



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement des Innern EDI  
Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz

Arbeitsbericht MeteoSchweiz Nr. 211

## ***Starkniederschlagsereignis August 2005***

*Hrsg. MeteoSchweiz*



**Arbeitsbericht MeteoSchweiz Nr. 211**

**ISSN: 1422-1381**

# Starkniederschlagsereignis August 2005

*Edition: Mathias Rotach, Christof Appenzeller, Peter Albisser*

*Autoren: Christof Appenzeller, Stephan Bader, Olivier Duding, Pierre Eckert, Christoph Frei, Urs Germann, Patrick Hächler  
Daniel K. Keuerleber-Burk, Mark Liniger, Mathias Rotach, Francis Schubiger, André Walser, Peter Zbinden*

Bitte zitieren Sie diesen Arbeitsbericht folgendermassen:

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

Herausgeber  
Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, MeteoSchweiz, © 2006

MeteoSchweiz  
Krähbühlstrasse 58  
CH-8044 Zürich  
T +41 44 256 91 11  
www.meteoschweiz.ch

**Weitere Standorte**  
CH-8058 Zürich-Flughafen  
CH-6605 Locarno Monti  
CH-1211 Genève 2  
CH-1530 Payerne



# Inhaltsverzeichnis

|  |  |    |
|--|--|----|
| Zusammenfassung  |  | 5  |
| <b>1 Einleitung</b>  | <i>M. Rotach</i>   | 9  |
| <b>2 Wetterlage</b>  | <i>P. Hächler</i>  | 10 |
| 2.1 Verlauf aufgrund der Boden- und Höhenkarten vom 19.–23. 8. 2005      |  | 10 |
| 2.2 Niederschlagsverlauf   |  | 12 |
| 2.3 Warmlufteffekte und Stabilität                                       |  | 13 |
| 2.4 Zykonale Prozesse und Mittelmeerluft                                 |  | 14 |
| 2.5 Fazit  |  | 14 |
| <b>3 Verteilung, Verlauf und klim. Einordnung des Starkniederschlags</b> | <i>C. Frei, S. Bader, U. Germann, P. Zbinden, C. Appenzeller</i> | 15 |
| 3.1 Niederschlagsbeobachtung und Analyse                                 |  | 15 |
| 3.2 Gegitterte Analysen aus Pluviometerdaten                             |  | 17 |
| 3.3 Niederschlagsentwicklung während dem Ereignis                        |  | 17 |
| 3.4 Gesamtniederschläge des Ereignisses                                  |  | 21 |
| 3.5 Wie extrem waren die Niederschläge im klimatologischen Vergleich?    |  | 24 |
| 3.6 Starkniederschläge und die Klimaänderung                             |  | 30 |
| <b>4 Vorhersage und Warnablauf bei MeteoSchweiz</b>                      | <i>F. Schubiger, P. Hächler, A. Walser, P. Eckert, O. Duding</i> | 32 |
| 4.1 Vorhersage   |  | 32 |
| 4.2 Operationelle Warnungen der MeteoSchweiz                             |  | 45 |
| <b>5 Vergleichbare Starkniederschläge in der Vergangenheit</b>           | <i>S. Bader, C. Frei, C. Appenzeller, P. Hächler</i>             | 46 |
| 5.1 Einleitung   |  | 46 |
| 5.2 Hochwasser bei ähnlicher synoptischer Lage                           |  | 47 |
| <b>6 Einfluss der Alpen auf das Starkniederschlagsereignis</b>           | <i>A. Walser, M. Liniger, C. Appenzeller</i>                     | 53 |
| 6.1 Motivation und Strategie   |  | 53 |
| 6.2 Vergleich der Niederschlagsvorhersagen                               |  | 54 |
| 6.3 Schlussfolgerungen   |  | 56 |
| <b>7 Konsequenzen</b>  | <i>Daniel K. Keuerleber-Burk, M. Rotach</i>                      | 57 |
| 7.1 Warnablauf   |  | 57 |
| 7.2 Klimatologische Daten und Interpretation                             |  | 57 |
| <b>8 Referenzen</b>  |  | 58 |
| Appendix   |  | 61 |





▲ Bristen (UR) vor dem Hochwasser-Ereignis im August 2005, Bild: André Guntern (ARP Uri).



▲ Bristen (UR) nach dem Hochwasser-Ereignis im August 2005, Bild: Heinz Baumann (Baumann & Fryberg, Altdorf).

# Zusammenfassung



Der vorliegende Arbeitsbericht beleuchtet das Starkniederschlagsereignis vom August 2005, das in weiten Teilen der Schweiz gravierende Schäden durch Überschwemmungen und Hangrutschungen angerichtet hat, von verschiedenen Seiten. Es wird gezeigt, dass die Wetterlage, wie sie sich dem Prognostiker dargeboten hat, nicht genau einer klassischen Problemlage entsprach, was insbesondere die Abschätzung der zu erwartenden Regenmenge schwierig machte. Trotzdem gab es wichtige Parallelen zu früheren Ereignissen, die ebenfalls aufgezeigt werden. Die an der MeteoSchweiz betriebenen Modellsysteme (das alpine Modell aLMo sowie ein Ensemble-Modell COSMO LEPS) haben das Ereignis insgesamt sowohl qualitativ wie auch quantitativ gut vorhergesagt. Die klimatologische Auswertung zeigt, dass die gefallenen Niederschläge insbesondere in Gegenden mit tendenziell nicht besonders hohem Niederschlag zu Rekorden geführt haben.

Es wurden vor allem hohe 48 h-Summen beobachtet, was die aussergewöhnliche Dauer des Ereignisses unterstreicht. An einer Reihe von Stationen vor allem in der Zentralschweiz dürfte das Ereignis einem hundertjährigen entsprochen haben, lokal sogar noch deutlich mehr. Mit Hilfe eines numerischen Experiments wird schliesslich demonstriert, dass die Alpen für die starken Niederschläge eine zentrale Rolle gespielt haben. Ohne die Niederschlagsbildung durch die Orographie wäre ein absolut durchschnittliches Niederschlagsereignis zu verzeichnen gewesen. Die Erkenntnisse aus den einzelnen Teilen des Berichts werden schliesslich zusammengefasst, um den Warnablauf im Hause sowie die Koordination mit anderen Amtsstellen zu verbessern.

## Résumé

L'auteur analyse ici sous plusieurs angles les précipitations extrêmes qui se sont abattues sur une grande partie de la Suisse en août 2005. Les inondations et glissements de terrain qui s'étaient ensuivis avaient provoqué de lourds dégâts. La situation météorologique telle qu'elle se présentait alors aux prévisionnistes était loin de correspondre à une problématique classique, ce qui a compliqué l'estimation du volume des précipitations attendues. Il était toutefois possible d'établir des parallèles significatifs avec des épisodes antérieurs, comme l'auteur le montre. Les modèles dont MétéoSuisse se sert (le modèle alpin «aLMo» ainsi que le système de prévision d'ensemble COSMO LEPS) ont globalement permis de prévoir l'événement tant qualitativement que quantitativement. L'évaluation climatique révèle que les pluies ont atteint un niveau «record» spécialement dans les régions généralement peu arrosées.

Si l'on se fonde sur les grosses sommes tombées en 48 h, la durée inhabituelle du phénomène ressort particulièrement. Dans une série de stations de mesure, en Suisse centrale essentiellement, on peut dire qu'en cent ans – voire bien plus, localement - on n'avait jamais vu ça. Enfin, une expérience numérique démontre que les Alpes ont joué un rôle central du point de vue des quantités de précipitations. Sans l'effet orographique, les chutes de pluies seraient restées absolument dans la norme. Dans la conclusion, l'auteur résume son étude et fait des propositions dans le but d'optimiser le lancement d'alertes par MétéoSuisse ainsi que la coordination avec d'autres instances officielles.

## Riassunto

Il presente rapporto di lavoro chiarisce sotto diversi punti di vista l'evento di forti precipitazioni dell'agosto 2005, che ha causato in diverse parti della Svizzera gravi danni a causa delle inondazioni e delle frane. Si dimostra come la situazione meteorologica che si era presentata ai previsori non fosse quella di una situazione problematica «classica», cosa che ha reso difficile soprattutto la stima della quantità di precipitazioni da aspettarsi. Malgrado ciò si sono notati dei parallelismi importanti con eventi precedenti, che saranno mostrati. I sistemi di modelli applicati da MeteoSvizzera (il «modello alpino», aLMo così come un «Ensemble-Modell», COSMO LEPS) hanno previsto l'evento globalmente bene, sia qualitativamente che quantitativamente. La valutazione climatologica mostra che le precipitazioni cadute, soprattutto nelle regioni che tendenzialmente non hanno un valore di precipitazioni particolarmente alto, hanno portato alla creazione di nuovi «record».

Sono state osservate in particolare somme sulle 48 ore alte, fatto che sottolinea la durata straordinaria dell'evento. Per tutta una serie di stazioni, soprattutto nella Svizzera Centrale, l'evento deve aver rappresentato quello «centenario», localmente addirittura ancora di più. Infine si dimostra con l'ausilio di un esperimento numerico che le Alpi hanno giocato un ruolo centrale per le precipitazioni forti. Senza la formazione di precipitazioni dovuta all'orografia si sarebbe dovuto registrare un evento di precipitazioni assolutamente nella media. Le conclusioni delle singole parti del rapporto vengono infine riassunte per permettere un miglioramento del processo di allarme interno e della coordinazione con altri uffici.



# Summary

The present report elucidates the heavy precipitation event of August 2005 that resulted in severe damage through flooding and slope instability over large parts of Switzerland. It is demonstrated that the synoptic situation as encountered by the bench forecaster did not precisely correspond to a situation which had led in the past to water related problems. This is particularly true for the expected amount of precipitation. Still, some similarities with previous incidents are demonstrated and discussed. The numerical weather prediction models that are operated at MeteoSwiss (i.e. the «alpine model», aLMo and an local ensemble prediction system, the COSMOLEPS) are shown to have predicted the event well both qualitatively and quantitatively. The climatological analysis shows that «records» were observed especially in regions with relatively moderate normal precipitation.

Outstanding were in particular 48h sums and this underlines the extraordinary long duration of the event. At a number of stations, especially in the central parts of Switzerland the event was found to have had a return period of some hundred years, at specific locations even clearly longer. With the aid of a numerical experiment it is demonstrated that the Alps played a key role for the strong precipitation. Without orographically induced precipitation the event would have been clearly (far) below average. The conclusions from the different parts of the reports are finally summarised in order to improve the warning procedures «in house» and especially the coordination with neighbouring offices of the federal administration.







© Schweizer Luftwaffe

# 1 Einleitung

*Mathias Rotach*

In der Periode vom 19.–23. August 2005 wurde die Schweiz und das angrenzende Ausland von äusserst starken Niederschlägen betroffen, die an vielen Stationen die bestehenden Niederschlags-Rekorde brachen. Die Niederschläge verursachten in weiten Teilen des Landes Überschwemmungen, verheerende Rutschungen und grosse Schäden (Abb. 1.1) mit einem finanziellen Ausmass von ungefähr 2.5 Mia CHF – es mussten sogar Todesfälle beklagt werden. Als Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie ist die MeteoSchweiz für die rechtzeitige Warnung der Behörden und der Bevölkerung im Zusammenhang mit wetterbedingten Ereignissen zuständig. Diese wird als Teil der Vorhersage-Aktivitäten aufgrund von Modellsimulationen, Beobachtungen und Analysen der meteorologischen Verhältnisse erstellt. Gleichzeitig betreibt die MeteoSchweiz ein operatives Messnetz für meteorologische Daten, das es erlaubt, das Ereignis vom August 2005 in Bezug auf seinen Ablauf wie auch auf seine klimatologische Bedeutung im Detail zu analysieren.

Der vorliegende Arbeitsbericht bezweckt einerseits, das Unwetterereignis vom August 2005 in seinem meteorologischen Ablauf zu dokumentieren und die Verteilung der resultierenden Niederschläge zu analysieren. Auf der anderen Seite werden dann die für die Prognostiker verfügbaren Modellresultate

vorgestellt und der effektive Warnablauf rekapituliert. Über alles gesehen wurde das Ereignis zufrieden stellend vorhergesagt und die Warnungen von den Empfängern als in Umfang und Zeitpunkt nützlich und gut beurteilt. Trotzdem zeigt die genaue Analyse, dass gewisse Verbesserungen, insbesondere im Bezug auf die Definition der Warnschwellen, möglich wären. Diese werden im Sinne des Sprichworts «aus Schaden wird man klug» als mögliche Konsequenzen diskutiert.

Im vorliegenden Arbeitsbericht werden routinemässige Analysen und Untersuchungen aufgearbeitet, wie sie für jedes «meteorologische Grossereignis» im Sinne der ständigen Verbesserung vorgenommen werden. Überdies fliessen einige Resultate ein, die von Mitarbeitenden der MeteoSchweiz im Rahmen einer vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) in Auftrag gegebenen und koordinierten «Ereignisanalyse Unwetter 2005» erarbeitet wurden.

Eine ähnliche Analyse wurde für das deutsche Gebiet kürzlich vom deutschen Wetterdienst (Rudolf et al., 2006) zusammengestellt und erlaubt einen Vergleich der Methoden und Resultate über die Landesgrenzen hinaus.



◀  
**Abbildung 1.1:**  
**Schäden eines**  
**Murgangs in**  
**Brienz (BE) nach**  
**dem Starknieder-**  
**schlagsereignis**  
**August 2005.**



# 2 Wetterlage

Patrick Hächler

## 2.1 Verlauf aufgrund der Boden- und Höhenkarten vom 19.–23. August 2005

Bereits an den Tagen vor dem Ereignis regnete es besonders in der Zentral- und Ostschweiz schon recht häufig. An mehreren Stationen wurden vom 14.–18. August über 40 mm Regen gemessen (siehe Witterungsbericht August 2005, MeteoSchweiz, 2005 und Kapitel 3).

Am Freitag, 19. August, konnte ein Tief mit Kern über den Niederlanden identifiziert werden. 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. Probleme traten aber nur sehr lokal auf.

Am Samstag, 20. August (Abb. 2.1) war das Tief im Raum der Benelux-Länder noch knapp zu erkennen, der Schwerpunkt der zyclonalen Aktivität hatte sich aber nach Norditalien verlagert. Dort entwickelte sich ein sekundäres Bodentief. Im Höhenfeld konnte ein Abschnürprozess ausgemacht werden, wobei der Kern des Höhentiefs wenig südlich von Paris lag. In der Schweiz kamen nordöstliche Winde auf, nur in grosser Höhe herrschte noch Südwind.

Am Sonntag, 21. August (Abb. 2.2) vertiefte sich das Tief weiter, sein Kern lag über dem Golf von Genua, und in der Höhe entstand eine stark zyclonale Situation. Dabei waren nun Boden- und Höhentief nahezu konzentrisch – aus der Sicht der konventionellen Synoptik ein Hinweis darauf, dass keine schnelle Weiterentwicklung zu erwarten war. In der Nacht zum 22. August erreichte das Höhentief seine maximale Ausprägung.

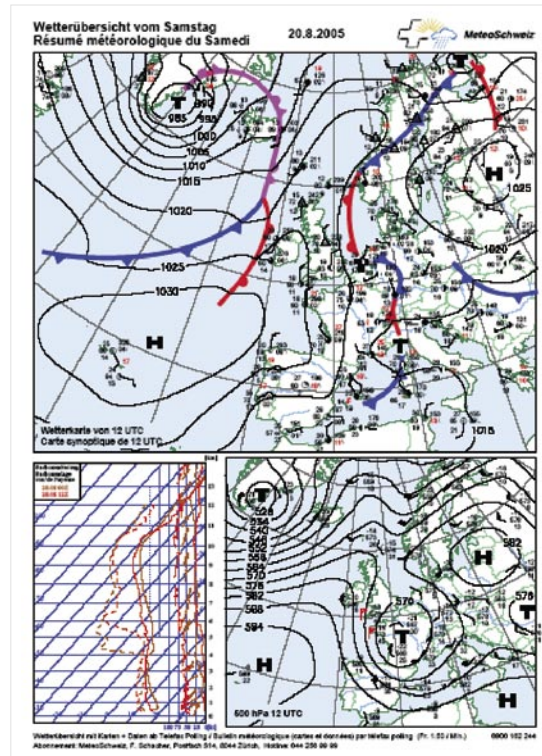


Abb 2.1 Wetterübersicht für 20. August 2005; erkennbar das Höhentief über Frankreich (Karte unten rechts, dargestellt ist Geopotentialfeld auf 500hPa) sowie das Bodentief mit Schwerpunkt über Norditalien (grosse Karte oben, Bodendruck).

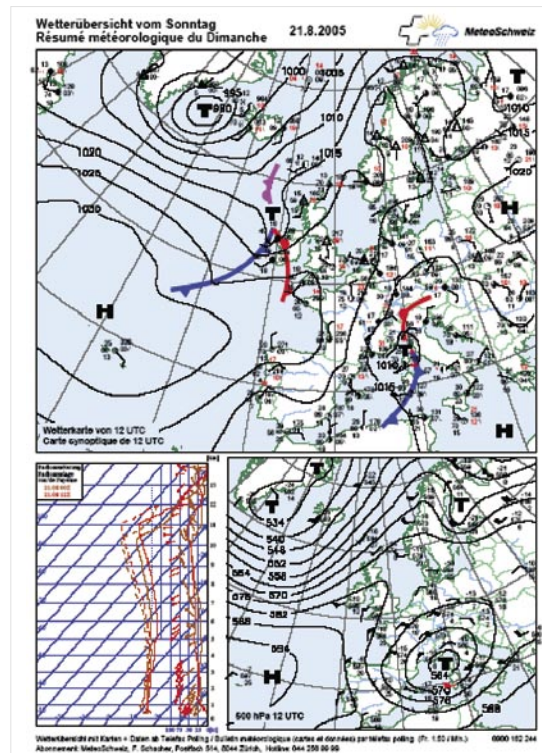


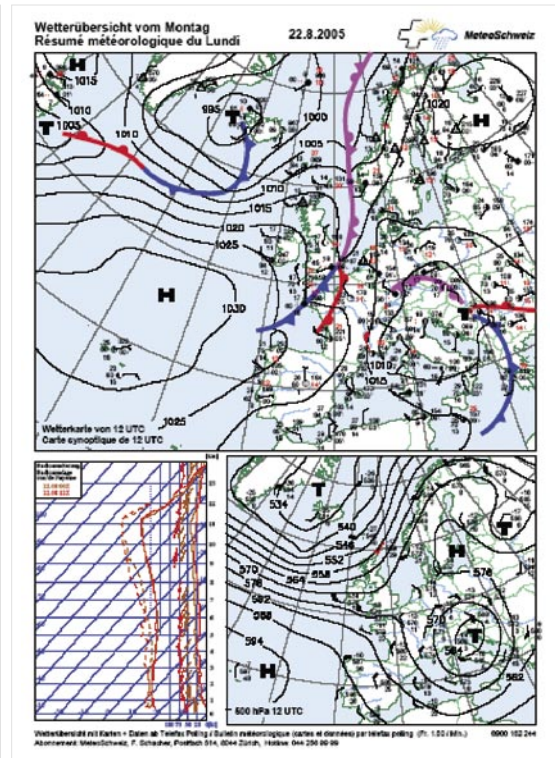
Abb 2.2 Wie Abb. 2.1, aber für 21. August 2005. Höhen- und Bodentief über Italien sind nahezu konzentrisch.

Gleichzeitig bewegte sich das ganze System ostwärts, so dass es am Montag Mittag (22. August, Abb. 2.3) immer noch konzentrisch über der nördlichen Adria lag. Damit drehten die Höhenwinde auf der Alpennordseite auf Nord, so dass zunehmend Stau eintrat.

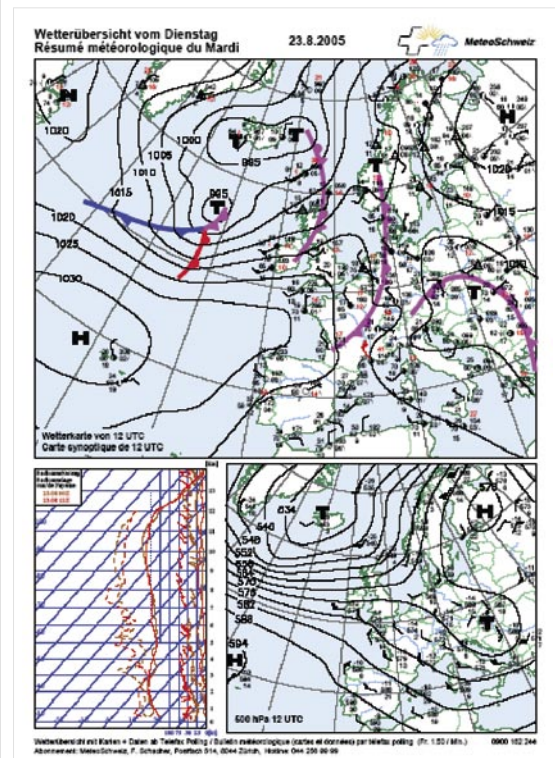
Am Dienstag, 23. August (Abb. 2.4) kam die Tiefdruckzone über Ungarn zu liegen. Die feuchtesten Luftmassen lagen nun nicht mehr über der Schweiz, wo lediglich noch das Prättigau nennenswerte Niederschläge erhielt. Die nordalpinen Teile Bayerns und Österreichs waren aber vom Starkregen immer noch betroffen.

In vielen Kommentaren wurde dieser Wetterlagenverlauf im Sinne der veralteten Systematik von J. van Bebber (zitiert nach Liljequist und Cihak, 1974) als Vb-Lage bezeichnet. In diesem Sinne ist zu bemerken, dass das hier beschriebene Tief von Norditalien her nur unwesentlich nordwärts, sondern ostnord-östlich abzog. Es erfasste Polen nur am Rande und zog zur Ukraine, wo es sich auffüllte. Diese Zugbahn liegt zwischen Vb und Vd und ist von van Bebber nicht beschrieben worden.

►  
**Abb 2.3**  
 Wie Abb. 2.1,  
 aber für  
 22. August.  
 Höhen- und  
 Bodentief über  
 der Adria.



►  
**Abb 2.4**  
 Wie Abb. 2.1,  
 aber für  
 23. August.  
 Höhen- und  
 Bodentief bei Un-  
 garn erkennbar.





## 2 Wetterlage

### 2.2 Niederschlagsverlauf

Am 19. und 20. August erfolgten teilweise konvektiv geprägte Niederschläge. Sie behelligten besonders das nördliche Alpenvorland und führten bereits zu ersten lokalen Schäden.

Eine flächige Regenzone zog allerdings im Laufe des 20. August über Graubünden nordostwärts und brachte bis zu 36 mm Niederschlag (Station Weissfluhjoch). Sie verursachte ausserdem eine merkliche Niederschlagsabkühlung, sodass es in der Region Davos vorübergehend bis etwa 2000 Meter schneite. Es scheint, dass der schmelzende Schnee für die nachfolgenden Ereignisse in dieser Region nicht unbeachtet bleiben darf. Es ist aber für das ganze Schadenereignis als einziges wesentliches Phänomen dieser Art identifiziert worden.

Der Verlauf der stärksten Niederschläge in den verschiedenen Regionen zeigt eine recht klare Struktur (siehe auch Abbildung 3.2 für eine Visualisierung des hier Beschriebenen):

- Bis zum 20. August wurden keine besonders starken und flächigen Summen registriert. Das Regime war noch weitgehend konvektiv orientiert, die grossräumige Hebung spielte keine entscheidende Rolle. Auch konnten keine Staueffekte beobachtet werden.

- Am 21. war vor allem die Region Berner Oberland – Zentralschweiz betroffen, und zwar vor allem in der zweiten Tageshälfte. Dies hängt ziemlich sicher mit der Position des Tiefs und der Ausrichtung der Höhenströmung – verbunden mit der Anströmung sehr feuchter Luft – zusammen.

- Am 22. lag der Schwerpunkt des Regens weiter östlich. Auch die Ostschweiz war nun beeinträchtigt. Gleichzeitig wurde der Streifen der Starkniederschläge schmaler und betraf in der westlichen Landeshälfte noch das Hauptanstiegsgebiet der Nordalpen. In dieser Phase wurden die Niederschläge weiter östlich auch über den ersten Alpenkamm bis ins Unterengadin transportiert. In allen Höhenlagen herrschten nun nördliche Winde, das Tief lag ja recht genau östlich der Schweiz.

- Am 23. war nur noch der äusserste Osten des Landes erfasst, am meisten die Region Prättigau. Die Höhenwinde zeigten nun Westkomponente, sodass weniger feuchte Luft von ausserhalb des Tiefs nachfliessen konnte.

Das Hauptereignis betraf damit die Zeit vom 21. August Mittag bis zum 23. August am Morgen. Insgesamt dauerte die Phase relevanter Niederschläge volle vier Tage.

| Tag/Zeit | H500 | H850 | DeltaH | Th500 | Th850 | DeltaT | ANS   | GR    |
|----------|------|------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|
| 19/12    | 577  | 152  | 425    | 16.0  | 16.5  | -0.5   | 3'600 | 3'500 |
| 20/00    | 575  | 153  | 422    | 15.5  | 16.0  | -0.5   | 3'100 | 3'200 |
| 20/12    | 572  | 152  | 420    | 13.5  | 14.0  | -0.5   | 3'200 | 2'600 |
| 21/00    | 571  | 151  | 420    | 15.0  | 15.0  | 0.0    | 2'900 | 2'800 |
| 21/12    | 570  | 148  | 422    | 16.5  | 15.5  | 1.0    | 2'600 | 2'600 |
| 22/00    | 570  | 147  | 423    | 16.5  | 16.0  | 0.5    | 2'900 | 2'800 |
| 22/12    | 570  | 148  | 422    | 16.0  | 16.0  | 0.0    | 3'100 | 3'100 |
| 23/00    | 571  | 149  | 422    | 16.0  | 16.0  | 0.0    | 2'800 | 2'900 |

▲

**Tabelle 2.1**

**Verlauf synoptischer Kenngrössen vom 19.– 23. 8. 2005. Die erste Spalte bezeichnet den Termin (Tag im August / Zeit [UTC]), Spalten 2–7 wurden aus den Höhenwetterkarten interpoliert, die letzten beiden sind die Mittelwerte der Schneefallgrenze der entsprechenden Region und wurden mittels Daten der Bergstationen des ANETZ (automatisches Messnetz der MeteoSchweiz) ermittelt.**

**Bedeutung der einzelnen Variablen:**

|               |   |
|---------------|---|
| <b>H500</b>   | <b>Geopotential auf 500 hPa über Zürich in dam</b>        |
| <b>H850</b>   | <b>Geopotential auf 850 hPa über Zürich in dam</b>        |
| <b>DeltaH</b> | <b>Schichtdicke (=H500-H850) über Zürich in dam</b>       |
| <b>Th500</b>  | <b>Feuchtpotentielle Temperatur [°C] auf 500 hPa</b>      |
| <b>Th850</b>  | <b>Feuchtpotentielle Temperatur [°C] auf 850 hPa</b>      |
| <b>DeltaT</b> | <b>Th500-Th850, negativ entspricht labiler Schichtung</b> |
| <b>ANS</b>    | <b>Schneefallgrenze auf der Alpennordseite</b>            |
| <b>GR</b>     | <b>Schneefallgrenze in Graubünden</b>                     |

## 2.3 Warmlufteffekte und Stabilität

Normalerweise fallen bei einem grösseren Ereignis dieser Art zuerst Niederschläge in der Warmluft, allenfalls in Verbindung mit Gewittern. Dann erfolgt Kaltadvektion, sodass die Schneefallgrenze typischerweise um etwa 1'000 Meter sinkt.

Das war diesmal nicht so. Tabelle 2.1 zeigt den Verlauf der Geopotentiale, Schichtdicke, der feuchtpotentiellen Temperaturen und der Stabilität bezüglich gesättigter Luft.

Das Geopotential auf 500 hPa zeigt einen eher geringen Abfall. Die Schweiz gelangte also nie ins Zentrum des Höhentiefs. Auf 850 hPa erfolgte der wesentliche Abbau am 21. August, was zeigt, dass die Zyklogese über Norditalien stark auf die Alpennordseite übergriff. Die Schichtdicke wurde am 20. etwas abgebaut, was auf Abkühlung hinweist. Durch Warmadvektion erfolgte am 21. bereits wieder eine Zunahme. 420 – 425 dam entsprechen einem normalen sommerlichen Standard.

Die feuchtpotentielle Temperatur gibt einen weiteren Hinweis auf die Advektion: besonders massiv ist die Warmadvektion auf 500 hPa vom 20. auf den 21. August.

Die Stabilität ist zu Beginn negativ ( $\Delta T < 0$ ), was auf ein beträchtliches Gewitterpotential schliessen lässt. Am 21. sind Gewitter nicht möglich, am 22. wenigstens denkbar.

Die Schneefallgrenze zeigt am 20. August ein deutliches Absinken in Graubünden, von 21.12 UTC bis 22.12 UTC fällt ihr Anstieg mit der bereits erwähnten Advektion warmer Luft zusammen.

In Bezug auf den Niederschlagscharakter kann das Ereignis damit vorerst in drei Abschnitte aufgeteilt werden:

- am 19. und 20. teils gewittrige Niederschläge;
- am 21. flächiger Regen infolge Warmadvektion;
- am 22. Strömungsniederschlag infolge Nordstau in sommerlicher Warmluft, eventuell gewittrig durchsetzt.

Bezüglich Konvektivität können diese Aussagen mit Hilfe der Blitzregistrierungen überprüft werden. Am 19. erfolgt ein mässiges Auftreten von Einschlägen im Norden, am 20. ein starkes Auftreten im Süden. Vom 21.–23. wurden keine Blitze mehr registriert, ausgenommen wenig Fernblitze am 21. im Süden.

Die Wolkenformen auf den Satellitenbildern zeigen diesen Verlauf ebenfalls. Ausserdem lässt sich am 22. August in der zweiten Tageshälfte konvektive Tätigkeit knapp nordöstlich der Schweiz feststellen. Es scheint jedoch, dass diese Zellen a) im weiteren Verlauf mit nördlichen Winden östlich der Schweiz durchgezogen sind und b) wahrscheinlich im Alpenvorland mit schichtartigen Wolken durchsetzt waren und somit unterdrückt wurden.

Zusammenfassend lassen sich die zunächst gemachten Aussagen für die Region Nordschweiz wie folgt bereinigen:

- am 19. teils gewittrige Niederschläge;
- am 20. praktisch keine Gewitter mehr;
- am 21. flächiger Regen infolge Warmadvektion;
- am 22. Strömungsniederschlag in sommerlicher Warmluft.

## 2 Wetterlage

### 2.4 Zykonale Prozesse und Mittelmeerluft

Wie unter 2.1 beschrieben, koppelte sich am 20. August ein markantes Höhentief von einem grösseren Trog ab. Dieses Tief verstärkte sich über Norditalien bis zum 21. und erzeugte dabei eine kräftige Zyklonalität, die weit über die Schweiz nach Norden reichte. Dadurch wurden die subtropischen Warmluftmassen mit feuchtpotentiellen Temperaturen von 15-18 °C – die in der Startphase recht homogen über Mitteleuropa und dem nördlichen Mittelmeerraum lagen – zu Hebung gezwungen und somit angefeuchtet. Trotz vorübergehender Warmadvektion war die Höhenströmung stets zyklonal gekrümmt, was die Hebungsprozesse unterstützt. Die nicht stark ausgeprägte Kaltadvektion von Frankreich her sorgte ausserdem zur Ausbildung einer Okklusion, die am 21. August mit östlichen Winden zur Schweiz gelangte. Am 22. entstand zudem noch orografische Hebung am Alpennordhang.

Oft wird darauf hingewiesen, dass sich die atlantischen Luftmassen über dem warmen Mittelmeer mit Feuchtigkeit vollgesogen hätten, was die starken Niederschläge bewirkt habe. Dass dieser Prozesse allein für die aussergewöhnlichen Niederschläge verantwortlich gemacht werden kann, ist eher unwahrscheinlich. So haben z.B. Jung et al (2005) gezeigt, dass die ausserordentliche Erwärmung des Mittelmeers im Sommer 2003 nur zu eher kleinen Änderungen im Niederschlagsregime in Europa geführt hat. Andererseits ist es natürlich klar, dass die Tatsache, dass die Luft das Mittelmeer überströmt, für den Niederschlag im Alpenraum wesentlich ist. In einem numerischen Experiment hat Niedermann (2001) gezeigt, dass sich ohne Mittelmeer (also, wenn die entsprechende Fläche mit «Vegetation» bedeckt wäre), das Niederschlagsregime im Alpenraum wesentlich ändern würde.

Die Diskussion in Kapitel 6 zeigt, dass auch die Präsenz der Alpen für das hier betrachtete Niederschlagsereignis von grosser Bedeutung war. Zusammenfassend ist es also mit Sicherheit nicht das Anfeuchten der Luft über dem Mittelmeer allein, das zum starken Niederschlag geführt hat. Vielmehr braucht es für ein Ereignis dieser Grössenordnung beides, die Wasseraufnahme der Luft auf der einen Seite wie auch einen Auslöseprozess (Hebung über den Alpen) auf der anderen Seite.

### 2.5 Fazit

Eine massive Zyklonogenese über Norditalien bewirkte vor allem am 21. und 22. August 2005 grossräumige starke Anfeuchtungsprozesse. Dabei war eine Luftmasse im Spiel, die nicht einmal besonders warm war, sondern typisch für die Jahreszeit. Gewitter spielten in der Schweiz nur eine Nebenrolle. Die Phase relevanter Niederschläge dauerte insgesamt etwa vier Tage.

# 3 Verteilung, Verlauf und klimatologische Einordnung des Starkniederschlags

*Christoph Frei, Stephan Bader, Urs Germann, Peter Zbinden, Christof Appenzeller*

## 3.1 Niederschlagsmessung und Analyse

Das Niederschlagsgeschehen wird mit unterschiedlichen Messtechniken gemessen und aufgezeichnet. Das Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz betreibt sowohl ein klassisches Niederschlagsmessnetz (Pluviometer) wie auch ein Wetterradarnetz:

### **Pluviometer:**

Das klassische Niederschlagsmessnetz der MeteoSchweiz umfasst gegenwärtig 440 Stationen mit Pluviometer Messgeräten (HADES-Tafel «Niederschlagsmessung», Musa und Konzmann 2006). Davon sind 70 Stationen mit automatischen Messgeräten ausgerüstet (ANETZ-Stationen), welche die Niederschlagsmengen in 10-Minuten Intervallen aufzeichnen und in Echtzeit übermitteln. An den verbleibenden Stationen erfolgt die Messung manuell und die Messdaten stehen, mit einigen Tagen Verzögerung, als 24-Stunden Niederschlagssummen (jeweils von 06:00–06:00 UTC) zur Verfügung. Zusätzlich zum Messnetz der MeteoSchweiz betreibt das Eidgenössische Institut für Schnee und Lawinenforschung (SLF) zusammen mit den Kantonen ein Netz automatischer Pluviometer in hochgelegenen Gebieten der Alpen. Die Stationen dieses IMIS-Netzes liegen typischerweise oberhalb von 2'000 m.ü.M. (HADES Tafel «Schneemessung» 2006). In den nachfolgenden Analysen wurden tägliche Niederschlagssummen von 42 IMIS Stationen

mitberücksichtigt. (Die hohe Schneefallgrenze während dem Ereignis ermöglicht die Benützung trotz unbeheizten Geräten.) Abbildung 3.1 zeigt die für die Niederschlagsanalyse verwendeten Messnetze.

Klassische Pluviometerstationen verfügen zum Teil über sehr lange Zeitreihen. So liegen zum Beispiel von 288 Stationen fast komplette digitale Beobachtungsreihen seit 1961 vor (mindestens 40 Jahre), und von 109 Stationen sogar seit 1901 (mindestens 100 Jahre). (Handschriftliche, bisher nicht digitalisierte Datenreihen sind hier nicht eingerechnet.) Diese Langzeitreihen ermöglichen eine klimatologische Einordnung der Starkniederschläge (siehe Kapitel 3.4).

Die klassische Pluviometerstation liefert, im Vergleich zum Wetterradar (s.u.), eine direkte und relativ genaue Messung an einem Ort. Zwar treten bei Schneefall, starkem Wind und geringen Niederschlagsintensitäten systematische Unterschätzungen auf (z.B. Sevruk 1985, Yang et al. 1999), aber für die Starkniederschläge im August 2005 dürfte der systematische Messfehler nicht grösser sein als einige wenige Prozent (meist kleiner als 5%). Eine im konkreten Fall wohl gravierendere Einschränkung ist die Tatsache, dass eine einzelne Niederschlagsmessung die Bedingungen an einem Punkt beschreibt. Die Repräsentativität eines Messwertes für eine grössere Umgebung ist wegen der hohen räumlichen Variabilität des Niederschlags eingeschränkt.



### 3 Verteilung, Verlauf und klimatologische Einordnung des Starkniederschlags

#### Wetterradar:

Das MeteoSchweiz WetterradarNetz bestehend aus drei Stationen (Abb. 3.1) liefert im Fünfminutentakt Niederschlagskarten für die ganze Schweiz sowie das angrenzende Ausland mit einer Auflösung von 1 km. Die Daten stehen dem Anwender nur wenige Minuten nach der Messung online zur Verfügung. Von den Starkniederschlägen im August 2005 lieferten Radarmessungen ein flächendeckendes, räumlich und zeitlich hoch aufgelöstes Bild der Niederschlagsentwicklung und der Verlagerung von Niederschlagssystemen.

Die operationelle Radar-Niederschlagsmessung in einem Alpenland wie der Schweiz ist eine besondere Herausforderung. Sie verlangt besonderes Design der verwendeten Radar-Hardware sowie raffinierte Methoden der Datenauswertung. Die aktuelle Implementation basiert auf 40 Jahren Erfahrung und kon-

tinuierlichen Verbesserungen (Joss et al., 1998; Germann und Joss, 2004). Die Stabilität der Messung wird durch die automatisierte, laufende Überwachung und Kalibration der Hardware und den periodischen Unterhalt vor Ort sichergestellt. Ein 1993 entwickelter und 1999 erweiterter Clutter-Unterdrückungs-Algorithmus (Joss und Lee, 1995; Germann 2000) detektiert und eliminiert 98% der Bodenechos. Wo die Radar-Messung auf Bodenniveau durch Berge abgeschirmt ist, werden die Messungen aus der Höhe mittels der Profilkorrektur auf das Bodenniveau extrapoliert (Joss und Lee, 1995; Germann und Joss, 2002). Ein robustes statistisches Verfahren wird verwendet um die Radarwerte an die Pluviometer-Messungen anzueichen. Die Fortschritte der letzten Jahre in der Datenauswertung resultieren in einer signifikanten Reduktion der Falschalarme, des Bias und der Fehlerstreuung der in Echtzeit verfügbaren Radarmessung (Germann et al. 2006).

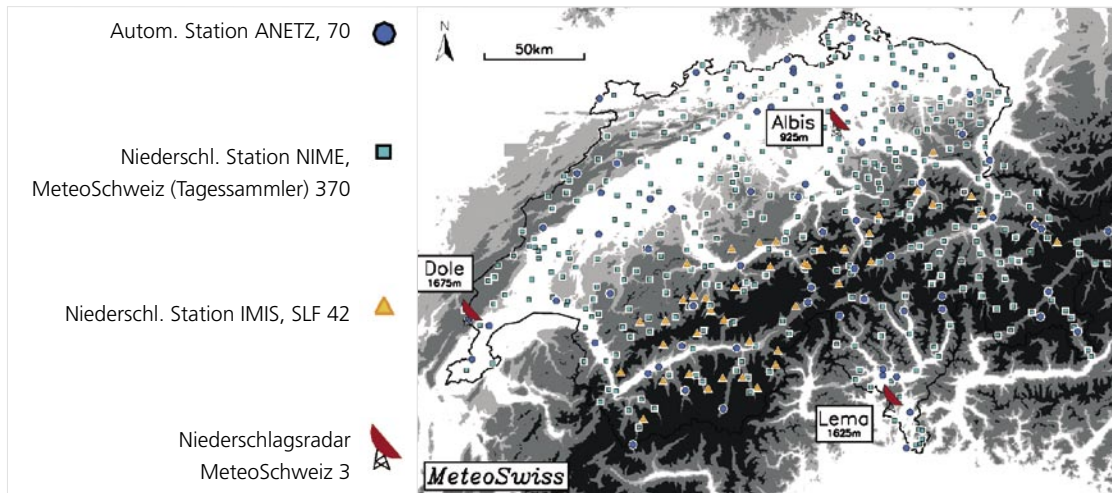


Abb. 3.1 Die Niederschlagsmessnetze in der Schweiz (Stand August 2005).

### 3.2 Gegitterte Analysen aus Pluviometerdaten

Zur quantitativen Analyse des Ereignisses hat die MeteoSchweiz aus den Messungen der insgesamt 482 Pluviometerstationen gegitterte tägliche Niederschlagsanalysen angefertigt (siehe Abb. 3.2). Dabei wurde ein Analyseverfahren verwendet, welches eine komplexe klimatologische Analyse (Schwarb et al. 2001, Daly et al. 2002) mit einer einfachen räumlichen Gewichtung kombiniert (Shepard 1986, Frei und Schär 1998, Frei und Schmidli 2005). Die Analysen wurden auf einem Gitter von ca. 2 km Maschenweite berechnet. Die in diesen Analysen sichtbaren fein-skaliigen Strukturen widerspiegeln eine Schätzung der Feinstrukturen aus der Klimatologie. Die tatsächliche Verteilung des Niederschlags auf der km-Skala kann stark von der in der Gitteranalyse dargestellten abweichen. Analysen aus Radarmessungen zeigen für feine Skalen ein verlässlicheres Bild der Verteilung. Die effektive Auflösung der gegitterten Pluviometer Analysen dürfte ungefähr 10–15 km im Flachland und 15–20 km im Gebirge betragen.

### 3.3 Niederschlagsentwicklung während dem Ereignis

Bereits die erste Hälfte des Monats August war von verschiedenen Niederschlagsereignissen geprägt (siehe Witterungsbericht August 2005, MeteoSchweiz, 2005). Bis zum 15. August

ist in den nördlichen Voralpen der Zentral- und Ostschweiz bereits verbreitet über 75 % der durchschnittlichen August-Regenmenge gefallen. Dazu beigetragen hat insbesondere auch eine ergiebige Niederschlagsperiode am 14. und 15. August, die nur wenige Tage vor dem Starkniederschlagsereignis dem zentralen Alpennordrand Niederschläge von 40 mm und mehr gebracht hat (Abb. 3.2). Der insgesamt nasse Monatsanfang und die erwähnten ergiebigen Niederschläge um die Monatsmitte haben die hydrologische Ausgangslage im Boden mitgeprägt.

Die Episode, in welcher die verheerenden Starkniederschläge aufgetreten sind, hat vom 18.–23. August gedauert, wobei die grössten Niederschlagsmengen am 21. und 22. August gefallen sind. Die folgende Analyse wird zeigen, dass das Hauptereignis vier Tage dauerte (19.–22. August), während der 18. als ‚Vorphase‘ und der 23. August als ‚Endphase‘ (Niederschläge nur noch ganz im Osten) hier auch noch kurz betrachtet werden. Der Verlauf der Niederschlagsmengen wird im Folgenden anhand von Pluviometeranalysen (Abb. 3.2) und anhand von Radarbildern (charakteristische Momentaufnahmen in Abb. 3.3, 6-Stunden Summen in Abb. 3.4) beschrieben und illustriert. Beispiele von Zeitreihen an ausgewählten automatischen Stationen des ANETZ sind in Abb 3.5 gezeigt.

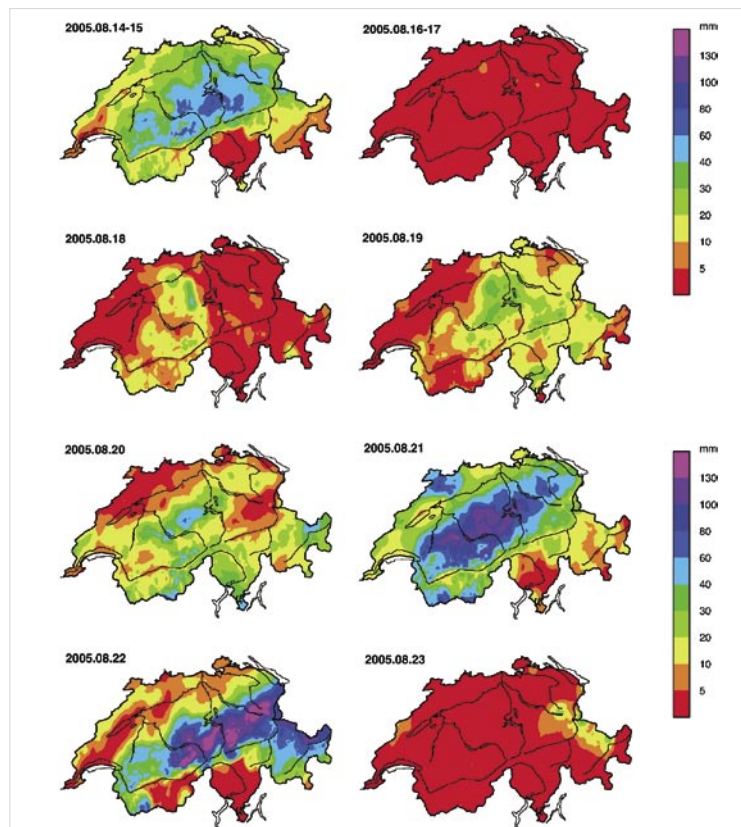


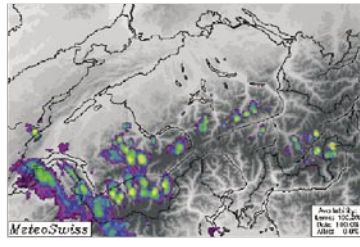
Abb. 3.2

Verlauf der täglichen Niederschlags-summen (mm) vom 14.–23. August 2005. Die Tagessummen beziehen sich auf den Zeitraum 06–06 Uhr des Folgetags d.h. von 08:00–08:00 Mitteleuropäische Sommerzeit. Beachte: Die obersten beiden Diagramme zeigen Niederschlags-summen über jeweils zwei Tage.

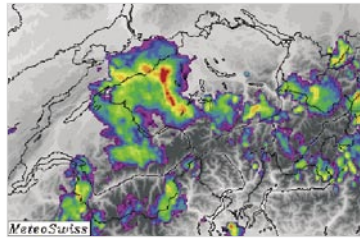
### 3 Verteilung, Verlauf und klimatologische Einordnung des Starkniederschlags

▶  
**Radar- Niederschlagsschätzung für ausgewählte Momentanaufnahmen in mm pro Stunde, Zeit in UTC:**

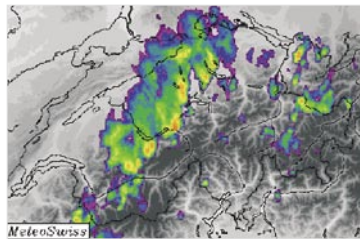
▶  
**Abb. 3.3a**  
**18. August 12:30**



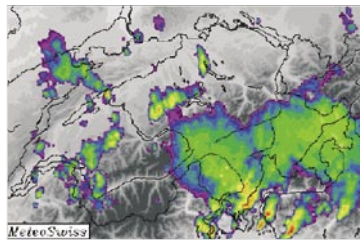
▶  
**Abb. 3.3b**  
**18. August 17:10**



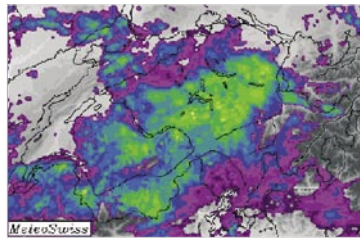
▶  
**Abb. 3.3c**  
**19. August 18:45**



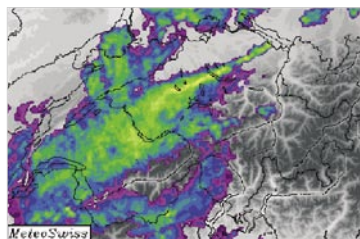
▶  
**Abb. 3.3d**  
**20. August 6:25**



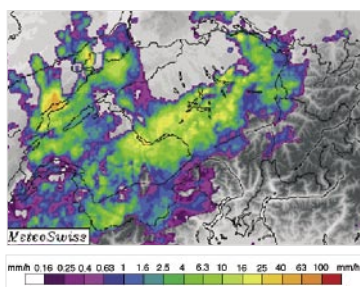
▶  
**Abb. 3.3e**  
**21. August 12:30**



▶  
**Abb. 3.3f**  
**21. August 19:30**



▶  
**Abb. 3.3g**  
**21. August 22:40**



#### 18. August 2005

Niederschläge fallen vor allem im Wallis sowie im Mittelland zwischen Saane und Reuss. Die Tagessummen (meist geringer als 30 mm, Abb. 3.2) sind nicht aussergewöhnlich. Das Niederschlagsgeschehen ist durch isolierte konvektive Zellen und einem meso-skaligen System von organisierten konvektiven Zellen geprägt. Die Zellenbildung beginnt am Morgen im Wallis und breitet sich später über den Alpenbogen aus (Abb. 3.3a). Das meso-skalige konvektive System entwickelt sich zwischen Berner Oberland und Jura, zieht langsam ostwärts und zerfällt am Abend als Linie über dem Suhretal (Abb. 3.3b).

#### 19. August 2005

Am 19. August ziehen erneut mehrere konvektive Zellen, zuerst isoliert, dann vereint als Regenfront, Richtung Nordosten über die Schweiz hinweg (Abb. 3.3c). Ab 20.00 UTC sind die meisten in der Front eingebetteten Gewitter vorbei und die maximalen Regenintensitäten gehen auf unter 20 mm/h zurück. Am späten Abend überquert die Front die Alpen und generiert im Piemont und Tessin noch einige Gewitter. Der Gewittertag hat über dem zentralen Mittelland und den Voralpen eine Niederschlagssumme von 20–40 mm verursacht.

#### 20. August 2005

Beidseits der Alpen halten die ergiebigen Niederschläge an. Grossflächig fallen mehr als 20 mm. In den zentralen Voralpen, im Tessin und in Teilen von Graubünden sogar mehr als 40 mm (Abb. 3.2). Im Verlauf des Morgens fallen südlich der Alpen teils gewittrige Stauniederschläge die auch ins Alpeninnere (Gotthard, Graubünden) hineinreichen (Abb. 3.3d). Im Mittelland und in den nördlichen Voralpen gibt es Schauer und flächige Niederschläge. Im Zusammenhang mit der Ausbildung des für das spätere Wettergeschehen bedeutenden Sekundär-Tiefs über Norditalien ändert sich die Zugrichtung der Niederschlagsysteme in den Mittagsstunden markant von Südwest auf Nordost.

#### 21. August 2005

In den frühen Morgenstunden des 21. August hat sich das Niederschlagsgeschehen vorübergehend beruhigt. Erst kurz vor Mittag setzen die grossflächigen und intensiven Niederschläge ein, welche in den folgenden rund 40 Stunden anhalten und für die ausserordentlichen Gesamtmengen verantwortlich sind. Zuerst entwickelt sich ein grossflächiges Niederschlagsgebiet mit noch vergleichsweise geringen Intensitäten über dem zentralen und östlichen Mittelland. Später erfasst dieses auch die westlichen Landesteile (Abb. 3.3e). Im Laufe des Nachmittags intensivieren sich die Niederschläge grossflächig aber besonders entlang der Voralpen vom Toggenburg über die Zentralschweiz ins Berner Oberland.



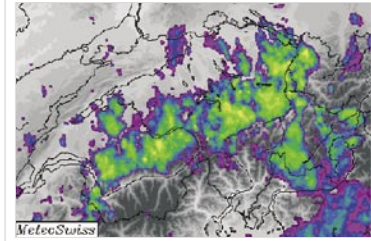
In den Radarsequenzen ist die quasi-stationäre Anströmung aus Nordosten in der Verlagerung von Niederschlagsystemen sichtbar. Sie dürfte für die andauernden Stauiederschläge in der zweiten Tageshälfte verantwortlich sein. Aber das Niederschlagsmuster ist nicht alleine durch stationären Stauiederschlag charakterisiert. Auch das Mittelland wird von verschiedenen herein ziehenden oder sich organisierenden Niederschlagsystemen betroffen. Ein besonders markantes System entwickelt sich am späteren Abend in Form eines langen schmalen Bandes, welches sich vom Bodensee über Zürichsee zum Zugersee erstreckt und sich leicht aufgefächert ins Emmental und Entlebuch weiterzieht (Abb. 3.3f). Dieses Band mit hohen Intensitäten bleibt während mehr als zwei Stunden erhalten und verschiebt sich erst im Laufe der frühen Nacht langsam in die Voralpen hinein. Dadurch nehmen die Niederschlagsintensitäten in den Voralpen wieder zu und der Dauerniederschlag erfasst auch die westlichen Voralpen (Simmental, Freiburger Alpen) und den Jura (Abb. 3.3g). In dieser Phase werden entlang dem Alpennordrand die höchsten Niederschlagsintensitäten während dem Ereignis erreicht. Die Niederschlagsakkumulation (Abb. 3.4) ist grossflächig, erfasst Voralpen und Mittelland und zeigt auch eingebettete feinskalige Strukturen.

Aufsummiert vom Morgen des 21. bis zum 22. August sind die Niederschlagssummen beachtlich (Abb. 3.2). Entlang der nördlichen Alpen sowie in weiten Teilen des Mittellandes vom Genfer- bis zum Bodensee sind mindestens 40 mm gefallen. In den Voralpen vom Lac de La Gruyère über das Emmental und Entlebuch bis zum Zugersee werden regional deutlich mehr als 100 mm gemessen. Die höchsten an diesem Tag gemessenen Tagessummen wurden an den Pluviometer-Stationen Wasen im Emmental (171 mm), Stockhorn (159 mm, IMIS), Rotschalp (148 mm, IMIS), Stans (135 mm) und Entlebuch (131 mm) gemessen.

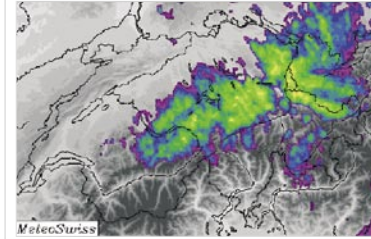
## 22. August 2005

Während die Regenintensität im Mittelland deutlich abnimmt, halten die intensiven und grossflächigen Niederschläge in den nördlichen Voralpen den ganzen Tag an. In der Nacht ziehen zuerst weitere als Bänder organisierte Niederschlagszonen von Nordosten über das Mittelland gegen die Voralpen (siehe auch Abb. 3.4). Die Anströmung ändert aber im Laufe des Morgens von Nordost auf Nord, und damit verschieben sich die hohen Intensitäten von den Voralpen weiter gegen den Alpenkamm (Abb. 3.3h). In Graubünden reichen die Niederschläge sogar ins inneralpine Gebiet hinein. Vorerst ist noch der gesamte Bereich vom Genfer- bis Bodensee betroffen. Im Zuge einer weiteren Drehung der Anströmung auf Nord-Nordwest im Lauf des Nachmittags beschränkt sich die Niederschlagsaktivität aber zunehmend auf die zentralen und östlichen Alpen. Schliesslich werden in der Nacht besonders Liechtenstein, Vorarlberg und der Nordosten von Graubünden (Prättigau) betroffen (Abb. 3.3i).

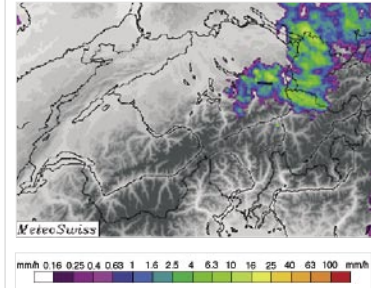
►  
**Abb. 3.3h**  
**22. August 13:00**



►  
**Abb. 3.3i**  
**22. August 22:30**



►  
**Abb. 3.3j**  
**23. August 07:30**



Am 22. August wurden die höchsten Tagessummen der gesamten Starkniederschlagsepisode gemessen (Abb. 3.2). Dies vor allem, weil – im Gegensatz zum Vortag – 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. Die Analyse in Abb. 3.2 zeigt deutlich, dass die Niederschlagsaktivität an diesem Tag im Vergleich zum Vortag näher am Alpenhauptkamm und eher im Osten lag. Die höchsten an diesem Tag registrierten Tagessummen wurden in Weesen (242 mm), Gadmen (233 mm, IMIS), Amden (203 mm, IMIS), auf dem Säntis (187 mm) und im Schächental (IMIS: 198 mm, Unterschächen: 184 mm) registriert.

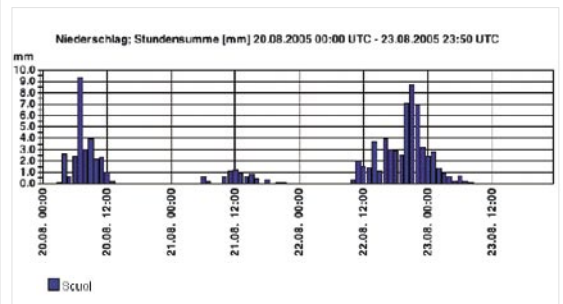
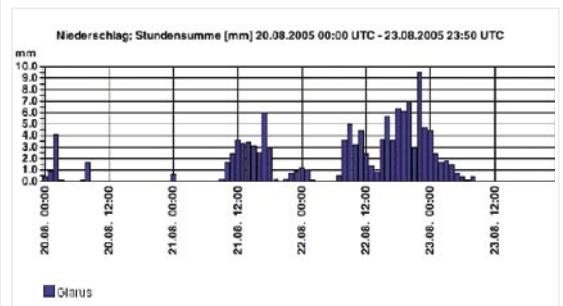
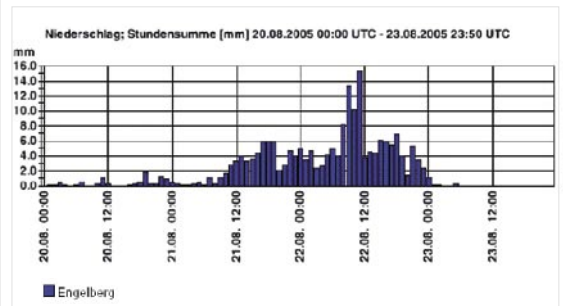
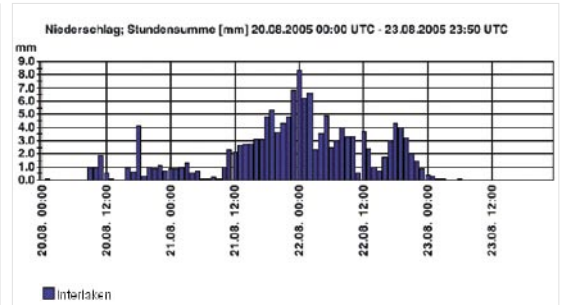
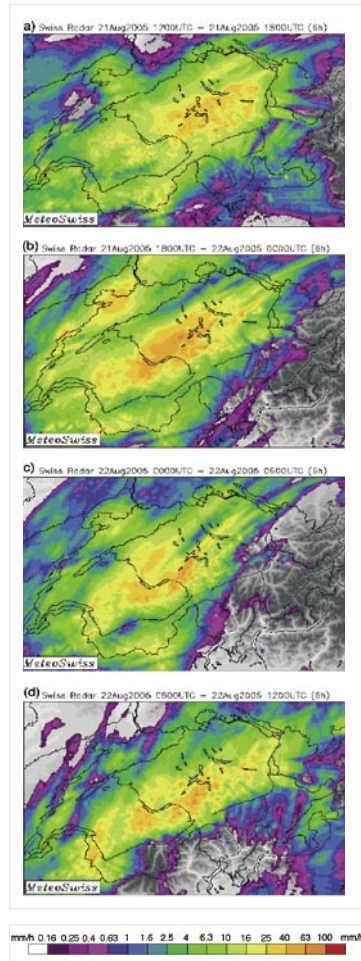
## 23. August 2005

Die intensiven Niederschläge in der Ostschweiz halten noch bis in den Morgen des 23. August an, führen aber vor allem noch in der Churfisten-Region und im Prättigau zu nennenswerten Mengen (Abb. 3.3). In den betroffenen Gebieten kommen so noch einmal 10–30 mm zusammen (Abb. 3.2), am meisten in Malbun (50 mm). Anschliessend verschiebt sich die Niederschlagsaktivität weiter ostwärts in die nördlichen Alpen von Österreich und Süddeutschland, wo es weiter zu anhaltend starken Niederschlägen kommt (Rudolf et al. 2005, 2006). Am Nachmittag und Abend ziehen noch vereinzelte konvektive Zellen von Nordwesten in die West- und Zentralschweiz.



### 3 Verteilung, Verlauf und klimatologische Einordnung des Starkniederschlags

**Abb. 3.4:** Akkumulierte Niederschlagssumme (in mm) aus Radarmessungen für 6 Stunden Intervalle.  
 a) 21.8. 12-18:00  
 b) 21.8. 18-24:00  
 c) 22.8. 00-06:00  
 d) 22.8. 06-12:00



**Abb. 3.5:** Niederschlagsverlauf (mm pro Stunde) an ausgewählten automatischen Stationen (ANETZ) der MeteoSchweiz.

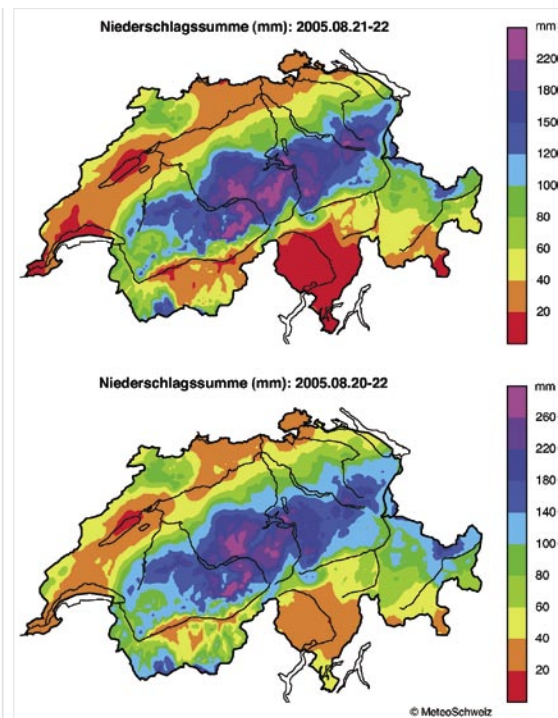
### 3.4 Gesamtniederschläge des Ereignisses

Die im Bezug auf die Niederschlagsintensität aktivste Phase des Ereignisses fand am 21. und 22. August statt. Integriert über die 48 Stunden vom Morgen des 21. August bis zum 23. August (06 – 06 UTC) sind in einem grossen, zusammenhängenden Gebiet vom Genfersee bis zum Bodensee mehr als 100 mm Niederschlag gefallen (Abb. 3.6). Die Achse dieses Gebiets liegt entlang dem Alpennordrand, aber es breitet sich auch in inneralpine Gebiete (Berner Oberland, Vorderrhein und Prättigau) aus und reicht zum Teil weit ins Schweizer Mittelland (Zürichsee, Untere Reuss, Oberrhein). Niederschlagsmengen von gar mehr als 220 mm sind grossflächig über den Berner Alpen, im Emmental und Entlebuch, in den Kantonen Obwalden, Uri und Schwyz und am Walensee gefallen.

Gemäss der in Abb. 3.6 dargestellten Niederschlagsanalyse sind während den beiden Haupttagen auf 28 % der Gesamtfläche der Schweiz Niederschläge von mehr als 100 mm gefallen. Die 200 mm Marke wurde auf gut 3 % der Fläche überschritten. Der integrierte Niederschlag über jene Gebiete, die mehr als 100 mm erhalten haben (der oben beschriebene Streifen entlang der Voralpen) beträgt rund 1 km<sup>3</sup> Wasser. Diese Menge entspricht etwa einem Viertel des Volumens des Zürichsees, oder dem 12-fachen des mittleren Tagesabflusses des Rheins bei Basel.

Zählt man den 20. August zur Starkniederschlagsepisode dazu, so kommen weiträumig noch einmal 20–40 mm dazu, im Emmental und Entlebuch sogar 40–60 mm (Abb. 3.6). Die 72-Stunden Summe zeigt dementsprechend ein markantes Maximum in den Voralpen zwischen Reuss/Vierwaldstättersee und Thunersee. Der über der ganzen Schweiz während den drei Tagen vom 20. bis 22. August gefallene Niederschlag entspricht rund 60 % des Zürichseevolumens.

Die gegitterten Niederschlagsanalysen von Abb. 3.6 zeigen die grossräumige Verteilung, die aus der Analyse von jeweils mehreren umliegenden Stationsmessungen berechnet wurde. Niederschlag variiert aber oft über kurze Distanzen stark, und deshalb weichen die gegitterten Analysen zum Teil beträchtlich von den Messungen an Einzelstationen ab. Insbesondere gibt die Analyse nicht die punktuellen Spitzenwerte in Einzelbeobachtungen wieder.



▲ **Abb. 3.6**  
**Verteilung der Niederschlagssummen (mm) über 2 Tage (21.–22. August 2005, 06–06:00, oben) und über 3 Tage (20.–22. August 2005, 06–06:00, unten). Beachte die unterschiedliche Farbskala.**

### 3 Verteilung, Verlauf und klimatologische Einordnung des Starkniederschlags

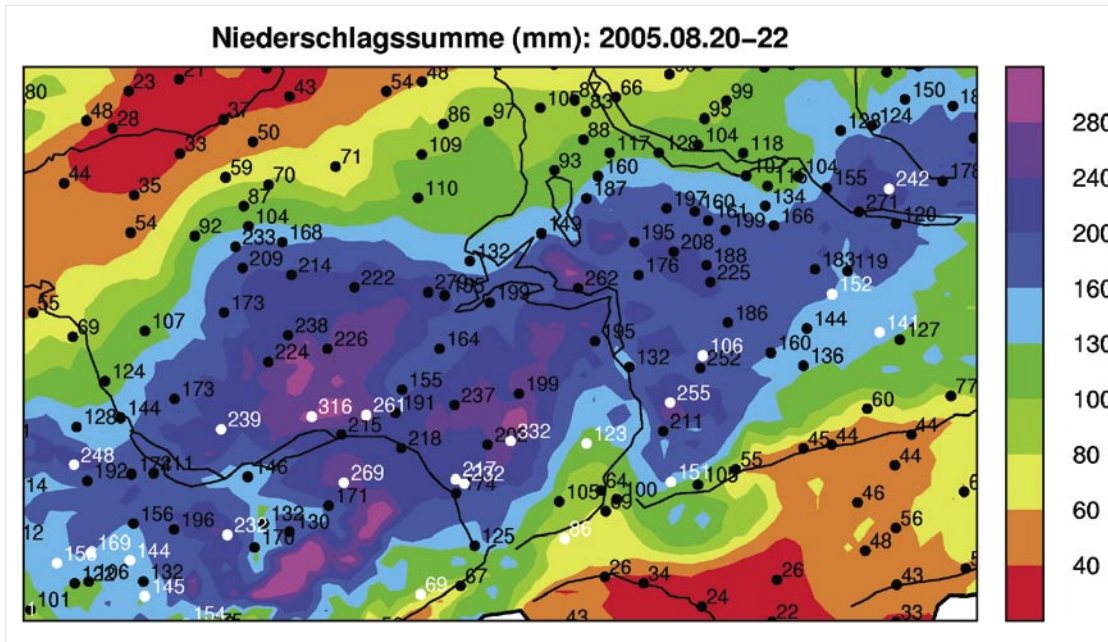


Abb. 3.7 Ausschnitt der Verteilung der Niederschlags-summe (mm) über 3 Tage 20.-22. August 2005 (siehe Abbildung 3.6 unten). Gegitterte Niederschlagsanalysen und gemessene Werte am Niederschlagsmessnetz der MeteoSchweiz (schwarz) und an den hochgelegenen Stationen (IMIS) des SLF (weiss).

Abbildung 3.7 zeigt Ausschnitte von den am meisten betroffenen Gebieten mit den Werten der verfügbaren Pluviometerbeobachtungen. Die Spitzenwerte der 72-Stunden Summe übersteigen die 300 mm Marke. Die höchsten Werte wurden in Gadmen (332 mm, IMIS), Rotschalp (316 mm, IMIS), Eigenthal (279 mm), Weesen (271 mm), First (269 mm, IMIS), Gersau (262 mm), und Schönbüel (261, IMIS) beobachtet. Generell weisen die hochgelegenen IMIS-Stationen eine Tendenz zu mehr Niederschlag auf im Vergleich zu den tiefer gelegenen Stationen des Niederschlagsmessnetzes der MeteoSchweiz.

Abbildung 3.7 illustriert auch die beträchtliche kleinräumige Variabilität in den Ereignissummen, obwohl der Charakter der Niederschlagsprozesse vorwiegend lang anhaltend und stratiform war. Die mesoskalige Variabilität manifestiert sich in den unterschiedlichen Messwerten zwischen nahe gelegenen Stationen. Markante Beispiele sind die Stationspaare Weesen (271 mm) und Obstalden (120 mm) sowie Hondrich (211 mm) und Wimmis (174 mm), welche jeweils nur etwa 5 km voneinander entfernt sind. Gegitterte Niederschlagsanalysen können solche kleinräumigen Variationen nur beschränkt reproduzieren.

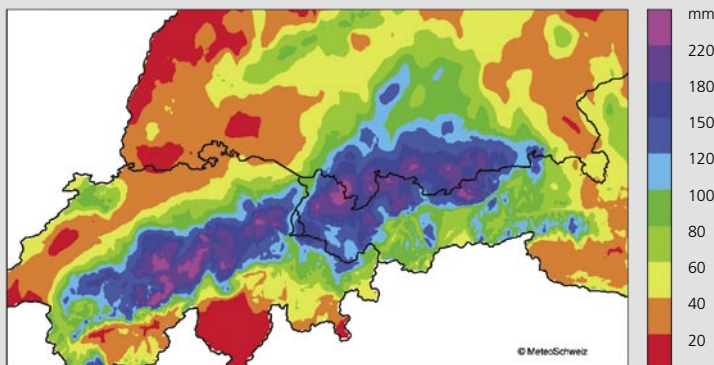
## Hochwasser August 2005 - ein überregionales Ereignis

Das August-Hochwasser 2005 hat neben der Schweiz auch Teile von Österreich und Deutschland betroffen. In Österreich waren vor allem die Bundesländer Vorarlberg und Tirol betroffen. Alleine in Vorarlberg (rund 1/20 der Fläche der Schweiz) sind 180 Mio. Euro Schäden registriert worden. Die Eisenbahnlinie über den Arlberg blieb für mehr als drei Monate ausser Betrieb (Amt der Vorarlberger Landesregierung 2005). In Deutschland waren vor allem die südlichen Teile von Bayern betroffen. Das Bundesland Bayern hatte einen Gesamtschaden von 172 Mio. Euro zu verkraften (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, 2005).

Unter Benützung von Beobachtungen in Österreich (842 Stationen des Hydrographischen Zentralbüros in Wien, Bearbeitungsstand März 2006) und Süddeutschland (605 Stationen des Deutschen Wetterdienstes in Offenbach) hat

MeteoSchweiz eine Niederschlagsanalyse für das gesamte betroffene Gebiet durchgeführt (siehe Abbildung unten). Das Gebiet starker Niederschläge erstreckt sich über eine Distanz von rund 500 km entlang dem nördlichen Alpenrand von den Freiburger Alpen bis Kufstein. Ausserhalb der Schweiz sind vor allem in den Allgäuer Alpen grosse Niederschlagsmengen gefallen. Die grössten 3-Tages Summen wurden in der Schweiz gemessen (mehr als 250 mm in Gadmen 320 mm, Rotschalp 283, Weesen 277 mm und Amden 267 mm, ) aber die 250 mm Marke wurde auch in Österreich (Innerlaterns 269 mm, Ebnet 268 mm, Au 257 mm) und in Deutschland (Balderschwang 259 mm) überschritten. In Bayern waren auch weite Teile des nördlichen Alpenvorlandes von grossen Niederschlagsmengen betroffen. Obwohl keine vergleichenden Analysen für das gesamte Alpengebiet vorliegen, ist es wahrscheinlich, dass der Starkniederschlag vom August zu den im Bezug auf die räumliche Ausdehnung grössten registrierten Niederschlagsereignissen im nördlichen Alpenraum gehört.

### Niederschlagssumme (mm): 21.08.-23.08.2005



72-Stunden Niederschlagssumme vom Morgen des 21. bis zum Morgen des 24. August 2005.

### 3 Verteilung, Verlauf und klimatologische Einordnung des Starkniederschlags

#### 3.5 Wie extrem waren die Niederschläge im klimatologischen Vergleich?

Die Starkniederschläge vom August 2005 waren in Bezug auf Intensität und Ausdehnung im langjährigen Vergleich sehr aussergewöhnlich.

Die über die 48 Stunden akkumulierte Niederschlagssumme am 21. und 22. August hat an insgesamt 22 Messstationen der MeteoSchweiz mit Messreihen bis ins frühe 20. Jahrhundert die bisher höchsten Werte seit Messbeginn egalisiert oder übertroffen (Tabelle 3.1). Zum Teil wurden die bisherigen Rekorde sehr deutlich übertroffen, wie zum Beispiel in Meiringen, Weesen und Wimmis. Überschreitungen des bisherigen Rekords gab es auch an Stationen mit Messreihen, die ins 19. Jahrhundert zurückreichen. 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. An insgesamt 13 Stationen mit langjährigen Beobachtungsreihen wurde der frühere Rekord überschritten (Tabelle 3.1). In Meiringen lagen die Tagesniederschläge sowohl am 21. wie auch am 22. August über dem früheren Rekord.

Im Vergleich zu Südschweizer Stationen sind die im August beobachteten Punkt-Niederschlagsmengen allerdings nicht einzigartig. Die grössten Starkniederschläge werden im Tessin, Simplongebiet und Mesolcina beobachtet, wo sogar im gesamtalpinen Vergleich besonders häufig Starkniederschläge vorkommen (z.B. Schär et al. 1998, Frei und Schmidli 2006, siehe dazu auch später Abb. 3.10). Die bisherigen Rekordwerte der 48 h-Summe liegen 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 Simplondorf (48 h-Summe, 13.–14. Sept. 2000) und mit 615 mm in Mosogno (72 h-Summe, 14.–16. Okt. 2002) gemessen. Ereignisse mit Niederschlagsmengen von 220 mm (48 h-Summe) resp. 300 mm (72 h-Summe) wie im August am Alpennordrand, kommen im Tessin praktisch jedes Jahr ein bis mehrere

Male vor. Einzig die extremste 24 h-Summe des Ereignisses (Weesen: 242 mm am 22. August) geht in eine Kategorie, die auch in der Südschweiz nur alle paar Jahre gemessen wird.

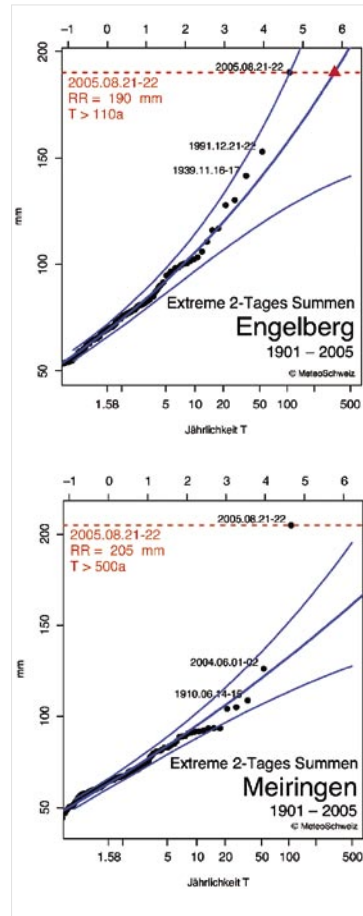
Eine statistische Schätzung der Seltenheit der im August gefallenen Niederschläge lässt sich mit den Methoden der Extremwertanalyse herleiten. Diese basieren auf theoretischen Arbeiten von Fisher und Tippett (1928) und Gumbel (1958). Eine moderne Einführung findet man zum Beispiel in Coles (2001). Für die Analysen in diesem Bericht wurde die verallgemeinerte Extremwertverteilung an die jährlichen Niederschlagsmaxima an Einzelstationen angepasst, wobei für die Parameterschätzung eine modifizierte Likelihood-Funktion verwendet wurde (Martins und Stedinger 2000), welche robustere Schätzungen mit kurzen Datenreihen erlaubt, (Details in Frei et al. 2006).

Mit der Extremwertanalyse kann die Jährlichkeit (Wiederkehrperiode) für ein bestimmtes Ereignis geschätzt werden. Eine Jährlichkeit von T Jahren bedeutet, dass in einem gegebenen Jahr ein Extremum gleicher oder grösserer Niederschlagsmenge mit einer Wahrscheinlichkeit von  $1/T$  zu erwarten ist.

Abbildung 3.8 zeigt zwei beispielhafte Gumbel-Diagramme für die 48 h-Summe an den Stationen Meiringen und Engelberg. Beide verfügen über digital verfügbare Messreihen von mehr als hundert Jahren, in welchen das August-Ereignis den Rekordwert markiert. (In den Handaufzeichnungen für Engelberg ist vom Juli 1874 ein noch höherer Wert vermerkt, siehe Tabelle 3.1.) Die beste Schätzung der Jährlichkeit (basierend auf der Referenzperiode 1901–2005) ist rund 300 Jahre für Engelberg und mehr als 1000 Jahre für Meiringen. Die Schätzungen für so seltene Ereignisse unterliegen aber, trotz langen Datenreihen, grossen Unsicherheiten. Das 95% Konfidenz-Intervall für Engelberg reicht zum Beispiel von 110 Jahren bis zu mehreren Tausend Jahren. Genaue Angaben zur Jährlichkeit machen also wenig Sinn. Summarisch lässt sich aber sagen, dass die Augustniederschläge in Meiringen lokal einem möglicherweise mehr als 500-jährigen Ereignis, in Engelberg einem mehr als hundertjährigen Ereignis entsprachen. Das Resultat für Meiringen ist ein Extremfall, aber das Beispiel Engelberg ist typisch für eine Reihe von Stationen in der Zentralschweiz (siehe rechts).



►  
**Abb. 3.8**  
**Gumbel-**  
**Diagramme für**  
**die Stationen**  
**Engelberg und**  
**Meiringen.**  
**Beziehung zwi-**  
**schen Jährlich-**  
**keit (T, Ordinate,**  
**in Jahren) und**  
**48-h Nieders-**  
**schlagssumme**  
**(Abszisse, in**  
**mm). Beste**  
**Schätzung der**  
**Verallgemeiner-**  
**ten Extremwert-**  
**verteilung**  
**(dicke Linie) und**  
**95 % Konfidenz-**  
**Intervall.**



In der nachfolgenden Tabelle aufgeführt sind Stationen mit Daten seit dem frühen 20. Jahrhundert, für welche beim Starkregeneignis vom 18.-23. August 2005 in der 1-Tages, der 2-Tages oder der 5-Tages Niederschlagssumme mindestens die drittgrösste Regenmenge seit 1901 registriert wurde. Regen-summen, die in der Statistik den 2.- oder 3.-grössten Wert seit Messbeginn erreichten, sind **schwarz in Fettdruck** dargestellt. Neue Höchstwerte sind zusammen mit den Stationsnamen **rot in Fettdruck** dargestellt. Für Niederschlagssummen, die nicht zu den 10 grössten in der Datenreihe gehören, ist in der Tabelle kein Rang angegeben. Am Alpenrand der Innerschweiz gab es schon am 20. teils sehr starke Regenfälle, so dass dort örtlich die 2-Tages Summe vom 20./21.8. 2005 höher war als die Summe am 21. und 22.8. 2005 (mit \*) markiert). Von wenigen Stationen existieren Daten zurück bis ins Jahr 1864. Es fällt auf, dass in der Zeit vor 1900 teils extremere Niederschläge auftraten als seit 1901. So erreichten die Niederschlagssummen des Ereignisses vom August 2005 in Engelberg und Einsiedeln zwar die höchsten Werte seit 1901. In Engelberg fielen aber im Juli 1874 noch grössere Mengen, und in Einsiedeln wurden zwischen 1864 und 1900 sogar drei Ereignisse notiert, die extremer waren als der Starkregen vom 18.-23. August 2005.

**Tab. 3.1:** Messorte mit extrem hohen 1-, 2- und 5-Tages-Regensummen während der Starkregen-Periode vom 18.–23. August 2005

| Station   | Daten seit | 1-Tages Niederschlagssummen |            |          |             |  |
|---|------------|-----------------------------|------------|----------|-------------|--|
|   |            | August 2005                 | Tag        | Rang     | Max. bisher | Datum                                  |
| <b>Urnäsch</b>                                      | 1901       | 89.5                        | 22.        |          | 120.0       | 07.08.1978                             |
| <b>Säntis</b>                                       | 1901       | <b>186.7</b>                | <b>22.</b> | <b>1</b> | 183.3       | 14.06.1910                             |
| Wildhaus  | 1880       | <b>158.1</b>                | <b>22.</b> | <b>3</b> | 201.5       | 21.05.1999                             |
| Starkenbach   | 1901       | <b>154</b>                  | <b>22.</b> | <b>2</b> | 184         | 14.06.1910                             |
| <b>Weesen</b>                                       | 1901       | <b>241.8</b>                | <b>22.</b> | <b>1</b> | 160.5       | 21.05.1999                             |
| Klöntal   | 1901       | <b>146.1</b>                | <b>22.</b> | <b>3</b> | 171         | 14.06.1910                             |
| <b>Einsiedeln</b> (höchste 2-Tages seit 1901)       | 1864       | 80.3                        | 22.        |          | 176         | 19.06.1871<br>31.07.1874<br>07.08.1978 |
| Oberiberg   | 1901       | 98                          | 22.        | 5        | 173.1       | 29.07.1990                             |
| <b>Sattel-Aegeri</b>                                | 1901       | 84.3                        | 21.        |          | 145         | 09.09.1934                             |
| Schwyz-lbach  | 1901       | 86                          | 22.        |          | 140         | 14.06.1910                             |
| Isenthal  | 1901       | <b>131</b>                  | <b>22.</b> | <b>2</b> | 133.3       | 03.05.2002                             |
| <b>Küssnacht a.R.</b>                               | 1901       | <b>101.5</b>                | <b>21.</b> | <b>3</b> | 110.1       | 31.08.2002                             |
| <b>Engelberg</b> (höchste 2- und 5- Tagesseit 1901) | 1864       | 111.2                       | 22.        | 5        | 154         | 31.07.1874                             |
| <b>Stans</b>  | 1904       | 135.3                       | 21.        | 1        | 135         | 14.06.1910                             |
| Luzern  | 1881       | 81.1                        | 21.        |          | 111.8       | 06.06.2002                             |
| Beromünster   | 1901       | <b>80.6</b>                 | <b>21.</b> | <b>3</b> | 92.0        | 18.05.1994                             |
| <b>Eigenthal</b>                                    | 1901       | 111.5                       | 22.        | 7        | 137         | 09.09.1934                             |
| <b>Entlebuch</b>                                    | 1901       | <b>131.4</b>                | <b>21.</b> | <b>1</b> | 106.2       | 22.08.1974                             |
| <b>Flühli</b>                                       | 1901       | <b>112.9</b>                | <b>22.</b> | <b>2</b> | 120         | 13.06.1912                             |
| <b>Eschholz matt</b>                                | 1901       | <b>101.7</b>                | <b>21.</b> | <b>2</b> | 114         | 03.09.1936                             |
| <b>Marbach</b>                                      | 1901       | 100                         | 21.        | 4        | 110.5       | 29.06.1988                             |
| <b>Luthern</b>                                      | 1910       | <b>87.8</b>                 | <b>21.</b> | <b>3</b> | 101.5       | 25.07.1963                             |
| <b>Kurzeneialp</b>                                  | 1901       | <b>123.2</b>                | <b>21.</b> | <b>1</b> | 100         | 23.06.1973                             |
| <b>Wasen i.E.</b>                                   | 1901       | <b>170.7</b>                | <b>21.</b> | <b>1</b> | 86.6        | 24.07.1961                             |
| <b>Langnau i.E</b>                                  | 1901       | 91.5                        | 21.        | 4        | 104.6       | 14.08.1906                             |
| <b>Schwarzenegg</b>                                 | 1901       | <b>89.5</b>                 | <b>21.</b> | <b>1</b> | 86.8        | 07.08.1978                             |
| <b>Sarnen</b>                                       | 1896       | <b>103.5</b>                | <b>21.</b> | <b>1</b> | 89          | 04.07.1977                             |
| Guttannen   | 1876       | 105.7                       | 22.        | 6        | 130.3       | 15.09.1882                             |
| <b>Gadmen</b>                                       | 1912       | <b>107.7</b>                | <b>22.</b> | <b>3</b> | 118         | 15.09.1882                             |
| <b>Meiringen</b>                                    | 1889       | <b>110.9</b>                | <b>22.</b> | <b>1</b> | 93.2        | 08.03.1896                             |
| <b>Brienz</b>                                       | 1901       | <b>96.4</b>                 | <b>22.</b> | <b>2</b> | 113         | 17.11.1939                             |
| <b>Grindelwald</b>                                  | 1911       | 92.8                        | 22.        | 4        | 138.2       | 02.11.1968                             |
| <b>Kiental</b>                                      | 1901       | <b>96.5</b>                 | <b>21.</b> | <b>1</b> | 92.1        | 20.07.1964                             |
| <b>Kandersteg</b>                                   | 1901       | 71.5                        | 21.        | 9        | 114.1       | 02.11.1968                             |
| <b>Frutigen</b>                                     | 1901       | <b>90.3</b>                 | <b>21.</b> | <b>1</b> | 83          | 23.05.1908                             |
| <b>Wimmis</b>                                       | 1901       | <b>101</b>                  | <b>21.</b> | <b>1</b> | 81          | 14.06.1910                             |
| <b>Thun</b>   | 1875       | <b>94.7</b>                 | <b>21.</b> | <b>1</b> | 88.6        | 07.06.1915                             |
| La Valsainte  | 1901       | 96.8                        | 21.        | 4        | 109.5       | 23.06.1973                             |

| 2-Tages Niederschlagssummen 21./22. resp. 20./21.08.2005*) |          |             |                    | 5-Tages Niederschlagssummen 18.-22.08.2005 |          |             |                   |
|--|----------|-------------|--------------------|--|----------|-------------|-------------------|
| August 2005  | Rang     | Max. bisher | Periode            | August 2005                                | Rang     | Max. bisher | Periode           |
| <b>166.7</b>   | <b>1</b> | 165         | 09.01.–10.01.1914  | <b>205</b>                                 | <b>1</b> | 198         | 11.05.–15.05.1999 |
| 207.9  | 6        | 290         | 02.11.–03.11.1921  | 221.3                                      |          | 418.2       | 02.11.–06.11.1921 |
| <b>174.8</b>   | <b>3</b> | 229         | 20.05.–21.05.1999  | <b>191.8</b>                               |          | 254.5       | 18.05.–22.05.1999 |
| <b>178.1</b>   | <b>3</b> | 215         | 13.06.–14.06.1910  | 189.1                                      |          | 280         | 18.01.–22.01.1910 |
| <b>270.2</b>   | <b>1</b> | 221         | 25.06.–26.06.1953  | <b>293.8</b>                               | <b>1</b> | 267         | 22.06.–26.06.1953 |
| <b>180.6</b>   | <b>2</b> | 195         | 13.06.–14.06.1910  | 209.3                                      | 8        | 239         | 02.11.–06.11.1921 |
| 152.1  | 4        | 178         | 30.07.–31.07.1874  | 184.9                                      | 4        | 209         | 24.07.–28.07.1865 |
| <b>173.8</b>   | <b>2</b> | 174.8       | 29.07.–30.07.1990  | 206.4                                      | 7        | 236         | 07.11.–11.11.1944 |
| <b>161.6</b>   | <b>1</b> | 159         | 09.09.–10.09.1934  | <b>218.3</b>                               | <b>2</b> | 220.5       | 22.07.–26.07.1982 |
| <b>157.2</b>   | <b>2</b> | 184         | 13.06.–14.06.1910  | <b>200.8</b>                               | <b>2</b> | 212         | 11.06.–15.06.1910 |
| <b>179.7</b>   | <b>2</b> | 205.5       | 02.05.–03.05.2002  | <b>217.9</b>                               | <b>2</b> | 224.6       | 01.05.–05.05.2002 |
| <b>130.1</b>   | <b>1</b> | 122         | 27.09.–28.09.1954  | <b>173.4</b>                               | <b>1</b> | 166.3       | 20.06.–24.06.1973 |
| <b>190.2</b>   | <b>2</b> | 226         | 30.07.–31.07.1874  | <b>216.2</b>                               | <b>2</b> | 229         | 27.07.–31.07.1874 |
| <b>167.6*)</b>   | <b>2</b> | 170         | 13.06.–14.06.1910  | <b>229.2</b>                               | <b>1</b> | 205         | 11.06.–15.06.1910 |
| 107  | 7        | 123.3       | 05.06.–06.06.2002  | <b>156.7</b>                               | <b>2</b> | 163.4       | 20.06.–24.06.1973 |
| 98.7*)   | 7        | 122         | 17.05.–18.05.1994  | 136.9                                      | 5        | 86.2        | 17.05.–21.05.1994 |
| <b>213.8</b>   | <b>1</b> | 209         | 09.08.–10.08.1984  | <b>324.3</b>                               | <b>1</b> | 246.9       | 20.06.–24.06.1973 |
| <b>177.6*</b>  | <b>1</b> | 150.3       | 09.08.–10.08.1984  | <b>298.7</b>                               | <b>1</b> | 190.3       | 05.07.–09.07.1946 |
| <b>170.1</b>   | <b>1</b> | 160.2       | 01.06.–02.06.2004  | <b>262.4</b>                               | <b>1</b> | 205.4       | 30.05.–03.06.2004 |
| <b>171.4</b>   | <b>1</b> | 160.2       | 03.09.–04.09.1936  | <b>268.6</b>                               | <b>1</b> | 192         | 03.09.–07.09.1936 |
| <b>181.3</b>   | <b>1</b> | 164.8       | 01.06.–02.06.2004  | <b>253.8</b>                               | <b>1</b> | 214.5       | 31.05.–04.06.2004 |
| <b>145.9</b>   | <b>1</b> | 123.4       | 22.06.–23.06.1973  | <b>207.6</b>                               | <b>1</b> | 176         | 18.01.–22.01.1910 |
| <b>178.6</b>   | <b>1</b> | 166.4       | 22.06.–23.06.1973  | <b>224.6</b>                               | <b>1</b> | 221         | 20.06.–24.06.1973 |
| <b>207.3*)</b>   | <b>1</b> | 118         | 02.08.–03.08.1968  | <b>258.6</b>                               | <b>1</b> | 163.7       | 17.05.–21.05.1994 |
| <b>141.2</b>   | <b>1</b> | 132         | 01.06.–02.06.2004  | <b>189.9</b>                               | <b>1</b> | 184.4       | 30.05.–03.06.2004 |
| <b>135.2</b>   | <b>1</b> | 103.5       | 09.08.–10.08.1984  | <b>187.5</b>                               | <b>1</b> | 135.1       | 28.08.–01.09.1983 |
| <b>135.8</b>   | <b>1</b> | 97.9        | 23.06.–24.06.1930  | <b>227.5</b>                               | <b>1</b> | 158.5       | 20.06.–24.06.1973 |
| <b>161.6</b>   | <b>3</b> | 179.2       | 01.11.–02.11.1968  | <b>197.4</b>                               | <b>8</b> | 266.8       | 12.09.–16.09.1882 |
| <b>188.7</b>   | <b>1</b> | 174.7       | 21.12.–22.12.1991  | <b>222.8</b>                               | <b>3</b> | 232.8       | 18.12.–22.12.1991 |
| <b>205</b>   | <b>1</b> | 158.7       | 07.03.–08.03.1896  | <b>247.3</b>                               | <b>1</b> | 199.4       | 06.03.–10.03.1896 |
| <b>181.1</b>   | <b>1</b> | 164         | 02.12.–03.12.1936  | <b>246.1</b>                               | <b>1</b> | 213         | 16.11.–20.11.1939 |
| <b>157.6</b>   | <b>1</b> | 150.4       | 02.11.–03.11.1968  | <b>186.5</b>                               | <b>1</b> | 164.7       | 18.12.–22.12.1991 |
| <b>170</b>   | <b>1</b> | 150.9       | 21.12.–22.12.1991  | <b>240.4</b>                               | <b>1</b> | 183.1       | 18.12.–22.12.1991 |
| <b>120</b>   | <b>3</b> | 137         | 31.10.–01.11.1924  | <b>162</b>                                 | <b>1</b> | 155.5       | 14.09.–18.09.1984 |
| <b>128.8</b>   | <b>1</b> | 125.2       | 01.06.–02.06.2004  | <b>175.7</b>                               | <b>1</b> | 171         | 18.12.–22.12.1991 |
| <b>141.1</b>   | <b>1</b> | 119.9       | 07.05.–08.05.1985  | <b>200.7</b>                               | <b>1</b> | 163.6       | 18.02.–22.02.1999 |
| <b>122*)</b>   | <b>2</b> | 122.1       | 01.09.–02.09.1881  | <b>155.1</b>                               | <b>1</b> | 150.5       | 31.08.–04.09.1881 |
| <b>142</b>   | <b>2</b> | 162.9       | 252.06.–23.03.1973 | <b>171.6</b>                               | <b>2</b> | 215.9       | 20.06.–24.06.1973 |

### 3 Verteilung, Verlauf und klimatologische Einordnung des Starkniederschlags

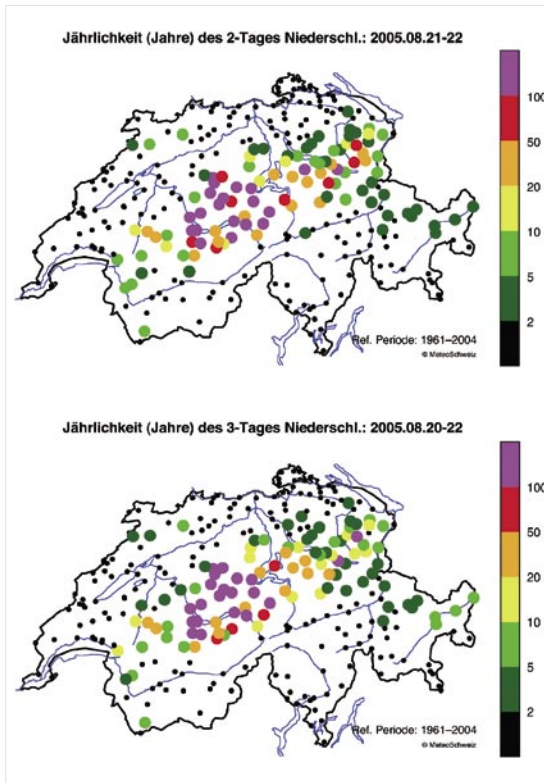
Extreme hohe Jährlichkeiten an einzelnen Stationen sollten nicht überbewertet werden. Sie beschreiben zwar die Seltenheit eines Ereignisses für die lokalen Verhältnisse, aber diese entspricht nicht der Seltenheit in einem regional übergeordneten Rahmen. Niederschlag ist eine räumlich sehr variable Grösse. Es ist deshalb möglich, dass Ereignisse, die überregional gesehen nicht extrem selten sind, durch ihre feinskaligen Unterschiede an immer anderen Stationen zu extremen Jährlichkeiten führen. Im Grenzfall wo die typische Raumskala von Starkniederschlägen viel kleiner ist als der typische Abstand zwischen Stationen, würde man in einem Messnetz von 100 Stationen (in der Schweiz gibt es rund 100 kontinuierliche Messreihen seit 1901) im Durchschnitt jedes Jahr einen Jahrhundertniederschlag registrieren.

Eine Betrachtung der Jährlichkeiten in einem ganzen Messnetz bietet deshalb mehr Einblick. Abbildung 3.9 zeigt die Jährlichkeiten (beste Schätzung) des Ereignisses für alle Schweizer Niederschlagsstationen mit mindestens 40-jährigen Messreihen seit 1961. Die Niederschlagssumme der zwei Tage 21. und 22. August als auch der drei Tage 20.–22. August weisen für praktisch alle Stationen im unteren Berner Oberland, dem

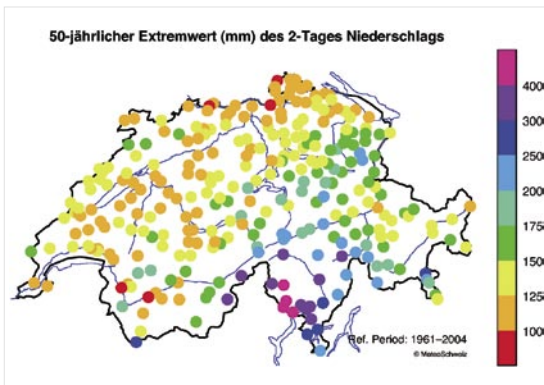
Emmental und Entlebuch sowie dem Kanton Obwalden, eine Jährlichkeit von mehr als 100 Jahren auf. In den östlichen Voralpen vom Vierwaldstättersee zum Bodensee wurden noch Jährlichkeiten zwischen 10 und 50 Jahren erreicht. Schweizweit war die 48 h-Summe an 20 (von insgesamt 280) Stationen ein Jahrhundert-Ereignis.

Abbildung 3.9 zeigt, 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 aufweisen. Dies ist nur teilweise durch die geringeren Niederschlagsmengen dort zu erklären. Ein weiterer Faktor ist die Tatsache, dass die östlichen Voralpen wesentlich häufiger von Starkniederschlägen betroffen sind. Der 50-jährliche extreme Zweitagesniederschlag ist in den östlichen Voralpen typischerweise 10–20% grösser als im Emmental und Berner Oberland (Abb. 3.10) (die Verhältnisse für Dreitagessummen sind sehr ähnlich). Zur Besonderheit (hohen Jährlichkeit) der Starkniederschläge hat also beigetragen, dass die hohen Niederschlagsmengen auch in einer Region der Schweiz gefallen sind, die seltener von Starkniederschlägen betroffen ist.





◀  
**Abb. 3.9**  
 Geschätzte Jährlichkeit (Jahre) der beobachteten 48 h-Niederschlags-summe (21.-22. August 2005) und 72h-Summe (20.-22. August 2005) für Schweizer Niederschlagsstationen mit einer mindestens 40 Jahre langen Beobachtungsreihe seit 1961 (Schwarze kleine Punkte: Jährlichkeit kleiner als 2 Jahre).



◀  
**Abb. 3.10**  
 50-jährlicher Extremwert (mm) der 48 h-Niederschlags-summe für Schweizer Niederschlagsstationen mit einer mindestens 40 Jahre langen Beobachtungsreihe seit 1961.

### 3 Verteilung, Verlauf und klimatologische Einordnung des Starkniederschlags

#### 3.6 Starkniederschläge und die Klimaänderung

Starkniederschläge sind natürliche Elemente des Klimas im Alpenraum. Verschiedene topographisch bedingte Prozesse in der Atmosphäre tragen zur – im europaweiten Vergleich – höheren Häufigkeit bei (Schär et al. 1998). Ein einzelner Starkniederschlag kann nicht ausschliesslich einer bestimmten Ursache zugeordnet werden, etwa der beobachteten globalen Klimaänderung und ihren anthropogenen Ursachen (IPCC 2001). Die globale Klimaänderung verändert allenfalls ihre Häufigkeit oder statistischen Eigenschaften (z.B. Dauer, Ausdehnung, saisonales Auftreten) und daraus liesse sich im Nachhinein ein statistischer Beitrag für ein Einzelereignis ableiten (Allen 2003).

Ob sich die Häufigkeit von Starkniederschlägen verändert hat, lässt sich für extreme 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 und Schär 2001). Unser Wissen über Veränderungen und Trends in Starkniederschlägen beruhen deshalb auf häufigeren 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 und Können 2003, Haylock und Goodess 2004). In der Schweiz, nördlich der Alpen, wurde für das 20. Jh. eine Zunahme im 90%-Quantil der Tagesniederschläge gefunden (Schmidli und Frei 2005). Dies gilt für Herbst und Winter, für den Sommer wurden keine Trends nachgewiesen.

Ob Extremniederschläge wie diejenigen im August mit der fortschreitenden globalen Klimaänderung in Zukunft häufiger auftreten, kann heute nicht abschliessend beurteilt werden. Insbesondere zeigen die Klimaszenarien aus verschiedenen Klimamodellen für den Sommer grosse Unterschiede. Probabilistische Szenarien aus regionalen Klimamodellen für das Jahr 2050 zeigen eine Abnahme der Sommerniederschläge in einem grossen Unsicherheitsbereich von 7% bis 31% (siehe Abb. 3.11; Frei 2005). Aber trotz Abnahme im Mittel wird in regionalen Klimamodellen eine Zunahme in der Häufigkeit von Extremniederschlägen nördlich der Alpen festgestellt (Christensen und Christensen, 2003; Frei et al. 2006, Abb 3.12). Diese Tendenz findet man auch am nördlichen Alpenrand (Schmidli et al. 2006). Wie abhängig dieses Szenario von den gegenwärtig verwendeten globalen Klimaszenarien ist, und ob es sich auch auf dynamisch bestimmte Starkniederschläge wie dem Ereignis im August auswirkt, werden zukünftige Untersuchungen zeigen müssen. OcCC (2003) gibt eine umfassende Zusammenfassung über den Zusammenhang zwischen verschiedenen Typen von Extremereignissen und der Klimaänderung.

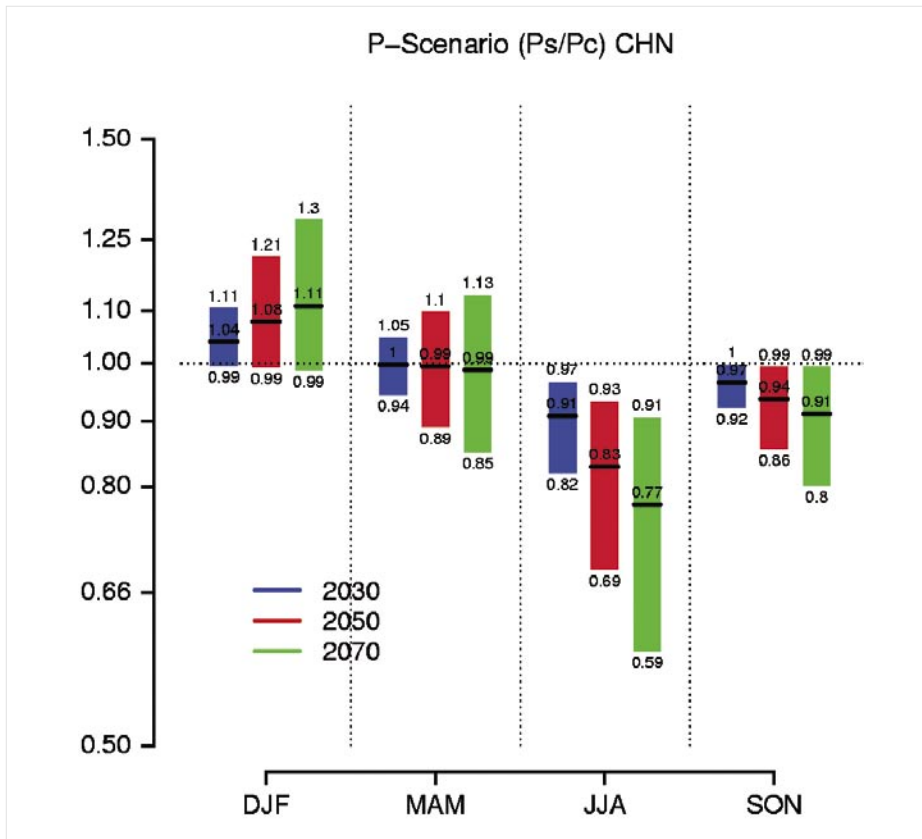


Abb. 3.11 Probabilistisches Szenario für den mittleren saisonalen Niederschlag. Änderung bis 2030, 2050, 2070 als Verhältnis zwischen zukünftigem und heutigem Klima. Die vertikalen Bereiche zeigen den Unsicherheitsbereich (95% Konfidenz-Intervall) der Szenarien nach heutigem Wissen (aus Frei, 2005).

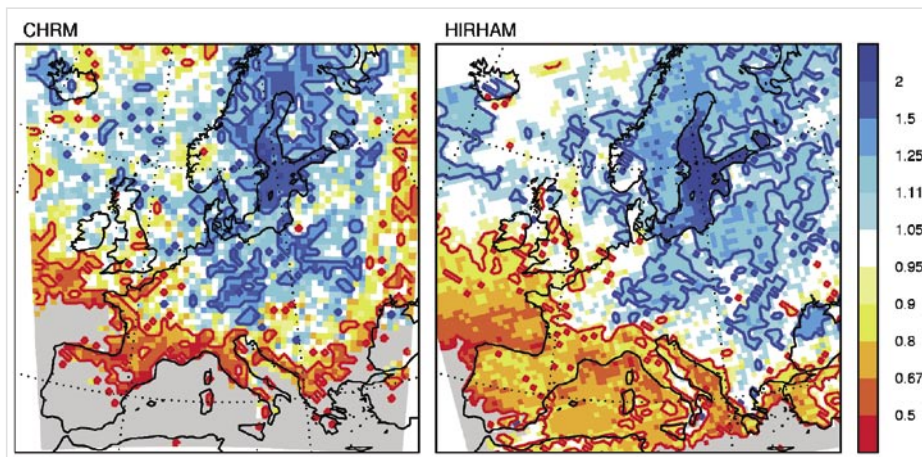


Abb. 3.12 Änderung (Verhältnis) des 5-jährlichen extremen 1-Tages Niederschlags im Sommer (2070-2100)/(1961-1990). Simulationen mit zwei regionalen Klimamodellen für das IPCC SRES A2 Emissions-szenario. blau: Zunahme, rot: Abnahme des Extremwerts. Aus Frei et al. (2006).

# 4 Vorhersage und Warnablauf bei MeteoSchweiz

Francis Schubiger, Patrick Hächler  
André Walser, Pierre Eckert, Olivier Duding

## 4.1 Vorhersage

### 4.1.1 Vorhersage durch das operationelle aLMo

Das operationelle numerische Wettervorhersagemodell von MeteoSchweiz, das Alpine Modell (aLMo), rechnet mit einem horizontalen Gitterabstand von 7 km auf 45 Flächen in einem Vorhersagegebiet, das ganz West- und Mittel-Europa umfasst. Zweimal täglich, um 2:30 Uhr und 14:30 Uhr, werden in 70 Minuten intensiver Berechnungen am Schweizerischen Nationalen Hochleistungsrechenzentrum CSCS der ETH in Manno (TI) die neuesten Vorhersagen bis 72 Stunden im Voraus ermittelt. Das Modell wurde im Rahmen der internationalen Zusammenarbeit COSMO von fünf nationalen Wetterdiensten (Deutschland, Schweiz, Italien, Griechenland und Polen) entwickelt und wird weiter verfeinert. Auf der COSMO-Website sind die wissenschaftliche Dokumentation und aktuelle Informationen, so auch die operationelle Modellkonfiguration, zu finden. Im COSMO-Newsletter (Schättler et. al, 2005) werden die neuesten Entwicklungen und Ergebnisse der Verifikation publiziert. Zahlreiche Produkte des aLMo werden in Echtzeit an Kunden weitergeleitet, so unter anderem an die Abteilung Hydrologie des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) für deren Abflussvorhersagen (insbesondere: aus jeder Vorhersage die stündlichen Niederschlagssummen an allen Gitterpunkten über der Schweiz und dem nahen Ausland).

Nachfolgend werden die Modell-Vorhersagen für die verschiedenen Tage vom 18. bis 22. August analysiert. Für die Verifikation werden (1) die Tagessummen des Niederschlags aus den Pluviometerstationen und (2) die Stundensummen des Niederschlags aus dem ANETZ herangezogen. Ein Vergleich der 72h-Niederschlagssumme des aLMo mit dem Radarkom-

posit und die «Scores» der objektiven Verifikation mit dem ANETZ werden am Schluss besprochen.

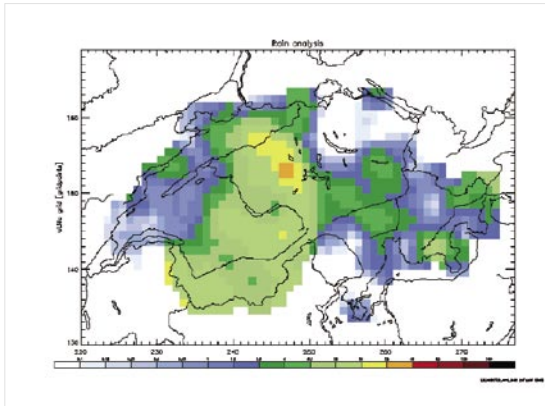
Der Niederschlag aus den Pluviometerstationen wurde in gegitterte Analysen (s. Kapitel 3.2) auf das Gitter des aLMo mit einer Maschenweite von 7 km umgewandelt: damit ist ein flächiger Vergleich Modell-Beobachtung möglich. Die Abbildungen 4.1–4.3 und 4.7 zeigen diese Vergleiche: 24 h-Niederschlagssummen (jeweils von 06 UTC des Tages bis 06 UTC des nachfolgenden Tages) des aLMo mit den gegitterten Analysen aus den Pluviometerdaten.

Die ANETZ Niederschlagsmessungen ermöglichen einen zeitlichen Vergleich zwischen Modell und Beobachtung. Die Abb. 4.4 und 4.5 zeigen diese Vergleiche: stündliche Niederschlagssummen des aLMo als Mittel von 5 Gitterpunkten an jeder ANETZ-Station mit den gemessenen Stundensummen des ANETZ. Dargestellt werden die Ergebnisse als Mittel aller Stationen und getrennt für drei Höhenklassen (< 800m, 800-1500m, > 1500m).

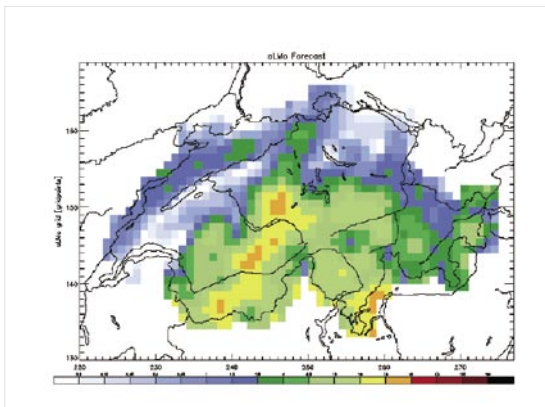
#### **Modell-Vorhersagen für Donnerstag, 18. August und Freitag, 19. August 2005 (drei, bzw. zwei Tage vor dem Hauptereignis)**

Abbildung 4.1 zeigt den Vergleich der 24 h-Niederschlagssummen für Donnerstag 18. August (06 UTC bis Freitag, 19. August 06 UTC) und für Freitag 19. August (06 UTC bis Samstag, 20. August 06 UTC). Dargestellt sind gegitterte Beobachtungen einerseits, und 00 UTC-Vorhersagen von aLMo des jeweiligen Tages von +6 bis +30 Stunden. Das Maximum des Niederschlags (im Bereich 25-40 mm/24 h) lag an beiden Tagen westlich des Vierwaldstättersees. Das Modell hat für den 18. August das Maximum etwas nach Südwesten verschoben (auch ins Wallis) und für den 19. August etwas nach Osten. Mengenmässig waren die Vorhersagen aber recht gut.

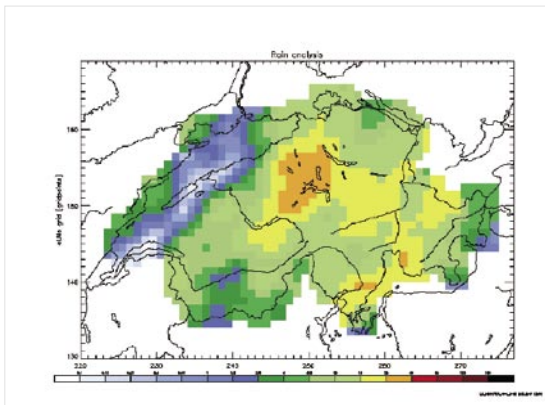




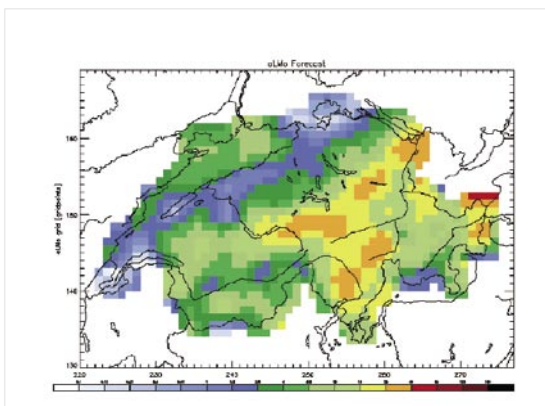
◀  
**Abb. 4.1**  
**24h-Niederschlags-**  
**summen:**  
**Gegitterte**  
**Beobachtung,**  
**24h Summe**  
**von 18. 8. 06 UTC**  
**bis 19. 8. 06 UTC.**



◀  
**Vorhersage um 00UTC**  
**(+6h bis +30h),**  
**24h Summe**  
**von 18. 8. 06 UTC**  
**bis 19. 8. 06 UTC.**



◀  
**Gegitterte**  
**Beobachtung,**  
**24h Summe**  
**von 19. 8. 06 UTC**  
**bis 20. 8. 06 UTC.**

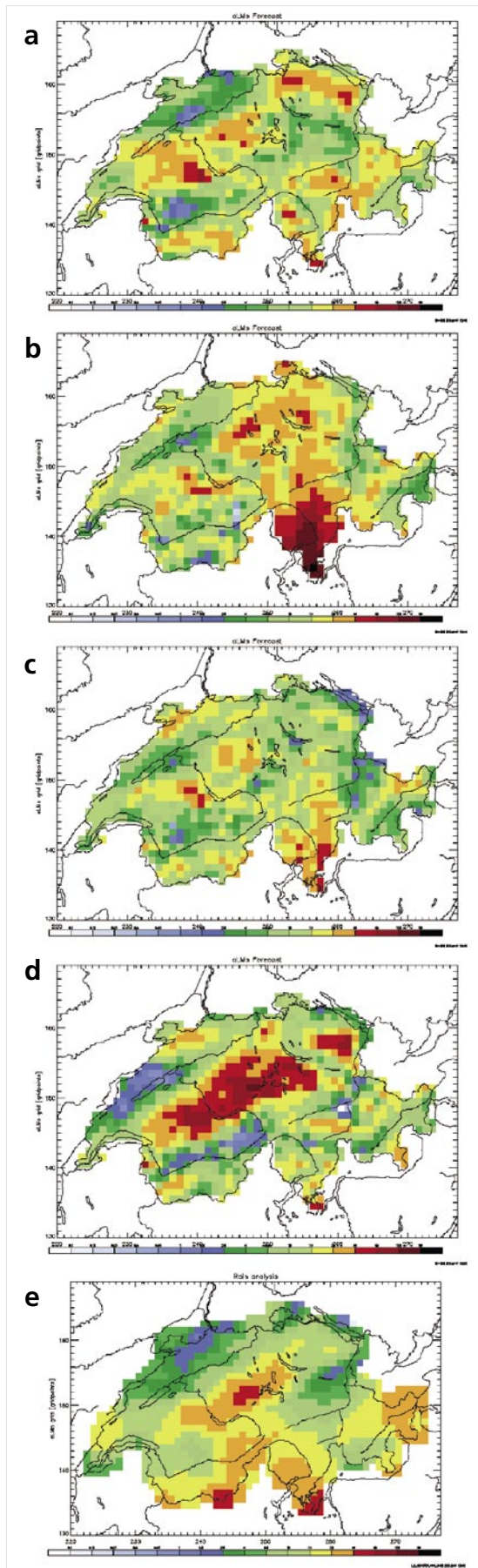


◀  
**Vorhersage um 00UTC**  
**(+6h bis +30h),**  
**24h Summe**  
**von 19. 8. 06 UTC**  
**bis 20. 8. 06 UTC.**

#### 4 Vorhersage und Warnablauf bei MeteoSchweiz

##### Modell-Vorhersagen für den Samstag, 20. August 2005 (ein Tag vor dem Hauptereignis)

Abbildung 4.2 zeigt für den Samstag, 20. August (06 UTC bis Sonntag, 21. August, 06 UTC) den Vergleich der 24 h-Niederschlagssummen aus den vier aLMO-Vorhersagen (von oben nach unten: von der ältesten zur jüngsten Vorhersage) mit den Beobachtungen des Pluviometermessnetzes auf dem Gitter des aLMO. Das Modell sagte in dieser Vorphase die stärksten Niederschläge zuerst ziemlich gut voraus (Vorhersage vom 18. August 2005 12 UTC); in der Vorhersage vom 19. August 2005 00 UTC ist der Niederschlag über dem südlichen Tessin zwar überschätzt, aber am korrekten Ort. Die letzte Vorhersage vom 20. August 2005 00 UTC zeigt ein breites Maximum zwischen Berner Oberland und Innerschweiz – in (grober) Übereinstimmung mit den Beobachtungen, allerdings wiederum überschätzt.



◀  
**Abb. 4.2**  
Niederschlags-  
summe vom  
20. August 2005  
(06-06 UTC):  
(a)-(d) aus  
aLMO-Vorhersa-  
gen vom  
(a) 18.08.2005  
12 UTC:  
+42..+66h

(b) 19.08.2005  
00 UTC:  
+30..+54h

(c) 19.08.2005 12  
UTC: +18..+42h

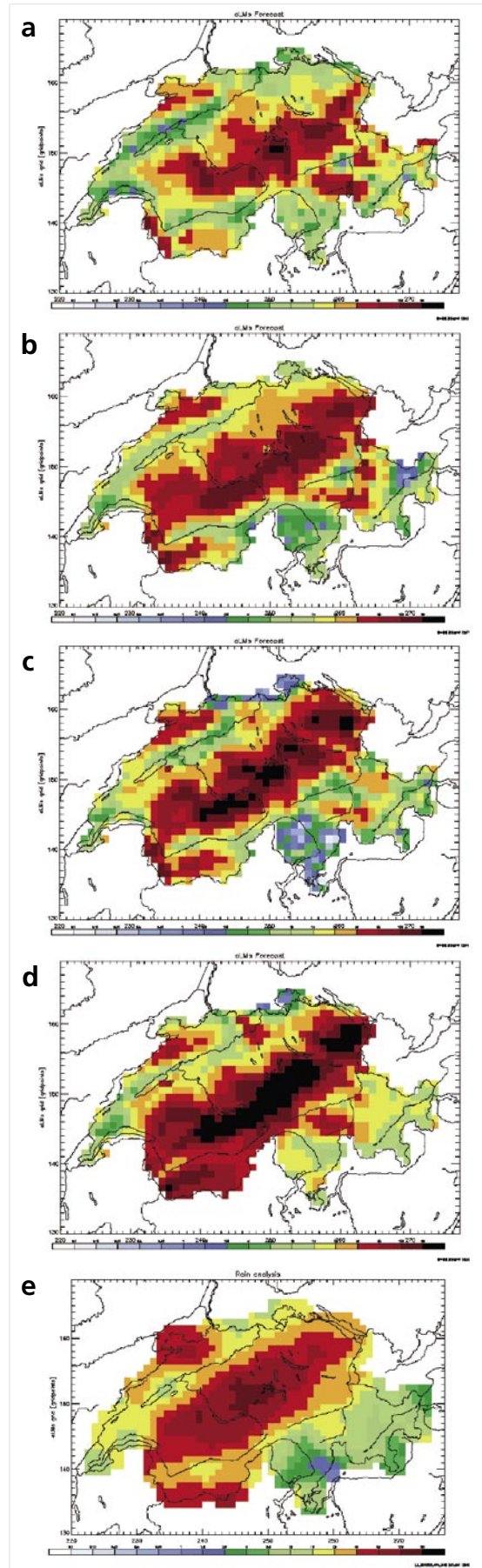
(d) 20.08.2005  
00 UTC:  
+6..+30h;

(e) gegitterte  
Analyse aus den  
Pluviometerda-  
ten (aLMO-  
Gitter).

**Modell-Vorhersagen für den Sonntag, 21. August 2005  
(erster Tag des Hauptereignisses)**

Vorhersagen und Beobachtungen der 24h-Niederschlagssummen für Sonntag, 21. August (06 UTC bis Montag, 22. August 06 UTC) sind in Abbildung 4.3 zusammengestellt.

Die erste Vorhersage, welche den ersten Tag des Hauptereignisses abdeckte, war diejenige vom Freitag, 19. August 12 UTC. Sie stand den Prognostikern und Kunden am Freitag 19. August um 17h zur Verfügung. Die Gebiete mit >100 mm/24 h (dunkelrot) waren schon gut angedeutet (mit einem Maximum von > 160 mm/24 h in der Region Engelberg); das Gebiet mit > 60 mm/24 h war etwas nach SE verschoben.



◀  
**Abb. 4.3**  
Niederschlags-  
summe vom  
21. August 2005  
(06-06 UTC):  
(a)-(d) aus  
aLMO-Vorhersa-  
gen vom  
(a) 19.08.2005  
12 UTC:  
+42..+66h,

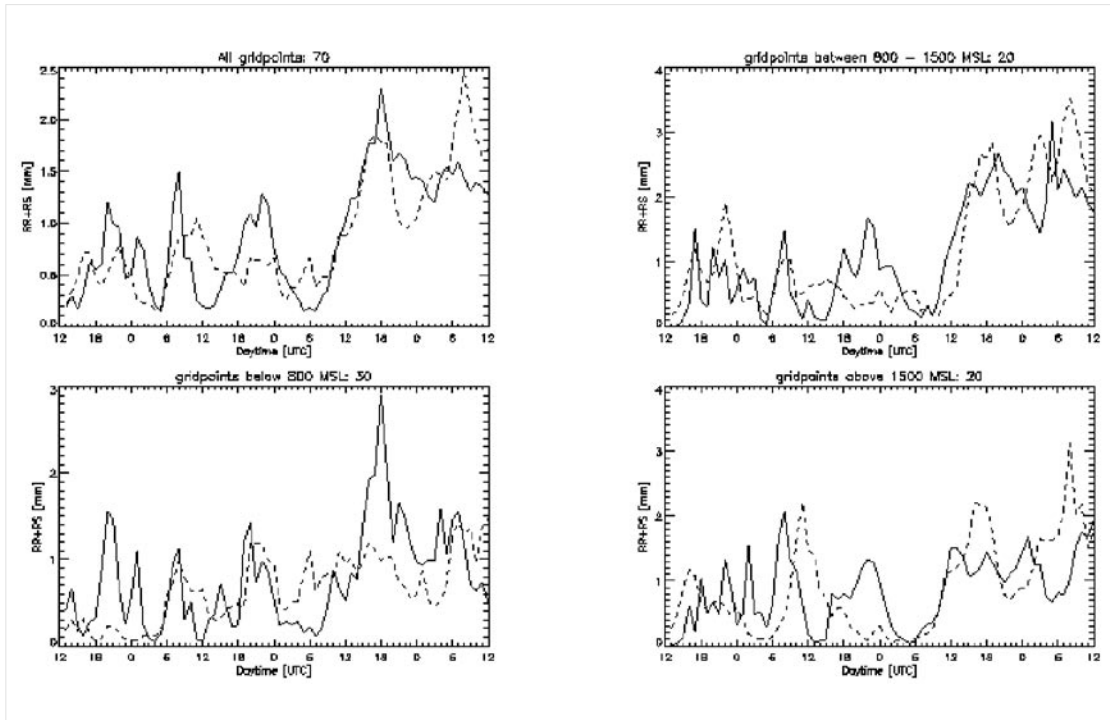
(b) 20.08.2005  
00 UTC:  
+30..+54h,

(c) 20.08.2005 12  
UTC: +18..+42h,

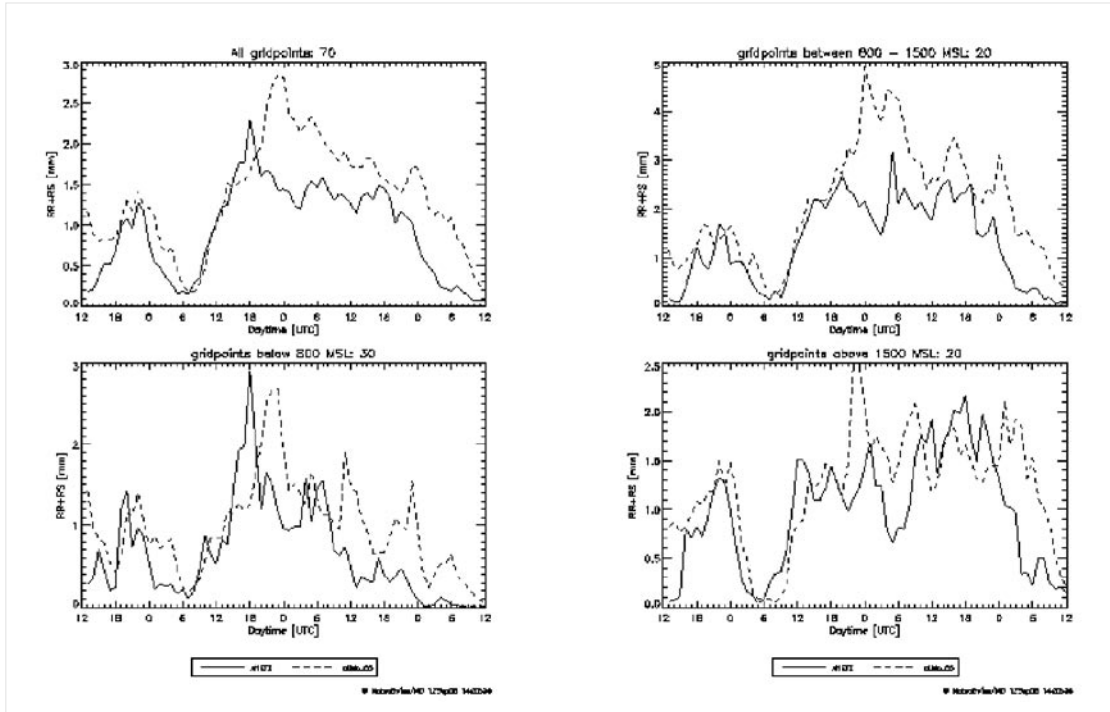
(d) 21.08.2005  
00 UTC:  
+6..+30h;

(e) gegitterte  
Analyse (aLMO-  
Gitter) aus den  
Pluviometer-  
daten.

#### 4 Vorhersage und Warnablauf bei MeteoSchweiz



◀  
**Abb. 4.4**  
 Verlauf des stündlichen Niederschlags (RR+RS = totale Niederschlagssumme) vom 19.08.2005 12 UTC bis 22.08.2005 12 UTC an den 70 Standorten des ANETZ aufgeteilt in (a) alle 70 Stationen, (b) Stationshöhe < 800m, (c) 800-1500m und (d) > 1500m. Ausgezogene Linien: Beobachtungen (ANETZ), gestrichelte Linien: aLMO Vorhersage vom 19.08.05 12 UTC (+0 bis +72 Stunden).



◀  
**Abb. 4.5**  
 Wie Abb. 4.1.1-4, aber für die Periode vom 20.08.05 12 UTC bis 23.08.05 12 UTC. aLMO-Vorhersage vom 20.08.05 12 UTC (0 ..+72 Stunden).



Abbildung 4.4 zeigt den zeitlichen Verlauf des stündlichen Niederschlags dieser Vorhersage: der Beginn der starken Niederschläge ab 21. August Vormittag wurde bereits mit dieser Vorhersage gut erfasst (siehe links oben gemittelt über alle 70 ANETZ-Stationen); an den Gitterpunkten < 800m (links unten) sind die Mengen allerdings noch unterschätzt.

Die zweite Vorhersage, vom Samstag 20. August 2005 00 UTC, hat die Struktur des ganzen Niederschlagbandes mit > 60 mm/24 h noch ein wenig besser vorhergesagt; die Maxima waren korrekt aber die Fläche mit > 100 mm/24 h war etwas zu gross.

Die dritte Vorhersage, vom Samstag 20. August 2005 12 UTC, war recht konsistent mit der vorherigen: gleiche Verteilung der starken Niederschläge (> 100 mm/24 h), aber das Maximum wurde überschätzt. Abbildung 4.5 zeigt den zeitlichen Verlauf des stündlichen Niederschlags für diese Vorhersage: der Einsatz der sehr starken Niederschläge ab Sonntag, 21. August ca. 08 UTC ist sehr gut vorhergesagt worden. Vor

allem aber zeigte diese Vorhersage, dass die starken Niederschläge noch einen weiteren Tag anhalten sollten (siehe auch Abb. 4.7 mit den 48 h-Niederschlagssummen aus dieser Vorhersage).

Die letzte Vorhersage, vom Sonntag 21. August 2005 00 UTC mit der Niederschlagsvorhersage von +6 bis +30 Stunden, war wiederum konsistent mit den beiden vorherigen, aber die Mengen wurden deutlich überschätzt (grosses Gebiet mit > 160 mm/24 h, die in den gegitterten Analysen aus den Pluviometermessungen nicht erscheint).

Zusammengefasst kann man sagen, dass alle aLMO-Vorhersagen die Niederschläge dieses ersten Tages gut erfasst haben: bereits die erste Vorhersage vom Freitag 19. August 12 UTC zeigte ein deutliches Signal für starke Niederschläge am Sonntag 21. August (06 UTC -06 UTC). Ab der nächsten Vorhersage vom Samstag 20. August 00 UTC war die Verteilung korrekt, mit einer Überschätzung, die in der Vorhersage vom Sonntag 21. August 00 UTC ausgeprägter wurde.

## 4 Vorhersage und Warnablauf bei MeteoSchweiz

### Modell-Vorhersagen für den Montag, 22. August 2005 (zweiter Tag des Hauptereignisses)

Vorhersagen und Beobachtungen der 24 h-Niederschlagssummen für Montag, 22. August (06 UTC bis Montag, 22. August 06 UTC) sind in Abbildung 4.6 zusammengestellt. Die hohen Niederschlagssummen (> 100 mm/24 h) betrafen an diesem zweiten Tag ein wesentlich grösseres Gebiet (vom Berner Oberland bis ins Alpstein) als am Tag zuvor.

Die erste Vorhersage, welche diesen Zeitraum abdeckte, war diejenige vom Samstag, 20. August 2005 12 UTC. Sie erfasste das Gebiet mit den höchsten Niederschlagssummen (> 100mm/24 h) geographisch recht gut; eine Überschätzung gab es aber im Unterwallis, Berner Oberland sowie in der Innerschweiz und eine Unterschätzung im Unterengadin. Abbildung 4.5 zeigt, dass der stündliche Niederschlag während der ganzen Dauer der Vorhersage – wenn auch etwas überschätzt - gut erfasst wurde; das Abklingen der Niederschläge am frühen Morgen des 23. August war zeitlich sehr gut.

Die zweite Vorhersage, vom Sonntag 21. August 2005 00 UTC, gab eine etwas bessere geographische Verteilung, die Maxima wurden aber überschätzt.

Die dritte Vorhersage, vom Sonntag 21. August 2005 12 UTC, war in der geographischen Verteilung nochmals besser und die Überschätzung wieder geringer; im Unterengadin waren die Mengen aber weiterhin unterschätzt.

Die letzte Vorhersage, vom Montag 22. August 2005 00 UTC mit der Niederschlagsvorhersage von +6 bis +30 Stunden, war recht konsistent mit der vorherigen: gute geographische Verteilung.

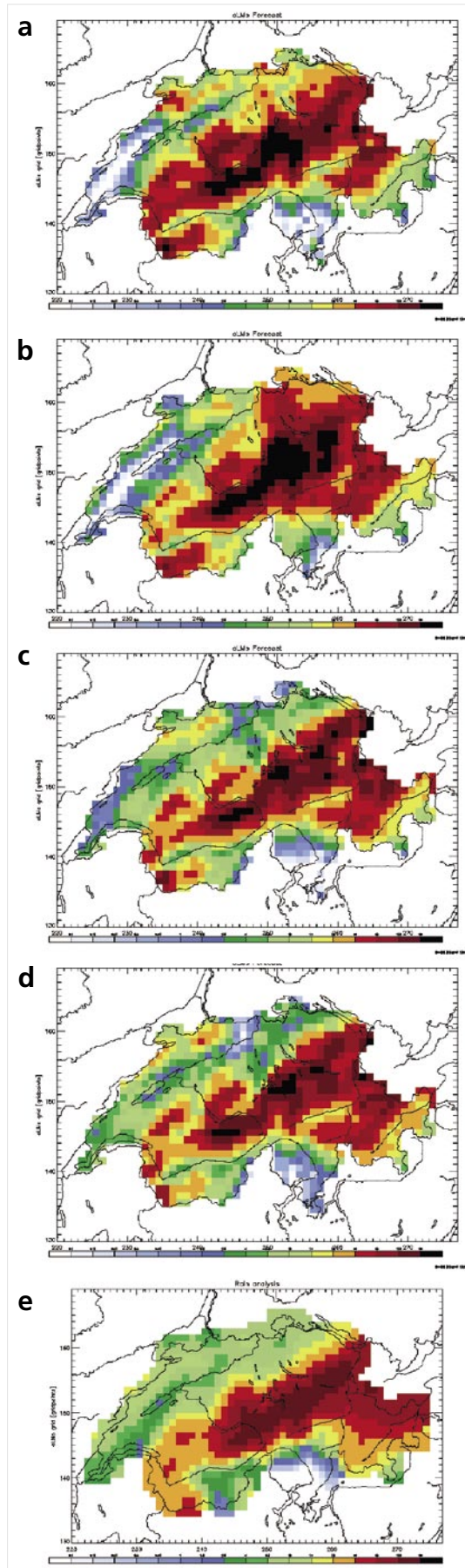


Abb. 4.6 Niederschlags-summe vom 22. August 2005 (06-06 UTC): (a)-(d) aus aLMo-Vorhersagen vom

(a) 20.08.2005 12 UTC: +42..+66h,

(b) 21.08.2005 00 UTC: +30..+54h,

(c) 21.08.2005 12 UTC: +18..+42h,

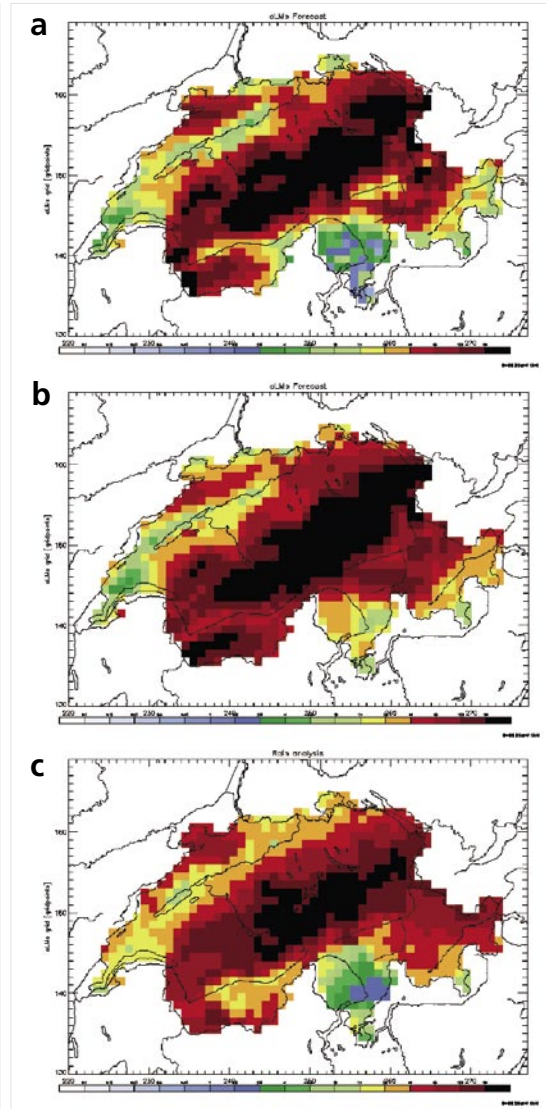
(d) 22.08.2005 00 UTC: +6..+30h;

(e) gegitterte Analyse (aLMo-Gitter) aus den Pluviometerdaten.

**Modell-Vorhersagen für die beiden Tage vom Sonntag 21. und Montag, 22. August 2005 (beide Tage des Hauptereignisses)**

Abbildung 4.7 zeigt den Vergleich der 48h-Niederschlagssummen vom Sonntag, 21. August 2006 UTC bis Dienstag 22. August 2006 UTC zwischen den beiden aLMO-Vorhersagen, welche diesen Zeitraum abdecken mit den Beobachtungen des Pluviometermessnetzes auf dem Gitter des aLMO. Diese 48h-Periode war in beiden Vorhersagen gut erfasst: das Maximum lag korrekt über der Innerschweiz, die Westschweiz (vom Genfersee bis Murtensee) hatte relativ wenig Niederschlag (20 mm/48h) und das Tessin noch weniger (10 mm/48 h). Einzig im Engadin waren die Niederschläge in der ersten Vorhersage (20. August 2005 12 UTC) deutlich unterschätzt.

Wenn man den zeitlichen Verlauf aus Abb. 4.5 miteinbezieht, ist ersichtlich, dass sowohl die Fläche mit den stärksten Niederschlägen (> 160 mm/48 h) wie auch der Zeitpunkt des Eintreffens, die Dauer des Ereignisses und das Abklingen der Niederschläge am frühen Vormittag des 23. August 2005 mit den Niederschlags-Vorhersagen des aLMO gut vorhergesagt wurden.



◀  
**Abb. 4.7**  
**48h-Niederschlagssumme vom 21. August 2005 06 UTC bis 23. August 2005 06 UTC:**  
**(a)-(b) aus aLMO-Vorhersagen vom**  
**(a) 20.08.2005 12 UTC:**  
**+18..+66h,**  
**(b) 21.08.2005 00 UTC:**  
**+ 6..+54h;**

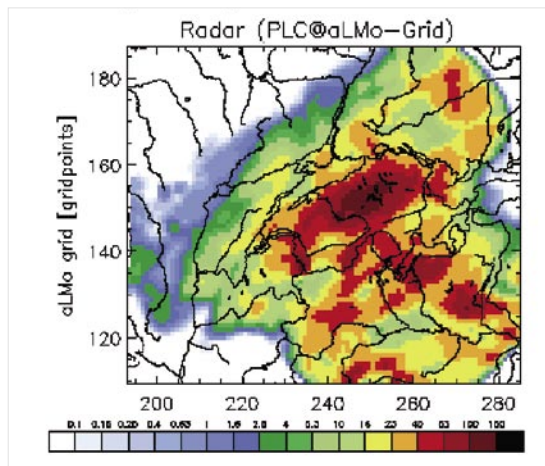
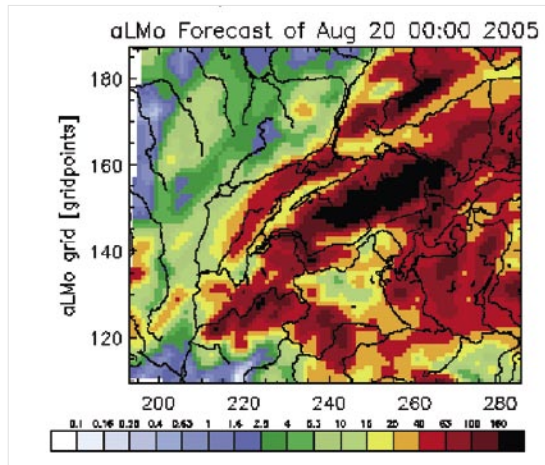
**(c) gegitterte Analyse (aLMO-Gitter) aus den Pluviometerdaten.**

#### 4 Vorhersage und Warnablauf bei MeteoSchweiz

##### Vergleich der 72h-Niederschlagssummen des Modells mit dem Radar und ‚Scores‘ der objektiven Verifikation mit dem ANETZ

Abb. 4.8 zeigt die 72 h Niederschlagssumme (20.08.2005, 00 UTC bis 23.08.2005 00 UTC) von aLMo (links: Vorhersage vom 20.08.05 00 UTC) im Vergleich zum Radarkomposit (rechts). Man beachte, dass das Radar den Niederschlag nur über der Schweiz und dem nahen Ausland wiedergeben kann (darum die weissen Gebiete am Rand). Mit einem Maximum in Form eines Bandes vom Thunersee, Innerschweiz bis in die Nordostschweiz hat das aLMo den Niederschlag korrekt positioniert, aber etwas überschätzt.

Die objektive Verifikation mit dem ANETZ über alle Vorhersagen vom 19.–22. August 2005 ergab für die schwachen und mittelstarken Niederschläge (2 mm/6 h und 10 mm/6 h) nur eine geringfügige Überschätzung von 10–20% auf allen Höhenstufen. Einzig die sehr starken Niederschläge (>30 mm/6 h) wurden deutlicher überschätzt: an den Standorten der ANETZ-Stationen unterhalb 800m mit ca. 30% und an den höher gelegenen Stationen der Voralpen und Alpen bis zu einem Faktor 2.



◀  
Abb. 4.8  
72 h-Summe des  
Niederschlags  
vom 20.08.05,  
00 UTC bis  
23.08.05, 00 UTC  
aus der aLMo-  
Vorhersage  
(oben) und der  
Beobachtung  
(Radarkomposit,  
unten).



#### 4.1.2 Vorhersage durch externe Modelle (ECMWF, GME, GFS)

Bereits mehrere Tage vor dem Unwetter vermuteten die Prognostiker von Meteo Zürich, dass sich auf das Wochenende vom 20. und 21. August 2005 eine niederschlagsträchtige Wetterlage anbahnte. Es war aber über mehrere Tage unklar, welche Zugbahn das sich absplattende Tief einschlagen würde.

Am 19.8. stand die synoptische Entwicklung weitgehend fest, und im Nachhinein darf festgestellt werden, dass die Vorhersagekarten für die ganze Dauer des Ereignisses sehr gut stimmten. So wich beim ECMWF (Europäisches Modell) beispielsweise das Geopotential auf 500 hPa, prognostiziert am Freitag 12 UTC für Montag 12 UTC nur um 1 dam vom effektiven Wert ab, ebenso die Schichtdicke. Bezüglich Gestalt und Position des Höhentiefs stimmten die Prognosekarten fast perfekt. Auch die andern Modelle bestätigten den Charakter der anstehenden Entwicklung.

Die Niederschlagsprognosen gaben allerdings überhaupt nicht genügende Hinweise auf das, was da kommen sollte. Insbesondere das ECMWF zeigte deutlich zu tiefe Werte. Beispielsweise lag die Prognose vom 20. 00 UTC für den Tageswert des 21. August fast um die Hälfte zu tief. Frühere Verifizierungen hatten indessen dem ECMWF relativ gute Noten für die Niederschlagsprognose gegeben. Das GME des DWD ander-

seits zeigte von Tag zu Tag grosse Schwankungen. Die Regensmengen des GFS (USA-Wetterdienst) lagen nicht quantitativ vor.

Das aLMo (hoch aufgelöstes Modell der MeteoSchweiz, siehe Abschnitt 4.1.1) lag damit – wie natürlich erst im Nachhinein klar wurde – deutlich näher an den tatsächlich beobachteten Niederschlagsmengen. Es wäre im Prognosedienst jedoch sehr unüblich, auf ein einzelnes Modell zu setzen, das zudem am Rande der ganzen Familie der Modelle liegt. In der Regel gibt man dem Mittelwert der Niederschlagsmengen der zur Verfügung stehenden Modelle die höchste Eintretenswahrscheinlichkeit.

Die nachfolgende Aufstellung (Tab. 4.1) zeigt die modellgestützten und approximativ flächig gemittelten Niederschlagswerte, wie sie am Samstag Vormittag im Prognosedienst vorlagen.

Qualitativ und synoptisch hatten also die Modelle die Entwicklung bereits mehrere Tage im Voraus gut im Griff.

Quantitativ herrschte aber bis am Sonntag mittag (21. August) grössere Unsicherheit. Es konnte einigermaßen verlässlich vorausgesagt werden, dass starker Niederschlag bevorstand, aber die Zuordnung der Zeitabschnitte und Regionen mit kritischen Niederschlägen (50 oder 100 mm) war nicht möglich.

| Basis 19.08.2005    | Modell | Deutschschweiz | Westschweiz | Südschweiz |
|---------------------|--------|----------------|-------------|------------|
| Für Samstag, 19.08. | ALMo   | 25             | 12          | 18         |
|                     | ECMWF  | 20             | 15          | 10         |
|                     | GME    | 15             | 15          | 10         |
| Für Sonntag, 20.08. | ALMo   | 30             | 30          | 4          |
|                     | ECMWF  | 20             | 12          | 4          |
|                     | GME    | 15             | 20          | 12         |
| Für Montag, 21.08.  | ALMo   | 90             | 30          | 8          |
|                     | ECMWF  | 25             | 15          | 3          |
|                     | GME    | 20             | 15          | 8          |
| Für Dienstag 22.08. | ALMo   | -              | -           | -          |
|                     | ECMWF  | 12             | 6           | 0          |
|                     | GME    | 20             | 4           | 4          |

▲  
**Tabelle 4.1: Niederschlagsvorhersagen verschiedener Modelle gemittelt über die Gebiete Deutsch-, West- und Südschweiz (in mm/24h), die am Samstag, 19.8.05 vorlagen; aLMo: hoch aufgelöstes regionales Modell der MeteoSchweiz, ECMWF: globales Modell des europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage, GME: globales Modell des Deutschen Wetterdienstes.**

## 4 Vorhersage und Warnablauf bei MeteoSchweiz

### 4.1.3 COSMO-LEPS

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. Diese Prognosen stehen den Prognostikern jeweils um ca. 1 UTC zur Verfügung. In der probabilistischen Vorhersage werden mehrere Modell-Läufe mit leicht unterschiedlichen Anfangsbedingungen gerechnet, die eine Interpretation der Wahrscheinlichkeit der zu erwartenden Entwicklung erlauben. Da COSMO-LEPS für eine Vorhersageperiode von 3–5 Tagen entwickelt wurde, konzentriert sich die folgende Analyse auf diesen Zeitraum.

#### Vorhersage vom 18. 8. 2005

Abbildung 4.9 zeigt die COSMO-LEPS Vorhersage vom Donnerstag, 18. 8. 2005 12 UTC für Niederschlag von Samstag 06 UTC bis Dienstag 06 UTC. Dargestellt sind für vier verschiedene Grenzwerte die Wahrscheinlichkeiten, mit welcher die 72-stündige Niederschlagssumme überschritten wird. Diese Vorhersage zeigt Wahrscheinlichkeiten bis 60 % für Niederschlag grösser als 100 mm in den Voralpen und im West-Tessin. Niederschlagsmengen über 150 mm wurden für weite Teile der Schweiz mit nur geringen Wahrscheinlichkeiten prognostiziert mit den höchsten Werten (über 40 %) im West-Tessin. COSMO-LEPS prognostizierte somit schon frühzeitig eine potentielle Gefahr eines extremen Niederschlagsereignisses, aber mit einer eher höheren Wahrscheinlichkeit für die Südalpen als für den Alpennordrand.

#### Vorhersage vom 19. 8. 2005

Die Vorhersage vom darauf folgenden Tag für die gleiche Vorhersageperiode ist in Abb. 4.10 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. Zudem wird auch ein Szenario mit Summen über 250 mm in Teilen dieser Gebiete mit einer Eintretenswahrscheinlichkeit von 20–30% vorhergesagt. Ein Vergleich dieser Vorhersage mit den erstellten Niederschlagsanalysen (siehe Abb. 3.5) zeigt, dass Regionen in welchen Niederschläge über 100 mm gemessen wurden, sehr gut mit denjenigen Regionen korrelieren, für welche die höchsten Wahrscheinlichkeiten (hier über 60 %) für Summen über 100 mm vorhergesagt wurden. Dies gilt – allerdings mit tieferen Wahrscheinlichkeiten – ziemlich gut auch für die beiden Schwellwerte 150 mm und 250 mm.

Insgesamt haben die COSMO-LEPS Vorhersagen gut vor dem Ereignis gewarnt. Ab der Vorhersage vom Freitag 19. 8. 2005 12 UTC wurde eine hohe Eintretenswahrscheinlichkeit für sehr grosse Niederschlagsmengen für einen Grossteil der betroffenen Gebiete prognostiziert, ohne für die nicht betroffenen Gebiete fälschlicherweise einen Warnhinweis zu geben.

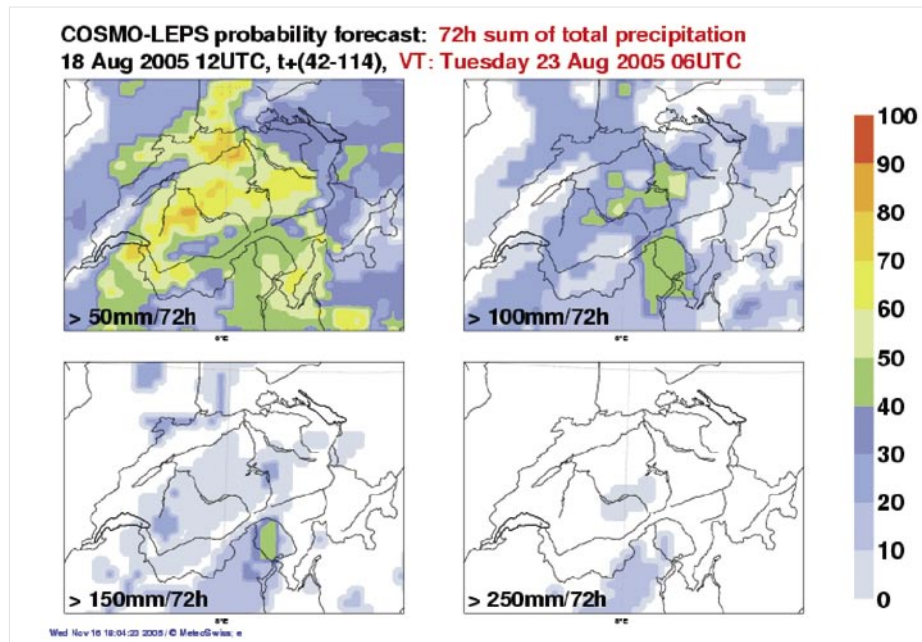


Abb. 4.9  
72 h-Summe des Niederschlags vom 20.08.05, 00 UTC bis 23.08.05, 00 UTC aus der aLMO-Vorhersage (links) und der Beobachtung (Radarkomposit, rechts).

#### 4.1.4 Operationelle Vorhersagen durch Meteo-Schweiz

Aufgrund der numerischen Prognosekarten kam man am Mittwoch, 17.8., zum Schluss, dass ein feuchtes Wochenende bevorstand. In den «mittelfristigen Aussichten» hiess es: Von Freitag bis Sonntag veränderlich und zeitweise Regenschauer, in den Alpen zum Teil auch häufig. Am Montag im Norden stark bewölkt und besonders im Osten häufig Regen.

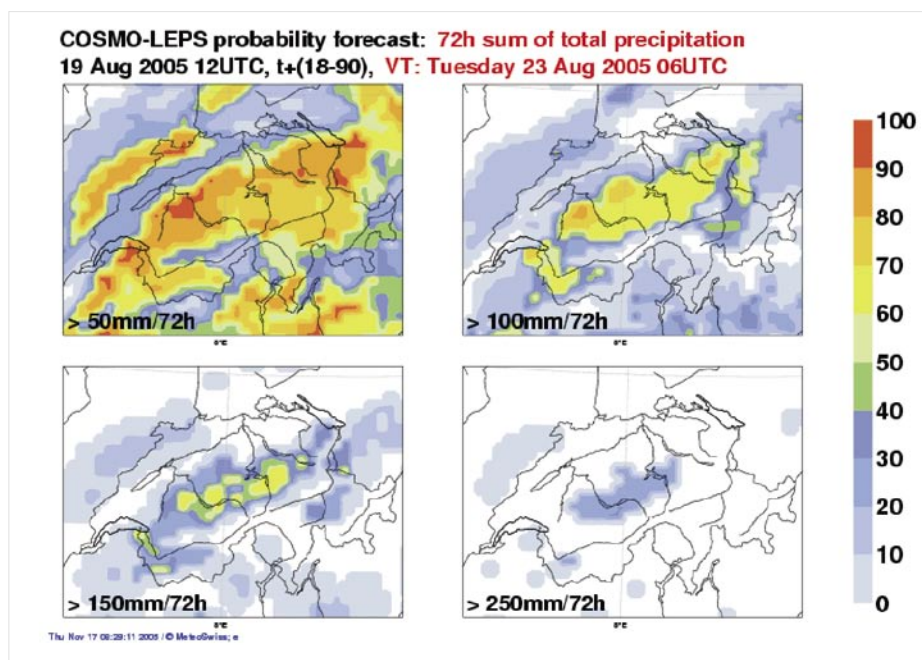
In der tabellarischen Niederschlagsprognose wurde für Montag für die Region Ost (ANETZ Station Säntis) die Klasse 4 gegeben, was mindestens 18 mm Niederschlag bedeutet.

Am 18.8. wurde der angeführte Befund bestätigt, und am 19.8. wagte man, quantitative Hinweise zum bevorstehenden Regenwetter bekannt zu geben. Im Spezialwetterbericht wurde erwähnt, dass von Samstag bis Montag 50–100 mm Regen erwartet würden. Auch wurde erwähnt, dass die Wetterbesserung im Westen am Dienstag, im Osten am Mittwoch einsetzen sollte.

Aufgrund dieser erwarteten Entwicklung wurde täglich mehrmals beraten, ob eine Unwetterwarnung nötig sei oder nicht. Am ehesten dachte man, für Montag bestünde erhöhte Gefahr für die Region Ost. Bis und mit Samstag, 20. August, ging man davon aus, dass die Bedingungen für eine Warnung nicht erfüllt seien.

Im Spezialwetterbericht wurde am Samstag erneut ein Hinweis auf starken Regen gegeben: Lokal werden von Samstag bis Montag wahrscheinlich über 100 Liter pro Quadratmeter erreicht.

Auch wenn starke Niederschläge prognostiziert wurden, so hätte man nicht voraussehen können, dass ein Rekordereignis bevorstand. Die Aufmerksamkeit war aber bei allen Beteiligten merklich erhöht, und es wurden laufend gezielte Untersuchungen angestellt, seien es Analysen zur quantitativen Niederschlagsprognose oder die Suche nach Analogfällen.



←  
Abb. 4.10  
Wie Abb. 5.1.1  
aber für die  
COSMO-LEPS  
Vorhersage  
vom 19.8.2005  
12 UTC.

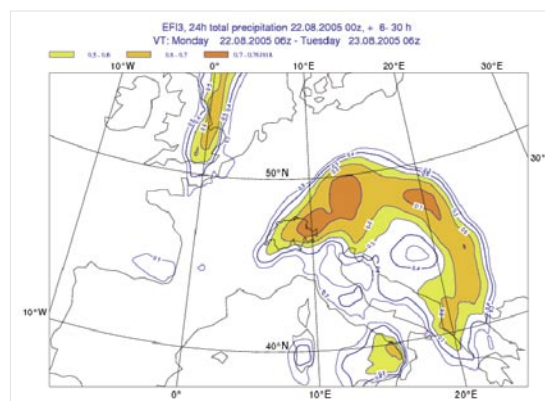
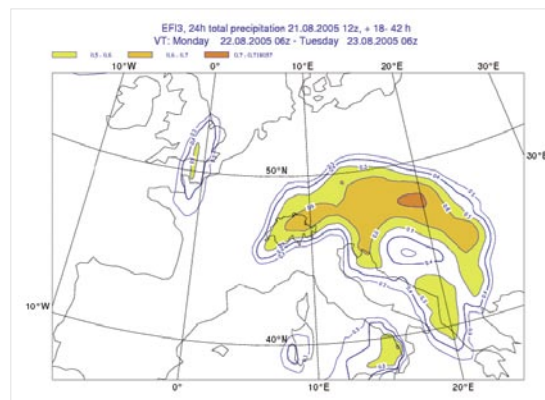
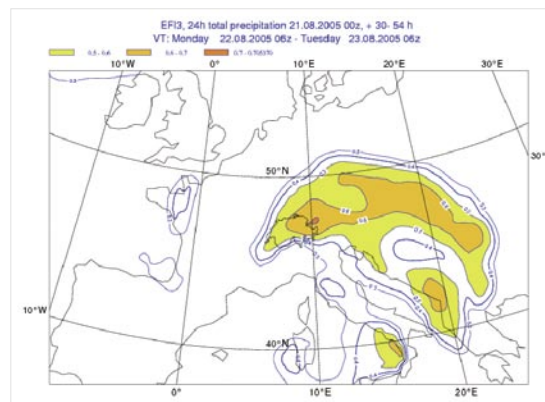
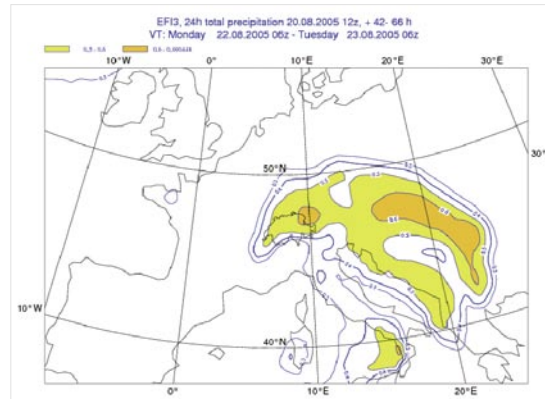
## 4 Vorhersage und Warnablauf bei MeteoSchweiz

### 4.1.5 Extreme Forecast Index, EFI

Das Europäische Zentrum für Mittelfristvorhersage (ECMWF) rechnet täglich eine Ensemble-Vorhersage. Aufgrund von Resultaten im Zusammenhang mit dieser Ensemble-Prognose wurde dort der so genannte Index für extreme Vorhersagen (Extreme Forecast Index, EFI) entwickelt (Lalurette 2002). Er beruht auf der Tatsache, dass das Ensemble-Model die extremen Ereignisse (in Bezug auf Niederschlag, Wind,...) systematisch und stark unterschätzt. Dies ist zu einem beträchtlichen Teil so, weil Modell-Auflösung und -Physik für solche Ereignisse nicht optimiert sind. Auch wenn die grossräumige Druckverteilung «richtig» vorhergesagt wird, können deshalb Böenspitzen oder Niederschlagsmaxima weit unterschätzt sein.

Um diesem Problem zu begegnen, wird die Ausserordentlichkeit eines (vorhergesagten) Ereignisses nicht nur an seiner absoluten Charakteristik gemessen, sondern ebenfalls an derjenigen in der «Modellwelt». Es wird also nicht nur ein Ereignis, das in der realen Welt als ausserordentlich gelten würde (z.B. mehr als 100 mm Niederschlag in 24 h) als solches erkannt, sondern eben auch eines, das in der Modellwelt sehr selten ist. Dazu wird zunächst eine Klimatologie des Modells erhoben. Jede Ensemble-Prognose wird dann mit dieser Klimatologie verglichen und ein Index (EFI) wird berechnet. Ein Betrag von 1 bedeutet, dass das vorhergesagte Ereignis in diesem Modell (an diesem Ort) noch nie erreicht wurde. Indizes, die 0.7 überschreiten, stellen seltene Ereignisse dar und lösen automatisch eine Mitteilung an die Prognosezentren der MeteoSchweiz aus.

Abbildung 4.11 zeigt die räumliche Verteilung des EFI für die Niederschlagssumme in der Vorhersageperiode Montag, 22.8.05, 0600 bis Dienstag 23.8.05, 0600 (24 h-Niederschlag) für verschiedene Modell-Läufe. Schon in der Simulation von Freitag, 19. August, ist der EFI grossflächig über 0.7 geklettert. Die betroffene Zone variierte jedoch mit jedem weiteren Lauf des Modells (Abb. 4.11): Werte über 0.7 finden sich jeweils in Teilen des Schweizer Mittellands, aber auch im Vorarlberg oder in Bayern. Es konnte daraus geschlossen werden, dass wesentliche Niederschlagsmengen nördlich der Alpen fallen würden, aber die präzise örtliche Zuordnung wurde erst sehr spät möglich. Die EFI-Karte der Simulation vom 22. August (Abb. 4.11d) zeigt hohe Werte des Index in einem ähnlichen «Band», das sich vom schweizerischen Mittelland nach Nordosten erstreckt, wie die Messungen später gezeigt haben (vgl. Abbildung im Kasten «Überregionales Ereignis», S. 23).



◀ **Abb. 4.11**  
Räumliche Verteilung des EFI für die Niederschlagssumme in der Vorhersageperiode Montag, 22.8.05, 0600 bis Dienstag 23.8.05, 0600 (24 h-Niederschlag) für die Simulation von a) 20.8.2005, 1200 UTC,

b) 21.8.2005, 0000 UTC ,

c) 21.8.2005, 1200 UTC und

d) 22.8.2005, 0000 UTC.



## 4.2 Operationelle Warnungen der MeteoSchweiz

MeteoSchweiz hat im Jahr 2000 mit den kantonalen Behörden abgesprochen, unter welchen Bedingungen vor Unwettern zu warnen sei. Dabei ist festgelegt worden, dass als Warnkriterium 50 mm Niederschlag in 24 Stunden zu verwenden sei. Eine Zusammenstellung der verschiedenen, heute gültigen Warnstufen und Kriterien, findet sich im Anhang.

Am Sonntag, 21. August, entschied man sich nach längeren Gesprächen anlässlich der routinemässigen Telefonkonferenz zwischen Zürich, Genf und Locarno, eine Unwetterwarnung zu erstellen. Die Warnung hatte folgenden Inhalt:

*Ausgabe vom 21.8.05, 11:12 Uhr  
Starkniederschläge, Gefahrenstufe 1  
Zeitpunkt von Sonntag 12:00 bis Dienstag 06:00 Uhr*

*Region ganzer Alpennordhang sowie nördlich angrenzende Gebiete: Kantone AI, AR, BE, GL, GR, LU, NW, OW, SG, SZ, UR, ZG, ZH*

*Nähere Angaben: Am Sonntag Nachmittag stellt sich allmählich eine Nordstaulage ein, damit verbunden sind anhaltende und ergiebige Niederschläge. Bis am Dienstag Morgen werden am Alpennordhang verbreitet 80–100 mm Niederschlag erwartet. Die intensivste Phase dürfte sich im Zeitraum von Sonntag Abend bis Montag Abend abspielen und Niederschlagsmengen von 50–70 mm bringen. Da die Schneefallgrenze im Bereich von 2'500–3'000 Meter liegt, gelangt der grösste Teil des Niederschlags zum Abfluss.  
Nächstes Bulletin Montag, 22.8.05, 08:00 Uhr*

Diese Warnung (vorerst nur für die Deutschschweiz) wurde auf dem üblichen Weg via Nationale Alarmzentrale, NAZ, auf dem geschützten System VULPUS an die Kantone versandt. Wenig später wurde vorschriftsgemäss eine Unwetterinformation mit ähnlichem Inhalt erstellt. Diese geht an die Öffentlichkeit und wird auch auf der Homepage von MeteoSchweiz dargestellt.

Am gleichen Abend wurden auch noch die Kantone Freiburg und Waadt durch MeteoGenève gewarnt.

Die 2. Warnung erfolgte am Montag, 22.8.05 um 07:58 Uhr. Es wurde erwähnt, dass zum Teil schon über 100 mm Regen gefallen sind. Weitere Regenfälle mit bis zu 70 mm würden noch bevorstehen, eine Entlastung sei auf Dienstag in Sicht. Die Gefahrenstufe wurde auf 2 erhöht, was «grosses Risiko» und «zusätzliche Mittel/Mannschaften nötig (z.B. Zivilschutz)» bedeutet.

Die 3. Warnung wurde am Montag um 19:01 Uhr verbreitet. Der Inhalt blieb sehr ähnlich. Wesentlich war sicher auch der Hinweis, dass die Schneefallgrenze auf rund 3'000 Metern verharren solle.

Die 4. Warnung erfolgte am Dienstag, 23.8. um 08:26 Uhr. Es wurden nur noch die Kantone AI, AR, GL, GR; SG erwähnt. Aber auch hier sollen die Niederschläge nachlassen. Die übrigen Kantone wurden entwarnt.

Am Abend dieses Tages wurden auch die Ostschweizer Kantone entwarnt.

Aus heutiger Sicht darf sicher festgehalten werden, dass früher und energischer hätte gewarnt werden sollen:

- bereits am Samstag 20.8. wäre eine Frühwarnung sinnvoll gewesen;
- am Sonntag hätte man auf die Gefahrenstufe 2 gehen sollen;
- und schliesslich hätte man bereits am Dienstag Morgen alle Gebiete entwarnen können.

Insgesamt darf aber festgehalten werden, dass die Warnungen für die meisten Interventionsorgane von grossem Nutzen waren. Von Seiten der Kantone ist denn auch die Tätigkeit der MeteoSchweiz mehrfach positiv erwähnt worden. Dennoch sind diverse Verbesserungen ins Auge zu fassen (s. Kap.6).

In gewissen Medien wurde recht harsche Kritik über die Warnungen der MeteoSchweiz laut. Wie die obigen Ausführungen zeigen, war diese allerdings weder in Ausmass noch Substanz gerechtfertigt und scheint vor allem auf die ‚reisserische Schlagzeile‘ gezielt zu haben.

# Vergleichbare Starkniederschläge in der Vergangenheit

Stephan Bader, Christoph Frei,  
Christof Appenzeller, Patrick Hächler

## 5.1 Einleitung

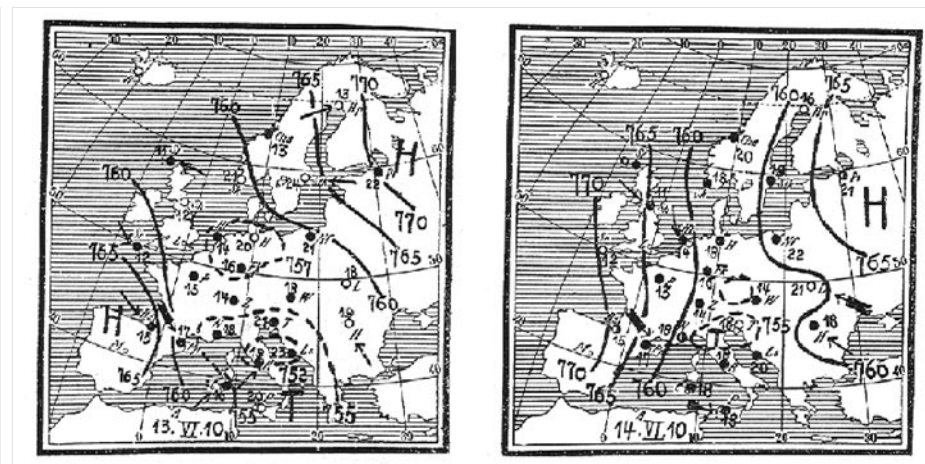
Über die Jahrhunderte betrachtet sind massive Unwetter mit weit reichenden Hochwasserfolgen ein fester Bestandteil des Klimas der Schweiz. Periodisch können solche Ereignisse auch gehäuft auftreten, was durch klimahistorische Analysen (Röthlisberger 1991, Pfister 1998, Pfister 1999), aber auch durch die bis ins 19. Jahrhundert zurück reichenden Niederschlagsmessreihen der MeteoSchweiz gut dokumentiert ist (Bader und Bantle 2004; Hegg und Vogt 2005). Ob dahinter eine systematische Variation der Ereigniswahrscheinlichkeit steckt oder es sich dabei lediglich um eine zufällige Anhäufung von Ereignissen handelt, kann aufgrund der Seltenheit der Ereignisse nicht beantwortet werden (Frei und Schär, 2001).

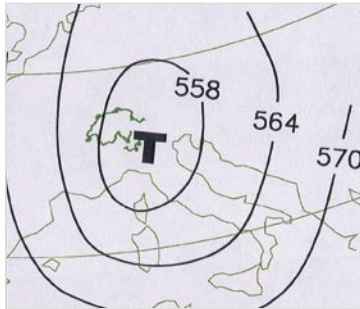
Extremniederschlagsereignisse, welche in ausgedehnten Gebieten zu grossen Niederschlagssummen und Schäden führen, haben in den meisten Fällen einen individuellen Charakter. Als wesentliche Gemeinsamkeit ist anzuführen, dass sie im Alpenraum primär durch Advektion verursacht werden, das heisst durch quasi-horizontales Aufgleiten einer feuchten Luftmasse in der freien Atmosphäre oder am Gebirge. Typisch sind dann grossflächige Dauerniederschläge über mehrere

Tage pro System mit Extremwerten in den Tagessummen in der Grössenordnung von ~250 mm nordalpin und ~400 mm südalpin (vgl. Kapitel 3.5). Überlagerungen von konvektiver und advektiver Hebung sind vor allem südlich des Alpenkammes häufig und erklären dort die grossen Tagessummen. Die Orographie kann hier wesentlich zur Auslösung der Konvektion beitragen. Extreme Dauerniederschläge entstehen auf der Alpensüdeite deshalb meist bei südlichen Anströmungsrichtungen auf der Vorderseite von Höhenträgen (Grebner 1996, Massacand et al. 1998, Buzzi und Foschini 2000).

Extremniederschläge auf der Alpennordseite können hingegen bei verschiedenen Strömungslagen zustande kommen und sind somit weniger an systematisch wiederkehrende Bedingungen gebunden. Die erforderlichen extremen 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 (vgl. Grebner 1996, Rudolf und 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 streng vergleichbar sind mit dem August-Unwetter 2005.

►  
Abb. 5.1  
Isobarenkarten  
vom 13. Juni  
1910 (links) und  
vom 14. Juni  
1910 (rechts).  
Quelle: Schweiz.  
Meteorologi-  
sche Zentralan-  
stalt 1910.





◀ **Abb. 5.2**  
**Approximativ rekonstruierte Höhenwetterkarte auf 500 hPa vom 14.6.1910, 08 MEZ. Die Schweiz liegt nahe dem Kern des Höhentiefs.**

## 5.2 Hochwasser bei ähnlicher synoptischer Lage

Für die nachfolgenden Vergleiche werden die vier Fälle Mai 1999, Juli 1977, Juli 1987 und Juni 1910 herangezogen, welche speziell für die Schweiz bedeutsam waren. Synoptisch sehr ähnlich verliefen jedoch auch die beiden unmittelbar sich folgenden, nicht weit zurückliegenden Unwetter in der ersten Augushälfte 2002. Sie führten in Deutschland, Österreich und Tschechien zu katastrophalen Hochwassern (Elbe-Jahrhunderthochwasser). Die Schweiz war von diesen nur am Rande betroffen, aber das nahe Ausland umso mehr. In diesem Sinne handelt es sich für die Schweiz um keinen Vergleichsfall, der jedoch aufgrund seiner ähnlichen synoptischen Lage kurz gestreift wird. Ein ausführlicher Bericht, auch als Internet-Version, ist verfügbar (Rudolf und Rapp, 2002).

### 5.2.1 Das Unwetter vom Juni 1910

Ein besonders ähnlicher Vergleichsfall zum August-Unwetter 2005 bezüglich Witterungsentwicklung und Niederschlagsverteilung ist das Juni-Unwetter aus dem Jahre 1910. Wesentliche Unterschiede zeigen sich jedoch in der Vorgeschichte als mitbeteiligter Faktor bei der Hochwasserauslösung und in der Dauer intensiver Niederschläge.

In den ersten Tagen des Juni 1910 herrschte über der Schweiz weitgehend sonniges und warmes Wetter mit vereinzelt Gewitterregen. Anschliessend lag über Westeuropa zunächst ein flaches, aber umfangreiches Tiefdruckgebiet, welches am 9. und 10. Juni zuerst im Norden, dann im ganzen Land Gewitterregen brachte. Auch am 11. und 12. Juni fielen auf der Nordseite mässige Niederschläge.

Am 13. Juni entwickelte sich über Mittelitalien ein Tiefdruckgebiet, welches sich anschliessend Richtung Norden bewegte (Abb. 5.1). Am 14. Juni lag das Tief über Norditalien (siehe die approximativ rekonstruierte Höhenwetterkarte, Abb. 5.2) und auf der Alpennordseite stellte sich eine kräftige und anhaltende Nordostströmung ein (Schweizerische Meteorologische Zentralanstalt 1910). Aufgrund der vorhandenen Aufzeichnungen ist zu vermuten, dass feuchte Warmluft im Einflussbereich des Tiefs angehoben wurde und zudem durch Nordstau-effekte ausgepresst wurde. In der Zentral- und Ostschweiz regnete es am 14. Juni ohne Unterbruch ausgiebig, wobei die Intensität gegen Abend wolkenbruchartig wurde. Auf dem Gebiet der Schweiz gingen etwa zwei Drittel der Tagessumme in der Nacht vom 14. zum 15. Juni nieder, wie sich aus einzelnen aus der damaligen Zeit verfügbaren Zwischenmessungen folgern lässt (Schweizerische Meteorologische Zentralanstalt 1910).

Ein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Ereignissen Juni 1910 und August 2005 besteht darin, dass im Fall 1910 der Niederschlag vor allem während eines Niederschlags-Tags innerhalb von rund 24 Stunden fiel (der konventionelle Niederschlagstag erstreckt sich von der Morgenablesung bis zur Morgenablesung des Folgetags), während im Fall vom August 2005 in weiten Gebieten zwei Tage mit intensivem Niederschlag folgten (Abb. 5.3).

Im Juni 1910 fielen die grössten Niederschlagsmengen entlang des zentralen und östlichen Alpennordhangs, wie die Niederschlagsanalyse (basierend auf 169 digital verfügbaren Stationswerten) und die damalige händische Auswertung in guter Übereinstimmung zeigen (Abb. 5.3, zu vergleichen mit Abbildung 3.4).

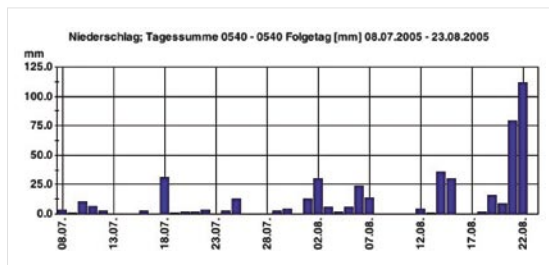
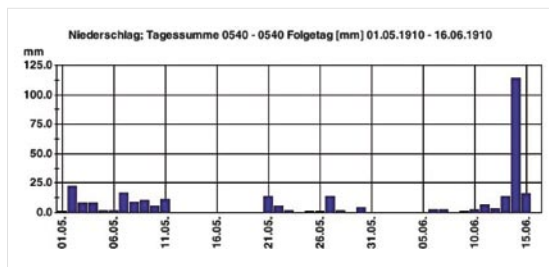
Im Osten der Schweiz, am Übergang zu Österreich, haben die intensiven Niederschläge gemäss einer Pluviographen-Messung aus dem Vorarlberg am Vormittag um etwa 10 Uhr des 14. Juni 1910 eingesetzt mit Stundensummen zwischen 10 und 12 mm. Ab Mittag des 14. Juni bis 06.00 Uhr des 15. Juni 1910 lagen die Stundensummen zwischen 8 und 16 mm.

## 5 Vergleichbare Starkniederschläge in der Vergangenheit

Danach gingen die Werte rasch zurück. Im Durchschnitt lagen die Stundensummen bei rund 11 mm (Schweizerische Meteorologische Zentralanstalt 1910). Aus der Schweiz sind von diesem Ereignis keine Aufzeichnungen in Stundenauflösung verfügbar.

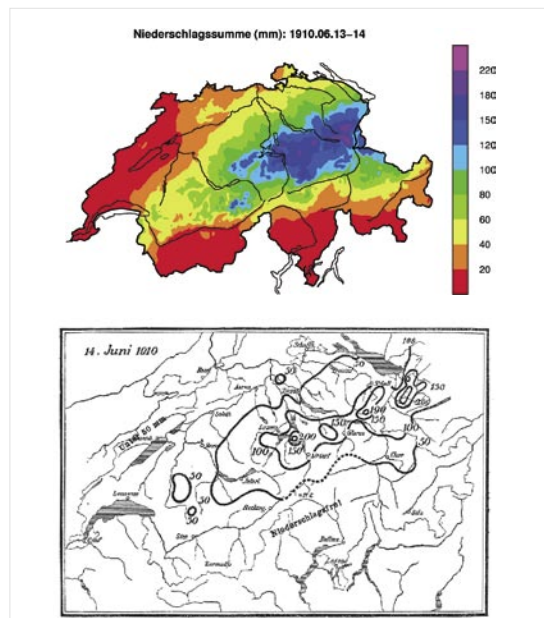
Bezüglich Vorgeschichte zeigen die beiden Ereignisse Juni 1910 und August 2005 ganz unterschiedliche Charakteristiken, welche jedoch die gleichen Folgen nach sich zogen. In den ersten 10 Tagen des Juni 1910 verursachten hohe Temperaturen eine massive Schneeschmelze in den Alpen. Auf dem Säntis schmolzen in dieser Zeit 132 cm Schnee und die Schneegrenze verschob sich vom 6. Juni bis zum 16. Juni 1910 von 1'500 m auf 1'700 m (Schweizerische Meteorologische

Zentralanstalt 1910). Dem Unwetterereignis Ende August 2005 gingen sehr nasse Wochen voraus, wie dies in Kapitel 3.3 bereits diskutiert wurde. Es fielen vorgängig verbreitet Niederschlagssummen in der Grössenordnung von etwa 75% der üblichen Augustmengen. Beide Situationen, die enorme Schneeschmelze 1910 und der sehr nasse August 2005, führten somit bereits vor dem eigentlichen Starkniederschlagsereignis zu hohen Pegelwerten bzw. Abflüssen in den Gerinnen und – im Falle vom August 2005 – zu hohen Bodefeuchten. Die Regenfluten der nachfolgenden Unwetter fielen damit in eine hydrologisch vorbelastete Situation, in der das Wasser schnell abfloss und Bäche und Flüsse innert kurzer Frist auf Rekordmarken anschwellen liess.



▲ **Abb. 5.3**

Entwicklung der Tagesniederschläge am Beispiel der Messstation Engelberg während des Unwetters 1910 (oben) und jenem vom August 2005 (unten) sowie jeweils in der Zeit davor.



▲ **Abb. 5.5**

Niederschlagsverteilung (mm) während des Unwetterereignisses vom 14. und 15. Juni 1910. Oben: Aktuelle räumliche Analyse der 48 h Summe basierend auf 169 Beobachtungen. Unten: Handanalyse der 24 h Summe (14. 6.) publiziert in den Annalen der Schweiz. Meteorologischen Zentralanstalt, 1910.

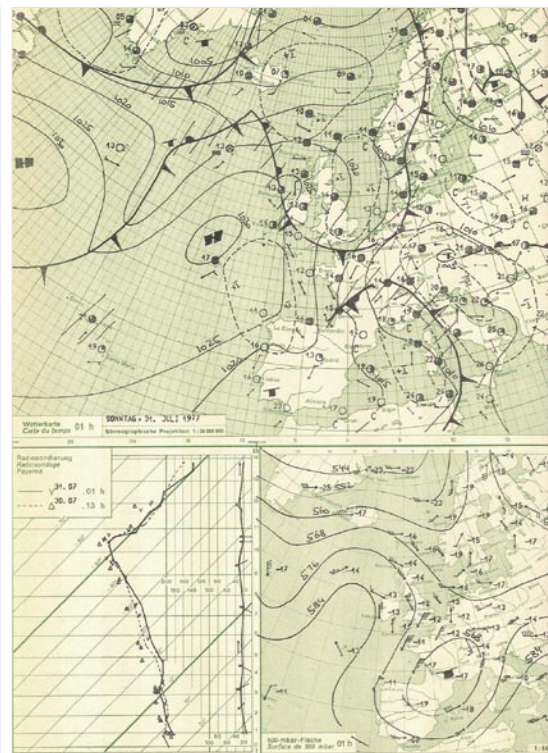


## 5.2.2 Die Juli-Unwetter 1977 und 1987

Im Rahmen der Analyse der Hochwasser vom Mai 1999 wurden die Unwetter vom Juli 1977 (BWG 2000b, Seite 57) sowie vom Juli 1987 (BWG 2000b, Seite 78) erwähnt, bei welchen die Zirkulationsverhältnisse zumindest gewisse Ähnlichkeiten mit dem Ereignis vom 20.–22. Mai 1999 und damit auch mit dem August-Unwetter 2005 aufwiesen.

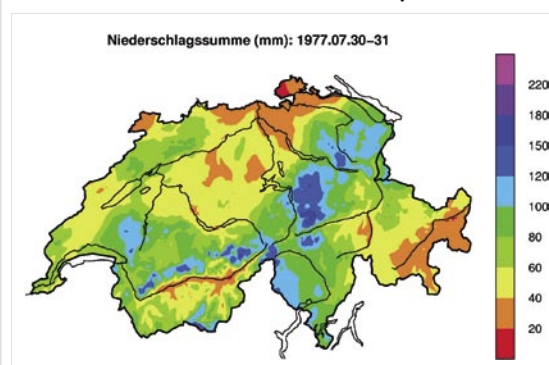
### Juli-Unwetter 1977

Das Ereignis von Ende Juli 1977 wurde durch die Bildung eines Tiefdrucktrogs eingeleitet, der von der Nordsee über England bis nach Portugal/Spainien reichte. Über den Pyrenäen spaltete sich ein Höhentief (Kaltlufttropfen) ab, welches sich am 31. Juli von Südfrankreich nach Norditalien bewegte (Abb. 5.5) und am 1. August die Alpen Richtung Osteuropa überquerte. Aus Norden stiess gleichzeitig eine Kaltfront Richtung Alpennordseite vor (Schweiz. Meteorologische Anstalt 1977a). Vor allem am 31. Juli 1977 ergab sich dabei 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 Thurggebiet massive Niederschläge aus (Abb. 5.6). Das Niederschlagszentrum lag im Raum Schächental und Sihlsee. Im Urnerland entwickelte sich die Situation zu einer eigentlichen Unwetterkatastrophe (Schweiz. Meteorologische Anstalt 1977b, Röhliberger 1991).



▲ **Abb. 5.5**  
Boden- und Höhenkarte  
(unten rechts)  
vom 31.7. 1977  
00 UTC. Reproduktion der Originalkarte aus den Beständen von Meteo-Schweiz.

**Abb. 5.6**  
Niederschlagsverteilung während des Unwetterereignisses vom 30./31. Juli 1977.

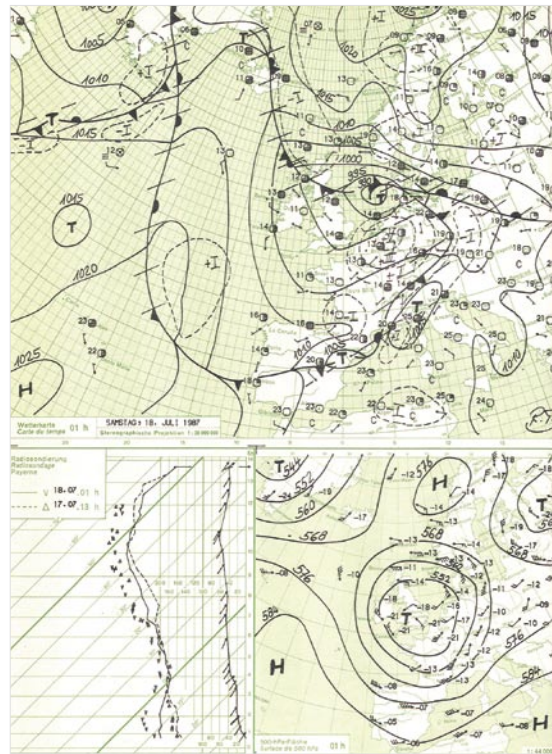


## 5 Vergleichbare Starkniederschläge in der Vergangenheit

### Juli-Unwetter 1987

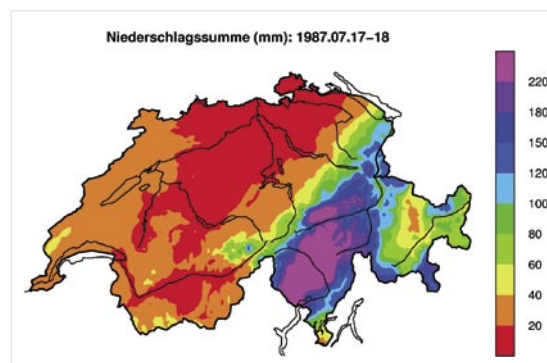
Rein schematisch lässt sich auch die Witterungsentwicklung, welche zur bekannten Unwetterkatastrophe vom 17.–19. Juli 1987 führte, an die oben diskutierte Art von Zirkulationsmuster annähern (BWG 2000b, Seite. 57). Von Nordwesten herangeführte Kaltluft traf über der Schweiz und Frankreich auf eine hoch reichende, warmfeuchte Südwestströmung. An der dazwischen liegenden Kaltfront entwickelte sich ein sekundärer Tiefdruckwirbel, welcher sich über längere Zeit im Raum Tessin/Veltlin festsetzte (Abb. 5.7). 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. Die Niederschlagsverteilung ist in Abbildung 5.8 dargestellt. Über längere Zeit herrschten nasse Bedingungen, was in den Flüssen zu hohen Wasserständen führte. Durch die regelmässig sich folgenden Niederschlagsphasen in der Vorperiode blieben die Böden in einem weitgehend gesättigten Zustand. Die gleichzeitig unterdurchschnittlichen Temperaturen reduzierten zudem die Verdunstung (BWW 1991). Weitgehend dieselben Bedingungen waren auch vor dem August-Unwetter 2005 vorhanden. Neben der bereits mehrfach erwähnten nassen Vorgeschichte lagen im August 2005 die Temperaturen bis zum Unwetterereignis insgesamt deutlich unter dem Durchschnitt.



▲ **Abb. 5.7**  
**Boden- und Höhenkarte (unten rechts) vom 18.7. 1987 00 UTC. Reproduktion der Originalkarte aus den Beständen von Meteo-Schweiz.**

**Abb. 5.8**  
**Niederschlagsverteilung während des Unwetterereignisses vom 17. und 18. Juli 1987.**



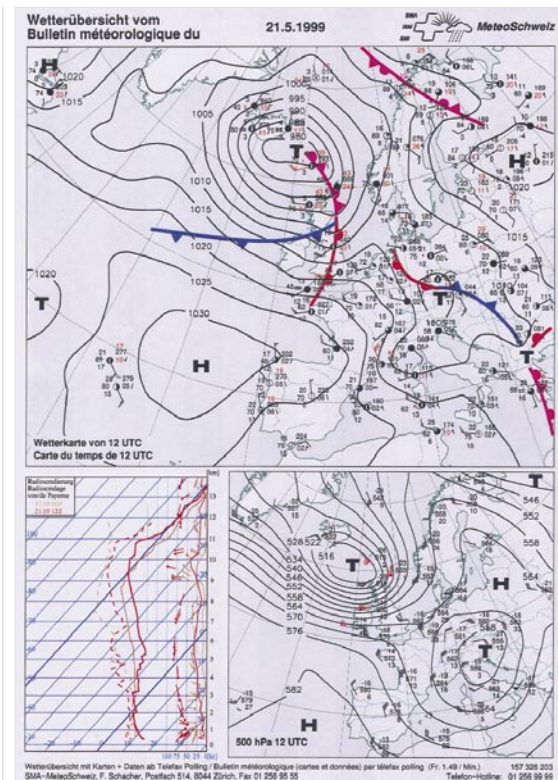
### 5.2.3 Das Unwetter vom 20.–22. Mai 1999

Das Unwetterereignis vom 20.–22. Mai 1999 mit massiven Hochwasserfolgen in der Zentral- und Ostschweiz folgte praktisch unmittelbar auf das Unwetterereignis vom 11.–14. Mai 1999. Bei diesem ersten Ereignis regnete es unter warmen Temperaturbedingungen bis in eine Höhe von 2'700 m, wobei diesem Ereignis zudem eine starke Schneeschmelze vorausging. Betroffen war der gesamte Alpenordhang sowie das zentrale und östliche Mittelland (BWG 2000a, BWG 2000b).

Das zweite, hier näher betrachtete Unwetterereignis vom 20.–22. Mai 1999 wurde am 18. Mai durch die Bildung eines Tiefdrucktroges eingeleitet, dessen Hauptzentrum bei Grönland lag. Ein weiteres Zentrum bildete sich über Spanien. Dieses verschob sich anschliessend über Südfrankreich und die Westalpen bis am 21. Mai in die nördliche Adria (Abb. 5.9). Auf der Ostseite dieses Tiefs wurde warme Mittelmeerluft zunächst nach Polen und anschliessend um das Tief herum als Nordost-Strömung wieder Richtung Alpen und die Schweiz transportiert. Das Haupttief über Grönland verschob sich in dieser Zeit nach Schottland. Auf dessen Südseite streckte sich die bodennah kühle Westströmung bis Mitteleuropa. Die aus Osten zur Alpenordseite fliessende bodennah warme Luft hatte also sowohl an den Alpen als auch entlang dieser kühlen Luftmassen aufzugleiten, was die starke Hebungskomponente und damit die enormen Niederschlagsmengen erklärt (BWG 2000b).

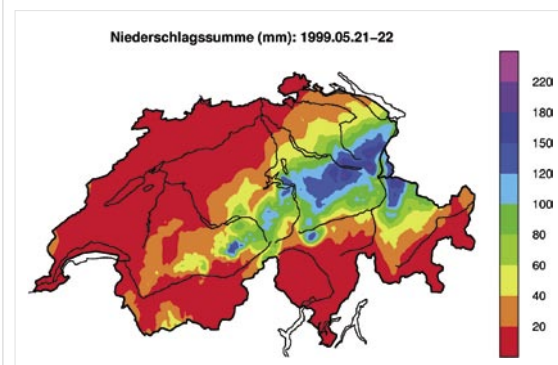
Auch hier wieder als typisches Merkmal das Tief südlich der Alpen, welches warmfeuchte Luftmassen mit hohem Niederschlagspotential von Osten her zur Alpenordseite brachte. Dementsprechend zeigten sich die Maximalwerte der damaligen Niederschlagsverteilung in der östlich zentralen Schweiz (Abb. 5.10). Die grössten Niederschlagsmengen traten vom Säntisgebiet über den Walensee bis zum Vierwaldstättersee sowie im Prättigau auf.

Beide Hochwasser vom Mai 1999 ergaben sich durch eine Überlagerung von Schneeschmelze und Starkniederschlägen. Die Beiträge dieser Prozesse waren je nach Region und Ereignis stark unterschiedlich. Im hier betrachteten Fall vom 20.–22. Mai 1999, welcher hauptsächlich das Thurgau, die Bodensee-, Walensee und Zürichseeregion betraf, fielen bedeutende Gebietsniederschläge mit Jährlichkeiten von über 25 Jahren auf einen von der Schneeschmelze und dem regenreichen Vormonat ständig feucht gehaltenen Boden (BWG 2000b). Gemäss der damaligen Ereignisanalyse entstanden die Hochwasser deshalb infolge des Niederschlags. Die Schneeschmelze wirkte dabei vor allem abflussfördernd (Bodendurchtränkung), trug aber nur in begrenztem Mass zum Abfluss bei. Unter diesen Vorbedingungen entstehende Hochwasser treten seltener auf, als sich allein aus der Wiederkehrperiode des Niederschlagsereignisses errechnen lässt (BWG 2000b).



▲ **Abb. 5.9**  
Boden- und  
Höhenkarte  
vom 21.5. 1999  
12 UTC.

**Abb. 5.10**  
Niederschlags-  
verteilung wäh-  
rend des Unwet-  
terereignisses  
vom 21. und  
22. Mai 1999.





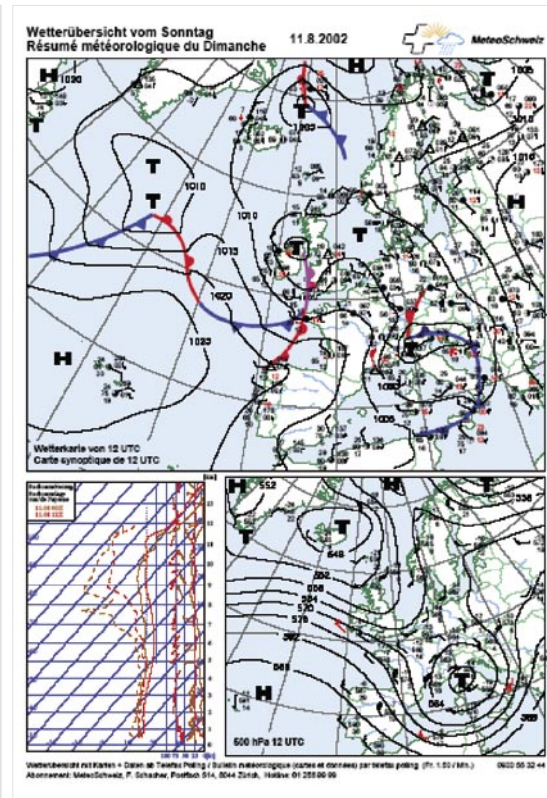
## 5 Vergleichbare Starkniederschläge in der Vergangenheit

### 5.2.5 Das Niederschlagsereignis vom August 2002

Der August 2002 dürfte vor allem den Bewohnern Tschechiens und des nordöstlichen Deutschland in Erinnerung bleiben. In der Schweiz fielen zwar auch starke Niederschläge, es wurden aber nur an 2 Stationen kumulierte Regenmengen von über 200 mm gemessen. Auch waren die Auswirkungen relativ harmlos.

Die synoptische Entwicklung war durchaus ähnlich wie 2005 und 1910. Eine kräftige Zyklogenese über Norditalien (Abb. 5.11) bringt der Schweiz flächige und starke Niederschläge. Warmadvektion mit gleichzeitigem Okklusionsvorgang kann beobachtet werden. Dieses Tief zieht aber relativ rasch nordostwärts weg und hält sich somit an die klassische Vb-Zugbahn. Das Resultat im mittleren Europa war katastrophal und soll hier nicht näher analysiert werden (da die Auswirkungen auf die Schweiz glücklicherweise relativ gering waren). Eine detaillierte Analyse findet sich in Rudolf und Rapp (2002).

Die Tatsache, dass der synoptische Ablauf durchaus ähnlich war wie 2005, aber in der Schweiz keine schlimmen Folgen hatte, erklärt mindestens teilweise, warum das aktuelle Ereignis zunächst unterschätzt worden ist.



▲  
**Abb. 5.11**  
**Boden- und Höhenkarte vom 11.8.2002 12 UTC. Die Tiefs sind in dieser Phase nahezu konzentrisch.**

# Einfluss der Alpen auf das Starkniederschlagsereignis

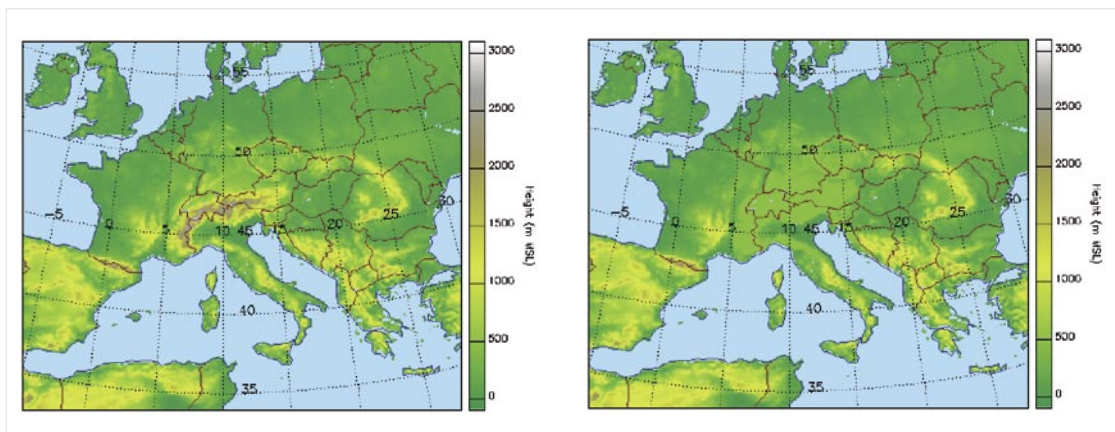
André Walser, Mark Liniger, Christof Appenzeller

## 6.1 Motivation und Strategie

Die Alpen beeinflussen unser Wetter in vielfältiger Art und Weise, da diese als natürliche Barriere wirken und die anströmenden Luftmassen ablenken oder zur Hebung zwingen können. Im Falle einer Hebung wird die Luftmasse abgekühlt und der enthaltene Wasserdampf kann kondensieren und als Niederschlag ausfallen. Dabei wird Kondensationswärme frei, welche an die Atmosphäre abgegeben wird. Die Alpen können über derartige Prozesse auch rückwirkend Einfluss auf die mesoskalige Luftströmung haben.

Um den Einfluss der Alpen auf die Entwicklung der Zyklone und die Menge und die räumliche Verteilung des Niederschlags zu

untersuchen, wurden mit der COSMO-LEPS Strategie (vgl. Kapitel 4.1.3) die Vorhersagen vom 19.8.2005 12 UTC mit zwei unterschiedlichen Konfigurationen wiederholt. Eine davon entspricht im Prinzip der operationell verwendeten Konfiguration und wird nachfolgend OPR genannt. Für die zweite Konfiguration wurde die Orographie in einem Rechteck, das den Alpenbogen umfasst, auf 500 m abgeschnitten (Abb. 6.1), um die Alpen sowie den Jura, die Vogesen und den Schwarzwald zu entfernen (nachfolgend wird dabei der Einfachheit halber und angesichts des Ereignisschwerpunktes nur noch von den ‚Alpen‘ gesprochen). Zudem wurden die Rauigkeitslängen an den modifizierten Orographie-Gitterpunkten auf einen typischen Schweizer-Mittellandwert (0.5 m) begrenzt. Diese Konfiguration wird im nachfolgenden TST genannt.



▲  
**Abb. 6.1**  
COSMO-LEPS  
Modellgebiet  
mit operationel-  
ler Orographie

und die für das  
Sensitivitäts-  
experiment ver-  
wendete Oro-  
graphie mit auf  
500 m abge-  
schnittenem Al-  
penbogen.



## 6 Einfluss der Alpen auf das Starkniederschlagsereignis

### 6.2 Vergleich der Niederschlagsvorhersagen

Zur Analyse dieses Sensitivitätsexperiments werden die beiden Ensemble-Simulationen anhand von probabilistischen und deterministischen Produkten miteinander verglichen.

Abbildung 6.2 zeigt Wahrscheinlichkeitskarten für Niederschlagssummen zwischen 20.8.2005 06 UTC und 23.8.2005 06 UTC, was der 72 h Periode mit den grössten beobachteten Summen entspricht. Dargestellt ist die Wahrscheinlichkeit, mit welcher die Schwellwerte 50 mm, 100 mm und 150 mm für die Simulationen mit (OPR, links) und ohne Alpen (TST, rechts) überschritten werden.

Die OPR Simulation zeigt hohe Wahrscheinlichkeiten für grosse Niederschlagssummen für die vom Ereignis betroffenen Gebiete, beispielsweise Werte über 60% für Niederschlag über 150 mm am Alpennordhang (vgl. auch Kapitel 4.1.3). Die TST Simulation zeigt hingegen schon für über 50 mm mit bis 40% für weite Teile der Schweiz deutlich geringere Wahrscheinlichkeiten als die OPR Simulation. Das TST Ensemble zeigt denn auch für Summen über 100 mm und insbesondere für über

150 mm nur noch sehr geringe Wahrscheinlichkeiten. Allgemein zeigt das TST Ensemble deutlich weniger Niederschlag, wobei das deutliche Defizit am Alpennordhang nicht mit grösseren Mengen in andere Regionen kompensiert wird, obwohl keine erwähnenswerten Unterschiede in der absoluten Feuchte zwischen den beiden Ensembles ausgemacht werden konnten (nicht gezeigt). Einzig für den Apennin prognostiziert das TST Ensemble eine deutlich höhere Wahrscheinlichkeit für über 50 mm als in OPR, allgemein ist die Niederschlagseffizienz in diesem Ensemble aber deutlich geringer.

Um die Unterschiede in der räumlichen Verteilung und dem zeitlichem Verlauf des Niederschlags mit und ohne Alpen genauer zu untersuchen, wird ein einzelnes Ensemble-Member genauer analysiert. Dazu wurde das subjektiv «beste» Member des OPR-Ensemble ausgewählt und mit dem entsprechenden aus dem TST-Ensemble verglichen. Das ausgewählte Member repräsentiert auch den grössten Cluster (siehe Montani et al. 2003) und hat dadurch für die Wahrscheinlichkeitskarten in Abb. 6.2 mit 31% das grösste Gewicht.

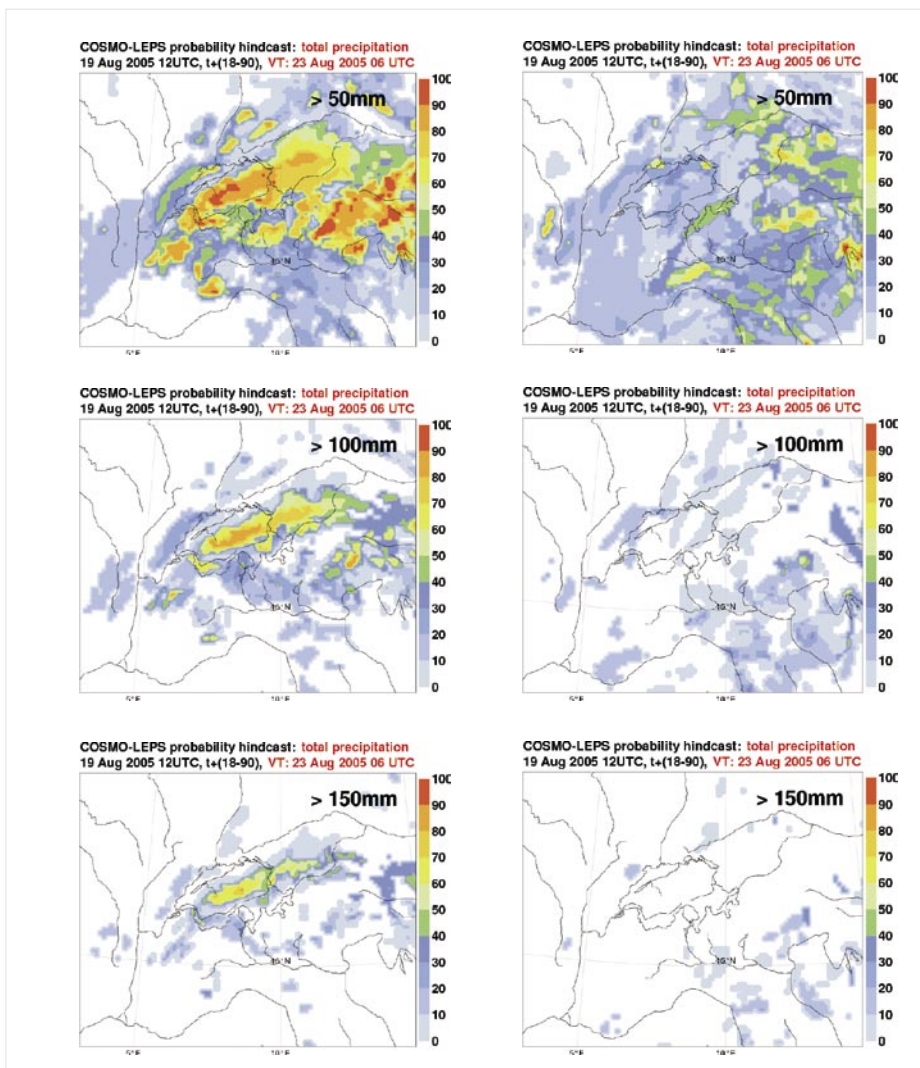


Abb. 6.2 COSMO-LEPS Vorhersage initialisiert für 19.8.2005 12 UTC mit operationell verwendeter Orographie (links) und ohne Alpenbogen (rechts). Dargestellt sind Wahrscheinlichkeiten für 72-stündige Niederschlagssummen (20. 06 UTC – 23. 06 UTC) grösser als 50, 100 und 150 mm.

Abbildung 6.3 zeigt die vorhergesagten 24 h Niederschlagssummen für den 21. und 22. August (jeweils von 06 UTC bis 06 UTC des Folgetages). Die räumliche Verteilung und die Menge des Niederschlags des OPR-Member (links) entsprechen recht gut den Messungen (vgl. mit Abb. 3.2). Am 21. August wurde die Zugbahn der Niederschlagssysteme durch eine Nordostströmung bestimmt, welche über die Voralpen und das Mittelland zogen (siehe Kapitel 3.3). Am Morgen des Folgetages drehte die Anströmung auf Nord, was anhaltende Niederschläge am Alpenkamm zur Folge hatte, was von diesem Ensemble-Member korrekt prognostiziert wurde. Das entsprechende TST-Member zeigt für die beiden Tage das gleiche Strömungsmuster, aber deutliche geringere Niederschläge auf der Alpennordseite als das OPR-Member. Die Niederschlagssysteme vom 21.8. sind vorhanden, aber typischerweise schwächer, und ziehen südlicher über die Schweiz bzw. die (nicht existierenden) Alpen, was sich auch am Niederschlagsmaximum über der Südostschweiz zeigt. Am 22.8. verlieren die

Systeme, die in der Nordströmung jeweils rasch nach Süden wandern, im Tagesverlauf an Intensität.

Zu bemerken ist, dass sich die Strömungs-Charakteristik auf der Alpennordseite an den beiden betrachteten Tagen durch die fehlenden Alpen kaum ändert. Dies ist konsistent mit der kaum veränderten Synoptik im TST-Member verglichen mit dem OPR-Member. Abbildung 6.4 zeigt für den 22. August 00 UTC das Geopotential auf 700 hPa der beiden Members. Die Zyklone liegt im TST-Member etwas weiter nördlich, sie wird offensichtlich weniger gebremst durch die Alpen. Die meso-skalige Strömung wird also nur unwesentlich beeinflusst, für eine derartige Analyse ist aber die Simulationszeit vermutlich zu kurz. Auch muss hier darauf hingewiesen werden, dass die antreibende globale Vorhersage (welche die Anfangs- und Randdaten liefert) für beide Ensemble-Members dieselbe ist, und diese den (grob aufgelösten) Alpenbogen berücksichtigt.

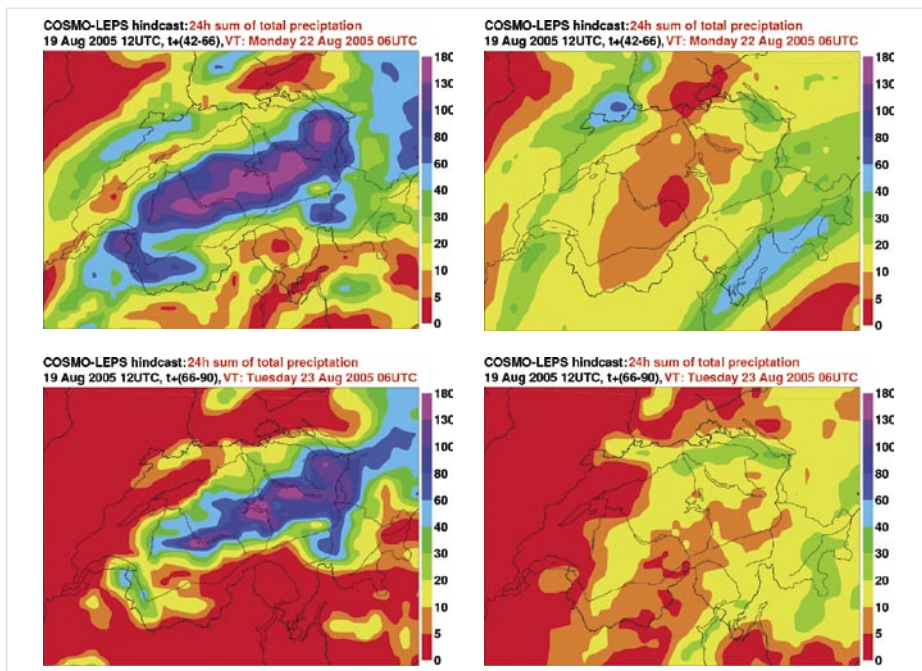


Abb. 6.3 COSMO-LEPS Vorhersage initialisiert für 19.8.2005 12 UTC mit operativell verwendeter Orographie (links) und ohne Alpenbogen (rechts). Dargestellt sind 24h-Niederschlags-summen von 21. (oben) und 22. (unten) eines ausgewählten Ensemble-Members (jeweils von 06 UTC bis 06 UTC des Folgetages).

## 6 Einfluss der Alpen auf das Starkniederschlagsereignis

### 6.3 Schlussfolgerungen

Das Sensitivitäts-Experiment zeigt deutlich auf, dass die Topographie des Alpenraums für die hohen Niederschlagsmengen entscheidend war. Im Experiment ohne Alpen fiel deutlich weniger Niederschlag, wobei der fehlende Niederschlag am Alpennordhang nicht auf andere Gebiete verteilt wurde. Das Defizit ist sowohl für die Nordostanströmung am 21. wie auch für die Nordanströmung am 22. August offensichtlich. Dies

zeigt, dass Staueffekte mit erzwungener Hebung der Luftmassen ausschlaggebend waren, wobei in der ersten Phase auch nicht ausgelöste Konvektion durch die fehlende Orographie eine Rolle gespielt hat. Diese Erkenntnisse unterstreichen die Notwendigkeit von Modellen, welche die komplexe Topographie berücksichtigen und deren Einfluss realistisch darstellen können, um weitere Fortschritte in der quantitativen und lokalen Niederschlagsvorhersage erreichen zu können.

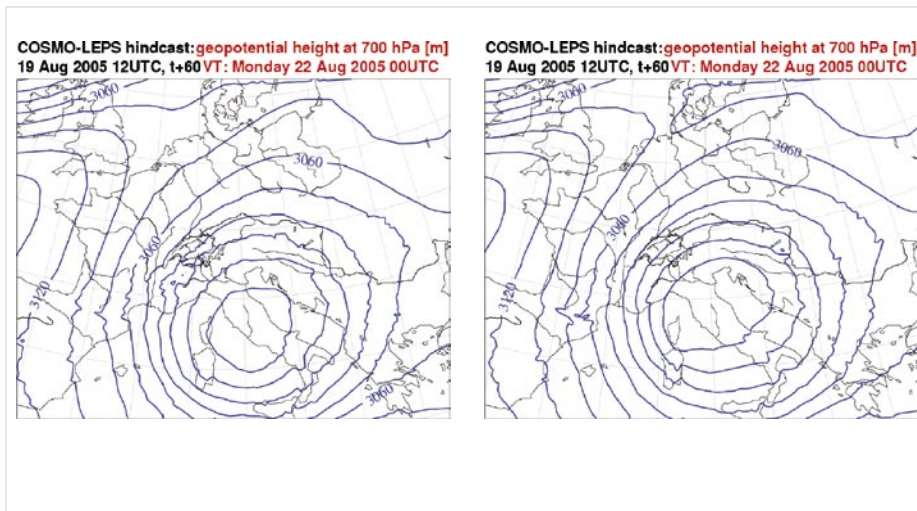


Abb. 6.4  
COSMO-LEPS  
Vorhersage initialisiert für  
19.8.2005  
12 UTC mit operationell  
verwendeter Orographie  
(links) und ohne Alpenbogen  
(rechts). Dargestellt ist das  
Geopotential auf 700 hPa für  
22.8.2005  
00 UTC eines ausgewählten  
Ensemble-Members.

# 7 Konsequenzen

Daniel K. Keuerleber-Burk, Mathias Rotach

## 7.1 Warnablauf

Die oben dargestellten Analysen der Überschwemmungsperiode vom August 2005 haben gezeigt, dass das Ereignis in Bezug auf die Niederschlagsmengen als beträchtlich (zum Teil wurden die bisherigen Rekorde sehr deutlich übertroffen) eingestuft werden muss. Solche Aussagen beziehen sich aber auf die lokale Klimatologie. In absoluten Zahlen gab es in der Vergangenheit insbesondere im Süden der Alpen bedeutend grössere Niederschlagsmengen. Dies unterstreicht die Bedeutung der regional diversifizierten meteorologischen und klimatologischen Charakteristika und ist eine zentrale Herausforderung für die Vorhersage in einem Alpenland wie der Schweiz.

Die Vorhersagen und Warnungen für das August-Ereignis können insgesamt als zufrieden stellend beurteilt werden, und wurden auch insbesondere von den Einsatzorganen und Behörden sehr positiv aufgenommen. Trotzdem soll die vorliegende Analyse dazu verwendet werden, um Lehren aus diesem Ereignis zu ziehen und mögliche Verbesserungen zu initiieren. Diese Verbesserungen lassen sich in organisatorische, definitorische und methodische Ansätze unterscheiden.

### Organisation des Warnablaufs

Die gegenwärtige Ausgabe von minimal zwei Warnungen pro Tag scheint insbesondere bei sich schnell ändernden Lagen und mit der häufig aufdatierten Information aus Beobachtungen und Modellsimulationen zu knapp zu sein. An kritischen Tagen sollte deshalb auf die Ausgabe von mindestens 3–4 Warnungen umgestellt werden. Ausserdem soll die Präsentation von Wetterdaten, die auf der ELD (elektronische Lagedarstellung der NAZ) verfügbar sind, noch wesentlich ausgebaut werden.

### Definition der Warnschwellen

Aus rein meteorologischer Sicht hat das Ereignis gezeigt, dass die Beschränkung auf eine Warn-Limite für den 24 h-Niederschlag (gegenwärtig: 50 mm/24 h) insbesondere bei lang

anhaltenden Ereignissen zu kurz greift. Insbesondere müssen Limiten für mehrere Tage (z.B. 48 und 72 h) definiert werden. Diese sollten überdies regional (mindestens nord / süd) differenziert sein und anhand der klimatologischen Erfahrung definiert werden. Eine weitere Notwendigkeit, die das Ereignis «August 2005» deutlich gemacht hat, ist die Ausrichtung der Warnschwellen auf mögliche Auswirkungen. Die gleiche Niederschlagsmenge kann bei ungünstigen Begleitumständen (z.B. im Vorfeld moderate Niederschläge mit weit gehender Sättigung der Böden) ungleich grössere Schäden anrichten als unter «normalen» Bedingungen. Eine Abwägung der Bedürfnisse nach Einfachheit/Klarheit auf der einen Seite, und der Aussagekraft auf der anderen Seite muss hier zu einer Neudefinition Anlass geben. Insbesondere die Berücksichtigung des (hydrologischen) Bodenzustands wird es erforderlich machen, die Koordination mit den entsprechenden hydrologischen Warninstitutionen massiv zu verbessern.

Die hier vorgeschlagenen Anpassungen im Bereich der meteorologischen Warnungen müssen dazu Anlass geben, im Bereich Wetter der MeteoSchweiz die notwendigen Schlüsse zu ziehen und Verbesserungen vorzunehmen.

### Methodische Ansätze

Die probabilistischen Vorhersagen des COSMO-LEPS haben sich als sehr wertvoll erwiesen. Insbesondere im Bereich der Vorwarnung (vgl. die Ausrichtung von COSMO-LEPS auf 3–5 Tage) ist dieses Instrument in Zukunft sicherlich von grosser Bedeutung. Das aLMo hat zwar das August-Ereignis insgesamt sowohl quantitativ wie qualitativ gut vorhergesagt – es genießt aber bei den Prognostikern in Bezug auf Niederschlag wenig Vertrauen. COSMO hat eben für 2006 ein Priority Project definiert, das sich mit den Defiziten des Lokal Modell (LM) und damit seiner Variante aLMo im Niederschlagsbereich befasst. Die aus diesem Projekt zu erwartenden Verbesserungen in diesem Bereich müssen zunächst systematisch verifiziert werden, und die Resultate dann an die operationellen Prozesse kommuniziert werden.

## 7.2 Klimatologische Daten und Interpretation

Für die Analysen im Kapitel 3 wurden grosse Anstrengungen unternommen, um die verschiedenen Quellen der Niederschlagsmessungen (ANETZ, NIME, IMIS und Radar) für das «Unwetter August 2005» in einer objektiven und flächigen Darstellung aufzuarbeiten. Dies hat sich als äusserst nützlich erwiesen – sowohl für die nachträgliche und hier vorliegende meteorologische Aufarbeitung des Ereignisses (Vergleiche zwischen Modellierung und Beobachtung, z.B. Abbildungen im Kapitel 4.1.1), wie auch für die vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) vorangetriebene Ereignisanalyse, in welcher fokussiert die Zusammenhänge zwischen Niederschlags-Charakteristika und Schäden untersucht werden.

Die so genannte «Gitterung» (gridding) von Punktmessungen auf ein regelmässiges Gitter ist im Alpenraum äusserst anspruchsvoll und erfordert höchste Ansprüche an die Mess-

genauigkeit, Stationsdichte und Vergleichbarkeit der Messungen. Durch die Topographie bedingt ergeben sich vielfältige Probleme, deren Lösung nur in langjähriger Arbeit und mit viel fachlichem Verständnis möglich war (Schwarb et al. 2001, Daly et al. 2002, Shepard 1986, Frei und Schär 1998, Frei und Schmidli 2005). Insbesondere die Kombination dieser gegitterten Daten («schlechte» zeitliche Auflösung, gute absolute Messgenauigkeit) mit den Daten der Wetterradars der MeteoSchweiz (gute räumlich/zeitliche Auflösung, schlechte absolute Genauigkeit) ermöglichen es, die beiden Systeme optimal zu verbinden um mehr als die Summe der Einzelteile daraus zu erhalten. Diese Art von gegitterter Information sollte in Zukunft vermehrt für die Routinearbeit und auch für die Assimilation von Daten in die numerischen (hoch aufgelösten) Modelle verfügbar gemacht werden können. Dies bezieht sich natürlich nicht nur auf den Niederschlag, sondern insbesondere auch auf Temperatur, Feuchte und andere meteorologische Variablen.

## 8 Referenzen

- Allen M, 2003: Liability for climate change, *Nature*, **421**, 891-892.
- Bader S, Bantle H, 2004: Das Schweizer Klima im Trend. Temperatur- und Niederschlagsentwicklung 1864-2001, Veröffentlichung der MeteoSchweiz, **68**, Zürich: MeteoSchweiz. 45 Seiten
- Buzzi A and Foschini L, 2000: Mesoscale meteorological features associated with heavy precipitation in the Southern Alpine region. *Meteorol, Atmos. Phys.*, **72** 131-146.
- BWG, 2000a: Hochwasser 1999. Analyse der Messdaten und statistische Einordnung. Hydrologische Mitteilungen Nr. 28, Bundesamt für Wasser und Geologie. 112 Seiten Kurzfassung:  
<http://www.bwg.admin.ch/themen/wasser/d/hw99.htm>
- BWG, 2000b: Hochwasser 1999. Analyse der Ereignisse. Studienbericht Nr. 10/2000, Bundesamt für Wasser und Geologie. 148 S. Kurzfassung:  
<http://www.bwg.admin.ch/themen/wasser/d/hw99.htm>
- BWW, 1999: Ursachenanalyse der Hochwasser 1987. Schlussbericht. Mitteilung des Bundesamtes für Wasserwirtschaft Nr. 5, Bern.
- Christensen JH and Christensen OB, 2003: Severe summertime flooding in Europe. *Nature*, **421**, 805-806.
- Coles S, 2001: An introduction to statistical modeling of extreme values. Springer, London, 208 pp.
- Daly C, Gibson WP, Taylor GH, Johnson GL and Pasteris P, 2002: A knowledge-based approach to the statistical mapping of climate, *Climate Res.*, **22**, 99-113.
- Fisher RA and Tippett LH Ct, 1928: Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest members of a sample. *Proc. Cambridge Philos. Soc.*, **24**, 180-190.
- 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). 8pp. Erhältlich unter  
<http://www.meteoschweiz.ch> und <http://www.occc.ch>
- Frei C and Schär C, 1998: A precipitation climatology of the Alps from high-resolution rain-gauge observations, *Int. J. Climatol.*, **18**, 873-900.
- Frei C and 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 and Schmidli J, 2006: Das Niederschlagsklima der Alpen: Wo sich die Extreme nahekommen. *pro-met, meteorologische Fortbildung (Deutscher Wetterdienst)*, **32 (1/2)**, 61-67.
- Frei C, Schöl RI, Fukutome S, Schmid Si and Vidale PL, 2006: Future change of precipitation extremes in Europe: An intercomparison of scenarios from regional climate models, *J. Geophys. Res.*, (in press).
- Germann U, 2000: Spatial continuity of precipitation, profiles of radar reflectivity and precipitation measurements in the Alps. PhD thesis, Nr 13932, ETH Zurich. 104 pages.  
<http://e-collection.ethbib.ethz.ch>
- Germann U and Joss J, 2002: Mesobeta profiles to extrapolate radar precipitation measurements above the Alps to the ground level, *J. Appl. Meteorol.*, **40**, 1042-1059.
- Germann U and Joss J, 2004: Operational measurement of precipitation in mountainous terrain. Kap. 2 in: *Weather Radar – Principles and Advanced Applications*, editor P. Meischner, Springer-Verlag, Berlin, Germany.



- Germann U, Galli G, Boscacci M and Bolliger M, 2006: Radar precipitation measurement in a mountainous region, Q. J. Royal Meteorol. Soc. (in press).
- Grebner D, 1996: Starkniederschläge in der Schweiz – Signale einer Klimaänderung? Klimaseminar Schweizer Rück, 6./7. Mai 1996, Zürich, 9 p.
- Gumbel EJ, 1958: Statistics of extremes. Columbia University Press, New York, 375 pp.
- HADES-Tafel «Niederschlagsmessung» Konzelmann und Weingartner
- HADES-Tafel «Schneemessung» Meister et al.
- Haylock MR and Goodess CM, 2004: Interannual variability of extreme European winter rainfall and links with mean large-scale circulation, Int. J. Climatol., **24**, 759-776.
- Hegg C, Vogt S, 2005: Häufigkeiten und Trends von Starkniederschlägen in der Schweiz im Zeitraum 1864-2002, Wasser Energie Luft, **97**, Heft 7/8, 209-212.
- IPCC, 2001: Climate Change 2000: The scientific basis, Third Assessment Report of Working Group 1 of the Intergovernmental Panel on Climate Change, (Ed. Houghton et al.), 881pp.
- Joss J, and coauthors, 1998: Operational use of radar for precipitation measurements in Switzerland. vdf Hochschulverlag AG, ETH Zürich. ISBN 3-7281-2501-6, 108 pages.
- Joss J und Lee R, 1995: The application of radar-gauge comparisons to operational precipitation profile corrections, J. Appl. Meteorol., **34**, 2612-2630.
- Jung T, Ferranti L and Tompkins A, 2005: Atmospheric response to a warm Mediterranean Sea as observed in summer 2003, Geophys Res Abstracts, **7**, 02375, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU05-A-02375.
- Klein Tank AMG and Können GP, 2003: Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946-1999, J. Climate, **16**, 3665-3680.
- Lalurette F: 2002, Early detection of abnormal weather using a probabilistic Extreme Forecast Index, ECMWF Technical Memorandum, **373**, 27pp
- Liljequist G und Cehak K, 1974: Allgemeine Meteorologie, Vieweg Verlag
- Marsigli C, Boccanera F, Montani A, and Paccagnella T, 2005: The COSMO-LEPS mesoscale ensemble system: validation of the methodology and verification, Nonlinear Processes in Geophysics, **12**, 527-536.
- Martins ES and StedingerJR, 2000: Generalized maximum-likelihood generalized extreme-value quantile estimators for hydrologic data, Water Resour. Res., **36**, 737-744.
- Massacand AC, Wernli H and Davies HC, 1998: Heavy precipitation on the Alpine southside: An upper-level precursor, Geophys. Res. Lett., **25**, 1435-1438.
- MeteoSchweiz, 2005: Witterungsbericht August 2005, 6pp, erhältlich auf <http://www.meteoschweiz.ch>
- Niedermann M, 2001: Einfluss der Mittelmeertemperaturen auf herbstliche Starkniederschläge im Alpenraum: Eine Fallstudie zum Ereignis vom Oktober 2000. Diplomarbeit, ETH Zürich, 81 pp. (Erhältlich von Institut für Atmosphäre und Klima ETH, Universitätsstr. 16, CH-8092 Zürich, Schweiz).

## 8 Referenzen

- OcCC 2003: Extremereignisse und Klimaänderung. Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung. Erhältlich unter <http://www.occc.ch>
- Pfister C, 1998: Raumzeitliche Rekonstruktion von Witterungsanomalien und Naturkatastrophen 1496-1995. Schlussbericht NFP 31. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 140 p.
- Pfister C, 1999: Wetternachhersage. 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen (1496-1995). Verlag Paul Haupt, Bern, 304 p.
- Röthlisberger G, 1991: Chronik der Unwetterschäden in der Schweiz. Berichte der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Nr. 330, 122 p.
- Rudolf B, Frank R, Grieser J, Müller-Westermeier G, Rapp J and Trampf W, 2006: Das Hochwasser in Südbayern im August 2005: Niederschlagsvorhersage, Warnung und klimatologische Bewertung des DWD. Hochwasserschutz und Katastrophenmanagement, (in press).
- Rudolf B, Rapp J, 2002: Das Jahrhunderthochwasser der Elbe: Synoptische Wetterentwicklung und klimatologische Aspekte. Klimastatusbericht des DWD 2002, 172-187, <http://www.dwd.de/de/Funde/Klima/KLIS/prod/KSB/ksb02/index.htm>
- Schär C, Davies TD, Frei C, Wanner H, Widmann M, Wild M and Davies HC, 1998: Current Alpine climate. In: A view from the Alps: regional perspectives on climate change. Ed.: Cebon P, Dahinden U, Davies HC, Imboden D, Jaeger CC, 21-72.
- Schättler U, Montani A [editors] 2005: COSMO Newsletter 5. pp 182. Printed at Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main (D). Available at: [cosmo-model.cscs.ch](http://cosmo-model.cscs.ch) > Publications > Newsletters.
- Schmidli J and Frei C, 2005: Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20th century, *Int. J. Climatol.*, **25**, 753-771.
- Schmidli J, Goodess CM, Frei C, Haylock M, Hundscha Y, Ribalaygua J and Schmith T, 2005: Statistical and dynamical downscaling of precipitation: An evaluation and comparison of scenarios for the European Alps, *J. Geophys. Res.*, (submitted).
- Schwarb M, Daly C, Frei C und Schär C, 2001: Mittlere jährliche und saisonale Niederschlagshöhen im europäischen Alpenraum 1971-1990. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafeln 2.6 und 2.7.
- Schweizerische Meteorologische Zentralanstalt, 1910: Annalen der Schweizerischen Meteorologische Zentralanstalt 1910, 47. Jahrgang, Zürich.
- Schweizerische Meteorologische Anstalt, 1977 a: Tägliches Wetterbulletin des Jahres 1977, Zürich.
- Schweizerische Meteorologische Zentralanstalt, 1977 b: Annalen der Schweizerischen Meteorologische Zentralanstalt 1977, 114. Jahrgang, Zürich.
- Sevruk B, 1985: Systematischer Niederschlagsmessfehler in der Schweiz. In: Der Niederschlag in der Schweiz. (Ed. Sevruk B.), Beiträge zur Geologie der Schweiz - Hydrologie, 31, 65-75.
- Shepard DS, 1984: Computer Mapping: The SYMAP Interpolation Algorithm. In: Spatial Statistics and Models, Ed.: Gaile G.L., Willmott C.J., 133-145.
- Yang DQ, Elomaa E, Tuominen A, Aaltonen A, Goodison B, Gunther T, Golubev V, Sevruk B, Madsen H and Milkovic J, 1999: Wind-induced precipitation undercatch of the Hellmann gauges, *Nordic Hydrol.*, **30**, 57-80.

# Appendix Warnlimiten

| * Limiten MZ                                | Gebiete / Regionen | Ausgabe bei MZ    | Art der Warnung | Limiten MG | Limiten ML / ASS   |
|---|--------------------|-------------------|-----------------|------------|--|
| Prob ≥ 60                                   |                    |                   |                 |            |  |
| 1<br>50 mm / 24 h<br>oder<br>100 mm / 72 h  | ANS / Alpen        | Warntool: VUL-PUS | Meteo-Warnung   | wie MZ     | Engadin wie ANS<br>Alpensüdseite (inkl. Simplon)<br>Verbano + Valle Maggia<br>150 mm/24 h                    |
| Prob ≥ 60                                   |                    |                   |                 |            |  |
| 2<br>75 mm / 24 h<br>oder<br>130 mm / 72 h  | ANS / Alpen        | Warntool: VUL-PUS | Meteo-Warnung   | wie MZ     | Engadin wie ANS<br>Alpensüdseite (inkl. Simplon)<br>130 mm / 24 h<br>Verbano + Valle Maggia<br>200 mm / 24 h |
| Prob ≥ 60                                   |                    |                   |                 |            |  |
| 3<br>100 mm / 24 h<br>oder<br>160 mm / 72 h | ANS / Alpen        | Warntool: VUL-PUS | Meteo-Warnung   | wie MZ     | Engadin wie ANS<br>Alpensüdseite (inkl. Simplon)<br>160 mm / 24 h<br>Verbano + Valle Maggia<br>250 mm / 24 h |

▲  
**Tabelle A1: Warnlimiten für Starkniederschlag bei der MeteoSchweiz.**  
**Beachte: die neue Limite 100mm/72h ist hier bereits aufgenommen, obwohl sie für den August 2005 noch nicht in Kraft war. ‚ANS‘ = Alpen Nordseite.**

\* = Gefahrenstufe / Farbe im Internet

# Kürzlich erschienen

## Arbeitsberichte der MeteoSchweiz

- 210** Buss S, Jäger E and Schmutz C: 2005: Evaluation of turbulence forecasts with the aLMo, 58pp, CHF 70.–
- 209** Schmutz C, Schmuki D, Duding O, Rohling S: 2004, Aeronautical Climatological Information Sion LSGS, 77pp, CHF 25.–
- 208** Schmuki D, Schmutz C, Rohling S: 2004, Aeronautical Climatological Information Grenchen LSZG, 73pp, CHF 24.–
- 207** Moesch M, Zelenka A: 2004, Globalstrahlungsmessungen 1981-2000 im ANETZ, 83pp, CHF 26.–
- 206** Schmutz C, Schmuki D, Rohling S: 2004, Aeronautical Climatological Information St.Gallen LSZR, 78pp, CHF 25.–
- 205** Schmutz C, Schmuki D, Ambrosetti P, Gaia M, Rohling S: 2004, Aeronautical Climatological Information Lugano LSZA, 81pp, CHF 26.–
- 204** Schmuki D, Schmutz C, Rohling S: 2004, Aeronautical Climatological Information Bern LSZB, 80pp, CHF 25.–
- 203** Duding O, Schmuki D, Schmutz C, Rohling S: 2004, Aeronautical Climatological Information Geneva LSGG, 104pp, CHF 31.–
- 202** Bader S: 2004, Tropische Wirbelstürme – Hurricanes –Typhoons – Cyclones, 40pp, 16 Fr.
- 201** Schmutz C, Schmuki D, Rohling S: 2004, Aeronautical Climatological Information Zurich LSZH, 110pp, CHF 34
- 200** Bader S: 2004, Die extreme Sommerhitze im aussergewöhnlichen Witterungsjahr 2003, 25pp, CHF 14
- 199** Frei T, Dössegger R, Galli G, Ruffieux D: 2002, Konzept Messsysteme 2010 von MeteoSchweiz, 100pp, CHF 32
- 198** Kaufmann P: 2002, Swiss Model Simulations for Extreme Rainfall Events on the South Side of the Alps, 40pp, CHF 20
- 197** WRC Davos (Ed): 2001, IPC - IX, 25.9. - 13.10.2000, Davos, Switzerland, 100pp, CHF 32
- 196** Hächler P et al.: 1999, Der Föhnfall vom April 1993, 139pp, CHF 40
- 195** Urfer Ch, Vogt R, 1999, Die Niederschlagsverhältnisse in Basel 1964-1998, 43pp, CHF 40
- 194** Courvoisier HW: 1998, Statistik der 24-stündigen Starkniederschläge in der Schweiz 1901-1996, 20pp, CHF 11
- 193** Defila C, Vonderach G: 1998, Todesfälle und Wetterlagen in Schaffhausen, 72pp, CHF 25
- 192** Maurer H: 1997, Frostprognose in der Schweiz: neue Methode mit automatischen Stationen, 38pp, CHF 16
- 191** Schönbächler M: 1996, Objektive Kontrolle der Textprognose SMA OPKO, 31pp, CHF 14
- 190** Brändli J: 1996, Statistische Auswertungen von täglichen und monatlichen Verdunstungswerten an 22 Standorten der Schweiz, 52pp, CHF 19
- 189** Schneiter D: 1994, SMI contribution to ETEX project in 1994, CHF 24
- 188** Fröhlich C: 1996, Internationaler Pyrheliometervergleich Comparison IPC VIII 25 September – 13 October 1995 Results and Symposium, CHF 35

## Veröffentlichungen der MeteoSchweiz

- 73** Scherrer SC: 2006, Interannual climate variability in the European and Alpine region, 132pp, CHF 86
- 72** Mathis H: 2005, Impact of Realistic Greenhouse Gas Forcing on Seasonal Forecast Performance, 80pp, CHF 75
- 71** Leuenberger D: 2005, High-Resolution Radar Rainfall Assimilation: Exploratory Studies with Latent Heat Nudging, 103pp, CHF 81.
- 70** Müller G und Viatte P: 2005, The Swiss Contribution to the Global Atmosphere Watch Programme – Achievements of the First Decade and Future Prospects, 112pp, CHF 83
- 69** Müller WA: 2004, Analysis and Prediction of the European Winter Climate, 115pp, CHF 34
- 68** Bader S: 2004, Das Schweizer Klima im Trend: Temperatur- und Niederschlagsentwicklung seit 1864, 48pp, CHF 18
- 67** Begert M, Seiz G, Schlegel T, Musa M, Baudraz G und Moesch M: 2003, Homogenisierung von Klimamessreihen der Schweiz und Bestimmung der Normwerte 1961-1990, Schlussbericht des Projektes NORM90, 170pp, CHF 40
- 66** Schär Christoph, Binder Peter, Richner Hans (Eds.): 2003, International Conference on Alpine Meteorology and MAP Meeting 2003, Extended Abstracts volumes A and B, 580pp, CHF 100
- 65** Stübi R: 2002, SONDEX / OZEX campaigns of dual ozone sondes flights: Report on the data analysis, 78pp, CHF 27
- 64** Bolliger M: 2002, On the characteristics of heavy precipitation systems observed by Meteosat-6 during the MAP-SOP, 116pp, CHF 36
- 63** Favaro G, Jeannot P, Stübi R: 2002, Re-evaluation and trend analysis of the Payerne ozone sounding, 99pp, CHF 33
- 62** Bettems JM: 2001, EUCOS impact study using the limited-area non-hydrostatic NWP model in operational use at MeteoSwiss, 17pp, CHF 12
- 61** Richner H, et al.: 1999, Grundlagen aerologischer Messungen speziell mittels der Schweizer Sonde SRS 400, 140pp, CHF 42
- 60** Gisler O: 1999, Zur Methodik einer Beschreibung der Entwicklung des linearen Trends der Lufttemperatur über der Schweiz im Zeitabschnitt von 1864 bis 1990, 125pp, CHF 36
- 59** Bettems J-M: 1999, The impact of hypothetical wind profiler networks on numerical weather prediction in the Alpine region, 65pp, CHF 25
- 58** Baudenbacher, M: 1997, Homogenisierung langer Klimareihen, dargelegt am Beispiel der Lufttemperatur, 181pp, CHF 50
- 57** Bosshard, W: 1996, Homogenisierung klimatologischer Zeitreihen, dargelegt am Beispiel der relativen Sonnenscheindauer, 136pp, CHF 38
- 56** Schraff, C: 1996, Data Assimilation and Mesoscale Weather Prediction: A Study with a Forecast Model for the Alpine Region, 138pp, CHF 38
- 55** Wolfensberger, H: 1994, Chronik der Totalisatoren, Handbuch zu den Niederschlags-Totalisatoren, 390pp, CHF 78