area ensemble forecasts. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 10, 261–274.

Rossa A. M., Arpagaus M., Zala E. 2003: Weather Situation-Dependent Stratification of Precipitation and Upper-air Verification of the Alpine Model (aLMo). *COSMO Newsletter DWD, Offenbach, Germany*, 3, 123–138.

Nadine Hilker, Dörte Aller, Christoph Hegg

## 6 > Schäden

*Mit einer Gesamtschadenssumme von knapp 3 Mrd. Franken stellt das Unwetter vom 21./22.08.2005 das schadensreichste Hochwasser in der Schweiz seit mindestens 100 Jahren dar. In den fünf besonders schwer betroffenen Kantonen Bern, Luzern, Uri, Obwalden und Nidwalden entstanden 75 % der Gesamtschadenssumme. Knapp ein Drittel aller Schweizer Gemeinden haben Schäden verzeichnet. Die Schadenssumme teilt sich in drei Viertel private und einen Viertel Infrastrukturschäden auf.*

### 6.1 Einleitung

Im Rahmen der Ereignisanalyse wurden die erfassten Schäden für die gesamte Schweiz dokumentiert, lokalisiert sowie den Prozessen zugeordnet. Seit 1972 sammelt und analysiert die Eidgenössische Forschungsanstalt WSL Unwetterschäden durch Hochwasser und Rutschungen systematisch in einer Datenbank. Die Ereignisse vom 21./22. August wurden im gleichen Stil erfasst, wobei die zur Verfügung stehende Datengrundlage detaillierter war als bei kleineren Ereignissen. Die Schäden wurden soweit möglich den betroffenen Kantonen und Gemeinden sowie den verursachenden Prozessen zugeordnet. Dabei wurde zwischen den drei Kategorien Hochwasser / Überschwemmung, Murgang und Rutschung / Hangmure unterschieden. Ziele waren die Dokumentation und Analyse der entstandenen Schäden und ihrer verursachenden Prozesse – insbesondere in Bezug auf die räumliche Verteilung – sowie ein Vergleich mit früheren Hochwasserereignissen. Dabei ging es nur um die direkten Schäden, d.h. um erfasste Wiederherstellungskosten. Der versicherte Betriebsunterbruch stellt einen Grenzfall dar und wurde hier analog zu früheren Untersuchungen mitberücksichtigt. Für andere indirekte Kosten (z.B. Einbussen im Tourismus) liegen keine Zahlen vor. Sie werden nicht erfasst und sind schwierig abzuschätzen. Es ist aber anzunehmen, dass es sich dabei um eine beträchtliche Summe handelt.

Unwetterschadensdatenbank

### 6.2 Datengrundlagen

Das BAFU (ehemals Bundesamt für Wasser und Geologie BWG) hat Informationen zu Schäden an subventionsberechtigter Infrastruktur bei den Kantonen erfragt. Diese Schäden umfassen pro Kanton die Kategorien Wasserbau, Gewässerschutz, Wald, National-, Haupt-, übrige Strassen, Bahnen, Landwirtschaft sowie weitere öffentliche Bereiche. Gemeindestrassen und weitere nicht subventionsberechtigter Infrastruktur sind darin nicht enthalten.

Schäden an subventionsberechtigter Infrastruktur

Die Daten zu privaten Schäden (Gebäude, Mobiliar, Motorfahrzeuge, übrige Sachschäden und Betriebsunterbruch) wurden von den Kantonalen Gebäudeversicherungen und den im Schweizerischen Versicherungsverband (SVV) zusammengeschlossenen Privatversicherungen zur Verfügung gestellt. Die Angaben der Kantonalen Gebäudeversicherungen liegen grösstenteils auf Gemeindeebene vor und beinhalten neben den schon bezahlten auch die noch nicht abgerechneten (aber schon abgeschätzten) Schäden. Die Privatversicherungen stellten die bezahlten Schäden (Gebäude, Hausrat und übrige Fahrhabe) auf Postleitzahlen-Ebene zur Verfügung. Die noch nicht abgerechneten Schäden der Privatversicherungen liegen jedoch nur als Schätzung für die gesamte Schweiz vor. Die Schweizer Hagelversicherung hat die Schäden am Kulturland auf Gemeindeebene zur Verfügung gestellt.

Versicherungsdaten

Neben subventionierten und versicherten Schäden kommen Kosten für nicht versicherte oder nicht versicherbare Objekte hinzu, die von Spenden (z.B. Glückskette) oder von Hilfsfonds (z.B. Fonds für Hilfe bei nicht versicherbaren Elementarschäden) übernommen werden oder von den Betroffenen selber getragen werden müssen (z.B. Gemeindestrassen). Da Fonds und Spendeninstitutionen als letzte abrechnen, werden wohl frühestens 2007 verlässliche Schätzungen vorliegen.

Fonds und Spenden

Im Zusammenhang mit den abgelaufenen Prozessen und deren Lokalisierung waren ausserdem Zeitungsmeldungen aus der gesamten Schweiz sowie die durch die betroffenen Kantone aufgenommenen Informationen wichtige Grundlagen. Die meisten Kantone (bzw. die beauftragten Büros) füllten dazu für jedes Ereignis ein StorMe-Formular vor Ort aus. Darin wurden die Prozesse lokalisiert und die entstandenen Schäden möglichst genau beschrieben. Die Unterlagen der Kantone enthielten meist auch wertvolle Fotos und Kartenausschnitte sowie teilweise Analyseberichte von beauftragten Fachbüros. Für die Schadensdatenbank der WSL wurden die Prozessarten (Wasser- bzw. Hangprozesse) innerhalb einer Gemeinde zusammengefasst und mit der Schadenssumme ergänzt. Allerdings ging pro Gemeinde in Bezug auf die Wasserprozesse jeweils nur die Hauptprozessart (entweder Hochwasser / Überschwemmung oder Murgang) in die Analyse ein.

Weitere Quellen

In diesem Kapitel wird nur von den tatsächlich erfassten finanziellen Schäden gesprochen. Bei Vergleichen bezüglich der Betroffenheit zwischen Kantonen bzw. Gemeinden oder mit früheren Ereignissen ist zu beachten, dass die Schäden nicht nur vom Ausmass des Ereignisses beeinflusst werden, sondern dass einerseits effiziente Prävention, Intervention oder Schadensbewältigung das Schadensausmass reduziert und andererseits hohe Schadenspotenziale dieselben erhöht haben.

### 6.3 Zuordnung der Daten

Bei der Dokumentation der Daten ergaben sich einige Probleme und Unsicherheiten hinsichtlich der Lokalisierung der Schäden sowie der Zuweisung bezüglich Schaden verursachender Prozesse. Gewisse Schäden konnten weder einer Gemeinde noch einem Kanton zugeordnet werden. Dies war besonders bei den noch nicht abgerechneten

Lokalisierung der Schadensdaten

Schäden der privaten Versicherungen der Fall. Solche Unsicherheiten werden im Laufe der Abwicklung der Schadensfälle zum grössten Teil verschwinden. Der Schweizerische Versicherungsverband SVV hat bisher Gebäude-, Hausrats- und Fahrhabeschäden von rund 692 Mio. Franken (80% der Fälle) abgeschlossen. Es sind zwar in der Regel nur noch wenige Schadensfälle offen, dafür sind dies meist die grossen und langwierigen, bei denen ganze Gebäude aufgebaut oder Produktionsmaschinen wiederhergestellt werden müssen, bevor genaue Werte bekannt sind. Auch die Betriebsunterbruchsschäden können erst grob abgeschätzt werden. Noch nicht abgeschlossen sind noch schätzungsweise weitere 258 Mio. Franken Gebäude- und Mobiliarschäden, ca. 95 Mio. Franken «übrige Sachschäden» (z.B. Schäden an Bahnen) und ca. 200 Mio. Franken Schäden infolge von versicherten Betriebsunterbrüchen. Weitere ca. 90 Mio. Franken Motorfahrzeugkasko sind abgeschlossen, können aber nicht genau lokalisiert werden. Es erschien durchaus als sinnvoll, diese Schäden – mit Ausnahme von Betriebsunterbruch – proportional zu den bereits erledigten Zahlungen auf die Kantone aufzuteilen. Die budgetierten Gebäudeschäden wurden dabei ausschliesslich auf die Kantone Uri, Obwalden und Schwyz verteilt, da dort nur private Versicherungsgesellschaften Gebäude versichern. Es wurde angenommen, dass sich die Beiträge aus Fonds und Spenden zusammen auf 100 Mio. Franken belaufen. Auch für die angefallenen Schäden an Gemeindestrassen wurde eine Gesamtsumme von 100 Mio. Franken geschätzt. Auf Grund der Unsicherheiten wurden diese beiden Werte sowie die Kosten durch Betriebsunterbruch keinem Kanton zugeordnet (Tab. 6.1). Knapp 10% der Infrastrukturschäden (ohne Bahnen und Gemeindestrassen) konnten nicht mit angemessenem Aufwand einer Gemeinde zugewiesen werden.

Grosse Unklarheit besteht im Bereich der Bahnen. Der Gesamtschaden beläuft sich auf rund 124 Mio. Franken. Laut BAFU übernimmt davon die öffentliche Hand knapp 55 Mio. Franken. Nicht bekannt ist, wie weit der Rest privat versichert ist oder von den Bahnen selbst getragen wird. Der Gesamtschaden konnte grösstenteils auf Kantons-ebene lokalisiert werden. Dabei ist es möglich, dass Doppelzählungen in Verbindung mit den privaten Versicherungen auftreten. Für eine grobe Schätzung der gesamtschweizerischen Schäden erscheint diese Lösung aber vertretbar. Da keine vollständige Verteilung auf Gemeindeebene möglich war, wurde auf eine solche Zuordnung verzichtet. Ein ähnliches Problem stellt die grosse Schadenssumme der Firma RUAG von rund 150 Mio. Franken im Kanton Uri dar, da diese nicht auf die versicherten, subventionierten oder selber zu tragenden Schäden aufgeteilt werden konnte. Der gesamte Betrag wurde zu den bereits bekannten Schäden im Kanton Uri addiert, obwohl so Doppelzählungen auftreten können. Es ist davon auszugehen, dass die oben erwähnten «übrigen Sachschäden» der privaten Versicherungen zumindest Teile der Kosten der Bahnen und der RUAG beinhalten.

Teilweise gab es auch Probleme bei der Zuordnung der Schäden auf die verursachenden Prozesse. Aus den Daten der privaten Versicherungen ging jeweils nicht hervor, ob es sich um ein Hochwasser oder einen Murgang handelte. Da für die vorliegende Analyse im Zweifelsfall der Schaden einem Hochwasser zugeordnet wurde, besteht die Möglichkeit, dass Murgänge unterbewertet wurden. Auch bei den Versicherungsdaten ist nicht auszuschliessen, dass vereinzelt Rutschungsschäden in der Kategorie Überschwemmung geführt wurden. Bei den Daten der öffentlichen Schäden wurde des

Schäden an Bahnen  
und der RUAG

Zuordnung auf die  
verursachenden Prozesse

Öfteren nur das beschädigte Objekt, nicht aber der verantwortliche Prozess, erwähnt. Die Unterlagen der Kantone sowie die Presseberichte waren in vielen dieser Fälle sehr nützlich, um eine Zuordnung zu machen. Dennoch konnte für die vorliegende Analyse der Hochwasserschäden nicht genau zwischen Prozessen wie dynamischer oder statischer Überflutung, Ufererosion oder Übersarung unterschieden werden, da innerhalb einer Gemeinde oft gleichzeitig mehrere dieser Prozesse vorkamen. Wo Fotos oder nähere Beschreibungen fehlten, war auch die Feineinteilung der Hangprozesse in Rutschungen und Hangmuren schwierig. Oft handelte es sich auch um eine Kombination beider Prozesse. Deshalb wurde hier auf eine solche Unterscheidung verzichtet.

Viele Schäden wurden nach eingehender Recherche und bestem Wissen lokalisiert und den Prozessen zugeordnet, andere blieben unaufgeschlüsselt. Schäden von rund 1.83 Mrd. Franken konnten einer Gemeinde und einem verursachenden Prozess zugewiesen werden. Das heisst, dass gut ein Jahr nach dem Ereignis über eine Milliarde Franken bzw. über ein Drittel der Schäden nicht genau lokalisiert werden können.

Die Handhabung der Schadensdaten erfolgte in Hinsicht auf die Vergleichbarkeit möglichst wie für die Analysen früherer Ereignisse. Daher sind Abweichungen zu Zahlen, wie sie andernorts publiziert werden, durchaus möglich. Ausserdem wurden hier, wie bereits erwähnt, nur die direkten Schäden (inkl. Betriebsunterbruch) dokumentiert und analysiert. Eine Schwierigkeit hinsichtlich der Vergleichbarkeit mit früheren Ereignissen liegt in der Definition der öffentlichen Schäden. Durch die Privatisierung verschiedener Betriebe (wie z.B. in den Bereichen Telekommunikation und Bahnen) werden heute viele Schäden nicht mehr durch die öffentliche Hand übernommen. Daher wird im vorliegenden Bericht bevorzugt von «Infrastrukturschäden» gesprochen. Es wurde also eher zwischen Objektarten als zwischen Trägerschaften unterschieden – ein Ansatz, der bei zukünftigen Ereignissen übernommen werden könnte.

Vergleichbarkeit  
mit früheren Ereignissen

6.4

## Schadensübersicht

Gesamtschweizerisch entstanden während des Unwetters vom 21./22. August erfassbare Schäden von rund 3 Mrd. Franken. Bisher wurde stets von einer Gesamtschadenssumme von 2.5 Mrd. Franken gesprochen. Einerseits sind einige Schäden zuvor nicht berücksichtigt worden. Dabei handelt es sich um nicht versicherte oder nicht versicherbare bzw. nicht subventionsberechtigte Schäden an Objekten wie z.B. Gemeindestrassen, Bahnen und Firmen (z.B. RUAG im Kanton Uri), die von den Betroffenen selber getragen werden müssen oder von Fonds und Spendenorganisationen übernommen werden. Andererseits haben in der Zwischenzeit einige Versicherungen und die öffentliche Hand die Entschädigungssummen nach oben korrigiert. Dies machte schliesslich die Differenz von rund 500 Mio. Franken von den bisherigen Schadensschätzungen zur Gesamtsumme von 3 Mrd. Franken gut ein Jahr nach dem Ereignis aus. Tab. 6.1 zeigt die Verteilung der Schäden auf Kantonsebene.

3 Mrd. Franken  
Gesamtschadenssumme

**Tab. 6.1 > Übersicht der Gesamtschadenssumme (gerundet, in Mio. Franken).**

Die Angaben unter «Kanton unklar» beziehen sich auf Betriebsunterbruch und Gemeindestrassen sowie einen kleinen Teil der Bahnschäden.

	Private Schäden [Mio. Fr.]	Infrastrukturschäden (ohne Bahnen) [Mio. Fr.]	Schäden an Bahnen [Mio. Fr.]	Total [Mio. Fr.]
BE	575	170	60	805
LU	525	65	< 5	590
UR	320	30	15	365
OW	260	65	20	345
NW	75	40	< 5	120
GR	45	40	< 5	85
SZ	60	20	< 5	80
AG	45	< 5	< 5	50
ZG	25	10	< 5	35
SG	20	10	5	35
GL	15	10	< 5	25
ZH	15	< 5	< 5	15
SO	10	< 5	0	10
übrige Kantone	> 5	> 5	0	15
Kanton unklar	200	100	15	315
<b>Zwischentotal</b>	<b>2'195</b>	<b>570</b>	<b>125</b>	<b>2'890</b>
			durch Fonds und Spenden gedeckte Schäden	100
			<b>Gesamtschadenssumme ganze Schweiz</b>	<b>2'990</b>

Über 25% der gesamtschweizerischen Schadenssumme sind allein im Kanton Bern entstanden. Die fünf am stärksten betroffenen Kantone Bern, Luzern, Uri, Obwalden und Nidwalden weisen zusammen rund 75% des Gesamtschadens auf. Werden die Schäden der Kantone pro Fläche bzw. pro Einwohner betrachtet, dann sind der Kanton Obwalden mit über 700'000 Franken pro km<sup>2</sup> bzw. der Kanton Uri mit über 10'400 Franken pro Einwohner am schwersten betroffen. Der Kanton Bern ist mit 135'000 Franken pro km<sup>2</sup> bzw. knapp 850 Franken pro Einwohner an sechster bzw. an fünfter Stelle bezüglich Schadensausmass. Solche Auswertungen sind jedoch mit Vorsicht zu geniessen, da in einigen Kantonen, wie im Kanton Bern, bei weitem nicht die ganze Fläche betroffen war.

In Abb. 6.1 werden die Anteile der privaten und der Infrastrukturschäden an der Gesamtschadenssumme pro Kanton dargestellt. Gesamtschweizerisch beträgt der Anteil der Infrastrukturschäden rund 25%, wobei Schäden im Bereich Wasserbau den Hauptanteil ausmachen. Die Kantone Bern, Obwalden, Schwyz und Zug weisen ähnliche Werte wie dieses gesamtschweizerische Mittel auf. In den ebenfalls stark betroffenen Kantonen Luzern und Uri beträgt der Anteil der Infrastrukturschäden jedoch nur etwa 10%. In diesen beiden Kantonen fielen vorwiegend Schäden an Industriebetrieben ins Gewicht. Die Kantone Aargau, Zürich und Solothurn haben mit weniger als 10% die

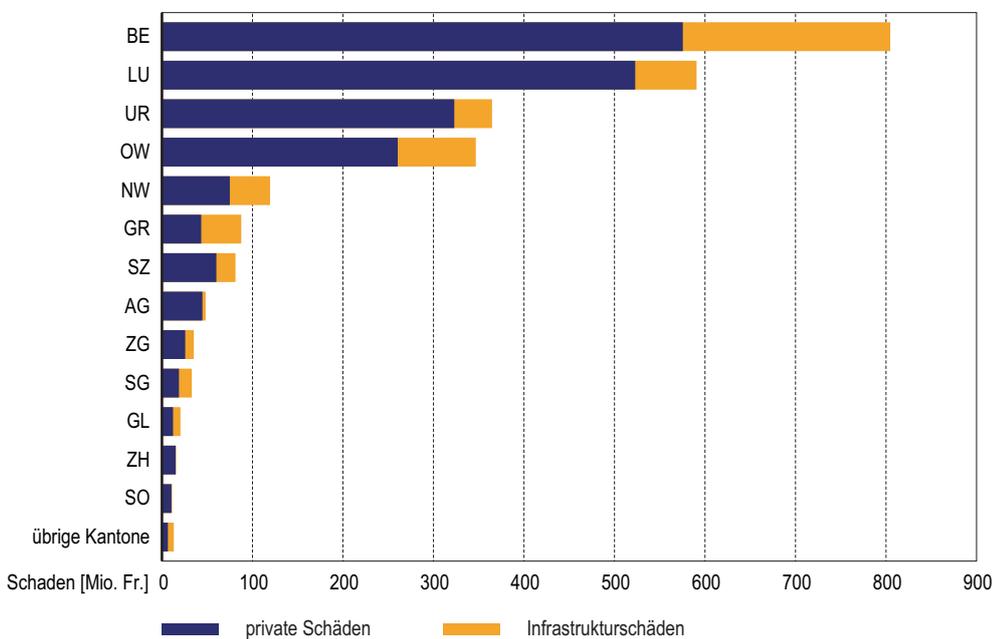
¼ des Gesamtschadens in den  
Kantonen BE, LU, UR, OW, NW

¼ private Schäden -  
¼ Infrastrukturschäden

geringsten Anteile an Infrastrukturschäden zu verzeichnen. Im Gegensatz dazu weisen die Kantone Nidwalden, Graubünden, St. Gallen und Glarus mit bis zu 50% deutlich höhere Anteile auf.

**Abb. 6.1 > Aufteilung der Gesamtschadenssumme pro Kanton in private und Infrastrukturschäden (in Mio. Franken).**

Grundlage: Kantonsdaten von 2.57 Mrd. Franken – nicht berücksichtigt sind 415 Mio. Franken, die den Kantonen nicht zugeordnet werden konnten. Gesamtschweizerisch weisen die Infrastrukturschäden einen Anteil von rund 25% an der Gesamtschadenssumme auf.



## 6.5 Schadensprozesse und betroffene Regionen

Für die Analyse der räumlichen Verteilung der Schäden und der Schadensprozesse wurden nur jene Daten verwendet, die auf Gemeindeebene vorlagen (1.83 Mrd. Franken). In Abb. 6.2 ist das Schadensausmass der einzelnen Gemeinden dargestellt.

Rund 900 Gemeinden, also fast ein Drittel aller Gemeinden der Schweiz, waren durch Wasser- und / oder Hangprozesse betroffen. Dabei lässt sich kein eindeutiger Schadensschwerpunkt feststellen. Mindestens 100 Gemeinden hatten ein grosses Schadensausmass zu verzeichnen. Davon waren wiederum mindestens 15 Gemeinden mit Schäden zwischen rund 50 und 200 Mio. Franken sehr stark betroffen.

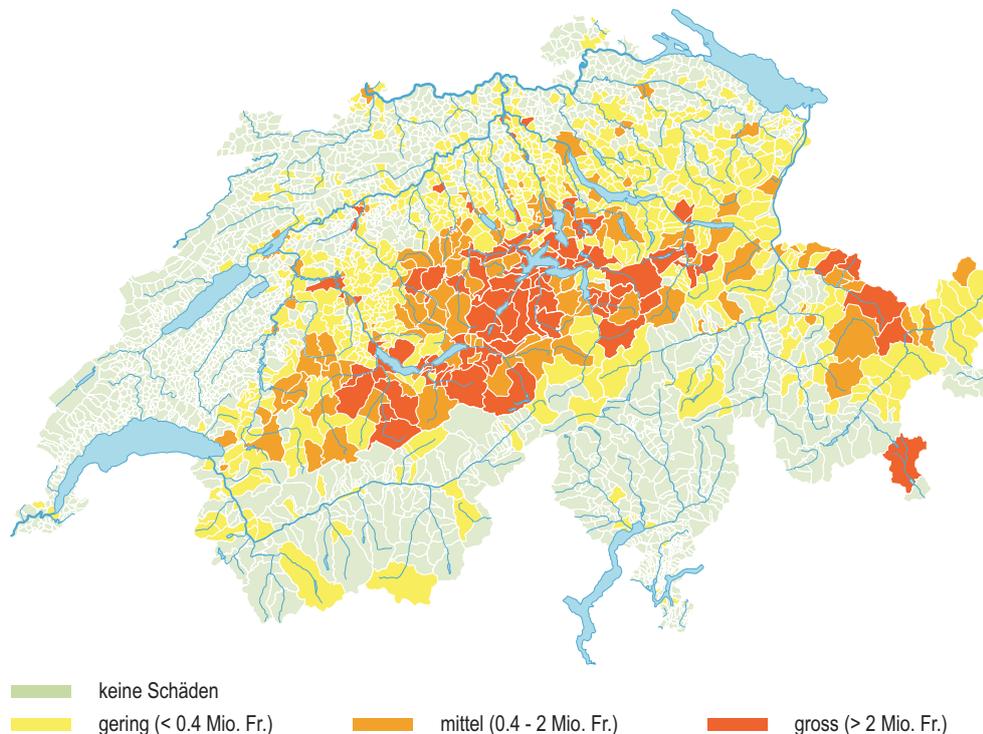
**Knapp ein Drittel aller Schweizer Gemeinden betroffen**

Grosse Hochwasserschäden entstanden vorwiegend in den nördlichen Voralpen und in der Zentralschweiz sowie entlang grosser Flüsse im Mittelland, wie z.B. in Bern BE an der Aare oder in Windisch AG an der Reuss. Zudem entstanden im Mittelland viele Schäden von kleinerem Ausmass. Die Rutschungen beschrieben mehr oder weniger ein

Band entlang der nördlichen Voralpen mit Ausläufern im Kanton Graubünden. Diese Verteilungen entsprechen den damals herrschenden Niederschlagsverhältnissen. Rutschungen und massive Überschwemmungen ereigneten sich primär in den Gebieten mit den stärksten Regenfällen und die grossen Flüsse transportierten diese Wassermengen weiter nach Norden. Der Jura, die Alpen und die Alpensüdseite blieben vom Unwetter weitgehend verschont.

**Abb. 6.2 > Karte des Schadensausmasses.**

Grundlage: Gemeindedaten von 1.83 Mrd. Franken.



Kartengrundlage: Digitale Übersichtskarte der Schweiz (K606-01 © 2004 swisstopo)

Abb. 6.3 zeigt die Anteile der verursachenden Prozesse an der Schadenssumme pro Kanton. 92 % der Schäden wurden durch die Prozesse Hochwasser, Überschwemmung, Übersarung, aufsteigendes Grundwasser oder abfliessendes Hangwasser verursacht. Dabei sorgten hauptsächlich grosse Flüsse und Seen für lang anhaltende, aber meist geschiebearme Überschwemmungen und führten vor allem im Siedlungsgebiet zu grossen Schäden. Durch Hochwasser kam es ausserdem zu massiven Ufererosionen. Murgänge als Hauptprozesse in den Gemeinden spielten mit nur 3 % Schadensanteil eine eher untergeordnete Rolle. Am meisten Schäden richteten die Murgänge vom Glyssi- und vom Trachtbach in der Gemeinde Brienz BE an. 5 % aller Schäden sind auf Rutschungen und Hangmuren zurückzuführen. Absolut gesehen, entstanden mehr als 75 % der Rutschungsschäden in den Kantonen Bern, Luzern, Obwalden und Nidwalden.

**95 % der Schäden durch Wasserprozesse verursacht**

**Abb. 6.3 > Hauptschadensprozesse aufgeteilt nach Kanton (in Mio. Franken).**

Grundlage: Gemeindedaten von 1.83 Mrd. Franken. Nicht enthalten sind die Schäden an der RUAG im Kanton Uri, wodurch dieser Kanton nur an vierter anstatt an dritter Stelle liegt.

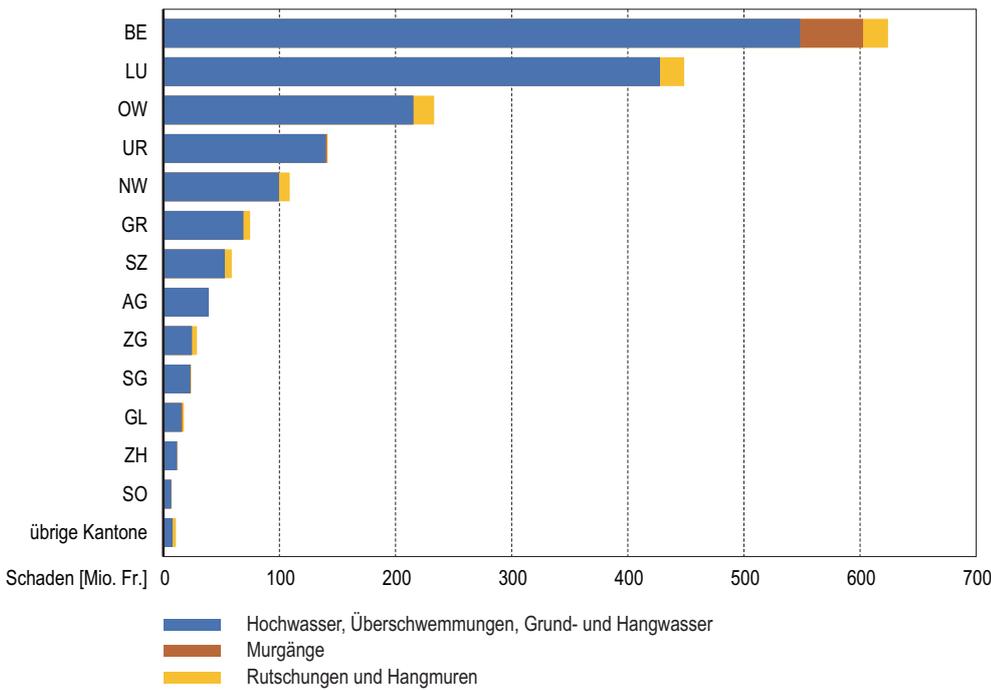
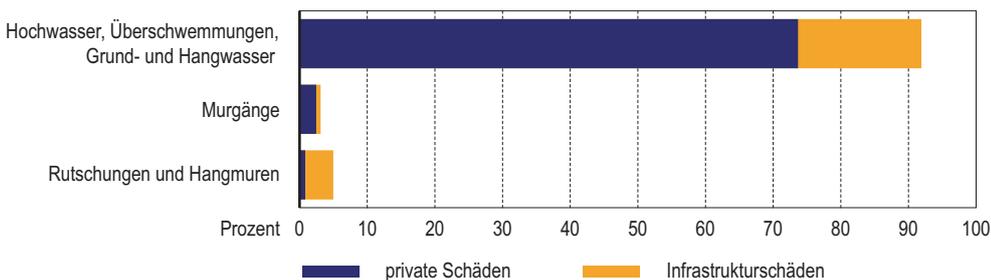


Abb. 6.4 zeigt, dass Prozesse im Zusammenhang mit Wasser hauptsächlich zu privaten Schäden geführt haben. Rutschungen hingegen betrafen vorwiegend Infrastruktur. So wurden fast 96% der Gebäude- und Mobiliarschäden durch Hochwasser verursacht, gut 3% durch Murgänge und der Rest durch Erdbeben. Im Gegensatz dazu wurden Strassen zu 21% durch Rutschungen beschädigt und zu 79% durch Wasser. Das liegt daran, dass bei Überschwemmungen an Strassen in der Regel weniger Schäden entstehen als an Gebäuden und deren Einrichtungen. Gerade entlang der Gewässer liegen Siedlungen mit grossem Schadenspotenzial. Rutschungen ziehen hingegen eher lineare Objekte wie Strassen in Mitleidenschaft.

Zusammenhang Prozessart – private / Infrastrukturschäden

**Abb. 6.4 > Aufteilung der Schäden auf die verursachenden Prozesse sowie auf private und Infrastrukturschäden.**

Grundlage: Gemeindedaten von 1.83 Mrd. Franken.



Bei etwa der Hälfte der über 800 durch Wasser betroffenen Gemeinden konnten die Schäden keinem Gewässer zugeordnet werden. Es wird vermutet, dass es sich dabei um Schäden durch aufsteigendes Grundwasser oder abfliessendes Hangwasser handelt. Die Schadenssumme von etwa 32 Mio. Franken ist zwar vergleichsweise klein, aber die Versicherungen schätzen den Anteil und vor allem die Anzahl dieser Schäden um einiges höher ein. Darauf deutet auch eine prozessorientierte Studie mit Daten der Kantonalen Gebäudeversicherung Bern von 32 betroffenen Gemeinden hin (geo7, 2007). In diesen Gemeinden wurden 5320 Gebäude beschädigt oder zerstört und wiesen eine Schadenssumme von knapp 310 Mio. Franken auf. Über die Hälfte der betroffenen Gebäude mit rund 27% dieser Schadenssumme lagen ausserhalb der kartierten Prozessfläche, d.h. sie sind entweder durch Rutschungen oder durch Grund- oder Hangwasser beschädigt worden. Diese Erkenntnis bedeutet für die gesamtschweizerische Dokumentation, dass ein Teil der Schäden fälschlicherweise dem Hochwasser zugeordnet worden ist. Grund- und Hangwasserprozesse werden normalerweise weder in Gefahrenkarten ausgewiesen noch durch raumplanerische Massnahmen berücksichtigt und können nicht durch wasserbauliche Massnahmen beeinflusst werden. Solche Schäden lassen sich durch Objektschutz verhindern. Teilweise sind schon einfache Massnahmen, wie z.B. höhere Lichtschächte, wirksam.

Hang- und Grundwasserschäden

## 6.6 Dokumentation der Prozesse und der Schäden nach Kantonen

Nachfolgend werden die Ereignisse in den betroffenen Kantonen detaillierter beschrieben. Alle Angaben zu Schadenszahlen – mit Ausnahme der kantonalen Gesamtschadenssummen – stammen aus der Datengrundlage auf Gemeindeebene und stellen somit Mindestangaben dar.

Der Kanton Bern verzeichnete mit rund 805 Mio. Franken die höchste Schadenssumme aller Kantone (Tab. 6.1). Diemtigen stellt mit mindestens 80 Mio. Franken die am stärksten betroffene Berner Gemeinde dar – gefolgt von Thun, Interlaken, Bern, Reichenbach im Kandertal und Brienz. Der Brienz-, Thuner- und Bielersee wiesen die höchsten je gemessenen Pegelstände auf. In Bächen, Flüssen und Seen verkeilte sich Schwemmholz in Engpässen oder Schleusen (z.B. in Thun), behinderte den Abfluss und führte stellenweise zu Ausbrüchen. Der Kanton Bern weist gesamtschweizerisch gesehen die grössten Schäden durch Rutschungen auf. Von den über 21 Mio. Franken fallen etwa 85% auf Infrastrukturschäden (insbesondere Verkehrsverbindungen). Am meisten Schäden verursachten die Hangprozesse in den Gemeinden Diemtigen, Langnau im Emmental, Trub, Eggiwil und Eriz. Nachfolgend soll auf jene Berner Gemeinden genauer eingegangen werden, bei denen die Schäden 10 Mio. Franken überschritten haben: In der Stadt Bern verursachte die Aare im Mattequartier Schäden von rund 50 Mio. Franken (Abb. 6.5). Zahlreiche Läden, Büros, Werkstätten und Wohnungen wurden überschwemmt und mussten evakuiert werden.

Kanton Bern  
805 Mio. Franken

Der aussergewöhnlich hohe Wasserstand des Thunersees und der Aare bei Thun sowie gestiegenes Grundwasser führten zu überfluteten Kellern und Verkehrsverbindungen in der Stadt Thun. Die Chirel beschädigte in der Gemeinde Diemtigen – vor allem im

Dorf Oey – knapp 200 Gebäude (rund 32 Mio. Franken) und riss ganze Strassenabschnitte weg (rund 35 Mio. Franken). Ausserdem wurden der Bahnhof Oey und die Gleise der BLS völlig zerstört. In der Gemeinde Reichenbach im Kandertal wurde der gesamte Talboden überflutet. Die Kiene richtete im Dorfteil Kien Schäden von über 45 Mio. Franken an. Die Kander verursachte in der Gemeinde Kandersteg vor allem Gebäude- und Mobiliarschäden. Die Gemeinden Interlaken und Unterseen wurden durch den Briener- bzw. Thunersee, die Aare und die Lütchine (nur Interlaken) überschwemmt. Das Hochwasser der (Schwarzen) Lütchine war für den grössten Teil der Schäden in den Gemeinden Grindelwald und Lütchentäl verantwortlich. Der Fluss verursachte hauptsächlich Infrastrukturschäden, indem er Teile der Bahnlinie und der Hauptstrasse zerstörte sowie Schäden im Bereich Wasserbau anrichtete. In den Gemeinden Wilderswil und Matten bei Interlaken hingegen verursachte die Lütchine vorwiegend Schäden an Gebäuden.

**Abb. 6.5** > Überflutung des Berner Mattequartiers durch die Aare (Foto: Schweizer Luftwaffe).



Zwei Menschen wurden in der Gemeinde Brienz in ihrem Haus durch den Murgang des Glyssibachs getötet. Acht Häuser wurden vollständig zerstört. Die Murgänge im Glyssi- und im Trachtbach (Abb. 6.6) sowie der hohe Wasserstand des Brienersees und der Aare richteten in Brienz Schäden von mindestens 50 Mio. Franken an. Im flachen Talboden der Gemeinde Meiringen vermochten die Bäche das Geschiebe nicht mehr bis zum Vorfluter zu transportieren oder wurden vom hohen Wasserstand der Aare zurückgestaut, was zur Ausuferung führte. Ausserdem brachen die Aaredämme an vier Stellen. Als Folge wurden grosse Gebiete – auch in anderen Gemeinden – überflutet oder übersart und es entstand ein Sachschaden von über 28 Mio. Franken. In

der Gemeinde Guttannen bewirkten Murgänge des Rotloui mit dem aufgeschütteten Geschiebe das Ausuferen der Aare, wodurch vor allem linienhafte Infrastruktur beschädigt wurde. Des Weiteren war die Region Emmental stark betroffen, wobei aber nicht alle einzelnen Gemeinden ein grosses Schadensausmass aufwiesen (Abb. 6.2).

**Abb. 6.6** > Murgang des Trachtbachs bei Brienz (Foto: Schweizer Luftwaffe).



Der Kanton Luzern verzeichnete Schäden von rund 590 Mio. Franken. Hauptsächlich waren zahlreiche Gewerbe- und Industriegebiete entlang der Kleinen Emme von Überschwemmungen betroffen. In vielen Gebäuden wurden intensiv genutzte Räume in Erd- und Untergeschossen durch Geschiebe und Schlamm verwüstet. Ausgelaufenes Heizöl hat das Schadensausmass zusätzlich beträchtlich erhöht (Gebäudeversicherung des Kantons Luzern, 2006). Über 900 Personen mussten entlang der Kleinen Emme evakuiert werden. Die Gemeinde Emme (mit dem grossen Industriegebiet in Emmenbrücke) erlitt Hochwasserschäden von rund 180 Mio. Franken und ist damit, neben Bürglen / Schattdorf UR, eine der am stärksten betroffenen Gemeinden der Schweiz. Die Gemeinde Littau (ebenfalls mit Überflutungsschäden durch die Kleine Emme) steht mit über 110 Mio. Franken an zweiter Stelle im Kanton. Weitere Luzerner Gemeinden mit einer Schadenssumme über 5 Mio. Franken sind Malters, Luzern,

**Kanton Luzern  
590 Mio. Franken**

Werthenstein (Abb. 6.7), Weggis, Root, Vitznau und Entlebuch. Vielerorts kam es zu massiven Ufererosionen und Damnbrüchen – teilweise wegen lokaler Erdbeben und Hangmuren, die viel Geschiebe und Schwemmholz in die Gewässer eintrugen. Der Vierwaldstättersee überschwemmte das Verkehrshaus und die Luzerner Innenstadt. Letztere wurde zusätzlich von der Reuss in Mitleidenschaft gezogen. Vor allem in den Gemeinden Entlebuch und Werthenstein, aber auch Wolhusen, Escholzmatt und Schüpfheim verursachten Hangmuren und Rutschungen hohe Schäden. Diese Hangprozesse führten im Kanton zu dreimal höheren Infrastrukturschäden (ca. 15 Mio. Franken) als Gebäudeschäden (ca. 5 Mio. Franken), obwohl einige Gebäude total zerstört wurden. Das Schadensausmass durch Hangprozesse erreichte im Kanton Luzern fast jenes des Kantons Bern. In der Gemeinde Entlebuch forderte eine Hangmure zudem zwei Todesopfer.

**Abb. 6.7** > Vom Hochwasser der Kleinen Emme mitgerissene Strasse bei Werthenstein.



Uri hatte im Vergleich zu anderen Innerschweizer Kantonen nur wenige Schäden durch Hangrutsche zu verzeichnen. Der Hauptanteil der geschätzten 365 Mio. Franken Gesamtschaden ist auf die Überschwemmung von teuren und empfindlichen Industriebetrieben zurückzuführen. Der Anteil der Infrastrukturschäden ist mit gut 10% sehr niedrig. Die höchsten Schadenssummen im Kanton wurden in den Gemeinden Schattdorf, Bürglen und Altdorf registriert. Sie gehören zu den am stärksten betroffenen Gemeinden in der Schweiz und sind vergleichbar mit jenen der Region Emmen–Littau im Kanton Luzern. Der Schächen und seine Zuflüsse gelten als Hauptverursacher der Schäden. Schnell ansteigendes und lang andauerndes Hochwasser führte im Schächengrinne zu grossen Geschiebeumlagerungen und ausgeprägten Tiefen- und Ufererosionen. Der Fluss beschädigte die Klausenstrasse in den Gemeinden Bürglen und Spiringen an mehreren Stellen. Zu den grössten – und zwar privaten – Schäden kam es allerdings im Mündungsbereich des Schächens: Die Reuss vermochte das Geschiebe des Schächens nicht mehr weiterzutransportieren. Dadurch kam es im Schächen zu rückschreitender Ablagerung und zum Ausbruch. Erschwert wurde die Situation dadurch, dass im Bereich der Mündung mehrere Brücken den Abfluss behinderten. So kam es zu grossflächigen Überschwemmungen im Gebiet des Schattdorfer Industrieareals. Der Gesamtschaden der Firma RUAG beläuft sich gemäss eigenen Angaben auf rund 150 Mio. Franken. Des Weiteren wurde das Maderanertal stark in Mitleidenschaft gezogen. In Bristen (Gemeinde Silenen) wurden acht Gebäude sowie die Talstation der Golzernseilbahn durch das Hochwasser des Chärstelenbachs zerstört (Abb. 6.8). Die Reussdämme bei Amsteg brachen und so wurde unter anderem die Autobahn überflutet, welche zwischen Flüelen und Erstfeld gesperrt werden musste. Später musste die gesamte Nord-Südachse – auch wegen den Ereignissen in den Nachbarkantonen – für mehrere Tage geschlossen werden. In der Gemeinde Flüelen führte die Ausuferung des Urnersees vorwiegend zu privaten Schäden.

Kanton Uri

365 Mio. Franken

**Abb. 6.8** >Massive Gerinneverlagerung des Chärstelenbachs bei Bristen (Foto: Amt für Tiefbau, Kt. UR).



Im Kanton Obwalden (Kanton Obwalden und Amt für Wald und Raumentwicklung Obwalden, 2006) wurde eine Gesamtschadenssumme von rund 345 Mio. Franken erfasst, wovon 260 Mio. Franken auf Gebäude- und Mobiliarschäden fallen. Über 40% dieser privaten Schäden sind in der Gemeinde Sarnen (Abb. 6.9) entstanden, wo unter anderem die Kulturgütersammlung des Benediktinerinnenklosters St. Andreas überflutete wurde. Sämtliche Gemeinden in Obwalden wiesen ein grosses Schadensausmass auf. Alle mittleren und grösseren Wildbäche, die Sarner Aa sowie der Sarnersee führten Hochwasser. Die beträchtlichen Abflüsse führten zu Überflutungen, Auflandungen und Verklausungen von Gerinnen. An zahlreichen Stellen entstanden Schäden an Verbauungen, Bachläufen und Verkehrswegen. So wurde unter anderem die Kantonsstrasse nach Engelberg von der Engelberger Aa unterspült und schliesslich teilweise mitgerissen, was einen Schaden von über 10 Mio. Franken anrichtete. Auch das Melchtal war zeitweise von der Umwelt abgeschnitten. Ersatzstrassen mussten gebaut werden. Das Schienennetz der Zentralbahn wurde sowohl im Sarneraatal als auch im Engelbergertal an zehn Stellen schwer beschädigt, fünf Bahnhöfe standen unter Wasser und fünf Brücken wurden zerstört. Über 1000 Hangmuren gingen im gesamten Kanton nieder, insbesondere in den Gebieten Kerns, Grosses Melchtal, Alpnach-Kägiswil und Engelberg und beschädigten hauptsächlich Wald-, Alp- und Güterstrassen. Teilweise waren davon aber auch Wohnhäuser und Gewerbebauten betroffen. Wegen Überflutungsgefahr und drohenden Hanginstabilitäten mussten zeitweise über 300 Personen ihre Häuser verlassen.

Kanton Obwalden 345 Mio.  
Franken

**Abb. 6.9** > Überschwemmung von Sarnen (Foto: Schweizer Luftwaffe).



Im Kanton Nidwalden (Regierungsrat des Kantons Nidwalden, 2005) wurde die Gesamtschadenssumme auf rund 120 Mio. Franken geschätzt. Die intensiven Niederschläge verwandelten sowohl die Engelberger Aa als auch Wildbäche in reissende

Kanton Nidwalden  
120 Mio. Franken

Flüsse, die grosse Mengen an Geschiebe und Holz ins Tal beförderten und stellenweise über die Ufer traten. Schäden von mindestens 20 Mio. Franken verzeichneten die Gemeinden Ennetbürgen, Stansstad und Wolfenschiessen. Die Hochwasserschutzmassnahmen an der Engelberger Aa waren in den beiden letztgenannten Gemeinden noch nicht realisiert. In der Gemeinde Wolfenschiessen wurde unter anderem das Schienennetz der Zentralbahn sehr stark beschädigt oder sogar zerstört. Auf Grund der noch nicht fertig gestellten Projektmassnahmen ergoss sich das Aawasser in das flache Siedlungsgebiet von Ennetbürgen. Ausserdem verursachte die Überflutung im Entlastungskorridor zwischen Buochs und Ennetbürgen unerwartet mächtige Ablagerungen von Sand und Holz. Viele Bäche verursachten auch in Form von Murgängen grosse Schäden. Dabei sind der Haldi-, Buoholz- und Secklisbach in der Gemeinde Wolfenschiessen hervorzuheben. Das Schadensausmass der Murgänge im Kanton Nidwalden ist in Abb. 6.3 nicht ersichtlich, weil in allen Gemeinden die Schäden durch Hochwasser dominierten und jeweils nur der Hauptschadensprozess in die Analyse einging. Teilweise konnten die Geschiebesammler die grossen anfallenden Feststoffmengen nicht mehr zurückhalten. Das Kantonsspital in Stans war durch den Lauigraben und den Kniribach besonders stark betroffen. Zusätzlich lag der Wasserspiegel des Vierwaldstättersees während rund acht Tagen über der Schadensgrenze und auch der angestiegene Grundwasserspiegel führte zu zahlreichen Überflutungen von Keller- und Erdgeschossen. Damit verbunden war vor allem in Stansstad die Gewässerverschmutzung durch das Auslaufen von Öl aus Heizungsanlagen. Über 800 Rutschungen und Hangmuren verursachten enorme Schäden an landwirtschaftlichen Kulturen und zerstörten sogar einzelne Gebäude, insbesondere in den Gemeinden Wolfenschiessen, Dallenwil, Oberdorf und Ennetmoos (Abb. 6.10). Im ganzen Kanton mussten wegen Hochwasser oder Hangprozessen mehr als 350 Personen evakuiert werden.

**Abb. 6.10** > Rutschungen und Hangmuren am Mueterschwandenberg (Foto: Schweizer Luftwaffe).



Im Kanton Graubünden wurden Schäden von gesamthaft über 85 Mio. Franken registriert, wobei sich private und Infrastrukturschäden in etwa die Waage halten. Mit Abstand am stärksten in Mitleidenschaft gezogen wurde die Gemeinde Klosters-Serneus mit einer Schadenssumme von über 43 Mio. Franken. Die Starkniederschläge führten auch hier zu verschiedenen Prozessen, wobei die grossflächigen Überschwemmungen der Landquart dominierten. Mehr als 100 Gebäude waren dadurch betroffen (hauptsächlich Wohnhäuser, aber auch öffentliche Bauten, Hotels, Gewerbebetriebe und landwirtschaftliche Bauten). Weitere markante Schäden in Klosters entstanden an Infrastrukturanlagen (Strassen, Brücken, Strom- und Wasserversorgung, Kraftwerksanlagen der Rätia Energie). In der Gemeinde Susch verursachte hauptsächlich die Susasca Schäden von über 4 Mio. Franken. Zwischen Ardez und Scuol im Unterengadin wurden das Bahntrasse und die Kantonsstrasse beschädigt. In der Gemeinde Küblis wurde eine 72-jährige Frau von einem in der Landquart treibenden Baum getroffen, fiel in den Fluss und konnte nur noch tot geborgen werden. Im Kanton mussten gesamthaft über 200 Menschen evakuiert werden.

**Kanton Graubünden**  
**85 Mio. Franken**

Im Kanton Schwyz entstanden Schäden von etwa 80 Mio. Franken und rund 800 Menschen mussten evakuiert werden. Am meisten Schäden richtete das Unwetter in den Gemeinden Ingenbohl, Schwyz, Gersau, Muotathal und Arth an. Die Autobahn Küssnacht-Brunnen war zeitweise nicht befahrbar. Wegen Wasseraustritten und Rutschungen in der Gemeinde Morschach musste die Axenstrasse nach Sisikon UR sowie die Gotthardlinie der SBB für mehrere Tage gesperrt werden. Teile von Brunnen wurden vom Vierwaldstättersee überflutet und es entstanden vorwiegend Gebäude- und Mobiliarschäden. Die Seewern und der Lauerzersee traten über die Ufer und überfluteten in der Gemeinde Schwyz unter anderem mehrere Keller, den Campingplatz und die Autobahn. Die Gemeinde Gersau war von Hangmuren, kleineren Murgängen und dem Hochwasser des Vierwaldstättersees betroffen. Teilweise waren sogar Totalschäden an Gebäuden zu verzeichnen. Die Muota riss in der Gemeinde Muotathal die Strasse ins Bisisthal auf einer Länge von 30 m mit und der Hüribach richtete erhebliche Schäden an Gewerbebauten an. Vom Rossberg (Gemeinde Arth) löste sich eine Schlammmasse von etwa 30'000 m<sup>3</sup> und floss in Richtung Arth und Goldau.

**Kanton Schwyz**  
**80 Mio. Franken**

Die im Kanton Aargau entstandenen Schäden von rund 50 Mio. Franken wurden ausschliesslich durch Wasser verursacht. Mit über 13 Mio. Franken war die Gemeinde Windisch bei weitem am stärksten betroffen, da die Reuss tief gelegene Quartiere der Stadt überflutete. Ausserdem richteten die Reuss auch in der Gemeinde Mellingen, die Wigger in der Gemeinde Brittnau und die Limmat in der Gemeinde Wettingen (Klosterhalbinsel) grössere Schäden an. Im ganzen Kanton machten überschwemmte Keller und Tiefgaragen den grössten Teil der Schadenssumme aus. Ansonsten wurden vorwiegend Wasserschutzbauten beschädigt. Etwa 200 Personen wurden evakuiert und diverse Strassen und Brücken gesperrt.

**Kanton Aargau**  
**50 Mio. Franken**

Im Kanton Zug wurde eine Schadenssumme von rund 35 Mio. Franken verzeichnet. Das Ägerital wurde am meisten in Mitleidenschaft gezogen. Unterägeri war von der Aussenwelt abgeschnitten und es mussten etwa 150 Personen evakuiert werden. Die Gemeinde hatte mit über 13 Mio. Franken mit Abstand die höchste Schadenssumme zu vermelden. Ein grosses Schadensausmass wiesen auch die Gemeinden Baar, Oberägeri

**Kanton Zug**  
**35 Mio. Franken**

und Risch auf. Die Gefahr ging eher von den kleineren Bächen sowie der Reuss bei Hünenberg aus, während es am Zugersee kaum zu problematischen Situationen kam. An vielen Orten gingen Hangrutschungen nieder, welche Schäden von über 4 Mio. (vor allem an der Infrastruktur) Franken anrichteten.

Ebenfalls rund 35 Mio. Franken Gesamtschaden entstand im Kanton St. Gallen. In der Gemeinde Weesen führten vorwiegend kleinere Bäche wie der Lauibach zu Schäden an Gebäuden und Ufern und zu einer Schadenssumme von fast 12 Mio. Franken. Die Linth setzte in der Gemeinde Schänis den Bahnhof Ziegelbrücke unter Wasser und beschädigte dabei ein Stellwerk. Zahlreiche Strassen, Keller und Tiefgaragen wurden überschwemmt und es ereigneten sich Erdrutsche. Neben dem Linthgebiet waren auch das Toggenburg und die Stadt St. Gallen betroffen. Mit Ausnahme von Weesen und Schänis wiesen alle Gemeinden im Kanton weniger als 1 Mio. Franken Schaden auf.

**Kanton St. Gallen**  
35 Mio. Franken

Im Kanton Glarus wurde eine Gesamtschadenssumme von rund 25 Mio. Franken registriert. Die regional sehr variablen Niederschlagsintensitäten hatten zur Folge, dass die verschiedenen Bäche und Flüsse unterschiedlich schnell und stark anstiegen. Ungewöhnlich grosse Abflüssen führten Linth, Löntsch, Fätschbach und Sernf, wobei aber Linth und Sernf in ihrem hinteren Einzugsgebiet normale Abflüsse aufwiesen. Auch die meisten Runsen und kleinere Seitenbäche führten keine grossen Abflüsse und so war der Schwemmholz- und Geschiebeeintrag in die Linth verhältnismässig gering. Die Linth überschwemmte vor allem in der Gemeinde Ennenda verschiedene Industrie- und Gewerbebezonen sowie Wohngebiete und verursachte damit den Hauptschadensanteil. Die grössten Infrastrukturschäden entstanden an Wasserbauten der Linth und des Löntsch. Mit Ausnahme einer grossen Hangmure im hinteren Klöntal (Gemeinde Glarus), welche einen neuen Stall vollständig zerstörte, spielten die Massenbewegungsprozesse eine untergeordnete Rolle. Sie führten vor allem zu Schäden an Kulturland und Verkehrsträgern oder lösten in einzelnen Gerinnen Murgänge aus.

**Kanton Glarus**  
25 Mio. Franken

Im Kanton Zürich kam es generell nur zu kleineren Überschwemmungen. Einige kleinere Bäche sowie die Sihl führten Hochwasser. Der erfassbare Schaden von rund 15 Mio. Franken (fast ausschliesslich Gebäude- und Mobiliarschäden) blieb somit verhältnismässig gering. Allerdings gab es in der Gemeinde Dürnten einen Todesfall zu beklagen. Die Polizei ging davon aus, dass der Mann vom Dorfbach erfasst worden und ertrunken ist.

**Kanton Zürich**  
15 Mio. Franken

Der grösste Teil der im Kanton Solothurn entstanden Schäden von über 10 Mio. Franken sind der Emme zuzuschreiben. Es wurden Keller und Landwirtschaftsflächen überschwemmt, Ufer angerissen und einzelne Brücken beschädigt.

**Kanton Solothurn**  
10 Mio. Franken

Die übrigen Kantone wiesen zusammen Schäden von knapp 15 Mio. Franken auf und werden hier nicht näher erläutert.

## 6.7

**Vergleich mit früheren Ereignissen**

Nach jedem grossen Hochwasserereignis stellt sich die Frage nach dessen Eintretenswahrscheinlichkeit. Diese Frage lässt sich für messbare Parameter (z.B. Abfluss oder Niederschlag) mit den Methoden der Extremwertstatistik grundsätzlich beantworten (Kap. 1 und 2). Schwieriger gestaltet sich die Beantwortung für Hochwasserereignisse als Ganzes, da letztlich wohl jedes Ereignis in seiner Ursache–Wirkungskombination und in seiner detaillierten Ausprägung als einmalig anzusehen ist. Trotzdem wurde versucht, das Hochwasser vom August 2005 in Bezug auf betroffenen Raum und verursachte Schäden mit früheren Ereignissen zu vergleichen. Auf Grund der Grenzen der Statistik und der sehr unterschiedlichen Datenqualität, vor allem bei früheren Ereignissen, erfolgten diese Betrachtungen hauptsächlich auf qualitative Art und Weise. Dazu wurden folgende Aspekte betrachtet:

- > Ausdehnung und Lage der betroffenen Region
- > Anzahl Todesopfer
- > Schadenszahlen und deren Verteilung auf unterschiedliche Kostenträger

**Schwierigkeiten: Grenzen der Statistik und unterschiedliche Datenqualität**

**Tab. 6.2 > Katastrophale Hochwasser in der Schweiz seit Beginn des 19. Jahrhunderts (nach Röhliberger, 1991; Pfister, 2002).**

Datum	Beschreibung
1830, 16. Juli	Schweres Unwetter im Hauensteingebiet (BL/SO) mit 19 Todesopfern. Eher kleinräumiges Ereignis, vor allem auf Grund der Zahl der Toten als katastrophal eingestuft.
1831, 9./10. und 28./29. August	Schwere Überschwemmungen in der Innerschweiz und im Berner Oberland. Wenig detaillierte Informationen vorliegend. Ausdehnung inneralpin möglicherweise ähnlich wie 2005, offenbar aber ohne vergleichbare Ausdehnung ins Mittelland.
1834, 25.–28. August	Katastrophale Überschwemmungen in Graubünden, Glarus, Uri, Tessin und Wallis sowie angrenzenden Gebieten.
1839, 15. September und 5./6. Oktober	Betroffene Region ähnlich wie 1834, Ausmass jedoch vermutlich geringer.
1852, 17./18. September	Vermutlich grösstes Hochwasser im schweizerischen Mittelland in der betrachteten Periode. Von der Thur bis zur Rhone unterhalb von Martigny führten alle Flüsse des Mittellandes Hochwasser. Weniger betroffen scheint der Alpenraum südlich einer Linie Spiez–Luzern gewesen zu sein.
1868, Ende September / Anfang Oktober	Schweres Hochwasser mit ähnlicher Ausdehnung wie im August 1987. Vergleichsweise gut dokumentiert.
1876, 10.–15. Juli	Schweres Hochwasser im zentralen und östlichen Mittelland sowie in den östlichen Voralpen.
1910, 14./15. Juni	Schweres Hochwasser mit einer ähnlichen Ausdehnung wie 2005, wobei der Schadensschwerpunkt und das Niederschlagszentrum (Kap. 1) weiter im Osten lagen. Massgebliche Verstärkung des Ausmasses durch Schneeschmelze.
1927, 24./25. September	Schwere Hochwasser in den Kantonen Tessin und Graubünden sowie in angrenzenden Gebieten.
1977, 31. Juli/1. August	Grossräumiges Hochwasserereignis mit einem ausgeprägten Schadensschwerpunkt im unteren Reusstal und im Schächental.
1978, 7./8. August	Grossräumiges Ereignis mit einem eindeutigen Schwerpunkt im Kanton Tessin und einem zweiten an der Thur.
1987, 17.–19. Juli	Schweres Unwetterereignis vor allem im Vorderrheintal, Puschlav, Bleniotal und in der unteren Leventina.
1987, 24./25. August	Schwerstes Hochwasser im 20. Jahrhundert in der Schweiz. Betroffen waren vor allem die Kantone Uri, Wallis und Tessin sowie das Puschlav.
1993, 24. September	Schwere Hochwasserschäden im Oberwallis und im Tessin, wobei der Lago Maggiore seinen Höchststand erst am 14. Oktober erreichte.
1999, 11.–15. und 20.–22. Mai	Zwei Ereignisse, auf Grund der zeitlichen Nähe und der räumlichen Überlappung für die Schadensbetrachtungen kaum zu trennen. Das Auffahrtshochwasser betraf primär die Region Bern bis Zürich–Thur, jenes an Pfingsten hauptsächlich die Ostschweiz. Vor allem das erste Ereignis wurde massgeblich durch Schneeschmelze beeinflusst.
2000, 14./15. Oktober	Schweres Hochwasser in den Kantonen Wallis und Tessin. Mit 16 Todesopfern das in dieser Hinsicht folgenschwerste seit 1910.

Auf Grund der Vergleichbarkeit lag der Fokus dabei auf den grossen Ereignissen. Ausserdem sind für das 19. Jahrhundert nur für Grossereignisse zumindest teilweise detaillierte Informationen verfügbar. Als grosse Ereignisse werden im Folgenden jene berücksichtigt (Tab. 6.2), welche von Röthlisberger (1991) in seiner eher subjektiven Klassifikation nach unscharfen Kriterien als katastrophal bezeichnet wurden sowie vergleichbare Ereignisse in der jüngeren Vergangenheit.

Die finanziellen Schäden betrug 2005 etwa das Zehnfache der mittleren Schäden seit 1972 (350 Mio. Franken). Im Vergleich zum Mittelwert von etwa 3 Todesopfern pro Jahr, waren 2005 6 Todesopfer zu beklagen. Im 19. und auch noch zu Beginn des 20. Jahrhunderts waren bei Hochwasserereignissen in der Regel wesentlich mehr Todesopfer zu verzeichnen als 2005, (z.B. 1868: 50 Tote (Röthlisberger, 1991), 1910: 27 Tote (Pfister, 2002), 2005: 6 Tote). Diese Tatsache wird umso eindrücklicher, wenn die Bevölkerungsentwicklung seit dem 19. Jahrhundert in der Schweiz berücksichtigt wird. Seither hat sich die Bevölkerung mindestens verdoppelt. Auch wenn eine genaue quantitative Beurteilung nicht möglich ist, dürfte diese Abnahme der Todesfälle im Wesentlichen auf die in den letzten gut 100 Jahren ausgeführten wasserbaulichen und forstlichen Massnahmen sowie auf die wesentlich umfassenderen technischen Möglichkeiten zur Rettung von Personen aus gefährdeten Objekten zurückzuführen sein.

Vergleich der Anzahl Todesopfer

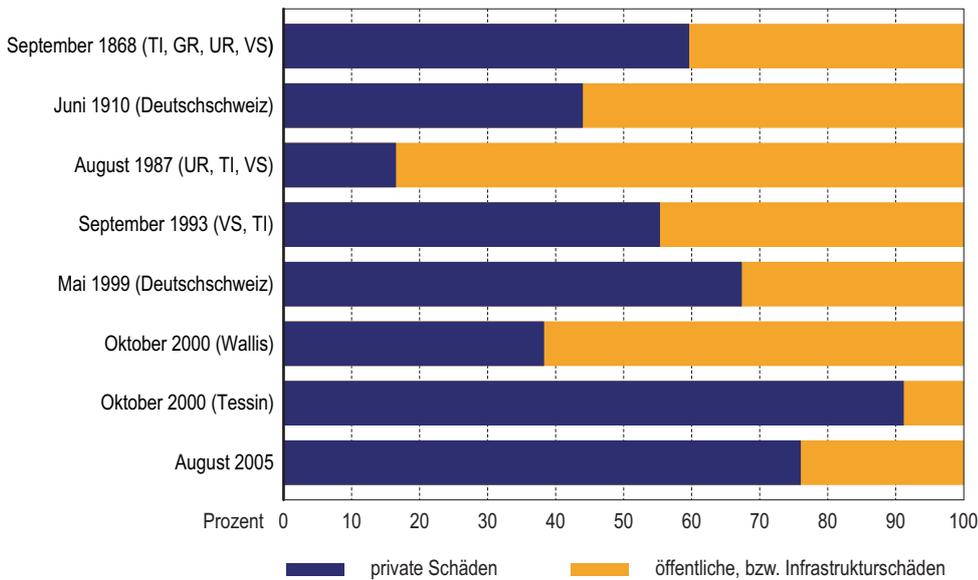
Wird die Entwicklung der Schadenszahlen durch Hochwasser und Rutschungen in der Schweiz seit dem Beginn der systematischen Erfassung im Jahre 1972 betrachtet, sticht das Ereignis vom August 2005 deutlich heraus. Weder ein Einzelereignis noch ein ganzes Jahr weisen höhere Schäden auf. Das bisher schadensreichste Jahr 1987 umfasste etwa 1.8 Mrd. Franken Schäden und war damit deutlich kleiner als 2005 mit rund 3 Mrd. Franken. Die Schäden mussten je nach Ereignis zu ganz unterschiedlichen Anteilen von Privaten (bzw. deren Versicherung) oder von der öffentlichen Hand getragen werden (Abb. 6.11). So dominieren beim Ereignis vom August 1987 eindeutig die Schäden an der öffentlichen Infrastruktur, während z.B. beim Hochwasser des Lago Maggiore im Tessin vom Oktober 2000 praktisch nur Schäden an privaten Gebäuden zu verzeichnen waren. 1987 betrafen zwei Drittel der Schäden den Kanton Uri, wo vor allem die öffentliche Infrastruktur (Autobahn, Bahnlinie, Kantonsstrasse) vom Reusshochwasser betroffen war.

Vergleich der finanziellen  
Schäden und der Trägerschaften

Beim Hochwasser 2005 traten erhebliche Schäden an der öffentlichen Infrastruktur auf, welche nur noch von jenem im August 1987 übertroffen wurden. Weit über allem bisher Beobachteten lagen dagegen die privaten Schäden. Mit über 2 Mrd. Franken liegen sie drei- bis viermal so hoch wie bei allen anderen Hochwasserereignissen seit 1972.

Die Versicherungen ordnen jeweils sowohl den Ereignisschaden als auch den Jahreschaden über alle Elementargefahren (Sturm, Hagel, etc.) ein. Schliesslich müssen die eingekommenen Prämien die Schäden aus allen Elementargefahren decken. Sowohl für die Privatversicherungen als auch für die Kantonalen Gebäudeversicherungen war der Ereignisschaden vom August 2005 das teuerste Elementarschaden-Ereignis seit den Anfängen der Elementarschadenversicherung in den 1930er Jahren. Werden die Jahreschäden betrachtet, war 2005 für die Privatversicherungen ebenfalls das bisher teuerste Jahr, bei den Kantonalen Gebäudeversicherungen sticht 1999 mit Schnee und Lawinen, Hochwasser, Hagel und dem Wintersturm Lothar als teuerstes Schadensjahr heraus.

**Abb. 6.11 > Anteile privater und öffentlicher Schäden ausgewählter historischer Hochwasserereignisse im Vergleich zu den entsprechenden Anteilen für das Unwetters 2005.**



Das Schadensausmass des Hochwassers vom August 2005 ist in der jüngeren Vergangenheit ohne Parallele, was aber auf Grund der kurzen Beobachtungsdauer von gut 30 Jahren nur wenig aussagt. Ein Vergleich mit früheren Ereignissen drängt sich deshalb auf. Wegen der unterschiedlichen Datenlage und den Veränderungen in den letzten 200 Jahren (z.B. Bebauungsdichte, Wirtschaftswachstum), kann ein Vergleich je nach gewähltem Parameter zu völlig unterschiedlichen Ergebnissen führen. Dies soll beispielhaft am Ereignis von 1868 erläutert werden, das einerseits recht gut dokumentiert ist und andererseits schon vielfach in diese Hinsicht untersucht wurde (unter anderem Petrascheck, 1989; Pfister, 2002). Wie bereits erwähnt, lässt sich 1868 recht gut mit 1987 in Bezug auf Ausmass und betroffenes Gebiet vergleichen. Nominal liegen die Schäden in völlig anderen Grössenordnungen, waren die Schäden im August 1987 mit etwa 800 Mio. Franken doch fast 60 Mal so gross wie 1868 mit etwa 14 Mio. Franken. Wird hingegen die Lohnentwicklung im Baugewerbe berücksichtigt, übertrifft der Schaden beim Ereignis von 1868 jenen vom August 1987 deutlich und liegt in einer ähnlichen Grössenordnung wie der Gesamtschaden des Jahres 1987 (Müller, 2003). Bei der Umrechnung der Schäden mit Hilfe des Bruttoinlandproduktes von 1868 auf heutige Werte, sind diese beinahe fünfmal höher als jene vom August 1987 (Pfister, 2002). Sie übertreffen mit etwa 4 Mrd. Franken sogar die Schäden von 2005. Möglicherweise war der Schaden 1852 noch grösser, lag doch schon allein im Kanton Aargau alleine der Schaden (umgerechnet mit der Lohnentwicklung im Baugewerbe) in einer ähnlichen Grössenordnung wie beim Ereignis vom August 1987. Zahlen zu den Gesamtschäden liegen nicht vor. Es kann deshalb nur vermutet werden, dass sie durchaus jene von 1868 und somit auch jene von 2005 übertreffen könnten.

6.8

## Erkenntnisse

Das Hochwasser vom 21./22. August stellt bezüglich finanzieller Schäden wohl eines der schwersten Unwetterereignisse in der Schweizer Geschichte dar. Heute ist die Situation der Betroffenen jedoch bezüglich finanzieller Bewältigung einer solchen Katastrophe mittels Institutionen wie Versicherungen, Fonds und Spendenorganisationen um einiges besser als früher. Zudem haben sich nach aktuellem Stand des Wissens erstellte Massnahmen zum Schutz vor Naturgefahren, wie z.B. das Projekt für die Engelberger Aa im Kanton Nidwalden, bewährt. Die verhältnismässig kleine Anzahl an Todesfällen ist unter anderem der Alarmierung und Evakuierung zu verdanken.

Rund ein Viertel der privaten Schäden (ca. 500 Mio. Franken) entstanden in den beiden Industriegebieten Emmen–Littau LU sowie Altdorf–Bürglen–Schattdorf UR. Dass alle betroffenen Betriebe ihren Standort an Orte verlagern, wo keine Gewässer eine Gefahr bilden, ist vermutlich wenig realistisch. Es stellt sich die Frage, mit welchen Massnahmen im Hinblick auf zukünftige Ereignisse Schäden vermindert oder sogar vermieden werden könnten. Diese Frage wird im Rahmen des zweiten Teils der Ereignisanalyse weiter behandelt.

Gut ein Jahr nach dem Ereignis konnten noch nicht alle Schäden erfasst und lokalisiert werden. Erst im Jahr 2007 kann mit präziseren Zahlen auf Versicherungs-, Fonds- und Spendenseite gerechnet werden. Für zukünftige Ereignisse sollte schon von vornherein vermittelt werden, in welcher Form Schadensdaten für Studien wie diese hier gewünscht werden – nämlich prozessorientiert und mit genauer Lokalisierung.

Gesamthaft kann gesagt werden, dass im 19. Jahrhundert mehrere Hochwasser aufgetreten sind, welche je nach Umrechnungsgrundlage das Schadensausmass von 2005 nur knapp nicht erreicht oder sogar übertroffen haben. Bei der Betrachtung längerer Zeitperioden verliert somit das Ausmass der Schäden vom August 2005 die Einzigartigkeit, welche es in den letzten gut 30 Jahren aufweist. Bei aller Unsicherheit der Beurteilung ist deshalb davon auszugehen, dass das Hochwasser vom August 2005 kein singuläres Ereignis ist, und dass mit dem wiederholten Auftreten ähnlicher Grossereignisse auch in Zukunft gerechnet werden muss.

Schadensbewältigung

Hohe Schäden  
in Industriegebieten

Datenerfassung  
bei zukünftigen Ereignissen

Es gibt vergleichbare Ereignisse  
im 19. Jahrhundert

**Literatur:**

geo7, 2006: Aktualisierung Schadenpotenzial-Studie. Vergleich der Studie 2001 mit den Schäden August 2005 und Neuberechnung Schadenpotenzial. Interner Bericht zuhanden Gebäudeversicherung des Kantons Bern.

Gebäudeversicherung des Kantons Luzern 2006: Das Unwetter August 2005.

Kanton Obwalden, Amt für Wald + Raumentwicklung Obwalden 2006: Unwetter 22./23. August 2005 – Ereignisdokumentation / Bericht

Müller R. 2003: «Das wild gewordene Element» – Gesellschaftliche Reaktionen auf die beiden Mittellandhochwasser von 1852 und 1876. Lizentiatsarbeit in Schweizer Geschichte an der Universität Bern, Bern. 233 S (unveröff.).

Petrascheck A. 1989: Die Hochwasser 1868 und 1987 – Ein Vergleich. Wasser Energie Luft, 81, Nr. 1–3: 1–8.

Pfister C. (Ed.) 2002: Am Tag danach – Zur Bewältigung von Naturkatastrophen in der Schweiz 1500–2000. Bern, Stuttgart, Wien: Haupt. 263 S.

Regierungsrat des Kantons Nidwalden 2005: Bericht über das Unwetter vom 22./23. August 2005 – Unwetterbericht 2005. erster Standbericht, Stans.

Röthlisberger G. 1991: Chronik der Unwetterschäden in der Schweiz. Berichte der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf. 330, 1991: 122 S.

Christoph Lehmann, Eva Gertsch, Alessandro Grasso, Adrian Jakob, Manfred Spreafico

## 7 > Feststoffbeobachtungen

*In den letzten Jahren wurden in der Schweiz je ein Beobachtungs- und Messnetz für den Geschiebe- und Schwebstofftransport aufgebaut. In diesem Kapitel werden die Informationen dargestellt und interpretiert, welche anlässlich des Hochwassers vom August 2005 erhoben wurden. Trotz der geringen Anzahl Stationen und der kurzen verfügbaren Datenreihen zeigt sich deutlich, dass das Ereignis für die grossen Flüsse bedeutender als für die Wildbäche war.*

### 7.1 Einleitung

Bei Feststoffen wird in einem Gewässer je nach Transportbedingungen und Art der transportierten Komponenten zwischen Geschiebe, Schwebstoffen oder Schwimmstoffen (z.B. Schwemmholz) unterschieden. Systematische Erhebungen der Schwimmstoffe werden in der Schweiz bis jetzt noch nicht durchgeführt. Für Geschiebe bzw. Schwebstoffe wurden in den letzten Jahren entsprechende Beobachtungs- bzw. Messnetze aufgebaut und betrieben.

Messnetze wurden vor kurzem aufgebaut

Das vorliegende Kapitel beschreibt kurz diese Netze und erläutert die Ergebnisse und Erkenntnisse, welche aus den Messungen und Beobachtungen während des Hochwassers 2005 gezogen werden konnten. Zu Beginn dieses Kapitels werden die Geschiebebeobachtungen und später die Schwebstoffmessungen erläutert.

### 7.2 Geschiebebeobachtungen

#### 7.2.1 Beschreibung des Messnetzes

Das Beobachtungsnetz wurde nach den Unwettern des Jahres 1987 erstellt und umfasst momentan über 80 Einzugsgebiete (Abb. 7.1). Die Abteilung Hydrologie des BAFU, die WSL und interessierte Kantone arbeiten dazu in der Gruppe für operationelle Hydrologie (GHO) zusammen und erfassen die Feststoffe in Geschiebeablagerungsplätzen nach einem gemeinsam festgelegten Konzept. Auf einheitlichen Meldeformularen werden folgende Parameter erhoben:

Messnetz besteht aus 80 Geschiebeablagerungsplätzen

- > Erhebungszeitraum
- > ausgebagerte Feststoffkubatur
- > Ursache des Feststoffanfalls
- > Zusammensetzung der Feststoffkubatur (Geschiebe, Feinmaterial, Holz)
- > Transportprozess (Geschiebetransport, Murgang).

Abb. 7.1 > Standorte der untersuchten Bäche im GH0 Beobachtungsnetz für Geschiebeablagerungsplätze.



Kartengrundlage: Digitale Übersichtskarte der Schweiz (K606-01 © 2004 swisstopo)

Wichtig ist die Unterscheidung zwischen der Feststofffracht eines Unwetters, der Jahresfracht oder einer Mehrjahresfracht, wenn ein Sammler nicht alljährlich geleert wird. Die Daten werden an der Abteilung Hydrologie in einer Datenbank gespeichert und ausgewertet. Die Ergebnisse werden den beteiligten Stellen zur Verfügung gestellt.

Daten liegen in sehr unterschiedlicher Dichte vor

Die Beobachtungsdauer und die Anzahl der Einträge in die Datenbank an den einzelnen Geschiebeablagerungsplätzen sind unterschiedlich. Sie hängen vom Geschiebeanfall im beobachteten Bach und von der Intensität ab, mit welcher die Erhebungen durchgeführt werden. Die längsten Beobachtungsreihen umfassen einen Zeitraum von beinahe 20 Jahren, wobei auch längere Datenlücken vorkommen.

Mit dem Beobachtungsnetz sollen primär die Grundlagen für spätere, detaillierte Auswertungen gelegt werden. Da der Geschiebetransport nicht kontinuierlich auftritt oder oft nur wenige Ereignisse registriert werden können, sind Messreihen von 20 oder weniger Jahren zu kurz, um umfassende Aussagen machen zu können.

Messnetz ist primär auf langfristiges Monitoring ausgelegt

Die untersuchten Bäche haben unterschiedliche Eigenschaften, was den Vergleich untereinander ebenfalls erschwert. Um die abgelaufenen Prozesse besser zu verstehen und die Vergleichbarkeit zu erhöhen, werden seit 2003 die zum Beobachtungsnetz gehörenden Einzugsgebiete systematisch dokumentiert. Diese Erhebungen bilden auch eine Grundlage für die Übertragung der Erkenntnisse auf nicht gemessene Einzugsgebiete. Die dokumentierten Parameter umfassen klimatische Faktoren, Geologie, Geomorphologie, Bodenbedeckung und Landnutzung, Wildbachgeschichte (Ereignisse und Verbauungen), Abflussschätzungen und Schätzungen der Feststofffrachten. Die Gerinne wurden zudem fotografisch dokumentiert.

## 7.2.2 Methodik

Das Hochwasser vom August 2005 war das erste grössere Ereignis seit dem Beginn der detaillierten Aufnahmen der Eigenschaften der Einzugsgebiete im GHÖ Beobachtungsnetz. Damit war die Möglichkeit gegeben, in den betroffenen Einzugsgebieten einen Vergleich der Situation vor und nach dem Ereignis durchzuführen. Hier sollen exemplarisch ausgewählte Ergebnisse aus den Erhebungen in den betroffenen Einzugsgebieten nach dem Hochwasser vom August 2005 erläutert werden.

Basierend auf den Informationen der Kantone wurden 17 Einzugsgebiete im Beobachtungsnetz ausgewählt. Sie liegen zum grossen Teil im Kerngebiet des Niederschlags. Diese 17 Bäche sind in Abb. 7.1 dargestellt und die erhobenen Parameter in Tab. 7.1 erläutert. Zahlreiche weitere Einzugsgebiete des Netzes befinden sich ebenfalls im Kerngebiet des Niederschlags, waren aber vom Hochwasser nicht oder nur marginal betroffen. Die Analyse dieser Nicht-Ereignisse war im Rahmen dieser Studie nicht möglich.

17 Einzugsgebiete betroffen

Die Erhebungen nach dem Hochwasser vom August 2005 umfassten folgende Arbeiten:

Erhebungsmethodik

- > Darstellung des Ereignisablaufes bezüglich der Feststofflieferung, -verlagerung und -ablagerung
- > Schätzung der Abflüsse, soweit möglich
- > Schätzung der Feststofffracht bis zum Geschiebeablagerungsplatz
- > Vergleich der Feststofffrachten der Felderhebungen mit denjenigen, welche sich gemäss den Angaben der Kantone im Geschiebeablagerungsplatz befanden
- > Darstellung von speziellen Beobachtungen bzw. Besonderheiten
- > Fotovergleiche vor und nach dem Ereignis

Die Bestimmung der Feststofflieferung und -verlagerung wurde gemäss Spreafico et al. (1996) durchgeführt. Im Gelände wurden sämtliche Spuren des Unwetters auf Hinweise für Abflüsse und die Feststoffverlagerung untersucht. Wo Vergleichsfotos aus der Zeit vor dem Ereignis verfügbar waren, wurde derselbe Standort nochmals fotografiert und die Veränderungen festgehalten.

## 7.2.3 Ergebnisse der Erhebungen

Die wichtigsten Ergebnisse der Erhebungen sind in Tab. 7.1 zusammengefasst. Die Tabelle umfasst in den ersten Spalten die Ergebnisse unterschiedlicher Schätzmethode für die beim Ereignis umgelagerten Feststoffmengen. Alle diese Methoden sind mit erheblichen Ungenauigkeiten behaftet, welche bezüglich Fracht und Volumina durchaus einen Faktor 1.5–2 erreichen können. Für die Angaben in der Spalte «Feldschätzung» wurden anlässlich von Begehungen die Volumen von Veränderungen geschätzt (Abb. 7.2 und 7.3) und entlang des Gerinnes aufsummiert. Diese Schätzungen sind mit grossen Unsicherheiten behaftet. Einerseits sind Volumen grundsätzlich schwer zu schätzen und andererseits ist häufig nicht klar, welcher Anteil der beobachteten Verän-

Geschiebeschätzungen haben grossen Unsicherheitsbereich

derung tatsächlich dem Hochwasser vom August 2005 zuzuordnen ist. Die Differenzen zwischen den Ergebnissen der unterschiedlichen Methoden in Tab. 7.1 lassen sich aus dieser Problematik herleiten.

Der rechte Teil der Tab 7.1 zeigt die wichtigsten abgelaufenen Prozesse. Dabei können die Vielschichtigkeit und die gegenseitige Überlagerung der verschiedenen Prozesse, die in jedem der untersuchten Bäche festgestellt wurden, nicht berücksichtigt werden. Dies ist nur mit einer umfassenden Darstellung für jeden einzelnen Bach angemessen möglich. Dazu sei auf die weiterführenden Publikationen verwiesen.

Nicht alle Bäche waren gleichermassen vom Ereignis betroffen. So erreichten die transportierten Feststoffvolumen einiger Bäche (z.B. Mühlebach LU oder Edisriedbach OW) keine aussergewöhnlichen Ausmasse. Hohe Feststofffrachten wurden z.B. im Steinibach (Dallenwil NW) und im Humligentobel (Wolfenschiessen NW) beobachtet. Die Geschiebeablagerungsplätze wurden gefüllt und Material gelangte über diese hinaus in den Kanal (Steinibach) oder in einen zusätzlichen Ablagerungsraum (Humligentobel).

Nur wenige Bäche stark betroffen

**Abb. 7.2** > Eistlenbach, Hofstetten BE vor dem Hochwasser 2005.

**Abb. 7.3** > Eistlenbach, Hofstetten BE nach dem Hochwasser 2005.

*Auf etwa 8 m Breite wurden ca. 1.5 m erodiert, was einen Erosionsquerschnitt für die betrachtete Stelle von 12 m<sup>2</sup> ergibt.*



Tab. 7.1 &gt; Feststofffrachten und Prozesse der Feststofflieferung und -verlagerung in den untersuchten Wildbacheinzugsgebieten.

Nr.	Bach, Gemeinde	Feldschätzung der Feststofffracht gemäss Feldbegehung		Schätzung der Ablagerung im Geschiebeablagerungsplatz gemäss Feldbegehung	Kubatur im Geschiebeablagerungsplatz gemäss der Angabe der Kantone	Transportprozess im Hauptgerinne		Auslösung			Einfluss der Ablagerungen entlang des Baches auf die Reduktion der Feststofffracht	
		Vol. min. [m³]	Vol. max. [m³]	Vol. [m³]	Vol. [m³]	Geschiebe-transport	Murgang	allmähliches Einsetzen der Erosion im gesamten Gerinnesystem	Einsetzen der Erosion in einem definierten Gerinneabschnitt	Auslösung durch einen isolierten Prozess	Einfluss hoch	kein oder geringer Einfluss
1	Bitzighoferbach, Sarnen OW	1'700	3'700	1'500	3'100	x	(x)	x				x
2	Melbach, Kerns OW	3'600	5'200	3'000 <sup>1,2</sup>	6'389	x	x	x			x	
3	Grosse Schliere, Alpnach OW	20'000	40'000	k.A. <sup>2</sup>	57'100	x	(x)	x			x	
4	Dürrbach, Engelberg OW	8'500	11'000	15'000	20'000	x	x		x		x	
5	Edisriedbach, Sachseln OW	3'500	6'300	6'500 <sup>3</sup>	6'000	x		x		(x)	x	
6	Steinibach, Dallenwil NW	10'000	15'000	k.A. <sup>2,4</sup>	32'200	x		x			x	
7	Humligentobel, Wolfenschiessen NW	5'200	8'300	7'000	17'000	x	x			x		x
8	Mühlebach, Beckenried NW	70	100	50	k.A. <sup>5</sup>	x		x				x
9	Steinibach, Hergiswil NW	1'900	3'700	k.A. <sup>2</sup>	5'000	x			(x)	x	x	
10	Gangbach, Schattdorf UR	1'100	2'000	1'500	1'563	x	(x)	x			x	
11	Valparghera, Domat/Ems GR	2'000	3'500	k.A. <sup>2</sup>	2'000	x	(x)	x			x	
12	Val Gronda, Tschlin GR	1'500	2'000	k.A. <sup>2</sup>	1'484	x	x		x			x
13	In. Blindlauigraben, Lütschental BE	300	500	300	k.A. <sup>5</sup>	x	(x)		x			x
14	Grosse Bachtalen, Brienz BE	4'000	5'000	k.A. <sup>2</sup>	3'500	x			x		x	
15	Eistlenbach, Hofstetten BE	5'000	6'500	5'000	k.A. <sup>6</sup>	x				x	x	
16	Croisette, Bex VD	700	1'300	k.A. <sup>2</sup>	700	x	(x)	x				x
17	La Tinière, Villeneuve VD	3'000	4'000	k.A. <sup>2</sup>	3'000	x		x		x	x	

<sup>1</sup> Sammler war vor dem Ereignis offensichtlich mehr als halbvoll; unterhalb des Sammlers setzte sich der Geschiebetransport fort (es bestehen zwei weitere Sammler)

<sup>2</sup> Geschiebesammler war bei der Ereignisanalyse bereits geleert oder es handelt sich um ein Delta, das in einen See reicht (La Tinière)

<sup>3</sup> Geschiebeablagerungsplatz war etwa zu 1/3 voll (20'000 m³ Fassungsvermögen)

<sup>4</sup> davon 18'000 m³ im Geschiebeablagerungsplatz, 14'000 m³ im Kanal

<sup>5</sup> Keine Leerung oder keine Angabe

<sup>6</sup> Angabe vom Kanton in Überprüfung

x Prozess dominierend oder gleichwertig mit anderem Prozess

(x) untergeordneter Prozess

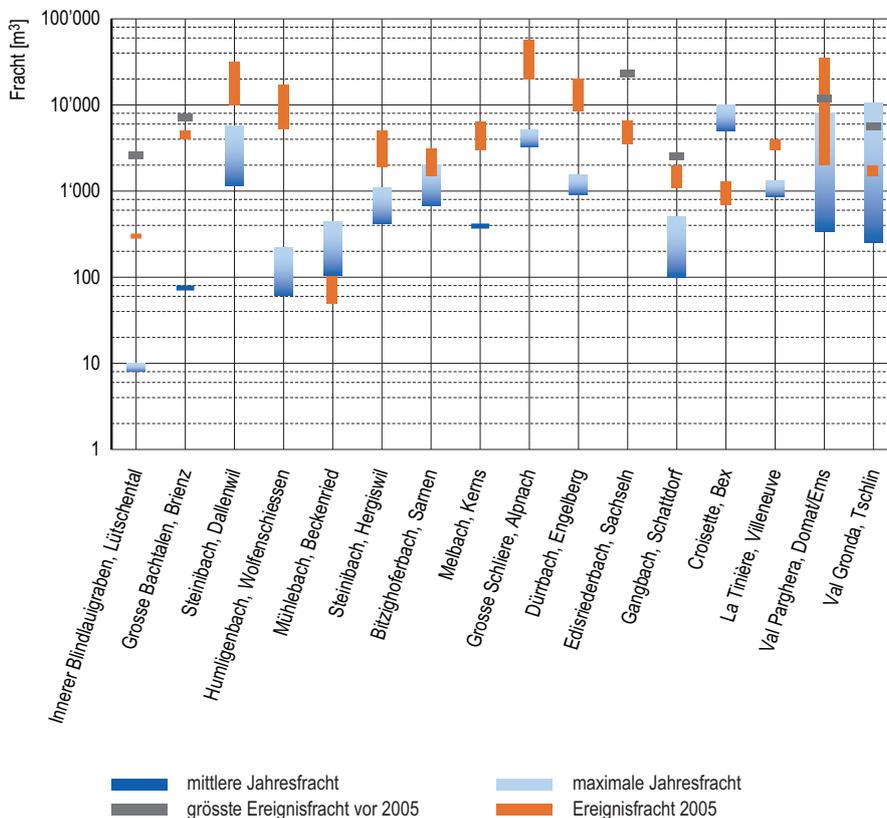
## 7.2.4 Einordnung

In Abb. 7.4 sind die Ereignisfrachten vom August 2005 gemeinsam mit den bisherigen Daten für die jeweiligen Einzugsgebiete dargestellt. Die Ereignisfracht 2005 entspricht der Bandbreite der Schätzungen in Tab. 7.1. Ereignisfrachten von früheren Ereignissen sind nur für Bäche verfügbar, bei welchen nicht nur Jahresfrachten erhoben werden. Die Bandbreite der Jahresfrachten ergibt sich aus der höchsten und der tiefsten bis heute gemeldeten Fracht. In der Abb. 7.4 fehlt der Eistlenbach (Hofstetten BE) weil dieser erst seit kurzem im Beobachtungsnetz ist und entsprechend sämtliche Angaben zu früheren Ereignissen fehlen.

Die Einordnung der Feststofffrachten ist noch nicht abgeschlossen, da neben den Angaben aus der Datenbank auch die Ereigniskataster, soweit vorhanden, berücksichtigt werden müssen. Allerdings zeigten die bisherigen Auswertungen in vielen untersuchten Gebieten eine Feststofffracht häufiger bis mittlerer Wiederkehrperiode. Seltene Ereignisse fanden im Steinibach (Dallenwil NW), im Humligentobel (Wolfenschiessen NW) und im Dürrbach (Engelberg OW) statt. Ereignisse ohne grössere Bedeutung finden sich unter anderem im Mühlebach (Beckenried NW) und Croisette (Bex VD). In diesen Bächen wurden früher bereits höhere Werte registriert. Die Zuordnung zu einer Jährlichkeit der Ereignisse erscheint zum jetzigen Zeitpunkt nicht sinnvoll.

Nur wenige Bäche wiesen  
aussergewöhnliche Frachten auf

Abb. 7.4 > Feststofffrachten von 2005 im Vergleich zu den bisherigen Beobachtungen.

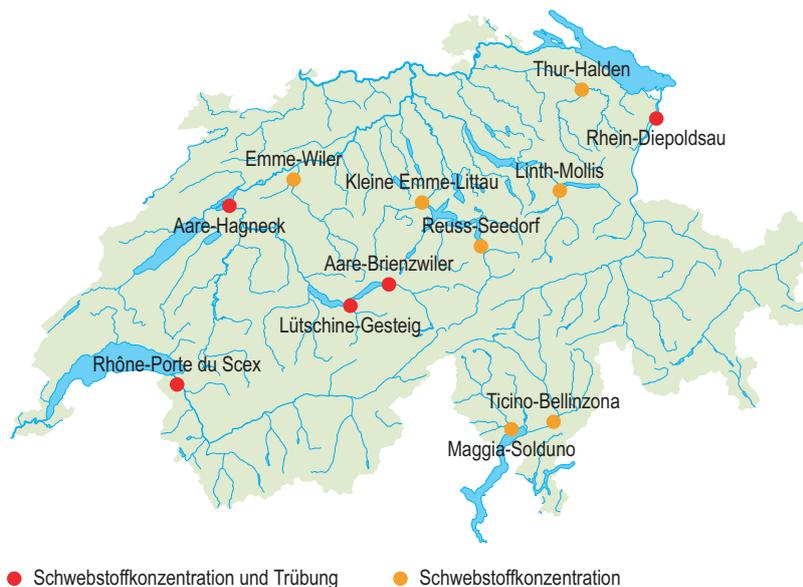


## 7.3 Schwebstoffmessungen

### 7.3.1 Das Schwebstoffmessnetz

Bereits Anfang der 1960er Jahre wurde in der Schweiz mit der Messung von Schwebstoffkonzentrationen begonnen. Das Messnetz wurde im Rahmen der Untersuchung der Erosionsprozesse und des Schwebstofftransportes geschaffen. Im Verlauf der Jahre wurde das Messnetz weiterentwickelt und für andere Ziele (z.B. Beobachtung der Auswirkungen des Klimawandels) angepasst. Heute umfasst es zwölf Messstationen. Davon sind die folgenden 5 Stationen mit einer Trübungssonde ausgerüstet: Rhein-Diepoldsau, Aare-Brienzwiler, Lüttschine-Gsteig, Rhone-Porte du Scex und seit November 2006 Aare-Hagneck (Abb. 7.5).

**Abb. 7.5** > Eidgenössisches Schwebstoffbeobachtungsmessnetz.



Kartengrundlage: Digitale Übersichtskarte der Schweiz (K606-01 © 2004 swisstopo)

### 7.3.2 Messtechnik

An den Stationen werden zweimal pro Woche Wasserproben entnommen und darin im Labor der Abteilung Hydrologie die Schwebstoffkonzentration bestimmt (Abb. 7.6). Die Konzentration dient im Wesentlichen der Ermittlung der jährlichen Feststofffracht.

#### Stichprobenentnahme

Die Messvertikale und die Tiefe der Entnahme werden auf Grund von Konzentrationsmessungen über die Flussbreite festgesetzt. Diese Messungen dienen der Wahl des Messpunktes, der für die Ermittlung der mittleren Schwebstofffracht des Flusses am repräsentativsten ist.

Da die Probenentnahme nicht täglich erfolgt, können grössere Ereignisse verpasst werden, was zu grösseren Unsicherheiten bei der Berechnung der jährlichen Feststofffracht führt. Um die diskreten Konzentrationsmessungen besser interpretieren zu können, werden daher die Messstellen sukzessive mit kontinuierlich messenden Trübungsmesssonden ergänzt (Abb. 7.7).

**Abb. 7.6 > Schwebstoffbeobachtung mittels Seifflügelanlage.**



**Abb. 7.7 > Schwebstoffbeobachtung mittels Trübungssonde.**



### 7.3.3 Stationen im betroffenen Gebiet

Neun Schwebstoffmessstationen liegen in den von den Unwettern betroffenen Gebieten (Abb. 7.8). Da für die vorliegende Analyse neben den diskreten Konzentrationsmessungen das Vorhandensein einer kontinuierlichen Trübungsmessung unerlässlich ist, wurden von den betroffenen Stationen nur diejenigen betrachtet, welche zusätzlich mit einer Trübungssonde ausgerüstet sind. Die betrachteten Stationen sind: Lütschine-Gsteig (Abb. 7.9), Aare-Brienzwiler und Rhein-Diepoldsau.

**Abb. 7.8 > Hohe Schwebstoffführung während des Hochwassers August 2005. Lütschine / Lütschental.**



**Abb. 7.9 > Hohe Schwebstoffführung während des Hochwassers vom August 2005. Lütschine / Gsteig.**



### 7.3.4 Ermittlung der Konzentration anhand von Trübungsmessungen

Die Trübung des Wassers entsteht infolge der Verringerung der Transparenz des Wassers durch Schwebstoffe. Letztere bestehen im Allgemeinen aus anorganischen Partikeln (Ton, Schlamm, feiner Sand), aber auch aus organischen Substanzen (Plankton, Algen, Bakterien, Pollen usw.) und kolloidalen Teilchen kleiner als 1  $\mu\text{m}$ .

Trübungsmessung

Die Trübung ist eine unspezifische Messung der Schwebstoffkonzentration und wird in TEF (Trübungseinheit Formazin) angegeben. Es kann zwar keine permanente direkte Korrelation zwischen der Trübung und der Konzentration hergestellt werden. Unter gewissen Bedingungen, d.h. über kurze Zeitintervalle ist es jedoch möglich, die Schwebstoffkonzentration mittels Trübungsmessung abzuschätzen. Ein derartiges Verfahren wurde an der Abteilung Hydrologie des BAFU entwickelt (Grasso et al., in Vorbereitung) und bei der Analyse des Hochwassers 2005 angewendet.

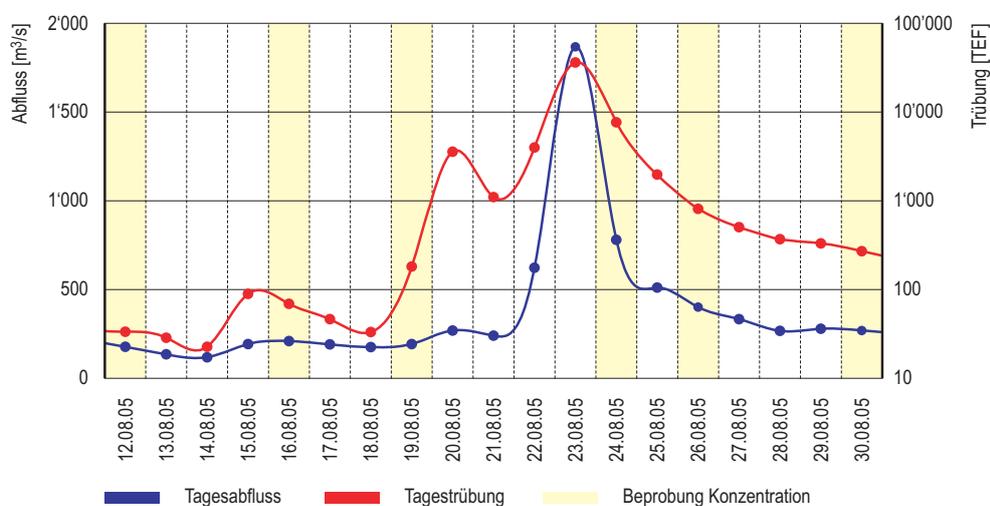
### 7.3.5 Ermittlung der Frachten

Die diskrete Beprobung zur Erhebung der Schwebstoffkonzentration ist ausreichend, um die Schwebstofffracht über grosse Zeitintervalle (ein bis mehrere Jahre) zu ermitteln. Das Verfahren beruht auf der statistischen Methode der Abflussdauerkurve (Grasso, Jakob, 2003), die seit 2000 zur Anwendung kommt. Für kurze Zeitabschnitte von wenigen Tagen bzw. für einzelne Hochwasserereignisse ist diese statistische Methode jedoch ungeeignet.

Jahresfracht

**Abb. 7.10** > Ganglinien des mittleren Tagesabflusses und der mittleren Tagestrübung für den Rhein bei Diepoldsau.

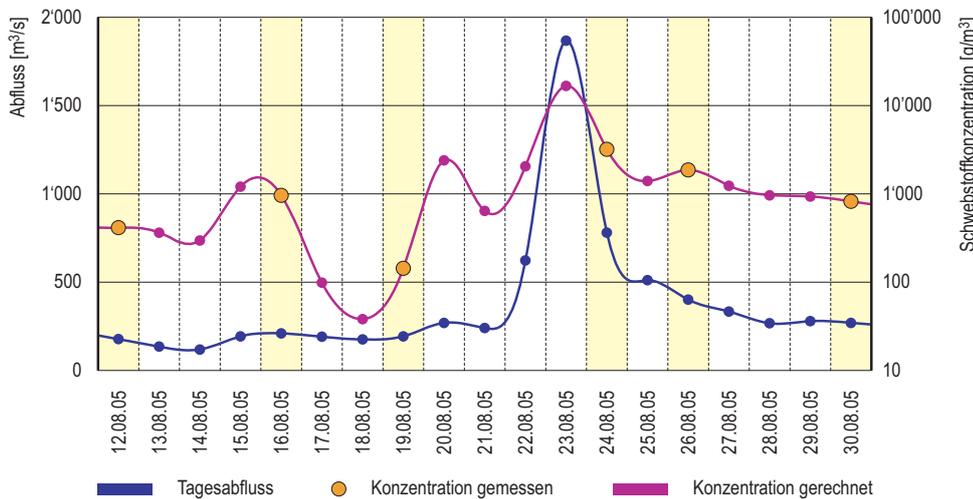
Farbig hinterlegt sind jene Tage, an welchen Probenentnahmen zur Bestimmung der Schwebstoffkonzentration erfolgten.



Zur Ermittlung der Schwebstofffracht, die von den Fliessgewässern während eines einzelnen Hochwassers transportiert wird, müssen die Informationen über Konzentration und Abfluss in kontinuierlicher Form vorliegen. Die tägliche Schwebstofffracht wird dann als Produkt aus dem Tagesmittel der Schwebstoffkonzentration und dem mittleren Tagesabflusses ermittelt. Während die Tagesabflussmenge relativ einfach bestimmt werden kann, ist die Ermittlung der Tageskonzentration der Schwebstoffe komplexer. Die routinemässige Beprobung führt zu Datenlücken von mehreren Tagen in der Konzentrationsganglinie. Diese lassen sich jedoch mittels Konzentrationsberechnung aus den Trübungsmessungen ergänzen (Abb. 7.10 und 7.11).

Ereignisfracht

**Abb. 7.11** > Ergänzung der Konzentrationsganglinie mittels Konzentrationsberechnung aus den Trübungsmessungen am Beispiel der Station Rhein-Diepoldsau.



Die so ermittelten Tageskonzentrationswerte für das Hochwasser vom August 2005 sowie die seit Beginn der Beobachtungen gemessenen maximalen Konzentrationen zeigt Tabelle 7.2.

Konzentrationen 2005

**Tab. 7.2** > Für das Hochwasser 2005 ermittelte Schwebstoffkonzentrationen im Vergleich mit den bisher gemessenen Maximalwerten.

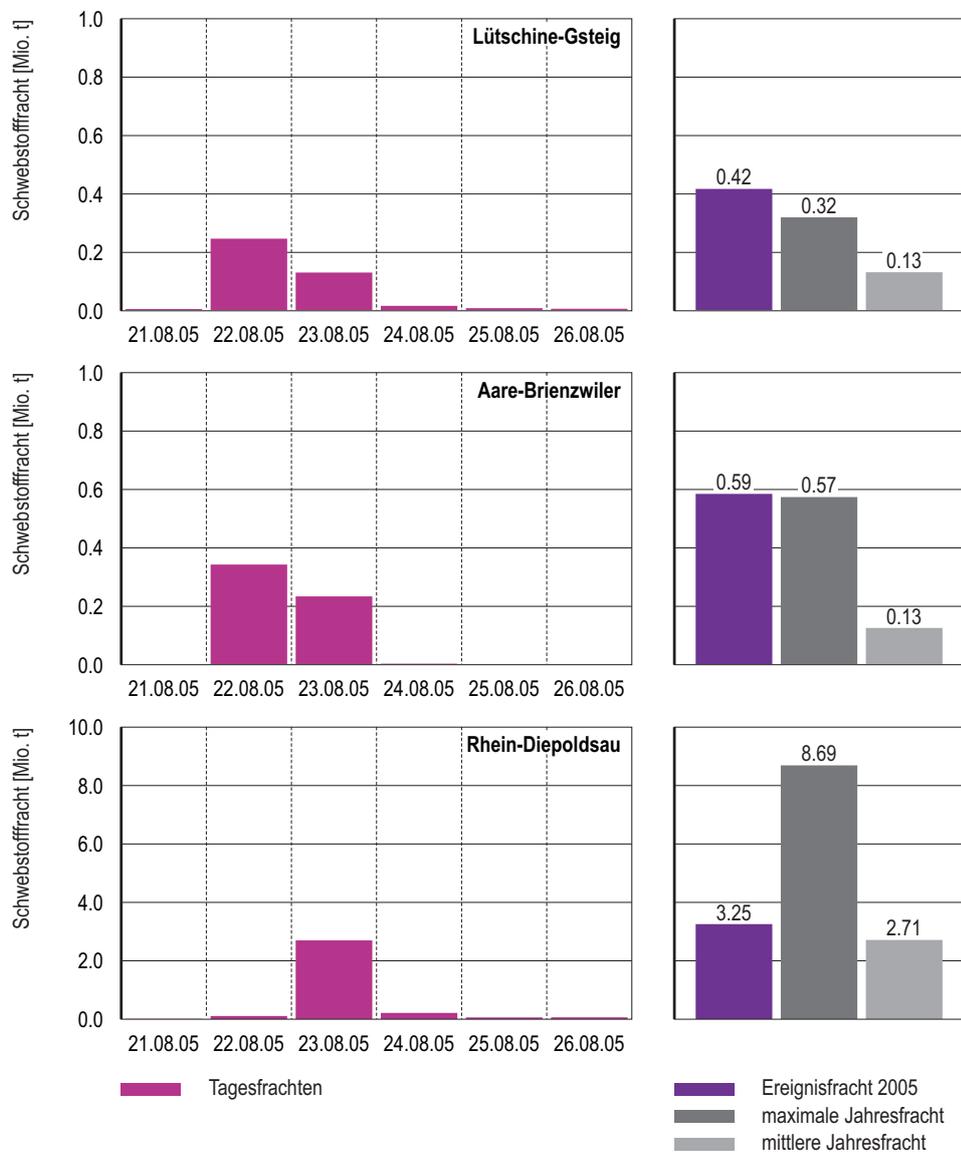
Messstation	Messbeginn	Tageskonzentration ermittelt anhand von Trübungsmessungen [kg/m³]			Maximalwert seit Messbeginn [kg/m³] und Datum der Messung	
		22.08.2005	23.08.2005	24.08.2005		
Lütschine-Gsteig	1964	13.6	9.2	2.6	5.3	26.07.2001
Aare-Brienzwiler	1964	12.5	9.8	0.4	11.7	22.03.1991
Rhein-Diepoldsau	1966	2.0	16.7	3.2	9.3	03.08.1974

In Abb. 7.12 sind die für die Hauptphase des Hochwassers 2005 ermittelten Tagesfrachten sowie die Ereignisfracht zwischen dem 21. August und dem 26. August im

Ereignisfrachten 2005

Vergleich zu den bisherigen maximalen und mittleren Jahresfrachten seit Messbeginn dargestellt. Die Jahresfrachten wurden mit der statistischen Methode der Abflussdauerkurve auf der Basis von ca. 100 Stichproben pro Jahr ermittelt. Aus den in Abb. 7.12 gezeigten Ereignisfrachten lassen sich die entsprechenden Ablagerungsvolumen abschätzen, indem die Frachten mit einer Lagerungsdichte von  $1.65 \text{ t/m}^3$  (entsprechend einer Porosität der Ablagerungen von 40%) umgerechnet werden. Die so für das Hochwasser 2005 erhaltenen Schwebstoffvolumen sind in Tab. 7.3 zusammengestellt.

**Abb. 7.12 > Berechnete Tages- und Ereignisfrachten 2005 im Vergleich mit den maximalen und mittleren Jahresfrachten seit Messbeginn.**



**Tab. 7.3 > Zusammenstellung der ermittelten Schwebstoffvolumen an den Messstationen während des Hochwassers 2005 (Grössenordnung).**

Messstation	Schwebstoffvolumen 21.–26.08.2005 [m <sup>3</sup> ]
Lütschine-Gsteig	250'000
Aare-Brienzwiler	350'000
Rhein-Diepoldsau	2'000'000

### 7.3.6 Einordnung

Für die drei betrachteten Messstationen sind die während des Hochwassers 2005 erreichten Tageskonzentrationen im Vergleich zu den bisherigen Beobachtungen relativ gross (Tab. 7.2). Bei der Station Aare-Brienzwiler ist das Maximum der im August 2005 erreichten Konzentration vergleichbar mit der grössten bisher an dieser Station gemessenen Konzentration. Bei den Stationen Lütschine-Gsteig und Rhein-Diepoldsau sind die 2005 erreichten Konzentrationswerte rund doppelt so gross wie die zuvor gemessenen maximalen Konzentrationen.

Für schweizerische Verhältnisse, sind solche Konzentrationen relativ gross, sie entsprechen jedoch noch nicht den grössten, bisher in der Schweiz beobachteten Werten. So wurden beispielsweise an den Stationen Landquart-Felsenbach und Arve-Genève, Bout du Monde schon 1999 bzw. 1992 Konzentrationen über 30 kg/m<sup>3</sup> beobachtet.

Die Ereignisfrachten 2005 bei den Stationen Lütschine-Gsteig und Aare-Brienzwiler liegen in der Grössenordnung der seit Messbeginn beobachteten maximalen Jahresfrachten. Sie sind rund 3 (Lütschine-Gsteig) bzw. 4.5 (Aare-Brienzwiler) Mal grösser als die mittleren Jahresfrachten (Abb. 7.12).

Die Schwebstofffracht bei der Station Rhein-Diepoldsau im August 2005 entspricht in etwa der mittleren Jahresfracht bzw. einem Drittel der maximalen Jahresfracht seit Messbeginn (Abb. 7.12). Das im August 2005 transportierte Schwebstoffvolumen von rund 2 Mio. m<sup>3</sup> entspricht etwa 2/3 des mittleren jährlichen Feststoffeintrags des Rheins in den Bodensee (Lambert, 1989).

### 7.4 Erkenntnisse

Bei dem Geschiebe- und dem Schwebstoffmessnetz werden nicht die gleichen Gewässer beprobt. Während das Geschiebemessnetz im Wesentlichen Wildbäche im Fokus hat, umfasst das Schwebstoffmessnetz nur mittlere und grosse Flüsse. Entsprechend unterschiedlich sind die beiden Netze betroffen.

Beim Geschiebebeobachtungsnetz der GHO waren nicht alle Einzugsgebiete, welche im Kerngebiet des Niederschlages lagen, vom Ereignis betroffen. Ebenso weisen nur wenige Bäche aussergewöhnliche Feststofffrachten auf. Dies lässt den Schluss zu, dass das Niederschlagsereignis vom August 2005 nur in wenigen Gebieten die kritischen

Vergleichsweise hohe Schwebstoffkonzentrationen an allen Stationen im betroffenen Gebiet

Ereignisfrachten 2005 in der Grössenordnung von Jahresfrachten

Unterschiedliche Betroffenheit im Geschiebe- und Schwebstoffmessnetz

Schwellwerte überschritt, welche für eine Auslösung von Feststoffverlagerungen notwendig sind (Kap. 8).

Weiterführende allgemeine Angaben lassen sich zurzeit aus den verfügbaren Informationen des Geschiebemessnetzes noch nicht ableiten. Dazu ist die Beobachtungszeit im auf langfristiges Monitoring ausgelegten Beobachtungsnetz noch viel zu kurz. Eine bachweise detaillierte Beschreibung der abgelaufenen Prozesse wird in weiterführenden Arbeiten erstellt.

Im Gegensatz dazu waren bei den an grösseren Flüssen liegenden Schwebstoffmessstationen ausserordentliche Abflusswerte zu beobachten. So lagen die Spitzenabflüsse an der Lutschine bei Gsteig und an der Aare bei Brienzwiler weit über den eines 100-jährlichen, am Rhein bei Diepoldsau allerdings nur im Bereich eines 20–50-jährlichen Hochwassers.

Die maximalen Tageswerte der Schwebstoffkonzentrationen betragen zwischen 12.5 kg/m<sup>3</sup> und 16.7 kg/m<sup>3</sup>. Im Vergleich mit den grössten je gemessenen Konzentrationen bei diesen drei Messstationen sind dies sehr hohe Werte.

Während bei der Station Rhein-Diepoldsau die transportierten Schwebstofffrachten in der Grössenordnung der mittleren Jahresfrachten sind, bewegen sich die Frachten bei den Stationen Lutschine-Gsteig und Aare-Brienzwiler im Bereich des 3–4.5-fachen der mittleren Jahresfrachten.

Die Ermittlung der Schwebstofffrachten ist relativ schwierig und aufwändig, weil die Schwebstoffkonzentration zeitlich und räumlich stark variiert. Trübungsmessungen stellen eine wichtige zusätzliche Informationsquelle dar, die gemeinsam mit den beiden wöchentlichen Probenentnahmen eine verlässliche Rekonstruktion des zeitlichen Verlaufs der Konzentration ermöglicht. Das Schwebstoffmessnetz umfasst heute zwölf Messstationen, von denen erst fünf mit einer Trübungsmesssonde ausgerüstet sind. Im Rahmen der bestehenden Möglichkeiten wird ein Ausbau aller zwölf Stationen mit solchen Sonden angestrebt.

Die in diesem Kapitel erläuterten Beobachtungsnetze versprechen keine kurzfristigen Resultate. Längerfristig sind sie aber unabdingbar, lassen sich doch nur an derartigen Messungen und Beobachtungen Modelle kalibrieren, welche eine Simulation und damit eine Bestimmung von Jahres- und Ereignisfrachten ohne aufwändige und langwierige Messungen erlauben.

**Aufwändige  
Schwebstoffmessungen**

**Geschiebe- und  
Schwebstoffmessnetz  
vor allem als langfristiges  
Monitoring sinnvoll**

#### **Literatur:**

Grasso D.A., Jakob A. 2003: Charge de sédiments en suspension – Comparaison entre deux méthodes de calcul. GWA, vol. 83, nr. 12, 898-905.

Grasso D. A., Jakob A., Spreafico M. Ermittlung der Schwebstofffrachten während dem Hochwasser vom August 2005. (in Vorbereitung).

Lambert A. 1989: Das Rheindelta im See. Vermessung Photogrammetrie Kulturtechnik 87/1, 29–32.

Spreafico M., Lehmann C., Naef F. 1996: Empfehlungen zur Abschätzung von Feststofffrachten in Wildbächen, Teil I Handbuch. Mitt. Nr. 4 der Arbeitsgruppe für operationelle Hydrologie, Landeshydrologie und -geologie, Bern.



Dieter Rickenmann, Lukas Hunzinger, Anne-Claude Cosandey

## 8 > Gerinneprozesse

*In verschiedenen Wildbächen kam es zu grösseren Murgangereignissen. In den Gebirgsflüssen oberhalb der Alpenrandseen verursachten Erosion, Gerinneverlagerungen und Feststoffablagerungen ausserhalb des Gerinnes grosse Schäden. Entlang der Talflüsse unterhalb der Alpenrandseen führten die grossen Abflussmengen vor allem zu Überflutungen. Anhand einer Datenbank mit den relevanten Ereignissen erfolgte eine erste Auswertung hinsichtlich der massgebenden Prozesse.*

### 8.1 Einleitung

Im August 2005 haben die meisten Wildbäche und Flüsse entlang des gesamten Alpennordhangs Hochwasser geführt. Die Gewässer mit intensiven Abflüssen und mit grossen Feststoffumlagerungen liegen im Wesentlichen im Gebiet der intensivsten Niederschläge. Hohe Abflüsse mit starkem Feststofftransport traten vor allem oberhalb der Alpenrandseen auf, während im Mittelland, insbesondere bei grösseren Flussläufen, hohe Abflüsse ohne wesentlichen Geschiebetransport zu verzeichnen waren. Die Gebiete in denen grosse Unwetterschäden verzeichnet wurden, decken sich mit den Gebieten mit starker Gerinneaktivität.

**Betroffenes Gebiet**

Dieses Kapitel dokumentiert die beim Hochwasser aufgetretenen Gerinneprozesse, Gefahrenprozesse und Schäden sowie die Auswirkungen des Hochwassers auf Auengebiete. Als Gerinneprozesse werden die Prozesse im Gerinne selbst (Mobilisation und Transport von Feststoffen, Verklausung etc.) bezeichnet, als Gefahrenprozesse Prozesse ausserhalb der Gerinne (Überflutung, Übersarung, Ufererosion), welche einen Schaden (Zerstörung von Gebäuden, Überflutung von Landwirtschaftsland unter anderem) verursachen können. In einer Datenbank wurden insgesamt fast 100 Einzelereignisse mit Angaben zur Art der abgelaufenen Prozesse und – sofern bekannt – zu Abflussmengen und Feststofffrachten erfasst. Es handelt sich dabei nicht um eine vollständige Dokumentation, sondern um eine übersichtsmässige Zusammenstellung der relevanten Ereignisse. Sie stützt sich vor allem auf Ereignisdokumentationen und -analysen der Kantone und Gemeinden (StoreMe-Formulare, zusammenfassende Analysen) sowie auf technische Berichte von Wiederinstandstellungs- und Hochwasserschutzprojekten. Es ist möglich, dass einzelne kleine, lokale Ereignisse nicht erfasst worden sind.

**Inhalt der Dokumentation**

Die Prozesse werden für drei verschiedene Gewässertypen Wildbäche, Gebirgsflüsse und Talflüsse getrennt diskutiert. Die Gewässer werden auf Grund der Grösse des Einzugsgebietes und des Längengefalles einem der Typen zugeordnet. Diese Gewäs-

**Untersuchte Gewässertypen**

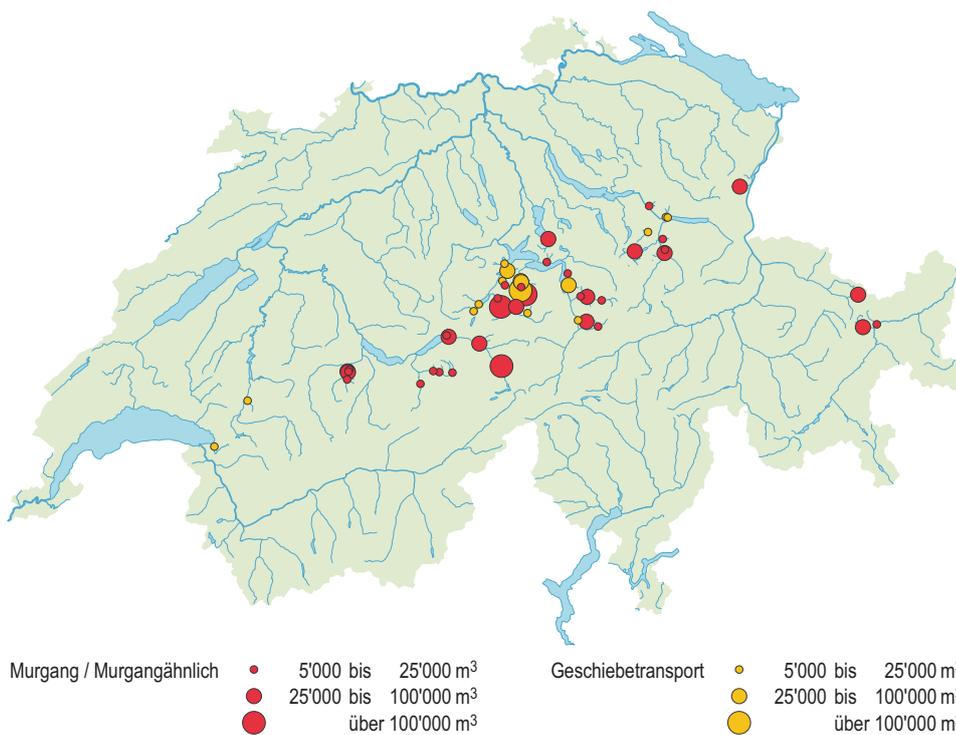
sertypen implizieren im Wesentlichen Unterschiede im Anteil der Feststoffe im Abfluss und in gewissem Sinne auch eine topographische Unterteilung, da die Bedeutung des Feststofftransportes mit abnehmendem Längsgefälle ebenfalls geringer wird. Die Grenzen zwischen Wildbach und Gebirgsfluss einerseits und zwischen Gebirgs- und Talfluss andererseits sind fließend. Die in den nachfolgenden Kapiteln aufgeführten Beispiele stehen stellvertretend für andere Gewässer, in welchen ähnliche Prozesse abgelaufen sind.

## 8.2 Wildbäche

Als Wildbäche werden hier die Gewässer mit intensivem Feststofftransport bezeichnet, deren Einzugsgebietsfläche kleiner als 25 km<sup>2</sup> ist und welche in der Regel steiler als 5–10 % sind. Für die Dokumentation wurden grundsätzlich Ereignisse mit Feststofffrachten über 5000–10'000 m<sup>3</sup> berücksichtigt. Bei Wildbächen führen Ereignisse dieser Grössenordnung häufig zu Ablagerungen ausserhalb des Gerinnes und damit zu Schäden, wenn nicht ein wesentlicher Teil der Feststoffe in einem Rückhaltebecken abgelagert und/oder kontrolliert abgeleitet werden kann. Es wird deshalb davon ausgegangen, dass die meisten dieser Ereignisse auf Grund der von ihnen verursachten Schäden dokumentiert wurden und somit in der Datenbank enthalten sind. Die Datenbank umfasst in der Kategorie Wildbäche über 50 Einträge (Abb. 8.1).

Abgrenzung

Abb. 8.1 > Übersicht über die erfassten Wildbachereignisse, Transportarten und Feststofffrachten.



Kartengrundlage: Digitale Übersichtskarte der Schweiz (K606-01 © 2004 swisstopo)

Bedeutende Hochwasserereignisse mit Murgängen und intensivem Geschiebetransport traten in allen Gebieten mit hohen Niederschlägen auf. In einigen Fällen spielten Karstsysteme in Kalkgebieten eine Rolle. So wurden beim Bärenbach (Engelberg OW) und bei einigen kleineren Wildbächen in Nidwalden mit Zuflüssen aus Karstquellen aussergewöhnlich hohe Abflüsse beobachtet.

**Geographische Verteilung**

Bezüglich der grösseren Murgangereignisse kann ein gewisser Schwerpunkt im Berner Oberland festgestellt werden, wo rund ein Drittel aller registrierten Murgänge auftraten. In einigen Wildbächen konnte auf Grund der Spuren im Gelände nach dem Ereignis nicht eindeutig festgestellt werden, ob es sich dabei um voll ausgebildete Murgänge oder um murgangartige Abflüsse mit hohen Feststoffkonzentrationen handelte. Dies betrifft beispielsweise Seitenbäche im Einzugsgebiet der Chirel (Diemtigen BE) und der Lutschine (Grindelwald BE).

Bei vielen der Murgangereignisse mit mehr als etwa 25'000 m<sup>3</sup> spielten grössere Rutschungen eine wichtige Rolle, indem sie wesentlich zur Verfügbarkeit von Feststoffen beitrugen (Abb. 8.2). Dazu gehören auch die drei grössten Murgangereignisse im Rotlaubach (Guttannen BE), im Haldibach (Wolfenschiessen NW) und im Acherlibach (Melchtal OW). In einigen Fällen trugen Hangmuren zum Geschiebeeintrag in die Gerinne bei, oder Hangmuren bzw. Rutschungen waren die Auslöser zur Bildung von Murgängen in Gerinnen. Bedeutende Materialeinträge aus Rutschungen haben möglicherweise auch zu grossen Beanspruchungen der Sohle in Wildbachgerinnen und dadurch zu massiver Erosion der Bachbette geführt, so z.B. im Rotlaubach (Guttannen BE) und im Glyssibach (Brienz BE). Auch in anderen Fällen wurde viel Geschiebe aus dem Sohlenbereich erodiert, so z.B. im Fangtobel (Engelberg OW; Abb. 8.3).

**Auslösung von Murgängen**

Bei den Wildbächen fällt auf, dass grosse Geschiebemengen (mehr als ca. 10'000 m<sup>3</sup>) nur in wenigen Fällen fluvial transportiert wurden, so z.B. im Gruonbach (Flüelen UR), im Steinibach (Dallenwil NW), im Flybach (Weesen SG) und im Sulzbach (Obersee GL). In den meisten Wildbächen wurden hingegen die Feststoffe als Murgänge oder in murgangähnlicher Form transportiert.

**Transportmechanismen**

Bei vielen Wildbachereignissen wurde Schwemmhholz mittransportiert, welches mehrheitlich aus Hangrutschungen und aus Uferböschungen stammte, die direkt erodiert wurden oder infolge Sohlenerosion abgerutscht sind. Der grosse Holzeintrag durch die Rutschungen und Murgänge im Haldibach (Wolfenschiessen NW) führte im Vorfluter (Secklisbach) zu einer Verklausung durch Schwemmhholz, welche erst nach Wochen und mit viel Aufwand entfernt werden konnte.

**Schwemmhholz**

**Abb. 8.2** > Sedimenteintrag aus der Rutschung Lotter in den Gangbach UR (Foto: H. Baumann, Amt für Tiefbau, Kt. UR).



**Abb. 8.3** > Massive Gerinneerosion beim Murgangereignis im Fangtobel OW.



Die Gefahren- und Schadensprozesse waren in den Gerinnen mit Murgängen und jenen mit Hochwasser und intensivem Geschiebetransport ähnlich. Wegen zu geringer Abfluss- und Transportkapazität, oft noch begünstigt durch Verklausungen, traten die Bäche über die Ufer und lagerten die Feststoffe flächig ausserhalb der Gerinne ab (Abb. 8.4). Tendenziell führten Verklausungen bei Murgängen dazu, dass angrenzende Strassen mit Geschiebe überführt wurden, während Verklausungen bei fluvialen Geschiebetransport eher Erosionsprozesse auslösten.

**Gefahrenprozesse**

Im Siedlungsbereich wurden Gebäude meistens leicht bis stark beschädigt, in einigen Fällen aber auch zerstört, wie am Glyssibach (Brienz BE; Abb. 8.4) oder am Schwendibach (Grindelwald BE).

**Schadensprozesse**

**Abb. 8.4 > Ablagerungen in Brienz nach dem Murgangereignis im Glyssibach BE  
(Foto: Schweizer Luftwaffe).**



### 8.3 Gebirgsflüsse

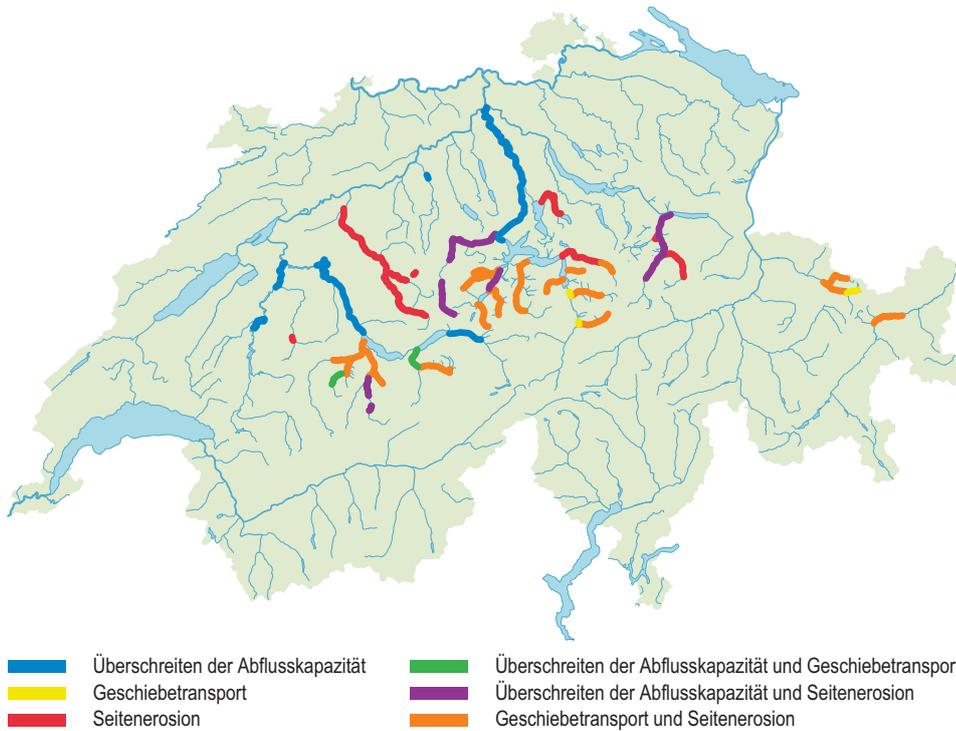
Als Gebirgsflüsse werden hier jene Gewässer mit einem Einzugsgebiet grösser als 25 km<sup>2</sup> bezeichnet, deren Verhalten massgeblich durch den Geschiebetransport beeinflusst wurde. Das Gefälle liegt in der Regel unter 5–10 %. In der Ereignisdokumentation sind rund 20 Gewässer oberstrom der Alpenrandseen mit einer Gerinnelänge von insgesamt 220 km in der Kategorie Gebirgsflüsse erfasst (Abb. 8.5).

Auf Grund der Intensität und der Dauer der Niederschläge sind in vielen Gebirgsflüssen über eine längere Zeitdauer grosse Abflüsse aufgetreten. Einige Flüsse wiesen Abflussspitzen mit Jährlichkeiten von 200 und mehr Jahren auf, so etwa die Grosse und Kleine Melchaa OW, die Engelberger Aa OW NW, die Muota SZ und die Landquart bei Klosters GR. Mit den hohen und lang andauernden Abflüssen war ein intensiver Geschiebetransport verbunden, der in einigen Gewässern 24 Stunden und länger anhielt. In der Chirel BE, der Engelberger Aa NW OW, der Grossen Melchaa OW und im Schächen UR betrug die umgelagerten Geschiebefrachten jeweils über 150'000 m<sup>3</sup>.

**Abgrenzung**

**Abflüsse und Geschiebefrachten**

Abb. 8.5 > Übersicht der erfassten Gebirgs- und Talflüsse und der massgebenden Prozesse.



Kartengrundlage: Digitale Übersichtskarte der Schweiz (K606-01 © 2004 swisstopo)

In einigen Gebirgsflüssen spielten massive Geschiebeeinträge aus Wildbächen eine wichtige Rolle. Bei der Chirel (Diemtigen BE) trugen die Seitenbäche zu über 40% an der gesamthaft mobilisierten Geschiebemenge bei und in der Chiene (Reichenbach BE) stammte ein beachtlicher Teil der Feststoffe – neben Hangrutschungen – aus Murgängen in den Seitenbächen.

**Geschiebeeintrag**

Je nach Abfluss und Morphologie kam es in den Gebirgsflüssen zu bedeutender Tiefenerosionen, Auflandungen oder Seitenerosionen. Besonders in Abschnitten mit Auflandungen kam es zusätzlich zu Gerinneverlagerungen. Dies betrifft Abschnitte nach Gefälleknicken, Abschnitte mit seitlicher Verbreiterungsmöglichkeit sowie Abschnitte, die mit grossen Geschiebefrachten von oberstrom belastet wurden. Gerinneverlagerungen in grossem Ausmass wurden z.B. an der Chirel (Diemtigen BE), der Lütschine (Burglauenen BE), dem Chärstelenbach (Bristen UR) und der Landquart (Klosters GR, Abb. 8.6) beobachtet. Punktuell verlagerte sich das Gerinne von Gebirgsflüssen auch dort, wo es durch Ablagerungen auf dem Schwemmkegel eines Seitenzubringers abgedrängt wurde, z.B. an der Reuss (Amsteg UR). Es fällt auf, dass in den Gebirgsflüssen häufig mehrere Gerinneprozesse gleichzeitig auftraten. Sie lassen sich deshalb nicht immer eindeutig voneinander abgrenzen.

**Gerinneprozesse**

Abb. 8.6 > Gerinneverlagerungen der Landquart oberhalb von Klosters GR (Foto: Schweizer Luftwaffe).



Wie in den Wildbächen wurde auch entlang von Gebirgsflüssen viel Schwemmhholz mobilisiert. Das Schwemmhholz stammte hauptsächlich aus Ufererosionen (Abb. 8.7), aus gerinnenahen Hangrutschungen, oder es wurde durch Seitenbäche in den Vorfluter eingetragen. Im Kanton Obwalden wurden in den ersten Wochen nach dem Unwetter rund 14'000 m<sup>3</sup> Schwemmhholz aus Flüssen und Seen entfernt. Etwa die Hälfte davon stammte allein aus der Grossen Melchaa.

Schwemmhholz

**Abb. 8.7 > Mobilisierung von Geschiebe und Schwemmholz durch Seitenerosion in der Chirel oberhalb Diemtigen BE.**



Gefahrenprozesse wurden hauptsächlich durch Ufererosionen und Gerinneverlagerung sowie durch Geschiebeablagerungen und Verklausungen bei Brücken ausgelöst. Gerinneverlagerungen führten oftmals zu grösseren Schäden entlang von Strassen. An einigen Stellen wurden wichtige Zufahrtsstrassen in die Täler weggerissen, z.B. entlang der Engelberger Aa OW und der Chirel BE. Als Folge von Ablagerungen im Gerinne oder Verklausungen traten die Gewässer über die Ufer und überschwemmten und übersarten Siedlungsräume oder Kulturland (Abb. 8.8). Die dynamischen Überflutungen erreichten mittlere bis hohe Intensitäten. Mancherorts sind Gebäude dadurch schwer beschädigt worden, z.B. an der Chiene (Reichenbach BE oder am Chärstelenbach (Bristen UR). Trotz laufendem und zum Teil gefährlichem Einsatz von Baggern konnten in einigen Fällen Ausuferungen und Überflutungen nicht verhindert werden, so etwa bei der Grossen Melchaa (Sarnen OW) und bei der Susasca (Susch GR). An der Kleinen Melchaa (Giswil OW) und anderen Orten konnten Schäden durch künstliche Breschenbildung oder Umleitung des Abflusses in weniger intensiv genutzte Gebiete zum Teil vermindert werden.

**Gefahrenprozesse**

**Abb. 8.8** > Verminderung der Abflusskapazität durch Geschiebeablagerungen und dadurch verursachte Überflutungen an der Engelberger Aa bei Grafenort NW (Foto: Schweizer Luftwaffe).



Die Gerinneprozesse im Schächen (Schattdorf UR) können als ausserordentlich bezeichnet werden. Einerseits entleerte sich der am Kegelhals gelegene Geschiebesammler Stiglisbrücke während des Ereignisses selbsttätig, so dass seine Kapazität nur zu einem kleinen Teil ausgeschöpft wurde und so für den Unterlauf des Schächens eine erhöhte Geschiebezufuhr resultierte. Andererseits war im Schächen eine progressive Rückwärtsauflandung in der gepflasterten Schale oberhalb der Mündung in die Reuss zu beobachten, welche von den Geschiebeablagerungen im Mündungsbereich ausging. Die Auflandung wurde durch den Aufstau an den über den Schächens führenden Brü-

Beispiel Schächen UR

cken zusätzlich angefacht und führte zum Ausbruch des Schächens (Abb. 8.9). Ursache für die Ablagerung im Mündungsbereich waren der hohe Wasserstand im Vorfluter bzw. dessen begrenztes Vermögen, das anfallende Geschiebe abzuführen.

**Abb. 8.9 > Verfüllung der Bachschale und Ausbruch des Schächens oberhalb der Mündung in die Reuss (Foto: Amt für Tiefbau, Kt. UR).**



8.4

## Talflüsse

Unter der Kategorie Talflüsse werden die flachen Gewässer zusammengefasst, in welchen die Geschiebetransportprozesse nur eine sekundäre Rolle gespielt haben. Dazu gehören vor allem die Flüsse im Mittelland (unterstrom der Alpenrandseen) und im Napfgebiet, sowie die grossen Vorfluter in den Alpentälern (Kander, Simme, Sarner Aa, Linth, Inn). In der Datenbank sind rund 20 Gewässer mit einer Gerinnelänge von insgesamt 370 km in der Kategorie Talflüsse erfasst (Abb. 8.5). Eine absolut scharfe Abgrenzung der Gerinneabschnitte war jedoch nicht immer möglich. Die aufgeführte Gerinnelänge kann deshalb nicht als exakte Grösse betrachtet werden.

Abgrenzung

In manchen Talflüssen erreichten die Abflüsse neue Rekordwerte (Simme, Kander, Aare bei Meiringen, Kleine Emme, Sarner Aa, Reuss im Reusstal, Sarine bei Fribourg). Die Abflusskapazität wurden deshalb mancherorts überschritten und der Abfluss trat aus dem Gerinne (Kander in Kandersteg, Aare zwischen Thun und Bern, Kleine Emme, Sarner Aa, Reuss im Kanton Aargau, Linth). Abb. 8.10 zeigt exemplarisch die Überflutungen der Sarner Aa zwischen Sarnen und dem Wichelsee. Entlang der Aare bei Meiringen und an der Saane unmittelbar vor deren Mündung in die Aare wurden

Abflusskapazität erschöpft

Hochwasserschutzdämme überströmt und beschädigt. In der Aare bei Bern wurde die Wehranlage im Schwellenmätteli teilweise mit Schwemmholz verlegt. Die Aare floss in der Folge durch das Mattequartier (Abb. 8.11). Auch an der Kleinen Emme in Littau trug die Verklauung einer Brücke mit Schwemmholz zum Ausbruch aus dem Gerinne bei. Wo aus dem Gerinne ausgetretenes Wasser Uferschutzbauten oder Bauten am Gewässer um- und hinterströmte, löste der Rückfluss ins Gerinne lokale Erosionsprozesse aus, z.B. bei der Sperre Maigrauge an der Saane FR.

**Abb. 8.10** > Überflutung des Talbodens flussabwärts von Sarnen durch die Sarner Aa (Foto: Schweizer Luftwaffe).



In den steileren Talflüssen wie Kander, Simme, Ilfis, Emme, Kleine Emme und Trueb wurde an manchen Stellen eine ausgeprägte Seitenerosion beobachtet. Uferabschnitte von 100 m oder länger wurden zum Teil mehr als 10 m abgetragen. An der Kleinen Emme (Malters LU) verlagerte sich das Gerinne gar um mehr als eine Flussbreite. Von der Erosion waren in der Regel Gerinneabschnitte mit Uferverbauungen betroffen. Diese wurden entweder überströmt (Kander, Simme, Emme, Kleine Emme) oder konnten der Strömungsbelastung in Aussenkurven nicht standhalten (Kleine Emme). An der Trueb initiierte das Überströmen und Umfliessen eines Absturzbauwerkes die Seitenerosion. In der Folge entwickelte sich eine pendelnde Strömung, welche auch die unterliegenden Ufer wechselseitig erodierte.

Seitenerosion

Die Seitenerosionen wurden durch die lange Dauer des Ereignisses begünstigt. Einerseits konnte die Strömung lange Zeit auf die Böschungen einwirken, andererseits waren diese durch die anhaltenden Niederschläge mancherorts aufgeweicht und daher weniger widerstandsfähig.

Abb. 8.11 > Überflutung des Mattequartiers in der Stadt Bern.



Die Talflüsse verursachten Schäden zweierlei Art: Erstens wurden zahlreiche Gebäude von Überflutungen betroffen, was zu Gebäude- und Mobiliarschäden privater Haushalte und Gewerbebetriebe führte. Zweitens wurden Uferschutzbauten und Strassen sowie andere, den Gewässern entlang führende Werkleitungen durch Ufererosion beschädigt oder zerstört (Abb. 8.12). Davon war meistens die öffentliche Hand betroffen.

**Schäden**

**Abb. 8.12 > Zerstörung des Uferschutzes und der entlang des Flusses führenden Kanalisationsleitung durch Seitenerosion an der Ilfis bei Langnau BE.**



## 8.5 Veränderungen in Auengebieten

In den Auengebieten haben die durch das Hochwasser hervorgerufenen Veränderungen eine andere Bedeutung als in intensiv oder dicht besiedelten Gebieten. Veränderungen wie Laufverlagerungen, Erosion und Sedimentation sind charakteristisch für Auen und gestalten ein komplexes Mosaik äusserst unterschiedlicher Habitate (Abb. 8.13 und 8.14). Die Erhaltung der natürlichen Dynamik des Gewässer- und Geschiebehaltens ist eines der Ziele, die in der Verordnung über den Schutz der Auengebiete von nationaler Bedeutung (Auenverordnung von 1992) festgehaltenen sind.

66 der 282 Auengebiete nationaler Bedeutung waren im August 2005 durch Abflüsse mit einer Wiederkehrperiode über 20 Jahren betroffen. Auf Grund einer Umfrage bei den kantonalen Fachstellen wurden 40 der am stärksten von Veränderungen betroffenen Auen begangen oder mittels Luftbildern analysiert. Die von morphologischen Veränderungen betroffenen Flächen wurden ausgeschieden. Diese Arbeiten gestatteten eine Klassierung der untersuchten Auengebiete in drei Kategorien entsprechend dem Ausmass der Veränderungen der Auenvegetation und des Flussgerinnes (Abb. 8.15).

Die erste Kategorie umfasst die Gebiete, in welchen die Veränderungen wenig bedeutend sind. Die Spuren des Ereignisses umfassen hier vor allem Ablagerungen von Feinsedimenten (Silt, Sand). Diese Prozesse betrafen die Auen entlang der grossen Talflüsse im Mittelland. In der zweiten Kategorie finden sich jene Auen, in welchen sich vorwiegend Veränderungen durch lokale seitliche Erosion ergaben, die hauptsächlich

**Auswahl und Methodik**

**Art der Veränderungen**

Kiesbänke und mit Gras bewachsene Flächen betrafen. Die dritte Kategorie umfasst sämtliche durch das Hochwasser stark umstrukturierte Auen. Hier waren grossflächige Erosionen oder ausgeprägte Ablagerungen gröberer Alluvionen zu beobachten. Die beiden letzten Kategorien umfassen primär Auengebiete entlang von Gebirgsflüssen.

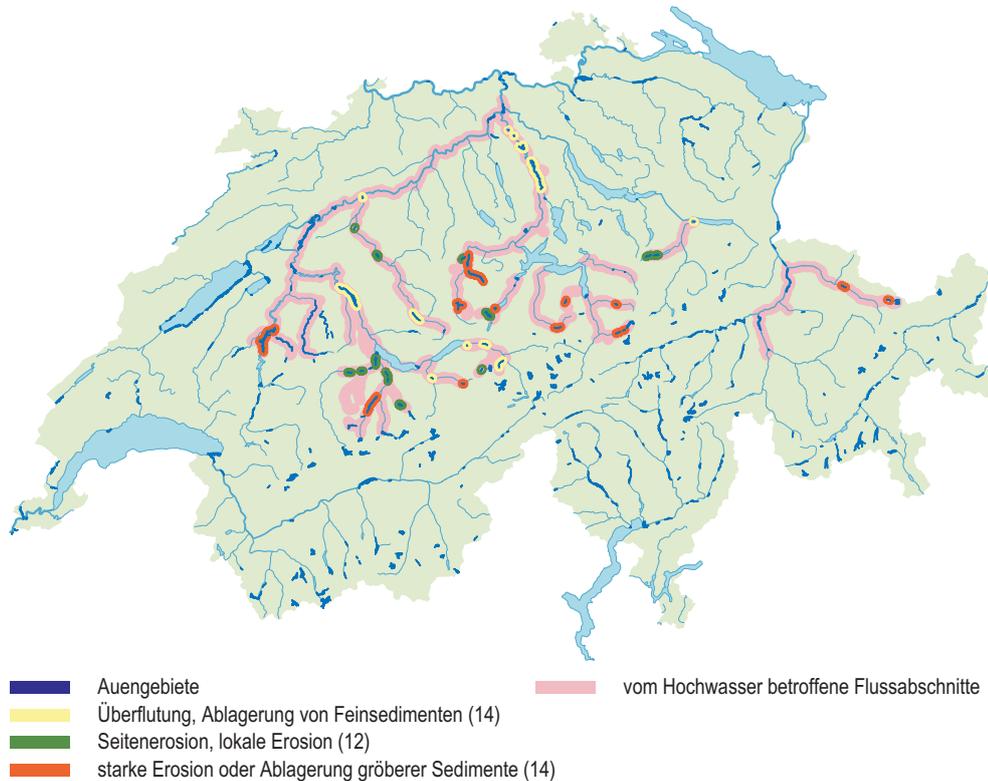
Abb. 8.13 > Auengebiet Stössli UR im August 2004.

Abb. 8.14 > Auengebiet Stössli UR im September 2005.

Umgestaltung der Aue durch Gerinneverlagerung des Chärstelenbachs während des Hochwassers vom August 2005.



Abb. 8.15 > Veränderungen in den vom Hochwasser 2005 betroffenen Auengebieten.



## 8.6

**Diskussion und Bewertung**

Aus der Dokumentation der Ereignisse lassen sich die ersten vorläufigen Schlüsse ziehen:

Die räumliche Ausdehnung und die Dauer der Niederschläge haben dazu geführt, dass in praktisch allen Gewässern des Alpennordhanges grosse und lang anhaltende Abflüsse mit Geschiebetransport zu beobachten waren. Die Gewässer mit intensivem Abfluss und mit grossen Feststoffumlagerungen liegen im Wesentlichen im Gebiet der intensivsten Niederschläge.

Räumliche Ausdehnung und  
Niederschläge

In Wildbächen traten vor allem Murgänge mit mittleren bis grossen Feststofffrachten auf. Drei Murgänge führten dabei mehr als 100'000 m<sup>3</sup>. Bei vielen Wildbächen wurde ein grosser Teil der Geschiebefracht im Kegelbereich und teilweise auch in Geschiebesammlern abgelagert. Bei einigen Ereignissen spielte der Feststoffeintrag in die Gebirgsflüsse eine wichtige Rolle. Übermurungen und Übersarungen waren die hauptsächlichlichen Schadensprozesse in Wildbächen, wobei Gebäude zerstört oder stark beschädigt wurden. Im betroffenen Gebiet gab es auch etliche Wildbäche, welche gar nicht oder nur mittelmässig aktiv waren, was darauf zurückzuführen sein dürfte, dass die gebietsspezifischen kritischen Niederschlagsintensitäten nur in wenigen Regionen erreicht wurden.

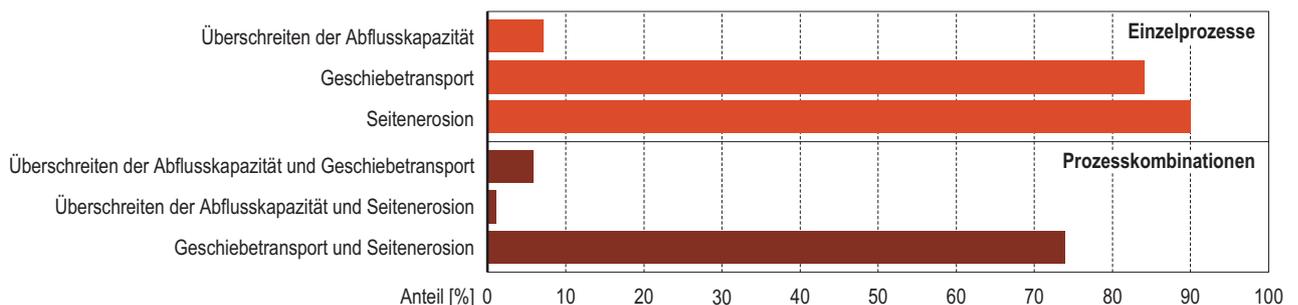
Wildbäche

In den Gebirgsflüssen haben die hohen Abflussspitzen und die grossen Wasserfrachten dazu geführt, dass grosse Mengen an Feststoffen transportiert und umgelagert worden sind. Die Feststoffe wurden dabei entweder von den Zuflüssen, d.h. von den Wildbächen, eingetragen oder durch Seitenerosion und Gerinneverlagerung mobilisiert. Geschiebetransport und Seitenerosion sind die dominierenden Prozesse in den Gebirgsflüssen (Abb. 8.16). Auf gut 200 km bzw. 90% der erfassten Gerinnelänge, war die Seitenerosion ein massgeblicher Prozess. Auf 190 km bzw. 84% der erfassten Gerinnelänge, war es der Geschiebetransport. Die beiden Prozesse überlagern sich auf Gerinneabschnitten mit einer Länge von insgesamt 170 km (74%).

Gebirgsflüsse

**Abb. 8.16 > Gerinneprozesse in Gebirgsflüssen.**

Anteil der durch die Gerinneprozesse Überflutung, Geschiebetransport und Seitenerosion betroffenen Gewässerabschnitte an der Gesamtlänge von 220 km der betroffenen Gebirgsflüsse (oben) bzw. Anteil der durch Kombinationen dieser Prozesse betroffenen Abschnitte (unten).



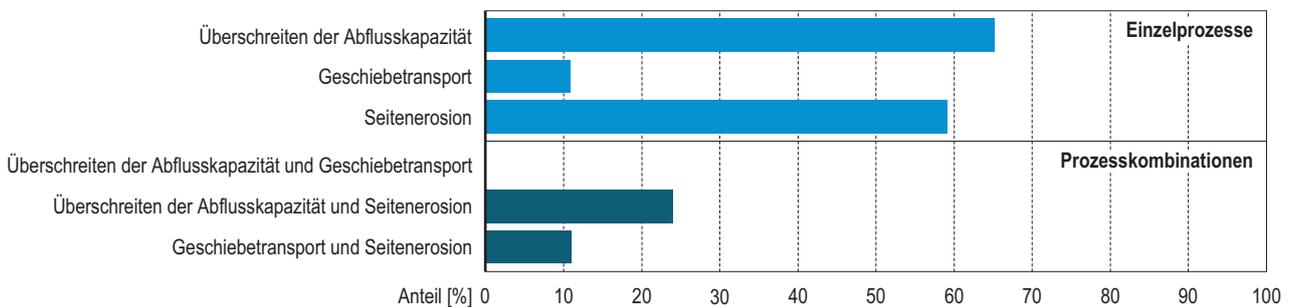
Geschiebeablagerungen in flacheren Flussabschnitten haben entweder zur Gerinneverlagerung und Mobilisation neuer Feststoffe geführt oder haben die Abflusskapazität reduziert und so die Überflutung und Übersarung angrenzender Gebiete verursacht. Wegen der hohen Intensität der Gefahrenprozesse und dem hohen Schadenspotenzial (Siedlungen, Verkehrsinfrastruktur) waren entlang der Gebirgsflüsse erhebliche Schäden zu verzeichnen.

In den Talflüssen wurden beim Hochwasser die Abflusskapazitäten der Gerinne vielerorts überschritten. Grossflächige Überflutungen waren die Folge, wovon unter anderem Siedlungen mit Industrie und Gewerbe mit sehr hohem Schadenspotenzial betroffen waren. Auf 60% der dokumentierten Gewässerabschnitte war die Seitenerosion ein massgeblicher Prozess (Abb. 8.17). Die Seitenerosion entlang verbauter und unverbauter Gewässerabschnitte hat damit ein Ausmass angenommen, welches in der Schweiz selten beobachtet worden ist.

Talflüsse

#### Abb. 8.17 > Gerinneprozesse in Talflüssen.

Anteil der durch die Gerinneprozesse Überflutung, Geschiebetransport und Seitenerosion betroffenen Gewässerabschnitte an der Gesamtlänge von 370 km der betroffenen Talflüsse (oben) bzw. Anteil der durch Kombinationen dieser Prozesse betroffenen Abschnitte (unten).



In Kap. 6 werden 3% der Schadenssumme beim Ereignis 2005 Murgängen und 92% Hochwasser zugeordnet. Letztere enthalten Geschiebeprozesse, Überflutungen durch Seen und Fliessgewässer, hohe Grundwasserstände und abfliessendes Hangwasser. Der hohe Anteil an durch Überschwemmungen verursachten Schäden, hat zwei Gründe: Erstens sind Überflutungen, Übersarungen und Ufererosionen entlang der Gebirgs- und der Talflüsse mit hoher Intensität aufgetreten. Zweitens haben die Prozesse ein grosses Schadenspotenzial getroffen, welches sich entlang der Flüsse (Verkehrsinfrastruktur, Wasserbau) und in den Talebenen (Siedlungen, Industrie) konzentriert. Der Anteil der Murgangschäden an der Schadenssumme ist geringer, weil die räumliche Ausdehnung dieses Prozesses im jeweils betroffenen Einzugsgebiet grundsätzlich eng begrenzt ist.

Schäden

8.7

## Erkenntnisse

Insgesamt waren im August 2005 relativ wenig Murgangereignisse zu verzeichnen, was darauf zurückzuführen ist, dass die gebietspezifischen Niederschlags-Schwell-

Relativ wenig Murgangereignisse in Wildbächen

werte zur Auslösung von Murgängen nur in vereinzelt Gebieten erreicht oder überschritten wurden.

Praktisch alle Gebirgsflüsse im Niederschlagsgebiet verzeichneten hohen Geschiebetransport und starke Seitenerosion. Ihre Abflusskapazität war in der Regel nicht ausgeschöpft. Hingegen führten Geschiebeablagerungen und Verklausungen dazu, dass die Abflusskapazität örtlich überschritten und angrenzende Gebiete überflutet wurden.

In den Talflüssen waren die Überschreitung der Abflusskapazität und die Seitenerosion die massgeblichen Gerinneprozesse. Bei den Talflüssen flussabwärts der Alpenrandseen (z.B. Aare flussabwärts von Thun, Reuss flussabwärts von Luzern) führten, trotz der ausgeprägten Dämpfung des Abflusses durch die Seen, primär Überflutungen zu Schäden. Im Gegensatz dazu wurden die Schäden entlang der Talflüsse (z.B. Emme, Kleine Emme, Linth) vornehmlich durch Seitenerosion verursacht.

**Geschiebetransport und Seitenerosion in Gebirgsflüssen**

**Überschreiten der Abflusskapazität und Seitenerosion in Talflüssen**

## 8.8

### Ausblick

Auf der Basis der dokumentierten Ereignisse sind im Rahmen der Ereignisanalyse weitere Folgeuntersuchungen geplant. Dabei sollen die beim Hochwasserereignis transportierten Feststofffrachten plausibilisiert und mit den beobachteten Niederschlägen oder Abflüssen sowie mit morphometrischen Parametern der Einzugsgebiete in Verbindung gebracht werden. Für die Einzugsgebiete der Lütschine, der Chiene und des Chirel sollen Simulationsberechnungen durchgeführt werden, mit welchen der Geschiebetransport in den Gerinnen der Seiten- und Hauptbäche beim Ereignis vom nachgebildet wird. Bei den Murgangereignissen im Glyssibach und Rotlaubach soll die Erosion von Geschiebe aus dem Bachbett insbesondere bei flacheren Gerinnegefällen näher untersucht werden. Weiter sollen die stark dominierenden Ufererosionsprozesse vertieft untersucht werden.

Im Rahmen des zweiten Teils der Ereignisanalyse findet zudem eine vertiefte Untersuchung der in den betroffenen Auengebieten abgelaufenen Prozesse und Veränderungen statt.

#### Verwendete Unterlagen:

Lokale Lösungsorientierte Ereignisanalyse (LLE)  
Glyssibach. NDR Zimmermann, Thun; Niederer + Pozzi, Uznach. April 2006.

Lokale Lösungsorientierte Ereignisanalyse (LLE)  
Trachtbach. NDR Zimmermann, Thun; Niederer + Pozzi, Uznach. Auszug aus Vorabzug Bericht vom 04.07.2006.

Lokale Lösungsorientierte Ereignisanalyse (LLE)  
Rotlouwibach. Geotest AG, Zollikofen. Ereignisanalyse – Erste Beurteilung vom 07.10.2005 ausgewertet.

Lokale Lösungsorientierte Ereignisanalyse (LLE)  
Millibach. Herzog Ingenieure, Gümligen; BIG, Wabern.

Lokale Lösungsorientierte Ereignisanalyse (LLE)  
Hochwasser 2005 im Diemtigtal. Schälchli, Abegg + Hunziker, Bern. Geo7, Bern. Juli 2006.

Lokale Lösungsorientierte Ereignisanalyse (LLE)  
Lütschine/Lütschental. Lehmann C., Bern; Jäggi M., Ebmatingen. Vorabinformationen zur LLE von C. Lehmann per Telefonat im Juli 2006.

Lokale Lösungsorientierte Ereignisanalyse (LLE)  
Reichenbach. Hunziker, Zarn & Partner, Aarau; Geotest, Zollikofen; Emch + Berger AG, Spiez. Vorabzug Februar 2006.

Projekt für die Verbauung der Trueb 2005 km 4.290–4.550. Schälchli, Abegg + Hunzinger, Bern. März 2006.

Hochwasser 2005 in der Ilfis: Rekonstruktion der Abflüsse und Abflusskapazität bei der Obermattbrücke. Schälchli, Abegg + Hunzinger, Bern. Dezember 2005.

Gefahrenbeurteilung – Überflutung der Aare zwischen Aareschlucht und Briener See – Neubeurteilung nach dem Hochwasser 2005. Schälchli, Abegg + Hunzinger, Bern. Oktober 2006.

Sanierung Simme Latterbach – Sofortmassnahmen – Hochwasser August 2005. Emch + Berger, Spiez. September 2005.

«Der Murgang von Guttannen», Keusen H.R., Geotest AG, Unterlagen zum FAN Forum 2006 «Unwetter August 2005, Ereignisse und Wetteranalysen», 23.2.2006; sowie Exkursionsunterlagen «Der Murgang von Guttannen, Rotloui, 21./22.08.2005», Keusen H.R., Geotest AG, FAN-Kurs 2006 «Unwetter 2005, Lehren für das Risikomanagement», 21./22.9.2006.

Schadenserhebung Unwetter 2005 Sektion I–III (Emme). Stebler + Partner Bauingenieurbüro GmbH, Burgdorf. Oktober 2005.

Emme Hochwasser August 2005, Uferanrisse. Hunziker, Zarn & Partner AG, Aarau. Januar 2006.

Ereigniskartierung Kleine Emme, Technischer Bericht. Ingenieure Bart AG, St. Gallen. November 2005.

Ereigniskartierung Reuss, Technischer Bericht. Ingenieure Bart AG, St. Gallen. November 2005.

Karte der Überflutungsflächen des Hochwasserereignisses vom August 2005, Kanton Aargau.

Kanton Nidwalden, Amt für Wald und Energie/Tiefbauamt: «Ereigniskataster Nidwalden, Unwetter August 2005», Stans, März 2006.

Kanton Obwalden, Amt Für Wald + Raumentwicklung Obwalden, Abteilung Naturgefahren, Sarnen, sowie Forstingenieurbüro Berwert-Lopes, Stalden, «Unwetter 22./23. August 2005, Ereignisdokumentation», Bericht + Anhang, 16. Januar 2006.

Regierungsrat des Kantons Schwyz, «Unwetter Norbert vom 21.-23. August 2005», Bericht des Regierungsrates, Beschluss Nr. 176/2006, Schwyz, 7. Februar 2006.

Kanton Uri, Amt für Tiefbau, «Hochwasser vom 22./23. August 2005 – Schlussbericht zu den Bereichen Wasserbau und Strassen», 13. Juni 2006.

Kanton Uri, Amt für Tiefbau/Wasserbau, «Vorprojekt Chärstelenbach, Hochwasserschutz Abschnitt Bristen», Projektverfasser Bigler AG/Aldorf, Schälchli, Abegg + Hunzinger/Zürich, Theiler Landschaft GmbH/Aldorf, 30.5.2006.

Kanton Uri, Amt für Tiefbau: «Hochwasserschutz Amsteg, Grobanalyse des Hochwassers vom 22./23. August 2005», Schälchli, Abegg + Hunzinger/Zürich, 19.9.2005

Aktennotiz, «HWS Urner Talboden», IG 3wasser: Basler & Hofmann; Wolf, Kropf & Bachmann AG, Projekta AG, 12.12.2005.

Baudirektion Kanton Glarus, «Wasserbau, Kantonsbeiträge für Wiederinstandstellung», Bericht an den Regierungsrat, 8.12.2005.

Kantonsforstamt Glarus, «Unwetter August 2005 – Handlungsbedarf», Fachstelle Naturgefahren, Rageth Th.

Kanton Graubünden, Amt für Wald, Bericht «Hochwasser 22/23.08.2005, Klosters-Serneus», Romang H., tur gmbh Davos / Zarn B., Hunziker Zarn und Partner AG, Domat/Ems.

Kanton Graubünden, Amt für Wald, «Hochwasser 22/23.08.2005, Klosters-Serneus – Faktenblatt», Romang H., tur gmbh Davos / Zarn B., Hunziker Zarn und Partner AG, Domat/Ems, 29.08.2005.

Kanton Graubünden, Amt für Wald, Südbünden/Zuoz, «Ereignisdokumentation Unwetter August 2005, 21. – 23.08.2005: Susasca und Aua da Sagliains, Gemeinde Susch», Geotest Davos, Krummenacher B., 3.1. 2006.

Bundesamt für Umwelt BAFU, «Geschiebesammler Stiglisbrücke, Interpretation des Verhaltens während des Hochwassers vom 22./23. August 2005», Bezzola G. R., 12.1.2006.

Bundesamt für Wasser und Geologie, Schadenszusammenstellungen der Unwetter 2005 pro Kanton, Bereich Wasserbau, Excel Tabellen, Januar 2006.

StorMe-Formulare der Kantone zum Hochwasser vom August 2005 (inkl. aller Anhänge).

Diverse Berichte in regionalen Zeitungen (publiziert während und nach dem Hochwasser vom August 2005).

Peter Waldner, Christian Rickli, Daniel Köchli, Tilo Usbeck, Lukas Schmocker, Flurin Sutter

## 9 > Schwemmholz

*Während des Ereignisses führte die Verklausung von Schwemmholz an Brücken und Wehren verschiedentlich zu einer Verschärfung der Hochwassersituation. Das vorliegende Kapitel enthält eine Übersicht über die dokumentierten Schwemmholzmengen, sowie Ergebnisse weitergehender Untersuchungen über das Schwemmholzaufkommen in vier Wildbächen und über die Zusammensetzung ausgewählter Schwemmholzablagerungen.*

### 9.1 Einführung

Während des Hochwassers vom August 2005 führten viele Gebirgs- und Talflüsse neben Wasser und Geschiebe auch grosse Mengen an Schwemmholz mit. Dieses wurde teils über weite Strecken transportiert und abgelagert, teils verkeilte es sich aber auch an Engstellen wie Brücken und Wehren und es kam zu Gerinneausbrüchen und Überschwemmungen, die teilweise grosse Schäden verursachten (Abb. 9.1).

Abb. 9.1 > Schwemmholzablagerung beim Wehr Perlen am 22.08.2005 (Foto: Schweizer Luftwaffe).



Im Umgang mit Schwemmholz stellen sich nach dem Ereignis zahlreiche Fragen. Sie betreffen zum einen die Ursachen und die Quellen (Mobilisierung) der grossen

Fragestellungen

Schwemmholz mengen. Zum anderen sollen die Bedingungen für den Transport von Schwemmholz und dessen Interaktion mit Bauwerken am und im Wasser untersucht und im zweiten Bericht der Ereignisanalyse erläutert werden.

Einen allgemeinen Überblick über den Schwemmholz anfall beim Hochwasser vom August 2005 vermittelt Abschnitt 9.2, welcher im Wesentlichen auf den durch kantonale Stellen erfassten Meldungen zu den abgelagerten Schwemmholz mengen und Schadensprozessen basiert.

Oft werden Wildbäche als wichtige Schwemmholzquellen angesehen. Hier ergab sich die Gelegenheit, dass im Rahmen eines bereits 2003 initiierten Projekts die Schwemmholz situation in vier betroffenen Wildbächen detailliert dokumentiert worden war. Durch eine erneute Aufnahme der Bäche konnten Veränderungen erfasst und davon auf die Schwemmholz transportprozesse geschlossen werden (Abschnitt 9.3).

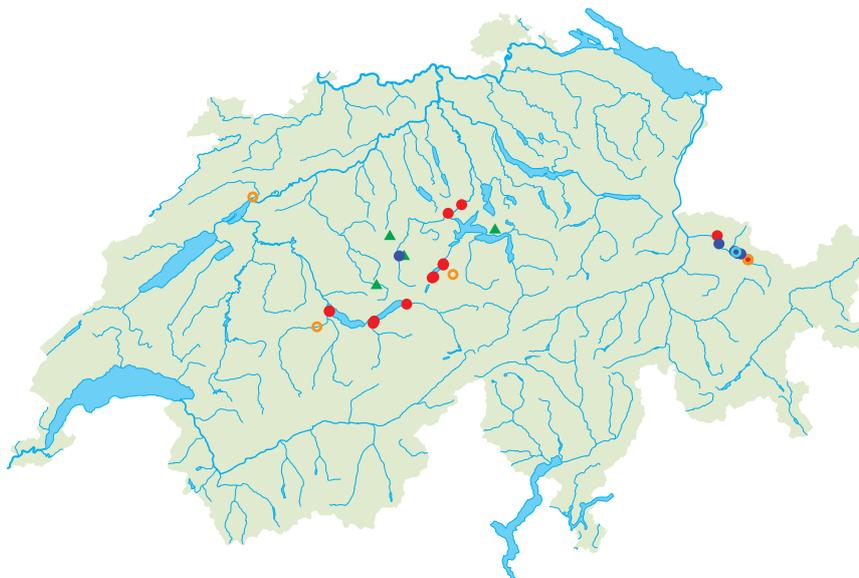
Bei der Schwemmholzmobilisierung war unklar, zu welchem Anteil das Holz aus frischen Uferanbrüchen oder Hangrutschungen entlang der Gewässer stammte. Ein besonderes Augenmerk lag dabei auf der Frage nach dem Anteil an Sturmholz, weil nach dem Ereignis verschiedentlich die Vermutung geäußert wurde, dass der grosse Schwemmholz anfall wesentlich durch nicht aufgeräumte Sturmschadensflächen verursacht worden sei. Zur Beantwortung dieser Fragen wurden detaillierte Untersuchungen zur Herkunft und Beschaffenheit des Holzes an ausgewählten Schwemmholzablagern entlang der Flüsse und Seen durchgeführt (Abschnitt 9.4).

Schwemmholzmenge

Schwemmholzaufkommen in Wildbächen

Zusammensetzung des Schwemmholzes

**Abb. 9.2** > untersuchte Wildbachabschnitte und Schwemmholzablagerungen.



untersuchte Schwemmholzablagerungen    ○ gestört, visuell    ● gestört, visuell + Linie  
   ○ ungestört, visuell    ● ungestört, visuell + Linie  
 untersuchte Wildbachabschnitte            ▲

Abb. 9.2 zeigt die Standorte der untersuchten Wildbachabschnitte und Schwemmholzablagerungen.

## 9.2 Angefallene Schwemmholzmengen

Bei der Ereignisdokumentation haben die meisten Kantone mindestens teilweise die Erhebungsformulare des Ereigniskatasters Naturgefahren verwendet. Im StorMe-Formular (Burren und Eyer, 2000) «Wasser/Murgang» können im Zusammenhang mit Schwemmholz Angaben bezüglich der Auslösung, der Gerinneprozesse und des Ablagerungsbereiches gemacht werden. Zu früheren Ereignissen enthält die StorMe-Datenbank des Bundes in diesen Feldern nur sehr punktuell Angaben. Für das Unwetter vom August 2005 wurden in der StorMe-Datenbank bereits für einige Kantone Angaben zum Schwemmholz eingetragen. Weitere Angaben wurden in Form von Berichten, Listen, StorMe-Formularen, Fotolegenden, etc. gemeldet. Dabei handelte es sich meist um Schwemmholz aus Verklausungen und Ablagerungen bei grösseren Bächen oder Flüssen (Abb. 9.3) bzw. um Holz, das auf Seen hinausgetrieben wurde und dort entnommen worden war. Die Meldungen enthalten Volumina bei verschiedenen Lagerungsarten (lose Haufen, Häcksel, Festmeter) und Gewichte. Tab. 9.1 fasst für verschiedene Regionen die gemeldeten Schwemmholzmengen zusammen.

Datengrundlagen

**Tab. 9.1 > Zusammenstellung der Meldungen zu abgelagertem oder entnommenem Schwemmholz für verschiedene Regionen.**

Kanton Region	Ablagerungsvolumen [m <sup>3</sup> ]	Masse [t]
GR Prättigau	16'300	4'075
BE Brienersee und Einzugsgebiet	8'500	2'125
BE Thunersee und Kandereinzugsgebiet	25'000	6'250
BE Stadt Bern	1'000	250
BE Bielersee	4'600	1'150
UR Urner Reusstal	22'000	5'500
OW Sarner- und Alpachersee	14'000	3'500
AG Reuss	8'000	2'000
LU Entlebuch	5'000	1'250
NW Engelberger Aa und Haldibach	5'400	1'350
<b>Total</b>	<b>109'800</b>	<b>27'450</b>

Da viele kleinere Ablagerungen nicht erfasst wurden, dürfte die tatsächliche Menge des während des Ereignisses mobilisierten, transportierten und abgelagerten Schwemmholzes die hier dokumentierte Menge von insgesamt rund 110'000 m<sup>3</sup> bzw. rund 30'000 t übersteigen.

Mehr als 110'000 m<sup>3</sup>  
Schwemmholz

Abb. 9.3 > Schwimmsperre beim Kanderdelta am 23.08.2005 (Foto: Ernst Hunziker, WWA Bern).



### 9.3 Schwemmh Holzprozesse in Wildbächen

Bei der Untersuchung der Frage nach Schwemmh Holz aufkommen, -mobilisierung und -transport in Wildbächen mit kleinen Einzugsgebieten konnte der Umstand ausgenutzt werden, dass an der WSL ein von der ehemaligen Forstdirektion unterstütztes Projekt zum Thema Schwemmh Holz in Bearbeitung war. Bei dieser Arbeit wurde der Zusammenhang zwischen der ufernahen Bestockung und dem Schwemmh Holzvorkommen in Wildbächen untersucht. In insgesamt zehn Bächen wurden auf einem Abschnitt von jeweils einem Kilometer die Schwemmh Holzsituation sowie die Gerinneprozesse und die Eintragsprozesse von Holz in das Bachbett analysiert (Rickli, Bucher, 2006). Somit konnten in vier bereits vor dem Unwetter untersuchten Bächen die Schwemmh Holzsituation nach dem August 2005 nochmals beurteilt werden mit dem Ziel, eine Aussage zum Schwemmh Holztransport während des Unwetters machen zu können.

Laufendes Projekt als Grundlage

Die Fallsstudien wurden an den folgenden Wildbächen mit Einzugsgebietsflächen zwischen 0.8 und 2.2 km<sup>2</sup> ausgeführt:

- > Brüggenwaldbach bei Gersau SZ,
- > Steinibach bei Flühli LU (Abb. 9.4),
- > Seelibach bei Romoos LU,
- > Büetschli graben bei Schangnau BE.

Folgende Teilarbeiten sollten zu einem Gesamtbild über die Veränderungen im Bach durch die Unwetter und zum Schwemmh Holztransport führen: Neuvermessung von Querprofilen, Beurteilung neuer und alter Verklausungen, Erhebung der durch die Unwetter ausgelösten Eintragsprozesse sowie diverse Fotovergleiche. Betrachtet wurde jeweils ein Bachabschnitt von 1 km Länge.

**Abb. 9.4** > Eintrag von Holz in den Steinibach bei Flüli LU durch frische Uferrutschungen.



Die Neuvermessung von 11 Querprofilen pro Bach gab Aufschluss über die Intensität allfälliger Geschiebetransportprozesse und damit auch allgemein über die Ereignisgrösse im entsprechenden Bach. Bei ungefähr 20% der Querprofile wurden deutliche Veränderungen der Sohlenlage festgestellt, bei 80% keine oder nur unwesentliche. Dies wird dahingehend interpretiert, dass die Abflüsse in den betrachteten Wildbächen nicht extrem waren.

Nur geringe Veränderungen  
durch Gerinneprozesse

Die Verklausungen wurden nach dem Hochwasser 2005 erneut beurteilt, um auf Grund ihrer Veränderungen Hinweise zum Schwemmholztransport im Bachlauf zu erhalten. Dank der Erhebungen vor dem Unwetter sind die Veränderungen eindeutig lokalisierbar und zu jeder Verklausung existiert ein Foto. Zwischen den Bächen zeigten sich einige Unterschiede. Während im Brüggentalbach keine Veränderungen feststellbar waren, brachen im Büetschli Graben vier von acht Verklausungen auf – hauptsächlich in der oberen Bachhälfte. Im Mittel über alle Bäche wurden jedoch nur bei 20% der Verklausungen markante Veränderungen festgestellt, d.h. die Höhe und/oder Breite des Baches haben sich verändert oder tragende Elemente der Verklausung wurden deutlich verschoben. Das Resultat weist auf eine eher geringe Schwemmholzmobilisierung bzw. auf den Transport von Holz über mehrheitlich nur kurze Strecken hin.

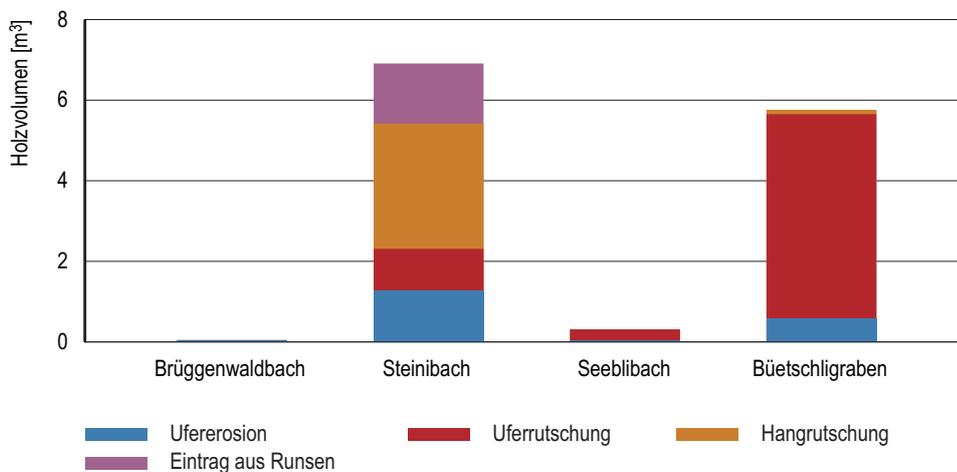
In allen vier Wildbächen zusammen wurden insgesamt 55 neue geomorphologische Prozesse festgestellt, welche Bodenmaterial und/oder Holz in die Bäche eintragen: 16 Stellen mit Ufererosion, 18 Uferrutschungen, 15 aktive Seitengräben mit Runsenerosion und 6 Hangrutschungen (Abb. 9.4). Bei etwa der Hälfte dieser Prozesse wurde Holz eingetragen. Das Holzvolumen betrug für alle Bäche zusammen ungefähr 13 m<sup>3</sup>. Dies entspricht ungefähr 4% der Totholzmenge, welche vor dem Unwetter in den Bachläu-

Schwemmholzeintrag durch  
Hangprozesse

fen lag. Der Holzeintrag fand jedoch praktisch nur im Steinibach und im Büetschligaben statt, obschon sich auch in den anderen Bächen Eintragsprozesse wie Ufererosion, Rutschungen etc. ereignet hatten (Abb. 9.5).

**Abb. 9.5** > Holzeintrag durch verschiedene Eintragsprozesse infolge des Unwetters 2005 in den vier untersuchten Wildbachabschnitten.

Betrachtet wurden jeweils 1 km lange Bachabschnitte.



Aus den Fallstudien können folgende Erkenntnisse abgeleitet werden: Die Veränderungen der Querprofile, die gutachtliche Beurteilung der Abflussspuren und auch die Aussagen der Anwohner weisen darauf hin, dass in den betrachteten Wildbachabschnitten zwar erhöhte, jedoch nicht extreme Abflüsse stattfanden. Insbesondere die Beobachtungen an den Verklausungen führen zum Schluss, dass zwar innerhalb der Abschnitte lokal an verschiedenen Orten Schwemmholztransport stattfand, jedoch jeweils nur über kürzere Strecken. Es wird abgeschätzt, dass insgesamt deutlich weniger als 10% bzw. weniger als ca. 5 m<sup>3</sup> des in den untersuchten Bachabschnitten liegenden Schwemmholzes aus den Abschnitten ausgetragen wurde. Dem gegenüber wurden durch die Starkniederschläge zahlreiche Eintragsprozesse ausgelöst, welche neben Geschiebe auch Holz in das Gerinne eintrugen. Die Niederschlagsituation vom August 2005, mit lange anhaltenden Niederschlägen, löste in den untersuchten, kleineren Einzugsgebieten keine Hochwasserabflüsse mit erheblichen Schwemmholzulagerungen aus (Ausnahme: Bäche mit murgangartigen Abflüssen). Allerdings wurde der Vorrat an totem Holz in den Bachbetten erhöht. Bei künftigen Starkniederschlägen kurzer Dauer ist dadurch das Potenzial für Schwemmholzverlagerungen angestiegen.

Schwemmholzpotenzial in Wildbächen erhöht

9.4

## Zusammensetzung von Schwemmholzablagerungen

Die Untersuchungen grösserer Schwemmholzablagerungen beschränkten sich auf ausgewählte Orte, da der Aufwand für eine vollständige Aufnahme zu gross gewesen wäre und das Schwemmholz bei den Aufräumarbeiten an vielen Orten sehr rasch ent-

Datengrundlage und Methodik

fernt worden war. Bei der Auswahl wurde der Frage nach dem Einfluss des Sturm- und Käferholzes im Wald auf das Schwemmholzaufkommen Rechnung getragen, indem Untersuchungsgebiete gewählt wurden, die vom Sturm «Lothar» besonders stark (Brienzersee, Thunersee, Entlebuch, Bielersee, Sarnen, Giswil) oder kaum (Prättigau) betroffen waren. In Absprache mit den kantonalen Fachstellen wurden an 40 Orten natürlich abgelagerte (ungestörte) oder bei der Räumung von Gerinnen aufgeschichtete (gestörte) Schwemmholzhaufen aufgenommen (Abb. 9.2). Die Erhebungen umfassten eine standardisierte visuelle Einschätzung des ganzen Haufens (visuelle Beurteilung) und meistens die Untersuchung einer oder mehrerer Stichproben von Holzstücken aus dem Haufen (Linienstichprobe). Es wurden 45 visuelle Beurteilungen und 46 Linienstichproben (insgesamt rund 700 Holzstücke) durchgeführt. Bei beiden Methoden wurden dieselben Klassierungen verwendet und die in der Tab. 9.2 aufgeführten Parameter aufgenommen.

**Tab. 9.2 > Parameter, die bei den untersuchten Schwemmholzhaufen mit einer visuellen Beurteilung des ganzen Haufens und/oder in einer Linienstichprobe an Holzstücken aufgenommen wurden.**

Parameter	Erläuterung	Visuell	Linienstichprobe
Volumen	Volumen (m <sup>3</sup> ) des Haufens (Holz und Zwischenräume).	X	-
Holztyp	(a) Bau-, (b) Brennholz (Wirtschaftsholz) und (c) naturbelassenes Holz.	X	X
Baumart	Baumart anhand der Rinde oder der Holzbeschaffenheit (Wagenführ, 1996).	X	X
Frisch / nicht frisch	Die Holzstücke wurden nach Rinde abgesucht und diese wurde aufgeschnitten. Als «frisch» wurden nur Holzstücke bezeichnet, bei denen noch grüne Rinde gefunden worden war (z.B. Abb. 9.6).	X	X
Verwitterungsgrad	Verwitterung auf einer Skala von 1 (frisch) bis 4 (sehr stark verwittert) in Anlehnung an Brang (1997).	X	X
Abnutzungsgrad	Der Grad der Abnutzung während des Wassertransports auf der Skala von 1 (wenig) bis 4 (sehr stark) nach Reichelt (1961).	X	X
Käferspuren	Spuren von Buchdruckern und anderen Borken- und Holzkäfern.	-	X
Durchmesser	Durchmesser des Schwemmholzstückes unter der Linie.	-	X
Länge	Länge eines Schwemmholzstückes.	-	X

**Abb. 9.6 > Stamm mit grau überzogener, aber noch «frischer» Rinde.**

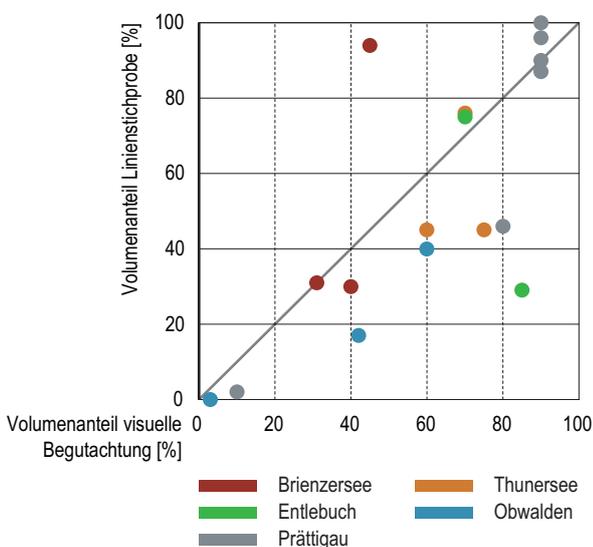


Die visuelle Beurteilung wurde jeweils von zwei Beobachtern durchgeführt. Bei der Liniestichprobe wurde wie folgt eine repräsentative Stichprobe ausgewählt: Je nach Haufengrösse wurde eine 5 m oder 20 m lange Linie über den Haufen gelegt. Entlang dieser Linie wurden jeweils die obersten Holzstücke untersucht, falls deren Durchmesser  $d$  grösser als  $d_{\min}$  war. Bei den meisten Liniestichproben wurde mit  $d_{\min} = 10$  cm gearbeitet, bei einigen aber auch mit  $d_{\min} = 1$  cm, um die Grössenverteilung besser zu erfassen.

Der Volumenanteil einer Klasse in einem Haufen wurde bei der visuellen Beurteilung direkt abgeschätzt. Bei der Liniestichprobe wurde zunächst jedes Holzstück einer Klasse zugeordnet. Der Volumenanteil einer Klasse im Haufen wurde unter Annahme einer Zylinderform für die einzelnen Holzstücke berechnet. Bei Liniestichproben mit kleiner Stückzahl ist die statistische Unsicherheit dieser Berechnung teilweise recht hoch. Die Übereinstimmung der beiden Methoden war angesichts dieser Unsicherheit aber in den meisten Fällen gut (Abb. 9.7).

#### Volumenbestimmung

**Abb. 9.7 > Volumenanteile des frischen, natürlichen Holzes: Vergleich der Volumenanteile der Liniestichproben mit jenen der visuellen Beurteilungen für mehrere Schwemmholzhäufen.**



Die untersuchten Schwemmholzstücke wiesen die in Abb. 9.8 und 9.9 dargestellten Durchmesser- und Längenverteilungen auf. Dabei ist zu beachten, dass die maximalen Längen bei maschinell aufgeschichteten Haufen (gestört) oft nicht mehr festgestellt werden konnten, da längere Stämme zum Zeitpunkt der Aufnahmen bereits zersägt waren, obwohl bereits am 4. Tag nach dem Unwetter mit den Aufnahmen begonnen wurde.

#### Dimensionen des Schwemmholzes

**Abb. 9.8** > Volumenanteile verschiedener Längenklassen der untersuchten Schwemmholzstücke der Liniestichproben mit einem minimalen Durchmesser von 10 cm.

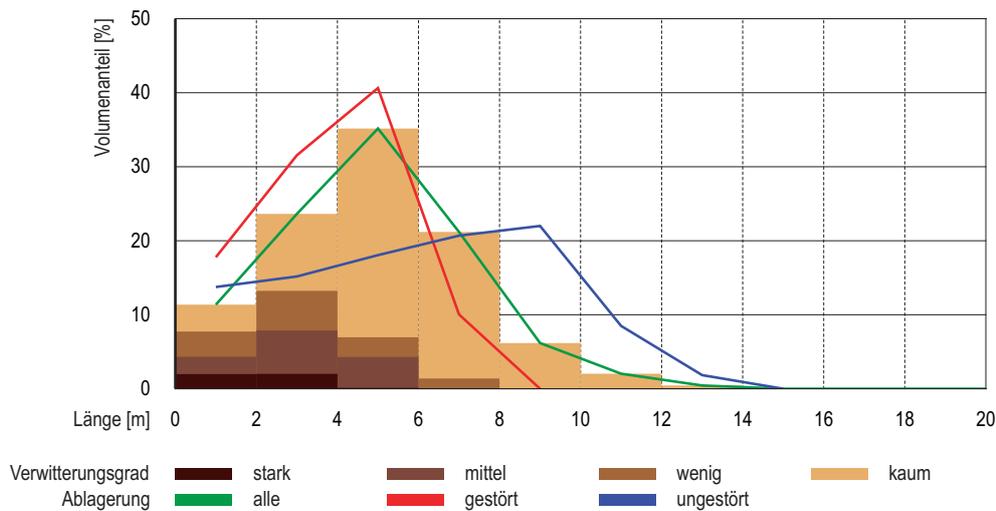
Die Balken zeigen die Volumenanteile nach Verwitterungsgrad aufgeteilt.

Die Linien zeigen die Volumenanteile

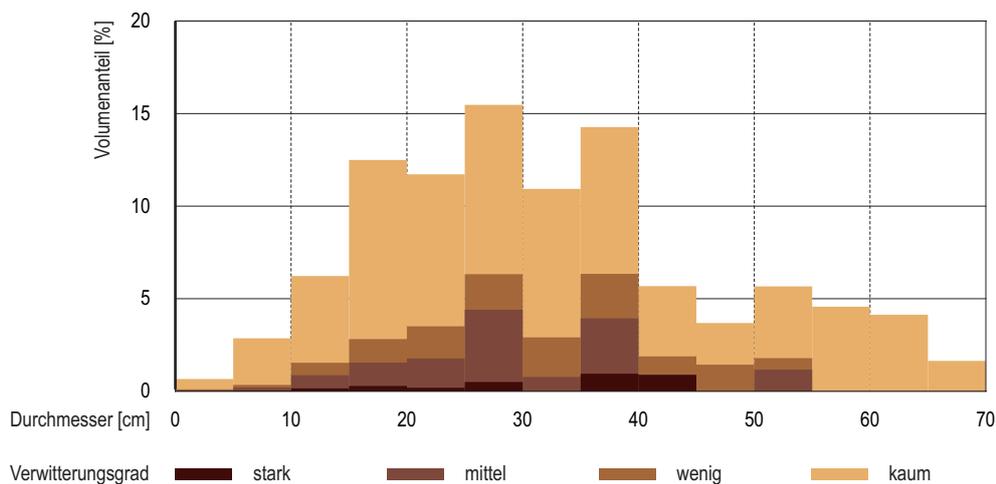
- aller Haufen («alle»)

- der maschinell aufgeschichteten Haufen («gestört»)

- der vom Fluss abgelagerten Haufen («ungestört»).



**Abb. 9.9** > Volumenanteile verschiedener Durchmesserklassen der untersuchten Schwemmholzstücke aller Liniestichproben aufgeteilt nach Verwitterungsgrad.



Die Zusammensetzung des Schwemmholzes wies grosse regionale Unterschiede auf (Abb. 9.11). Der Anteil an Bau- und Brennholz war in den meisten Regionen unter 20%. Im Prättigau führte der Schraubach viel Bauholz aus Uferverbauungen mit. Wird der Schraubach nicht berücksichtigt, liegt der Bau- und Brennholzanteil im Prättigau bei rund 10% (Abb. 9.10). Auch der Frischholzanteil war unterschiedlich: Je nach

Zusammensetzung des Schwemmholzes

Region und Methode wurden zwischen 25% (Linienstichprobe Sarnen) und 80% (visuelle Beurteilung Entlebuch) des natürlichen Holzes als frisch identifiziert. Über alle Regionen waren vom untersuchten Schwemmh Holz rund 9% «Bau- und Brennholz», rund 58% «als frisch identifiziertes» und 33% anderes, unbearbeitetes Holz.

**Abb. 9.10** > Schwemmh Holz im Flussbett der Lanquart nahe Jenaz.



Das Schwemmh Holz war durch den Transport im Gerinne teilweise sehr stark abgenutzt. Viele Stämme wurden fast vollständig entrindet vorgefunden und konnten nur noch anhand von Rindenresten, z.B. zwischen den Wurzelanläufen, als frisch identifiziert werden. Deshalb muss davon ausgegangen werden, dass der Grünholzanteil mit der Kategorie «als frisch identifiziert» unterschätzt wird. In einer der wenigen vergleichbaren Studien fand Bänziger (1990) im Goms nach den Unwettern von 1987 eine ähnliche Zusammensetzung bei den untersuchten 1700 m<sup>3</sup> Schwemmhöle: 17% Bau- und Brennholz, 48% Grünholz und 35% Totholz.

**Vergleich mit 1987**

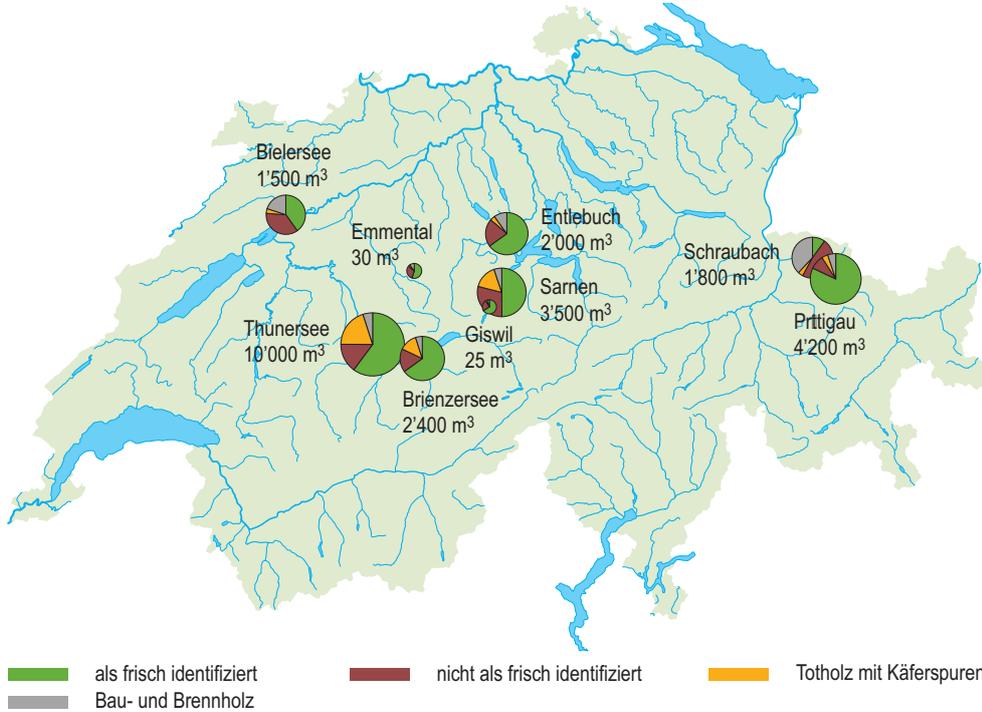
In den Regionen, die vom Sturm «Lothar» stark betroffen waren, lag der Anteil «als frisch identifiziert» mit 53% etwas unter jenem im Prättigau (78%), das vom Sturm kaum betroffen war. In den vom Sturm stark betroffenen Regionen wurden bei rund 17% des total erfassten Schwemmh Holzvolumens Käferspuren entdeckt, in den anderen (Prättigau) waren es rund 2%. Da sich Borkenkäfer insbesondere in Fichtenbeständen nach Sturmschäden verstärkt vermehren, ist dies ein Hinweis, dass relativ wenig Schwemmh Holz aus Sturmflächen stammte (Abb. 9.11).

**Geringer Anteil von Käferholz**

Vor allem in den Gebieten flussabwärts der Alpenrandseen wurde ein markanter Anteil von Weichholzbaumarten gefunden, welche für die Ufervegetation der Talflüsse typisch sind (Abb. 9.12). Dies ist ein weiterer Hinweis, dass ein grosser Teil des Schwemmhöles durch Seitenerosion entlang der grösseren Gewässer (frische Uferabbrüche) mobilisiert wurde.

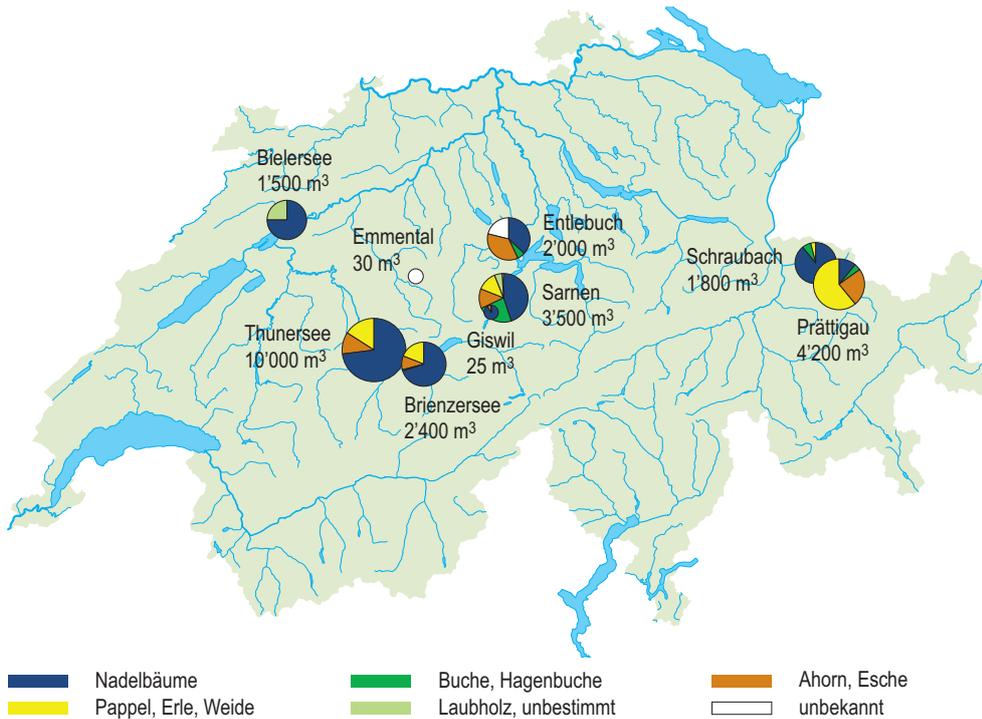
**Baumartenzusammensetzung**

Abb. 9.11 > Volumenanteile der Holztypen der untersuchten Schwemmholzablagerungen.



Kartengrundlage: Digitale Übersichtskarte der Schweiz (K606-01 © 2004 swisstopo)

Abb. 9.12 > Mittlere Baumartenzusammensetzungen in den untersuchten Schwemmholzablagerungen.



Kartengrundlage: Digitale Übersichtskarte der Schweiz (K606-01 © 2004 swisstopo)

9.5

## Erkenntnisse und Ausblick

Im Verlauf des Unwetters 2005 kam es wegen Verkläuerungen durch Schwemholz an Brücken und Wehren an verschiedenen Orten zu Gerinneausbrüchen und Überschwemmungen. Die dokumentierten Mengen an abgelagertem oder entnommenem Schwemholz belaufen sich auf mindestens 110'000 m<sup>3</sup> (inkl. Zwischenräume) oder 30'000 t. Bei den Hochwassern im Jahr 1987 wurden die abgelagerten Schwemholzmengen auf rund 41'000 m<sup>3</sup> geschätzt (Bänziger, 1991).

Gesamtvolumen

In vier Wildbächen wurden sowohl vor als auch nach dem Unwetter Erhebungen zur Schwemholzsituation durchgeführt. Diese Fallstudien zeigen, dass die starken Regenfälle in den Bacheinhängen viele Prozesse wie Erosion und Rutschungen auslösten und dadurch Holz aus den ufernahen Bestockungen in die Bachläufe eingetragen wurden. Da die untersuchten Wildbäche keine extremen Abflüsse führten, kam es jedoch nur zu einem geringen Schwemholztransport in den Bachläufen. Insgesamt wurde im August 2005 das Schwemholzpotenzial für künftige Ereignisse in diesen Wildbachgerinnen erhöht, was auf Grund der Niederschlagssituation auch für viele andere Wildbäche mit kleinen Einzugsgebieten (bis etwa 3 km<sup>2</sup>) zutreffen dürfte.

Schwemholzpotenzial in Wildbächen erhöht

In den untersuchten grossen Schwemholzablagerungen weist der Anteil an frischem Holz darauf hin, dass viel Holz aus rezenten Eintragsprozessen stammte. Die Zusammensetzung wies grosse regionale Unterschiede auf. Es gab Stellen, an denen der Frischholzanteil bei nur 15% lag, andernorts wiederum lag er bei fast 80%. Gesamthaft gesehen, lag der Frischholzanteil zwischen 50 und 75% und die Zusammensetzung war insgesamt mit jener beim Hochwasser vom August 1987 im Goms vergleichbar. Weiter wiesen weniger als 15% des Schwemholzes Borkenkäferspuren auf. Solche Spuren sind bei liegen gelassenem Sturmholz normalerweise häufig anzutreffen. In einigen Regionen war der Anteil der Baumarten hoch, welche für Uferbestockungen entlang von Flussläufen typisch sind. Dieser Hinweis auf einen beachtlichen Anteil aus frischen Uferanbrüchen entlang dieser Flüsse (Seitenerosion) wird durch entsprechend starke Seitenerosionen in diesen Abschnitten unterstützt (Kap. 8).

Mehrheitlich frisches Holz

Aufbauend auf der hier präsentierten Übersicht über die Schwemholzprozesse beim Hochwasser vom August 2005 werden im zweiten Teil der Ereignisanalyse folgende Aspekte vertieft: Anhand von Fallstudien in einzelnen Einzugsgebieten ist eine genauere Bestimmung der Beiträge der verschiedenen Quellen zum Schwemholzaufkommen und eine Beurteilung von Präventivmassnahmen (z.B. Frehner et al., 2005) vorgesehen. Weiter werden für typische Fälle die Umstände bei der Bildung von Verkläuerungen untersucht und die hydraulischen Bedingungen für den Schwemholztransport analysiert. Damit sollen bessere Grundlagen für die Berücksichtigung von Schwemholz bei der Gestaltung von Bauten am und im Wasser erarbeitet werden.

Ausblick

**Literatur:**

Bänziger R. 1990: Schwemmholz im Unwettersommer 1987. Schweizer Ingenieur und Architekt 47 (22. November 1990): 1354–1358.

Bänziger R. 1991: Projektabschlussbericht Schwemmholz. Teilprojekt A1 der Ursachenanalyse Hochwasser 1987. Forschungsprogramm des Bundes für Wasserwirtschaft. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf.

Brang P. 1997: Aufnahmeanleitung der langfristigen Waldökosystem-Forschung (LWF). Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf.

Burren S., Eyer W. 2000: STORME – ein informationsgestütztes Ereignis – Kataster der Schweiz. Tagungsband zum internationalen Symposium Interpraevent (26. – 30.06.2000), Band 1, 25-37.

Frehner M., Wasser B., Schwitter R. 2005: Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion, Vollzug Umwelt, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, 564 S.

Reichelt G. 1961: Schotterformen und Rundungsgradanalyse als Feldmethode. Petermanns geogr. Mitt. 105.

Rickli C., Bucher H. 2006: Schutzwald und Schwemmholz in Wildbacheinzugsgebieten. FAN-Agenda 1/06: 17–20.

Wagenführ R. 1996: Möglichkeiten der Holzartenbestimmung. In: Holzatlas. Fachbuchverlag Leipzig, 34–37.



Hugo Raetzo, Christian Rickli

## 10 > Rutschungen

*Auf Grund der extremen Niederschläge gerieten im August 2005 viele Hänge ins Rutschen. Das Spektrum dieser Hangprozesse ist gross und reicht von flachgründigen, erosionsähnlichen Bodenbewegungen mit einem Volumen von wenigen  $m^3$  Rutschmaterial bis zu tiefgründigen Rutschungen mit mehreren Mio.  $m^3$ . Durch Hangprozesse verloren zwei Menschen ihr Leben und es entstanden grosse Sachschäden. In diesem Kapitel werden die mittel- bis tiefgründigen Rutschungen sowie die oberflächennahen Rutschprozesse untersucht.*

### 10.1 Einleitung

Rutschungen beruhen auf Veränderungen des Kräftegleichgewichtes im Untergrund. Starke Niederschläge bewirken eine vermehrte Wassersättigung des Untergrundes, wodurch sich das Gewicht erhöht und dadurch die treibenden Kräfte vergrössert werden. Die rückhaltenden Kräfte, die durch Reibung und Kohäsion entstehen, werden verkleinert. Durch die grossen Regenmengen im August 2005 wurden an vielen Orten bis anhin stabile oder sich gerade noch im Gleichgewicht befindende Hänge instabil.

In den Empfehlungen zur Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten (BRP, BWB, BUWAL, 1997) sind die verschiedenen Massenbewegungen beschrieben. Rutschungen werden dabei nach der Tiefe der Gleitfläche klassifiziert: Sie liegt bei flachgründigen Rutschungen weniger als 2 m, bei mittelgründigen Rutschungen 2–10 m und bei tiefgründigen Rutschungen über 10 m unter dem Terrain. Hangmuren können in der Regel den flachgründigen Rutschprozessen zugeordnet werden, wobei jeweils ein grosser Teil des destabilisierten Bodenmaterials murgangförmig abfließt. Diese Bodenbewegungen werden oft auch «Rüfen» genannt.

Das Unwetter vom August 2005 hat in der ganzen Schweiz mindestens 5000 Rutschprozesse ausgelöst. Viele davon wiesen in Bezug auf die Ausdehnung und das Volumen ein geringes Ausmass auf. Nur einige waren so gross, dass sie – zum Teil auch durch sekundäre Fliessprozesse – beträchtliche Schäden verursachten. Abb. 10.1 zeigt die räumliche Verteilung der Rutschungen im August 2005. Über die ganze Schweiz verteilt, sind die flachgründigen Rutschungen mit Volumina von einigen 100–1000  $m^3$  in der Mehrzahl.

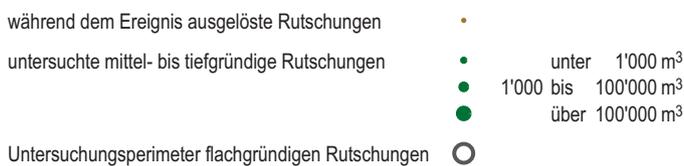
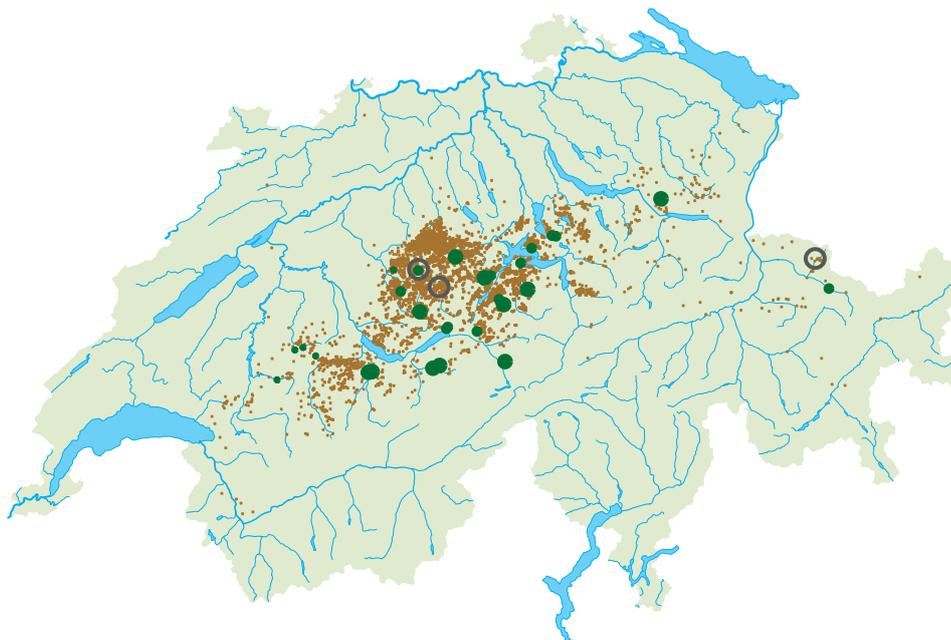
Unterschied flach- und tiefgründiger Rutschungen

Die grössten Rutschungen mit einem Volumen von mehreren Millionen m<sup>3</sup> ereigneten sich im Berner Oberland und im Entlebuch. Weitere mittel- und tiefgründige Prozesse traten vorwiegend in den Regionen Zentralschweiz, Berner Oberland und Graubünden auf. Von den insgesamt etwa 100 mittel- bis tiefgründigen Rutschungen werden im Rahmen der Ereignisanalyse bei 29 Ereignissen die Ursachen in Zusammenarbeit mit den betroffenen Kantonen und privaten Büros untersucht. Die ausgewählten Ereignisse (Abb. 10.1) ermöglichen gemäss den Kriterien Ausmass, geologische Disposition, Gleitmechanismus, Grundwasser oder Reichweite neue Erkenntnisse für die Gefahrenbeurteilung.

Mittel- bis tiefgründige  
Rutschungen

**Abb. 10.1** > Erfasste Rutschungen vom Unwetter 2005, gemäss den Angaben der betroffenen Kantone.

Von der WSL werden die in den drei mit Kreisen markierten Untersuchungsperimetern liegenden flachgründigen Rutschungen und vom BAFU die als Punkte dargestellten mittel- bis tiefgründigen Rutschungen untersucht.



Kartengrundlage: Digitale Übersichtskarte der Schweiz (K606-01 © 2004 swisstopo)

Von den gesamtschweizerisch rund 5000 flachgründige Rutschungen wurden deren 1000 allein im Kanton Obwalden ausgelöst (Berwert-Lopes, 2006). Im Kanton Nidwalden gingen auf Grund von Rufen etwa 800 Meldungen beim Nidwaldner Hilfsfonds ein (Oeko-B AG und Niederer + Pozzi Umwelt AG, 2006). In der Gemeinde Langnau i.E. wurden im Rahmen der Ereignisdokumentation fast 500 Hangmuren («Louelen») erfasst (Kellerhals und Häfli AG, 2005). Rutschprozesse wurden jedoch nicht nur in

Flachgründige Rutschungen

der Zentralschweiz beobachtet, sondern – mit unterschiedlicher Intensität – im gesamten von den Starkniederschlägen im betroffenen Raum. In den drei Untersuchungsperimetern bei Trub BE, Flühli LU und St. Antönien GR wurden die dort ausgelösten flachgründigen Rutschprozesse (Abb. 10.1) detailliert erhoben. Dies erlaubt statistische Aussagen über die räumliche Verteilung der Rutschungen und über die Einflussfaktoren, z.B. der Vegetation.

## 10.2 Mittel- bis tiefgründige Rutschprozesse

Das Unwetter 2005 verursachte im Voralpen- und nördlichen Alpengebiet auch Rutschungen mit einem Volumen von einigen 100'000 bis Mio. m<sup>3</sup>, welche wie in den Fällen Feldweid LU und Cholrüti OW zum Teil Häuser und Infrastrukturen zerstörten. Mittel- bis tiefgründige Rutschungen weisen eine Gleitfläche zwischen rutschender Masse und darunter liegendem Gestein auf. Die primären Gleitprozesse können schnell oder langsam sein, wobei im August 2005 oftmals als sekundärer Prozess schnell fließende Murgänge folgten, die ihrerseits Todesfälle (Brienz) und hohe Sachschäden verursachten. Der Murgang Rotloui in der Gemeinde Guttannen umfasste beispielsweise 500'000 m<sup>3</sup>, staute die Aare oberhalb des Dorfes und verschüttete die Grimselstrasse, die deshalb verlegt werden musste.

Im Rahmen der Ereignisanalyse stellen sich für die Analyse der Rutschungen folgende Fragen:

- > Wie gross kann das Ausmass seltener Rutschprozesse inklusive der Sekundärfolgen sein?
- > Welche geologische Disposition kann für wahrscheinliche Gefahren definiert werden?
- > Welche Rolle spielt der Kluft- oder Porenwasserdruck?
- > Welche hydrogeologischen Dispositionen sind typisch für die Rutschprozesse?

Aus den mittel- bis tiefgründigen Rutschungen wurden 30 Ereignisse aus acht Kantonen ausgewählt, dokumentiert und in die Analyse integriert. Eine Zusammenstellung der untersuchten Rutschungen ist in Tab. 10.1 aufgeführt.

Eine erste Übersicht der mittel- bis tiefgründigen Rutschungen zeigt, dass spezifische geologische und hydrogeologische Dispositionen für wiederkehrende, teilweise seltene Ereignisse im Vordergrund stehen. Eine detaillierte Analyse und weitergehende Dokumentation erfolgt im Rahmen des zweiten Teiles der Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Für den vorliegenden Bericht werden nachfolgend erste allgemeine Erkenntnisse aus den 29 dokumentierten Fallbeispielen zusammengefasst.

- > Rutschungen treten häufig im Lockergestein auf. In vielen Fällen, insbesondere bei Volumina kleiner als 1 Mio. m<sup>3</sup>, liegt die Gleitfläche nahe der Felsoberfläche, was bei einer Gefahrenbeurteilung im Normalfall berücksichtigt werden kann. In be-

stimmten Fällen kann auch der geklüftete Fels involviert werden (z.B. Rutschung Feldweid).

- > Unterschiedliche Durchlässigkeiten im Lockergestein sind in der Regel Verursacher von Instabilitäten. Besonders kritisch sind schwach durchlässige feinkörnige Deckschichten über sandig-kiesigem Lockergestein.
- > Die geologische Disposition mit hangparallelen Schichtneigungen ist für kleine bis grosse Rutschmassen kritisch. Als Gleitflächen dienen oftmals Mergelschichten. In diesen Fällen können die Rutschgeschwindigkeiten mehrere m/s erreichen. Nicht selten geht der Prozess in ein «Fliesen» über (debris-, earth-flow).
- > Die Molasse ist bei einer Wechsellagerung von Nagelfluh, Sandsteinen und Mergelschichten durch die unterschiedliche Durchlässigkeit und den möglichen Wasserdruck eine prädestinierte Formation für Unwetterrutschungen. Diese geologische Disposition war beim Bergsturz von Goldau SZ (1806), beim Felsrutsch Gribisch bei Arth-Goldau SZ (2005), bei den Rutschungen Laugneri in Weggis LU (2005), Blappach bei Trubschachen BE (2005) und Gantli bei Arth-Goldau SZ (2005) sowie zahlreichen Hangmuren ausschlaggebend. Die geotechnischen und hydrogeologischen Grenzwerte müssen in weiteren Untersuchungen ermittelt werden.
- > Die Drainagewirkung alter Entwässerungswerke ist oft unbekannt und ungenügend. Gründe für eine ungenügende Wirkung können fehlender Unterhalt oder ungenügende Ausführungen sein, was in instabilen oder labilen Lockergesteinsmassen oftmals ein Versagen verursacht. Es besteht Handlungsbedarf für viele Rutschgebiete, die in der Vergangenheit saniert wurden.
- > Oberflächenwasser aus Einzugsgebieten mit schwach durchlässigen Böden, sowie Siedlungs- und Strassenentwässerungen sind häufige Auslöser von unerwarteten Rutschprozessen (z.B. Laugneri, Blappach).
- > Die aussergewöhnlich hohen Hang- und Grundwasserstände, erhöhter Strömungsdruck sowie die Sättigungsverhältnisse während des Unwetters 2005 haben an einigen Hängen sehr grosse Rutschungen verursacht. In der Rutschung Feldweid waren beispielsweise Felsblöcke an der Basis, die im Holozän wahrscheinlich erstmals angerissen worden sind. Der Einfluss der Hang- und Grundwasserstände auf seltene Hanginstabilitäten und hohe Rutschaktivitäten wurde bereits bei früheren Unwettern belegt (Hegg et al., 2002).

Aus den in Tab. 10.1 aufgeführten Rutschungen werden in dieser ersten Dokumentation drei Beispiele exemplarisch erläutert. Das Beispiel Laugneri in Weggis LU illustriert typische geologisch-hydrogeologische Dispositionen für überraschende und schnelle Rutschprozesse. Eine hangwärts geneigte Wechsellagerung von Nagelfluh Sandsteinen und Mergelschichten war auch bei der Katastrophe von Goldau im Jahr 1806 sowie bei der Felsrutschung Gribisch von 2005 für das Abgleiten ausschlaggebend. Die Rutschung Laugneri zeigt auch, dass schon mit geringen Volumina gefährliche und schadensreiche Prozesse ablaufen können. Das Beispiel Blappach (Trubschachen BE) illustriert, in welcher Grössenordnung eine Ausdehnung bei entsprechender geologischer Disposition auftreten kann. Die Fläche dieser Rutschung umfasst 14'000 m<sup>2</sup> bei einer mittleren Mächtigkeit von lediglich ca. 5 m. Diese Rutschung ist auch typisch für früher gebaute Drainagen und schlecht unterhaltenen Quelfassungen, die wahrscheinlich während des Unwetters überlastet waren. Mit dem dritten Beispiel aus dem Entlebuch LU, der Rutschung Feldweid, wird gezeigt, wie alte und inaktive

Untersuchungsgebiete

Rutschhänge trotz flacher Hangneigung von zirka 20° in Bewegung geraten und Infrastrukturen zerstören können. Die Ausdehnung dieser Rutschmasse umfasst auch anstehenden Fels an der Basis, der durch eine prägnante Klüftung gestört ist. Einhergehend mit der prägnanten Klüftung ist vermutlich eine Zerrüttung durch alte Sackungsbewegungen. Zudem ist die Rutschung Feldweid typisch für eine progressive und regressive Destabilisierung, weil im Frühling 2006 das Ausmass der initialen Rutschung grösser war und bereits sanierte Infrastrukturen zum zweiten Mal zerstört wurden. Die drei Beispiele basieren auf den am Kapitelende aufgelisteten, von spezialisierten Ingenieur- und Geologenbüros durchgeführten Ereignisanalysen.

**Tab. 10.1 > Liste der im Rahmen der Ereignisanalyse detailliert untersuchten mittel- bis tiefgründigen Rutschungen.**

Kt.	Gemeinde	Flurname	Prozesstyp (Primär-, Sekundärprozess)	Volumen (geschätzt)
BE	Langnau	Schwandacker	Rutschung, Hangmure	1'000 m <sup>3</sup>
BE	Trubschachen	Blappach	Rutschung	70'000 m <sup>3</sup>
BE	Trub	Schniderhus	Rutschung	90'000 m <sup>3</sup>
BE	Hasliberg	Tierberg	Rutschung	6'000 m <sup>3</sup>
BE	Guttannen	Rotlauri	Rutschung	3'000'000 m <sup>3</sup>
BE	Grindelwald	Anggistalden	Rutschung	10'000'000 m <sup>3</sup>
BE	Grindelwald	Stalden	Rutschung	250'000 m <sup>3</sup>
BE	Reichenbach	Margeli	Rutschung, Hangmure	150'000 m <sup>3</sup>
BE	Reichenbach	Leiternwald	Rutschung	250'000 m <sup>3</sup>
BE	Brienz	Ritzwald, Trachtbach	Rutschung, Murgang	60'000 m <sup>3</sup>
BE	Brienz	Balen, Glyssibach	Rutschung, Murgang	80'000 m <sup>3</sup>
BE	Schangnau	Waeldli	Rutschung	1'000'000 m <sup>3</sup>
FR	Plaffeien	Eltschingera	Rutschung, Hangmure	400 m <sup>3</sup>
FR	Plaffeien	Ramserli	Rutschung, Hangmure	500 m <sup>3</sup>
FR	Plaffeien	Spittelgantrisch	Rutschung, Hangmure	400 m <sup>3</sup>
FR	Jaun	Zöpfe	Rutschung	350 m <sup>3</sup>
GR	Klosters-Serneus	Landquart	Rutschung	30'000 m <sup>3</sup>
LU	Weggis	Laugneri	Rutschung	20'000 m <sup>3</sup>
LU	Entlebuch	Schwändi	Hangmure	500 m <sup>3</sup>
LU	Entlebuch	Feldweid	Rutschung, Sackung	300'000 m <sup>3</sup>
NW	Wolfenschiessen	Schmidsboden (Oberrickenbach)	Rutschung, Murgang	270'000 m <sup>3</sup>
NW	Ennetbürgen	Herderwald	Rutschung, Felssturz	1'500 m <sup>3</sup>
OW	Kerns, Melchtal	Cholrüti	Felsrutsch	100'000 m <sup>3</sup>
OW	Alpnach	Seewli	Felsrutsch	80'000 m <sup>3</sup>
OW	Alpnach	Hurd	Rutschung	300'000 m <sup>3</sup>
OW	Kerns	Stöckwald	Rutschung	300'000 m <sup>3</sup>
SZ	Arth-Goldau	Nolberg-Gribsch	Felssturz, Murgang	90'000 m <sup>3</sup>
SZ	Arth-Goldau	Gantli	Rutschung, Hangmure	50'000 m <sup>3</sup>
SG	Schänis	Schäner Berg	Rutschung	300'000 m <sup>3</sup>

### Fallbeispiel Rutschung Laugneri, Gemeinde Weggis, Kanton LU

In der zweiten Tageshälfte des 22. Augusts hörten Anwohner der Liegenschaften Laugneri Geräusche von Baumwurzeln, die zerrissen wurden. Es ist anzunehmen, dass sich die Rutschmassen bereits in Bewegung gesetzt hatten und dass die Fliesswege des Wassers in der instabilen Masse dadurch verändert wurden. In der Nacht vom 22./23. August hörten Anwohner gegen 3 Uhr mehrfach ein lautes Krachen beim Ausbruch der Rutschung in Laugneri (Abb. 10.2). Die Gesteinsmassen sowie die eingelagerten Blöcke, insgesamt 17'000 m<sup>3</sup>, dürften mit hoher Geschwindigkeit, teils als Hangmuren, auf die Wohnhäuser aufgeprallt sein. Ein Indiz dafür sind auch die Einzelblöcke, die sich aus der Rutschmasse lösten und weiter talwärts rollten. Ein weiter unten liegendes Haus wurde von einem solchen Block getroffen und an der bergseitigen Mauer beschädigt.

Zeitlicher Verlauf

Das Rigimassiv wird durch seine Wechsellagerung von Nagelfluh-, Sandstein- und Mergel-Schichten der Unteren Süsswassermolasse geprägt. Die Schichtneigung ist mit 20° Richtung Südsüdost schräg einfallend, also nicht hangparallel. Die Hangneigung beträgt ca. 35° und ist südwestlich orientiert (Abb. 10.3).

Geologische Randbedingungen

Das eher feinkörnige, siltige und sandige Material an der Oberfläche ist in geringer Tiefe von grossen Nagelfluh- und Sandsteinblöcken durchsetzt. Diese Blöcke sind im Lockergestein eingelagert und erreichen Volumina von 100 m<sup>3</sup>. Die mechanischen Einwirkungen dieser Grossblöcke bewirken vor allem bei Backsteinmauern, aber auch bei betonierten Gebäudeteilen viel grössere Schäden, als die im Vergleich dazu langsam abgleitenden geringmächtigen Rutschmassen. Diese Erkenntnis, basierend auf der geologischen Zusammensetzung des Lockergesteins, müsste in zukünftigen Gefahrenbeurteilungen berücksichtigt werden. Die Genese des Lockergesteins ist diversen Hangprozessen zuzuschreiben. Dazu gehören Rutschungen und Hangmuren des Holozäns. Spuren früherer Rutschereignisse liegen nordwestlich und südöstlich der Transitstrecken vor. Es ist anzunehmen, dass auch einzelne Felsstürze aus den Nagelfluhformationen das grobblockige Material geliefert haben. Die Hangneigungen reichen von 28°–37° und liegen wegen der eingelagerten Blöcke über dem Durchschnitt von Lockergesteinsrutschungen.

Die Nagelfluh- und Mergel-Schichten weisen sehr unterschiedliche Durchlässigkeiten auf. Durch Störungszonen an der Südwestflanke des Rigimassivs entwässert das System in teilweise steiles unbewohntes Gelände oberhalb der Wohnhäuser. Es gibt aber auch zahlreiche Quellhorizonte im Siedlungsbereich von Weggis und speziell im Quartier Laugneri. Die Quellfassungen für das Quartier liegen in den Rutschzonen von 2005 und wurden beim Ereignis teilweise zerstört. Im August 2005 schüttete die Hauptquelle mehr als 500 l/min. Vor dem Unwetter waren es 100–160 l/min. Hinzu kamen mindestens 1000 l/min aus dem Oberflächenabfluss, der teilweise über Wanderwege zugeführt wurde. Die Entwässerung aus den Molasseschichten ist am Hangfuss durch feinkörnigen Hangschutt und alte Rutschablagerungen gehemmt. Bei der Kantonsstrasse unterhalb der Rutschungen Laugneri wurde bei einer Bohrung gespanntes Grundwasser gefunden.

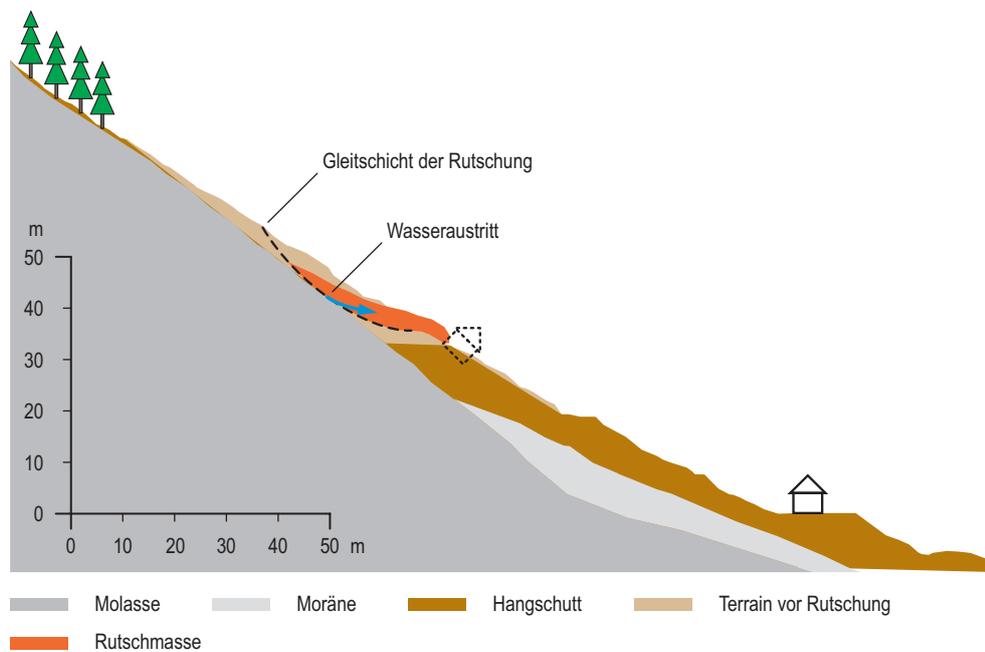
Hydrogeologische  
Randbedingungen

**Abb. 10.2** > Luftbildaufnahme der Rutschung Laugneri bei Weggis (Foto: K. Louis, Weggis).

Die gestrichelte Linie markiert das in Abb. 10.3 dargestellte Profil.



**Abb. 10.3** > Geologisches Profil der Rutschung Laugneri bei Weggis.



Quelle: Ingenieurbüro Louis, Weggis, 2005

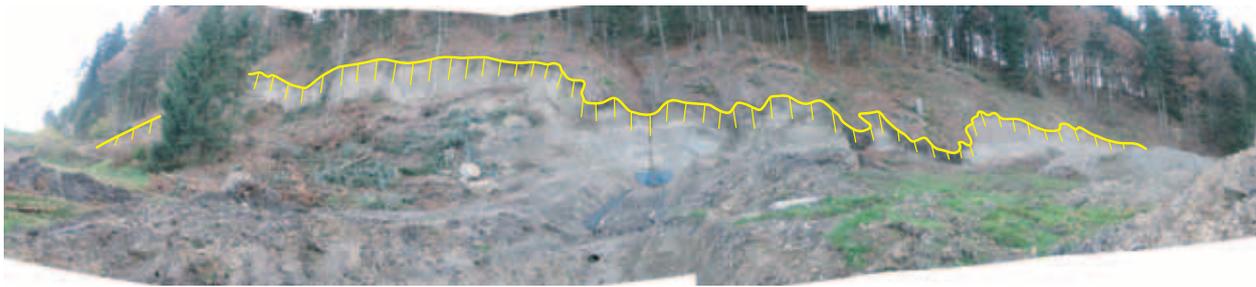
### Fallbeispiel Rutschung Blappach, Gemeinde Trubschachen Kanton BE

Am 22. August beschleunigte sich eine Rutschmasse in der Gemeinde Trubschachen (1100 m ü. M.) auf einer Fläche von 14'000 m<sup>2</sup>. Obwohl die mittlere Mächtigkeit etwa 5 m betrug, sind auf Grund der Breite von 270 m ca. 70'000 m<sup>3</sup> Lockergestein in Bewegung geraten (Abb. 10.4). Die Rutschmasse besteht aus verwitterten Nagelfluh- und Sandsteinschichten der Oberen Süsswassermolasse. Als Verwitterungsprodukte dieser Formationen finden sich entsprechend kiesig-sandige Schichten mittlerer Durchlässigkeit, seltener auch tonig-siltige Horizonte.

Die hydrogeologischen Bedingungen dieser Rutschung sind geprägt durch die Durchlässigkeitskontraste, einerseits im Lockergestein und andererseits in den Molasse-schichten. Wasseraustritte wurden in der Vergangenheit als Quellen gefasst und als Trinkwasser verwendet. Bereits früher wurde mit Drainagen, d.h. eingelegten Rohren, versucht, die vernässten Böden zu entwässern. Die Funktionstüchtigkeit der alten Drainagen und der Strassenentwässerungen am Hangfuss war möglicherweise ungenügend. Infiltrierendes Kluftwasser über stauenden Molassemergeln hat den Wasserdruck im August 2005 erhöht. Nach dem Rutschereignis wurden als Sofortmassnahme offene Gräben erstellt. Am östlichen Rand konnten so in einer Rinne 10–40 l/min gefasst und als Trinkwasser verwendet werden. Die alten Quellfassungen wurden im August 2005 zerstört. Die grossen Wasserzuflüsse aus dem Untergrund und weniger durchlässige Deckschichten sind die Voraussetzung für eine Rutschung bei diesen sehr flachen Neigungsverhältnissen. Das Pauschalgefälle von zirka 12° liegt dementsprechend unter den üblichen Werten.

Hydrogeologische  
Randbedingungen

Abb. 10.4 > Rutschung Blappach bei Trubschachen



### Fallbeispiel Rutschung Feldweid, Gemeinde Entlebuch, Kanton LU

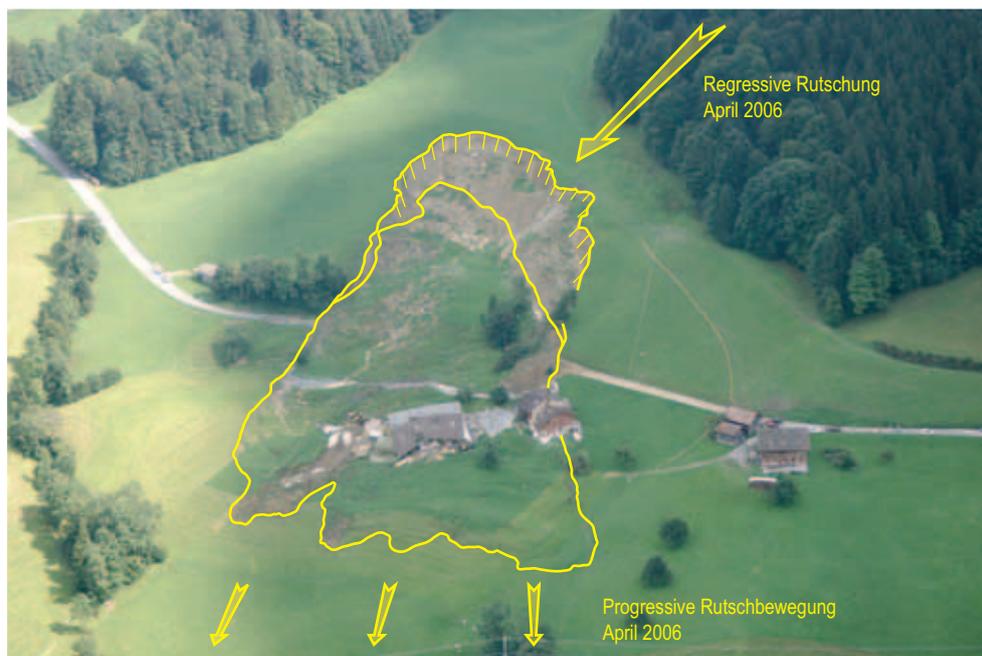
In der Nacht vom 22. zum 23. August hörte der Bauer ein Krachen im Stall. Er verliess sofort den Stall, um die Evakuierung seiner Familie einzuleiten. Kurz nach der Evakuierung beschleunigte sich der Rutschhang Feldweid und zerstörte den Stall und das Wohnhaus. Abb. 10.5 zeigt das Initialstadium mit einem klaren Anriss in der Weide oberhalb der Renggstrasse, die um mehrere Meter abgerutscht ist. Rund 300'000 m<sup>3</sup> Gestein gerieten in Bewegung. Unterhalb der eingestürzten Häuser sind die frontalen Stauchwülste im Gras erkennbar. In den darauf folgenden Wochen hat sich die Rutschung weiterentwickelt und zerstörte auch das Wasserreservoir. Am Hangfuss wurde mit Baggern ein Damm geschüttet und auf der Rutschung wurden Entwässerungsgrä-

Zeitlicher Verlauf

ben zum Ableiten des Wassers aus den zerstörten Quelfassungen (ca. 35 l/min vor dem Unwetter) erstellt. Im Winter war die Rutschung ruhig, so dass die Renggstrasse provisorisch repariert werden konnte. Im Frühling 2006 kam es zu einer bergseitigen regressiven Ausdehnung, die bis in den Wald hinein reicht (Abb. 10.6). Auf einem schräg einfallenden Mergelband lösten sich einige 100'000 m<sup>3</sup> Gestein und rutschten mit einer Geschwindigkeit von mehreren Metern bis Dekametern pro Tag Richtung Siedlung. Geologische Abklärungen zeigen, dass das historische Rutschgebiet noch einige hundert Meter weiter bergwärts reicht. Das Abgleiten dieser zusätzlichen Rutschmassen gefährdete weitere Wohngebäude. Es mussten weitere Massnahmen ergriffen werden.

**Abb. 10.5 > Rutschung Feldweid, Gemeinde Entlebuch im August 2005 (Foto: Schweizer Luftwaffe).**

*Im Frühling 2006 kam es zu einer bergseitigen regressiven Ausdehnung, die bis in den Wald hinein reicht (siehe Pfeil).*



Das Rutschvolumen von Feldweid besteht nur zu einem Teil aus Lockergestein. Schon am 23. August wurden an der Basis der instabilen Masse anstehende Sandsteinblöcke abgerissen. Dies bedeutet, dass die Rutschung eine Ausdehnung erreicht hat, wie sie wahrscheinlich erstmalig im Holozän auftrat. Im Frühling 2006 wurden bergwärts der Ausbruchsnische von 2005 erneut Teile von Sandstein- und Mergelformationen angerissen, welche allerdings mit Material überdeckt waren. Sie dürften im Holozän bereits mehrmals aktiv gewesen sein. Die als Gleitfläche funktionierende Mergelschicht hat eine Neigung von ca. 20°. Auf Grund dieser geologischen Disposition ist es durch eine Ausdehnung der Mergelschichten möglich, dass sich diese Rutschung weiterhin bergwärts ausdehnen wird. Die Rutschung im Jahr 2006 überfuhr die Ablagerungen von 2005 und mobilisierte diese erneut. Die Rutschfront stoppte im Frühling 2006 deutlich weiter unten als im Jahr zuvor.

**Geologische Randbedingungen**

Abb. 10.6 > Rutschung Feldweid, Gemeinde Entlebuch, bergseitige Ausdehnung im Frühling 2006.



### 10.3

#### Flachgründige Rutschprozesse

Obwohl bei flachgründigen Rutschungen meistens nur relativ geringe Materialmengen verlagert werden, stellen sie durch ihr plötzliches Auftreten, die limitierten Prognosemöglichkeiten und den oft raschen Materialabfluss in Form von Hangmuren ein erhebliches Gefährdungspotenzial für Mensch, Tier und Sachwerte dar (Abb. 10.7). So kamen in der Nähe von Entlebuch zwei Feuerwehrleute durch eine Rufe ums Leben. An mehreren anderen Orten verhinderten grosses Glück und rechtzeitige Interventionen, wie die Evakuationen von Gebäuden und Sperrungen von Strassen, weitere Tragödien. Vielerorts wurden Gebäude durch Hangmuren beschädigt sowie Strassen und Eisenbahnlinien unterbrochen. Häufig flossen die Rutschmassen in Bach- und Flussläufe und trugen so zum Geschiebe- und Schwemmholztransport bei. Grosse Flächen Landwirtschaftsland wurden zerstört.

Im Rahmen der Ereignisanalyse werden in ausgewählten Schadensgebieten die flachgründigen Rutschprozesse dokumentiert und analysiert. Ausserdem sollen die Grundlagen und Kenntnisse zu den massgebenden Einflussgrössen auf die Rutschauslösung und zum Transportprozess von Rutschmaterial in steilen Hängen (Hangmuren) erarbeitet und verbessert werden. Zusammen mit den Ergebnissen früherer Untersuchungen zu Ereignissen mit flachgründigen Rutschungen (Rickli, 2001, Rickli, et al. 2004) soll damit eine Verbesserung der Kartierungs- und Prognosemöglichkeiten angestrebt werden.

Ziele der Untersuchung von  
flachgründigen Rutschungen

Im Folgenden werden dazu die Methoden und erste Ergebnisse dargestellt. Im Rahmen von Spezialstudien werden zudem weitere Aspekte untersucht: Modellierung von Hangmuren, Niederschlags-Schwellenwerte für die Auslösung von flachgründigen Rutschungen, Relevanz von Bodenkarten bei der Beurteilung von Hangprozessen. Die Ergebnisse dieser Spezialstudien werden im zweiten Teil der Ereignisanalyse beschrieben.

**Abb. 10.7** > Oberflächennahe Rutschprozesse 2005 bei St. Antönien GR.



Für die Analyse und Dokumentation der flachgründigen Rutschungen 2005 wurden drei Untersuchungsperimeter ausgeschieden, und zwar im Napf bei Trub BE, im Entlebuch bei Flühli LU und im Prättigau bei St. Antönien GR (Abb. 10.1 und Tab. 10.2). Innerhalb der erwähnten Untersuchungsgebiete wurden alle Rutschungen mit einem Volumen von mindestens  $30 \text{ m}^3$  im Feld aufgesucht und dokumentiert. Durch dieses Vorgehen soll das gesamte Spektrum der in einem Gebiet vorkommenden Prozesse erfasst werden. Zu den erhobenen Daten pro Rutschung gehören die Abmessungen, Hangneigungen, Boden- und Standortverhältnisse sowie verschiedene Aspekte des Rutschmechanismus und des Abflussvorganges.

**Untersuchungsperimeter**

**Tab. 10.2 > Wichtigste Kenngrößen der drei Untersuchungsgebiete für die flachgründigen Rutschungen.**

	Napf	Entlebuch	Prättigau
Ort	Trub BE	Flühli LU	St. Antonien GR
Fläche	1.6 km <sup>2</sup>	5.1 km <sup>2</sup>	4.7 km <sup>2</sup>
Waldanteil	29 %	28 %	16 %
Anzahl Rutschungen	36 (14 im Wald)	47 (10 im Wald)	50 (26 im Wald)
Aktivität in Rutschungen pro km <sup>2</sup>	22.5 R/km <sup>2</sup>	9.2 R/km <sup>2</sup>	10.6 R/km <sup>2</sup>
Geologie	Mittelländische Molasse	Subalpine Molasse	Prättigauer Flysch
Geotechnik	Konglomerate, Sandsteine, Mergel, Gehängeschutt	Konglomerate, Sandsteine, Mergel, Gehängeschutt, Moräne	Sandkalke (zum Teil geschiefert), Mergelschiefer, Moräne

Die Felderhebungen fanden hauptsächlich im Herbst 2005 statt. In den drei Untersuchungsgebieten wurden bei insgesamt 217 Rutschungen Daten erhoben. Davon waren 49 Rutschungen kleiner als 30 m<sup>3</sup>. 18 Rutschungen entstanden an Strassenböschungen und 17 Rutschungen wurden durch Gerinneprozesse ausgelöst. Für die Auswertungen standen total 133 vollständige Datensätze zur Verfügung. Im Vergleich zu den rund 5000 Rutschungen, die sich 2005 gesamtschweizerisch ereigneten, basieren die Ergebnisse also auf einer kleinen Stichprobe.

Felderhebungen

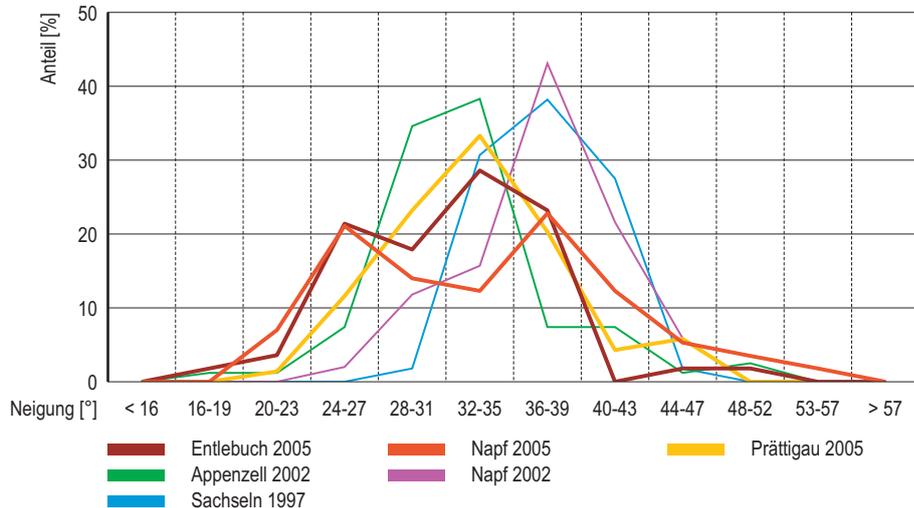
Die Rutschaktivität war im Perimeter Napf mit 22 Rutschungen pro km<sup>2</sup> deutlich grösser als in den beiden anderen Gebieten, wo sich 10 bzw. 11 Rutschungen pro km<sup>2</sup> ereigneten. Im Entlebuch gab es ungefähr gleich viele Wald- und Nichtwaldrutschungen. Dies steht im Gegensatz zu früheren Beobachtungen, bzw. den Beobachtungen in den Kantonen Obwalden und Nidwalden im August 2005 (Berwert-Lopes, 2006; Oeko-B AG, Niederer + Pozzi Umwelt AG, 2006), deckt sich jedoch mindestens teilweise mit den Analysen früherer Ereignisse in der Schweiz (Rickli et al., 2004). In den Gebieten Prättigau und Napf wurden 2005 jeweils intensivere Rutschaktivitäten im Wald festgestellt. Allerdings ist bei der Interpretation der Ergebnisse die Tatsache zu berücksichtigen, dass der Wald in allen Perimetern in den steileren und damit rutschanfälligeren Gebieten vorkommt. Dem gegenüber ist das Freiland auf eher weniger steilem Gelände zu finden.

Rutschaktivität

Die Hangneigung ist ein sehr wichtiger Parameter für die Auslösung von Rutschungen. In den meisten Fällen wurden bei den Rutschungen Neigungen zwischen etwa 20° und 50° gemessen (Abb. 10.8). Im Vergleich zu den Ereignissen Sachseln OW 1997 und Napf und Appenzell 2002 traten 2005 mehr Rutschungen in flacheren Gebieten auf. Als Gründe für diese Abweichungen sind bei weiteren Interpretationen die Faktoren Niederschlag und Geologie zu diskutieren. Im Wald lösten sich die Rutschungen in steileren Gebieten als im Freiland. In allen Untersuchungsgebieten zusammen beträgt der Median der Waldrutschungen 34°, jener der Freilandrutschungen 29°.

Geomorphologische  
Randbedingungen

**Abb. 10.8** > Hangneigungen der Rutschungen in den Untersuchungsgebieten des Unwetters 2005.

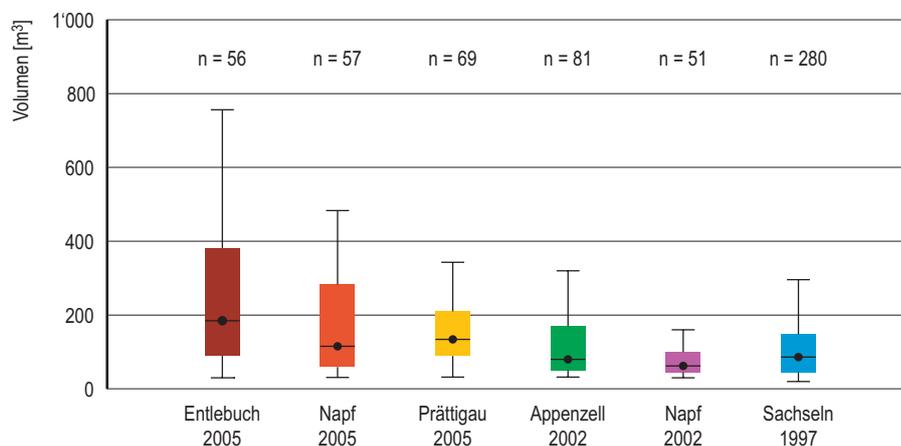


Die Volumina der in den drei Untersuchungsgebieten erfassten Rutschungen decken einen weiten Bereich von 30–5400 m<sup>3</sup> ab. In allen Gebieten und in Übereinstimmung mit früheren Untersuchungen, entstanden viele kleine und nur wenige grosse Rutschungen. Der mittlere Wert der Rutschungsvolumina beträgt für das Gebiet Entlebuch etwa 200 m<sup>3</sup> und für die Perimeter Napf und Prättigau je etwas über 100 m<sup>3</sup>. Im Vergleich zu früheren Schadensereignissen (Sachseln 1997 und Napf und Appenzell 2002) waren die Rutschungen eher grösser (Abb. 10.9). Im Rahmen weiterer Auswertungen soll der Frage nachgegangen werden, welche Einflussgrössen sich auf das Volumen der Rutschungen auswirken.

Rutschungsvolumina

**Abb. 10.9** > Streuungs-Diagramm der Rutschungsvolumina in den Untersuchungsgebieten des Unwetters 2005 und jenen früherer Unwetterereignisse.

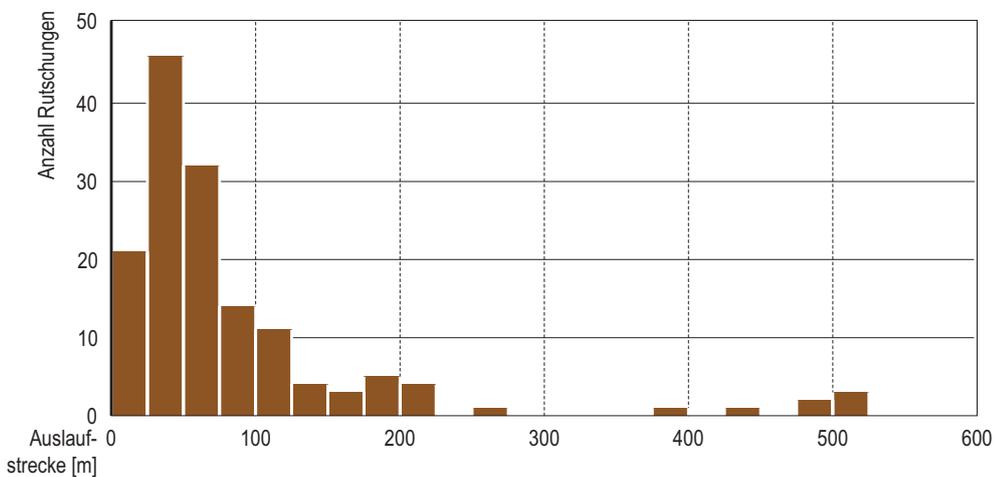
Der Punkt markiert den Median der jeweils  $n$  untersuchten Rutschungen. Jeweils 25% der Rutschungen weisen Volumina auf, die ober- bzw. unterhalb des durch den Balken markierten Bereichs liegen. Jeweils 10% der Rutschungen weisen Volumina auf, die über oder unter dem durch die horizontalen Striche markierten Bereich liegen.



Im Zusammenhang mit Fragen zur Kartierung der Gefahr durch Hangmuren sind nicht nur der Entstehungsort sondern auch die Transitstrecke und der Ablagerungsort von Bedeutung. Auf Grund der vorherrschenden grossen Hangneigungen und der Wassersättigung der Böden floss ein erheblicher Teil des Materials aus den Rutschungen in Form von Hangmuren ab. Die Beobachtungen vor Ort zeigten, dass insgesamt bei ungefähr zwei Dritteln aller Rutschungen ein Anteil von mindestens 70% des Bodenmaterials aus der eigentlichen Rutschfläche abfloss bzw. nur 30% im Bereich der Gleitfläche zurückblieb. Davon abweichend wurden im Gebiet Napf doch einige Rutschungen mit sehr geringer Materialverlagerung beobachtet.

Wo möglich, wurden bei den Rutschungen jeweils das Pauschalgefälle, also die Neigung der Verbindungslinie zwischen Anriss und unterster Ablagerung, und die als Auslaufstrecke bezeichnete Distanz entlang Geländeoberfläche zwischen Anriss und unterster Ablagerung gemessen. Die Auslaufstrecken betragen von wenigen Metern bis zu über 500 m (Abb. 10.10). Bei über 80% der Rutschungen wurden jedoch Strecken von weniger als 200 m gemessen. Die Pauschalgefälle lagen zwischen 20° und 35°. Von welchen Faktoren die Auslaufstrecke und das Pauschalgefälle abhängen, ist Gegenstand der vertieften Auswertungen.

**Abb. 10.10** > Auslaufstrecken der Hangmuren 2005 (Gesamtzahl n = 148).



Die Auswertungen der erhobenen Daten zu den flachgründigen Rutschungen sind noch nicht abgeschlossen. Im zweiten Teil des Berichtes zur Ereignisanalyse sollen weitere Zusammenhänge dargestellt werden. Dabei werden auch vermehrt die Standorteigenschaften der Rutschhänge einfließen: z.B. die Bodeneigenschaften, Geologie, Hydrologie, Topographie usw. Zudem sollen die Ergebnisse mit jenen früherer Studien verglichen werden. Schliesslich werden im zweiten Teil auch Ergebnisse der derzeit laufenden Studien zur Modellierung von Hangmuren und zu den Aussagemöglichkeiten von Bodenkarten im Hinblick auf die Prognose von Rufen dargestellt.

## 10.4 Erkenntnisse und Ausblick

Die Untersuchungen zu den mittel- bis tiefgründigen Rutschungen zeigen, dass diese Prozesse oftmals in Gebieten mit kritischer geologischer Disposition auftreten. Eine Wechsellagerung von hangwärts geneigten Schichten unterschiedlicher Durchlässigkeit kann seltene und schadensreiche Prozesse verursachen. Weiteren Klärungsbedarf gibt es in der Beurteilung der hydrogeologischen Verhältnisse sowie der Dimensionierung von Schutzbauten im Zusammenhang mit den Wiederkehrperioden. Die Ereignisdokumentation der Ereignisse 2005 bestätigt zudem frühere Erkenntnisse, wonach Hanginstabilitäten zu einem sehr grossen Teil innerhalb bestehender, teils alter Rutschzonen und geologischer Störungszonen auftreten (Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren, 2000). Hier liegt ein grosses Potenzial in der Gefahrenprävention.

Die Ergebnisse zu den flachgründigen Rutschungen in den drei Untersuchungsperimetern wurden an Hand eines kleinen Ausschnittes der tatsächlich abgelaufenen Prozesse erarbeitet und die Auswertungen sind noch nicht abgeschlossen. Die dargestellten Ergebnisse zu den Neigungsverhältnissen am Standort der Rutschungen, zu den Rutschvolumina und zum Auslauf der Rutschmassen stimmen mehrheitlich mit jenen früherer Untersuchungen überein. Allerdings sind gebietsspezifisch auch einige Abweichungen zu beobachten. Im zweiten Teil des Berichtes zur Ereignisanalyse werden weitere Auswertungen dargestellt, z.B. zu den massgebenden Einflussgrössen auf die Auslaufdistanzen von Hangmuren. Zudem soll über die derzeit laufenden Studien zu den Aussagemöglichkeiten von Bodenkarten im Hinblick auf die Prognose von Rufen, zur Modellierung von Hangmuren und zum Zusammenhang zwischen dem Auslösezeitpunkt und der Niederschlagsentwicklung berichtet werden.

Mittel- und tiefgründige  
Rutschungen

Flachgründige Rutschungen

### Literatur:

Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren 2000: Ursachenanalyse der Hanginstabilitäten 1999. Bulletin für angewandte Geologie Vol.5, Nr. 1.

BRP, BWB, BUWAL 1997: Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten – Empfehlung Naturgefahren. Bundesamt für Raumplanung, Bundesamt für Wasserwirtschaft und Geologie, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, 42 S.

Hegg C., Schmid F., Frick E. (Ed.) 2002: Hochwasser 2000 – Les crues 2000. Ereignisanalyse / Fallbeispiele. Analyse des événements / Cas exemplaires. Bundesamt für Wasser und Geologie, Serie Wasser 2, Bern

Rickli C. (Ed.) 2001: Vegetationswirkungen und Rutschungen – Untersuchung zum Einfluss der Vegetation auf oberflächennahe Rutschprozesse anhand der Unwetterereignisse in Sachseln OW am 15. August 1997.; Eidg. Forschungsanstalt WSL, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Birmensdorf, Bern, 97 S.

Rickli C., Bucher H., Böll A., Raetzo H. 2004: Untersuchungen zu oberflächennahen Rutschungen des Jahres 2002 im Napfgebiet und in der Region Appenzell. Bull. angew. Geol. 9/1: 37–50

### Unveröffentlichte Studienberichte:

Berwert-Lopes J 2006: Unwetter 22./23.08.2005. Ereignisdokumentation – Bericht, Amt für Wald und Raumentwicklung OW, 106 S. + Anhang.

Geotest 2005: Ereignisdokumentation Rutschung Feldweid in Entlebuch, Horw.

Ingenieurbüro Louis 2005: Ereignisdokumentation Rutschung Laugneri in Weggis, Weggis.

Kellerhals und Haefeli 2005: Ereignisdokumentation Rutschung Blappach in Trubschachen, Bern.

Oeko-B AG, Niederer + Pozzi Umwelt AG 2006: Ereigniskataster Nidwalden Unwetter August 2005. 92 S. + Anhang



Gian Reto Bezzola, Christoph Hegg

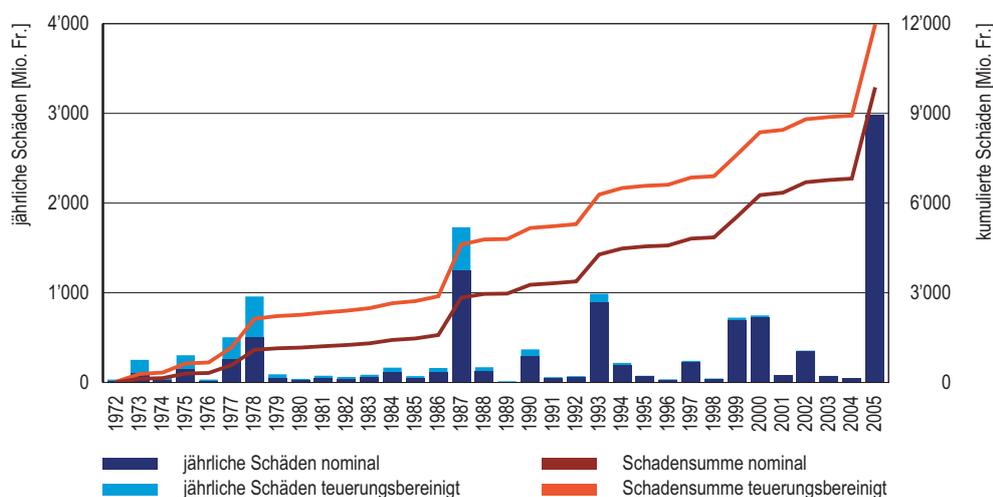
## 11 > Fazit

Das Hochwasser vom August 2005 ist in jüngerer Zeit ohne Parallele, im historischen Rückblick jedoch nicht einmalig. Mit überregionalen Grossereignissen ist deshalb auch zukünftig zu rechnen. Der Umgang mit den Unsicherheiten, die mit der Einordnung solcher Ereignisse verbunden sind, stellt eine besondere Herausforderung dar. Mit einem risikobasierten Vorgehen in Kombination mit robusten und überlastbaren Systemen – also einem «pragmatischen» risikoorientierten Ansatz – kann mit diesen Unsicherheiten umgegangen werden. Ein vollständiger Schutz vor Naturgefahren ist aus technischen und ökonomischen Gründen nicht möglich. Mit relativ einfachen Massnahmen am Objekt und vorbereiteten Notfallkonzepten lassen sich jedoch auch bei Grossereignissen Schäden auf ein tragbares Mass reduzieren.

Mit Gesamtschäden von rund 3 Mrd. Franken ist das Hochwasser vom August 2005 in der jüngeren Vergangenheit ohne Parallele (Abb. 11.1). Der gesamte Alpenordhang zwischen der Sarine und dem Alpenrhein, die Alpenrandseen und deren Unterläufe waren vom Hochwasser betroffen. Östlich des Alpenrheins erstreckte sich das betroffene Gebiet weit nach Osten bzw. Nordosten. In Österreich waren in den Bundesländern Vorarlberg, Tirol, Steiermark und Salzburg schwere Schäden zu verzeichnen. In Deutschland war vor allem Südbayern betroffen. Mit über 550 Mio. Euro (825 Mio. Franken) in Österreich und rund 175 Mio. Euro (260 Mio. Franken) in Deutschland gab es auch im angrenzenden Ausland ausserordentliche Schäden.

Ausserordentliche Schäden

Abb. 11.1 > Schäden durch Hochwasser und Rutschungen seit 1972 (Preisbasis 2004).



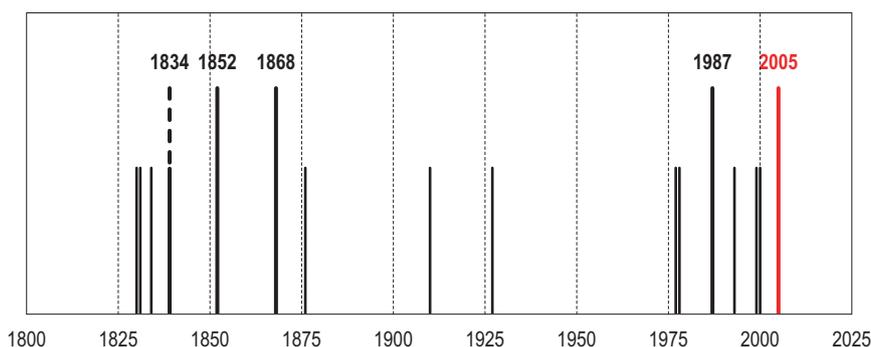
Das Gesamtbild des Ereignisses vom August 2005 entspricht letztlich dem, was bei derartigen Grossereignissen zu erwarten ist. Für den Zeitraum seit 1972, für den vergleichbare Schadenszahlen vorliegen, ist es zwar ohne Parallele, was aber auf Grund der kurzen Beobachtungsdauer von rund 30 Jahren nur wenig aussagt. Ein Vergleich mit früheren Ereignissen drängt sich deshalb auf, auch wenn die entsprechenden Datengrundlagen mit grösseren Unsicherheiten behaftet sind. So sind frühere Ereignisse oft nur schlecht dokumentiert. Zudem hat einerseits das Schadenspotenzial im Laufe der Zeit markant zugenommen, andererseits haben sich aber auch die Massnahmen zum Hochwasserschutz weiter entwickelt. Gesamthaft kann aber als erwiesen angesehen werden, dass sich im 19. Jahrhundert mehrere Hochwasser ereignet haben, die – je nach Umrechnungsgrundlage – das Schadensausmass von 2005 erreichen oder sogar übertreffen. Bei der Betrachtung einer längeren Zeitperiode verliert somit das Ausmass der Schäden vom August 2005 die Einzigartigkeit, welche es innerhalb der letzten 30 Jahre aufweist. Bei aller Unschärfe in der Beurteilung ist deshalb davon auszugehen, dass das Hochwasser vom August 2005 kein singuläres Ereignis ist, und dass mit dem wiederholten Auftreten ähnlicher Ereignisse auch in Zukunft gerechnet werden muss.

Einordnung des Hochwassers im historischen Rückblick

Seit Beginn des 19. Jahrhunderts haben sich in der Schweiz 16 grosse überregionale Hochwasser ereignet, die ein überkantonales Eingreifen nötig machten (Abb. 11.2). Diese Ereignisse verursachten Schäden, die nach heutigem Geldwert zwischen 500 Mio. und einigen Mrd. Franken liegen. Sie forderten jeweils mehrere, im 19. Jahrhundert oft Dutzende, von Todesopfern. Überregionale Grossereignisse unterschiedlichen Ausmasses treten, statistisch gesehen, etwa alle 15 Jahre auf. Dabei wird im Mittel etwa alle 50–100 Jahre ein ähnliches Ausmass wie im August 2005 erreicht.

Überregionale Grossereignisse

Abb. 11.2 > Grosse überregionale Hochwasserereignisse seit 1800 (Röthlisberger 1991, Pfister 2002).



Gegenüber der Situation im 19. und 20. Jahrhundert sind heute bei Grossereignissen bedeutend weniger Todesopfer zu beklagen. Diese erfreuliche Entwicklung ist sicher auf die in den letzten 100 Jahren realisierten wasserbaulichen und forstlichen Massnahmen zurückzuführen. Sie widerspiegelt aber, wie dies die Zahlen der 2005 evakuierten Personen belegen, vor allem auch die bedeutenden Fortschritte im Bereich der organisatorischen Massnahmen und die umfassenden Möglichkeiten, welche heute zur Rettung von Personen zur Verfügung stehen.

Abnahme der Opferzahlen

Der Versuch, das Ereignis vom August 2005 aus Sicht der jeweiligen Fachbereiche einzuordnen, zeigt deutlich die Schwierigkeit auf, die Wahrscheinlichkeit eines so seltenen Ereignisses zu quantifizieren. An Hand der Analyse der Niederschläge lässt sich die Bedeutung der Systemabgrenzung aufzeigen. So ergeben sich bei der Betrachtung von Punktniederschlägen für einzelne Stationen Jährlichkeiten von deutlich mehr als hundert Jahren. Schweizweit war die 48-Stundensumme des Niederschlages bei 20 Stationen ein Jahrhundertereignis. Die extremen Jährlichkeiten widerspiegeln die Seltenheit des Ereignisses für die lokalen Verhältnisse, nicht aber die Wahrscheinlichkeit in einem regional übergeordneten Rahmen. Demzufolge weist der im August 2005 beobachtete Gebietsniederschlag mit knapp 80 Jahren eine kleinere Wiederkehrperiode auf, als die extremen Punktniederschläge einzelner Stationen. Sowohl die Analyse der Niederschläge als auch jene der Spitzenabflüsse zeigen zudem deutlich die Unschärfe der Jährlichkeiten bzw. Wahrscheinlichkeiten. Die Genauigkeit der Extremwertstatistik hängt von der verfügbaren Datengrundlage ab. Die vorhandenen Messreihen sind zu kurz, um solche Ereignisse zuverlässig einzuordnen. Die vorhandene Unschärfe lässt sich durch die Angabe von Vertrauensintervallen charakterisieren.

Unschärfen bei der  
Quantifizierung der  
Eintretenswahrscheinlichkeit

Aus nationaler bzw. überregionaler Sicht entsprachen die im August 2005 abgelaufenen Prozesse den bisherigen Erfahrungen bei Grossereignissen. Auf lokaler Ebene wurden jedoch unerwartete Prozesse festgestellt, entweder weil am betreffenden Ort der Prozess an sich nicht erwartet wurde oder weil die mit dem Prozess verbundenen Intensitäten die erwarteten Werte deutlich übertrafen und so besonders hohe Schäden verursachte. Ausgewählte Beispiele werden im zweiten Teil der Ereignisanalyse vertieft untersucht. Nicht unerhebliche Schäden traten zudem in Gebieten weit ab eines Gewässers auf. Solche Schäden durch oberflächlich abfliessendes Niederschlagswasser lassen sich in vielen Fällen relativ einfach mit kostengünstigen Massnahmen am oder um das Objekt verhindern.

Wenig überraschende Prozesse  
auf überregionaler Ebene

Die grosse Länge der Gewässerabschnitte, auf welchen die Überschreitung der Abflusskapazität oder die Seitenerosion die auslösenden Prozesse für Schäden waren, zeigt deutlich die Notwendigkeit von Raum, um Wasser, Feststoffe und Schwemmholz abzuführen oder zurückzuhalten. Nur wenn geeignete Flächen und Korridore frei gehalten oder frei gemacht werden, lassen sich Schäden entlang grösserer Gewässer bei zukünftigen Ereignissen gegenüber heute deutlich reduzieren.

Notwendigkeit für mehr Raum

Grossereignisse wie jenes vom August 2005 decken Schutzdefizite auf. In nicht betroffenen Gebieten und für andere Ereignisabläufe zeigen die Gefahrenkarten die Ausdehnung und die Intensität der zu erwartenden Prozesse. Die vertiefte Analyse dieser Gefahrengrundlagen ist dem zweiten Teil der Ereignisanalyse vorbehalten. Schweizweit sollen die Gefahrenkarten bis 2011 erstellt und auch die vorhandenen Defizite weitgehend bekannt sein. Das Hochwasser 2005 zeigt aber bereits deutlich, dass viele bestehende Schutzbauten den heutigen Anforderungen nicht genügen, nicht überlastbar sind und sich auch nicht mit einfachen Mitteln an die heutigen Anforderungen anpassen lassen. Wie der absehbare Umfang der durch das Hochwasser 2005 ausgelösten Folgeprojekte zeigt, ist der Handlungsbedarf gross. Die für den Hochwasserschutz verfügbaren Mittel sind begrenzt und die erforderlichen Massnahmen lassen sich nicht gleichzeitig umsetzen. Überall dort, wo die Realisierung von Hochwasserschutzprojek-

Handlungsbedarf im baulichen  
Hochwasserschutz

ten längere Zeit benötigt, lassen sich aber mit vergleichsweise kostengünstigen Massnahmen wie Raumsicherung, Objektschutz oder Notfallplanung die vorhandenen Risiken massgeblich reduzieren.

Die mit der Einordnung des Hochwassers 2005 verbundenen Schwierigkeiten zeigen die Grenzen eines rein risikobasierten Vorgehens im Umgang mit Naturgefahren auf, da sich die grossen, mit der Quantifizierung der Eintretenswahrscheinlichkeiten verbundenen Unschärfen, direkt im Risiko niederschlagen. Infolge dieser Unsicherheit lassen sich aus der Forderung, wonach eine Massnahme auf ein bestimmtes Risiko auszulegen sei, oft mit der gleichen Argumentation Belastungsannahmen rechtfertigen, die um einen Faktor 2 oder mehr divergieren. In solchen Fällen scheint ein differenziertes und nicht allein rein risikobasiertes Vorgehen sinnvoll. Die grosse Herausforderung besteht darin, Massnahmen innerhalb der vorhandenen Unsicherheit zu optimieren. Sind die Kosten einer Massnahme vergleichsweise klein, kann sie auf eine Belastung ausgelegt werden, die eher am oberen Rand des Unsicherheitsspektrums angesiedelt ist. Sind hingegen die Kosten vergleichsweise gross, sollte der Bemessung eher eine Belastung zu Grunde gelegt werden, die am unteren Rand des Unsicherheitsspektrums liegt. In jedem Fall ist durch eine geeignete Systemwahl sicherzustellen, dass die Massnahme überlastbar ist und das verbleibende Risiko angemessen berücksichtigt wird. Dadurch wird gewährleistet, dass die Schäden nicht schlagartig zunehmen, wenn das Bemessungsereignis übertroffen wird. Die Ermittlung der im Überlastfall betroffenen Gebiete, der bei einer Eskalation des Ereignisses ablaufenden Prozesse sowie deren Intensitäten ist eine wichtige Grundlage zur Beurteilung der verbleibenden Risiken. Wenn diese erkannt sind, lassen sie sich wirkungsvoll durch bauliche Massnahmen zum lokalen Schutz empfindlicher Objekte und durch organisatorische Massnahmen minimieren.

**Umgang mit den Unschärfen**

Eine zentrale Voraussetzung für die Intervention bei Naturereignissen sind zuverlässige Prognosen. Vorhersagen sind aber nur dort sinnvoll, wo dadurch Zeit für ein wirksames Handeln gewonnen werden kann. Das Hochwasser 2005 hat im Bereich der Vorhersage und Warnung deutliche Grenzen und Schwachstellen aufgezeigt. Diese betreffen in erster Linie die verfügbaren Prognoseinstrumente. Hier sind Weiterentwicklungen und Verbesserungen erforderlich, die einerseits einen besseren Umgang mit den inhärenten Unsicherheiten ermöglichen (z.B. durch Ensemble Vorhersagen in der Meteorologie), andererseits sind verstärkte Anstrengungen hinsichtlich zuverlässigerer regionaler Abflussprognosen notwendig. Das Hochwasser 2005 hat auch deutlich Schwächen struktureller Art offen gelegt. Besonders im Bereich der Abflussvorhersagen waren die personellen Ressourcen zur Bewältigung der Krisensituationen nicht ausreichend. Die technischen Systeme zur Verbreitung der Informationen waren ausserdem den aufgetreten Belastungen nicht gewachsen. Um solches zukünftig zu verhindern, sind die im Projekt OWARNA (Optimierung von Warnung und Alarmierung bei Naturgefahren) des Eidgenössischen Departements für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport VBS und der Nationalen Plattform Naturgefahren PLANAT geforderten Massnahmen zügig umzusetzen.

**Schwachstellen bei der Vorhersage und Warnung**

Das Hochwasser vom August 2005 hat auch bereits bekannte Lücken in der Koordination zwischen den beteiligten Stellen eindrücklich bestätigt, die sich in einer teilweise mangelhaften Konsistenz der Aussagen auswirkten. Die Fachstellen, welche die für Naturgefahren relevanten Informationen verbreiten, haben deshalb bereits vor dem Hochwasser 2005 beschlossen, eine gemeinsame Informationsplattform Naturgefahren (GIN) aufzubauen, auf welcher die relevanten Daten sowie gemeinsame Bulletins an die Einsatzorgane und Fachstellen verbreitet werden.

**Gemeinsame Informationsplattform Naturgefahren**

Wegen der systemimmanenten Unsicherheiten werden sich lokale Entwicklungen letztlich nie genau voraussagen lassen. Vorhersagen allein können deshalb bei weit reichenden Entscheiden kaum alleinige Grundlage sein. Sie müssen deshalb zusammen mit lokalen Beobachtungen und Kenntnissen bewertet und interpretiert werden. Dazu brauchen die Entscheidungsträger auf allen Stufen die fachliche Unterstützung von Naturgefahrenspezialisten, die entsprechend geschult und ausgebildet sein müssen. Wie dies konkret aussehen könnte, wird im Rahmen des zweiten Teils der Ereignisanalyse vom Hochwasser 2005 studiert.

**Fachwissen auf allen Stufen**

Die Schweiz muss sich darauf einstellen, dass Ereignisse wie jenes von 2005 oder gar grössere Naturereignisse auch in Zukunft auftreten können. Um zu verhindern, dass dabei ähnliche oder noch grössere Schäden auftreten, ist die konsequente Fortsetzung einer umfassenden Gefahrenpräventionspolitik notwendig. Grundlage dafür bilden die Gefahrenkarten, welche aufzeigen, wo mit welchen Ereignisausmassen gerechnet werden muss. Auf ihrer Grundlage können die notwendigen vorbeugenden Massnahmen getroffen werden, seien diese raumplanerischer oder baulicher Art. Dennoch ist auch mit Ereignissen zu rechnen, welche die Wirksamkeit der getroffenen Massnahmen übertreffen. Schutzmassnahmen müssen deshalb in ihrem Verhalten robust und überlastbar sein. Um ein unkontrolliertes Anwachsen der Schäden zu verhindern, sind Objektschutzmassnahmen und vorbereitete Notfallmassnahmen notwendig. In jedem Fall ist durch eine sorgfältige Raumnutzung ein unkontrolliertes Anwachsen des Schadenspotenzials zu verhindern. Das Ereignis vom August 2005 hat schliesslich in aller Deutlichkeit gezeigt, dass Versicherungen zur Sicherung eines Neubeginns und somit für das wirtschaftliche Überleben unverzichtbar sind.

**Konsequente Fortsetzung einer umfassenden Hochwasserschutzpolitik**

Beim Umgang mit Naturgefahren handelt es sich um eine Verbundaufgabe der öffentlichen Hand (Bund, Kantone und Gemeinden) privater Institutionen (Versicherungen, Planer, Architekten etc.) sowie jedes Einzelnen, der potentiell von Naturgefahren betroffen ist. Die grosse Zahl von Akteuren und die lokal unterschiedliche Ausprägung der Gefahrensituation bedingen massgeschneiderte Lösungen, welche alle Chancen zur Beeinflussung des Risikos ergreifen müssen. Weil mit Grossereignissen wie jenem von 2005 auch künftig gerechnet werden muss, sind Prävention vor und Intervention bei solchen Ereignissen eine Daueraufgabe aller.

**Umgang mit Naturgefahren – eine Daueraufgabe aller**