



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement des Innern EDI
Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz

Arbeitsbericht MeteoSchweiz Nr. 221

Möglichkeiten und Grenzen der Niederschlagsanalysen zum Hochwasser 2005.

Christoph Frei, Urs Germann, Sophie Fukutome und Mark Liniger



Arbeitsbericht MeteoSchweiz Nr. 221

Möglichkeiten und Grenzen der Niederschlagsanalysen zum Hochwasser 2005.

Christoph Frei, Urs Germann, Sophie Fukutome und Mark Liniger

Diese Studie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) im Rahmen der Ereignisanalyse zum Hochwasser 2005 erstellt. Sie wurde auch in Teil 2 der Ereignisanalyse des BAFU publiziert (Bezzola und Hegg 2008).

Bitte zitieren Sie diesen Arbeitsbericht folgendermassen

Frei, C., Germann U., Fukutome S., Liniger M., 2008: Möglichkeiten und Grenzen der Niederschlagsanalysen zum Hochwasser 2005. *Arbeitsberichte der MeteoSchweiz*, **221**, 19 pp.

Herausgeber

Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, MeteoSchweiz, © 2008

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 Paverne

Vorwort

Räumliche Analysen des Niederschlags aus Radar- oder aus Stationsmessungen werden vermehrt in quantitativen Anwendungen, insbesondere in der Hydrologie genutzt. Dank Verbesserungen in der Messtechnik, der Verdichtung der Stationsnetze und Fortschritten bei Analyseverfahren sind solche Anwendungen in den letzten Jahren erst möglich geworden. Aber die Genauigkeit ist nicht unbegrenzt. Eine sorgfältige Berücksichtigung der Unsicherheiten ist deshalb wichtig. Der fachgerechte Einsatz erfordert eine Auseinandersetzung des Nutzers mit den Eigenschaften der verfügbaren Datensätze.

Dieser Bericht diskutiert die Möglichkeiten und Grenzen heutiger Niederschlagsanalysen aus Radar- und Stationsmessungen. Er illustriert die Ursachen für die Unsicherheiten in den Datensätzen, quantifiziert diese am Beispiel eines extremen Starkniederschlags, und gibt Empfehlungen zur fachgerechten Anwendung. Die Resultate bieten eine Grundlage und Interpretationshilfe für quantitative Anwendungen räumlicher Niederschlagsanalysen.

Der Bericht wurde im Rahmen der Ereignisanalyse des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) zum Hochwasser 2005 erstellt (Bezzola und Hegg 2008) und bezieht sich unmittelbar auf die von MeteoSchweiz für dieses Hochwasser bereitgestellten Datensätze. Viele Erläuterungen sind aber allgemeiner Natur und richten sich deshalb generell an Anwender von gegitterten Niederschlagsdatensätzen.

1 Einleitung

Räumlich und zeitlich hochaufgelöste Niederschlagsanalysen spielen eine zentrale Rolle bei der Beurteilung von Hochwasserereignissen. Als Eingangsgrösse in hydrologische Modelle verhelfen sie zu einem Verständnis der beteiligten physikalischen Prozesse, und mit statistischen Auswertungen lassen sich Extremwerte für Einzugsgebietsniederschläge herleiten, die bei der Beurteilung der Hochwassergefahr nützlich sind.

Für die Ereignisanalyse zum Hochwasser 2005 (Teil 1, Bezzola und Hegg 2007) hat MeteoSchweiz Datensätze der Niederschlagsentwicklung in der Schweiz hergeleitet (siehe auch MeteoSchweiz 2006). Diese wurden nachfolgend für hydrologische Untersuchungen zum Hochwasser Ereignis verwendet. Einige der Anwendungen sind im zweiten Teil der Ereignisanalyse beschrieben (Bezzola und Hegg 2008). Der vorliegende Bericht führt diese Datensätze ein und illustriert ihre Möglichkeiten und Grenzen für hydrologische und statistische Anwendungen.

Auch die heutigen modernen Beobachtungssysteme können die Niederschlagsverteilung nur mit beschränkter Genauigkeit erfassen. Unsicherheiten in den Niederschlagsanalysen sind deshalb nicht vermeidbar. Kenntnisse darüber sind für eine fachgerechte Anwendung zentral und die Unsicherheiten können sich auf die Interpretation von Resultaten auswirken.

Die von der MeteoSchweiz entwickelten Niederschlagsanalysen nutzen zwei unterschiedliche Methoden der Niederschlagsmessung. Sie unterscheiden sich in ihrer räumlichen und zeitlichen Auflösung sowie der absoluten Genauigkeit. Je nach Anforderung in einer konkreten Anwendung eignet sich die eine oder die andere Niederschlagsanalyse besser. Zusammen ergänzen sich die beiden Datensätze. In diesem Bericht werden die Unsicherheiten der beiden Niederschlagsanalysen illustriert, wo möglich quantifiziert und daraus Leitlinien für deren praktische Anwendung formuliert.

Nach einer kurzen Einführung der zwei Datensätze (Kapitel 2) werden in diesem Bericht folgende Fragen untersucht:

- Woher kommen die Unsicherheiten in den Datensätzen und wie gross sind sie? (Kapitel 3)
- Wie unterscheiden sich die beiden Datensätze? (Kapitel 4)
- Welchen Einfluss haben die Unsicherheiten auf Extremwertanalysen für Gebietsnieder-

schläge? Sind solche Analysen überhaupt sinnvoll? (Kapitel 5)

- Welche Folgen haben die Unsicherheiten generell für die praktische Anwendung der beiden Niederschlagsanalysen? (Kapitel 6, sowie ausführliche Interpretationshilfe in Anhang A.)

2 Niederschlagsanalysen für das Hochwasser 2005

In Teil 1 der Ereignisanalyse zum Hochwasser 2005 hat MeteoSchweiz zwei Analysen der räumlichen und zeitlichen Niederschlagsverteilung bereitgestellt:

- a) Eine flächige Analyse aus konventionellen Niederschlagsmessungen an Wetterstationen (im Folgenden vereinfacht als *Stationen Analyse* bezeichnet),
- b) Eine Analyse durch Kombination von Niederschlags-Radarmessungen (im Folgenden als *Radar Analyse* bezeichnet).

Die *Stationen Analyse* (siehe Beispiel Abb. 1a) beruht auf einer räumlichen und klimatologischen Interpolation von in-situ Messungen an 482 Niederschlagsstationen (440 der MeteoSchweiz und 42 des SLF, siehe MeteoSchweiz 2006 für eine Karte). Gut drei Viertel der Stations-Messungen in der Schweiz werden nur im 24-Stunden Takt durchgeführt. Deshalb kann die

Stationen Analyse nur für tägliche Niederschlagssummen durchgeführt werden (gültig jeweils von 06-06 UTC). Das Interpolationsverfahren (modifiziert nach Shepard 1984) gewichtet die Stationen in Abhängigkeit ihrer Distanz und Richtungsisolierung (Frei und Schär 1998). Anders als in klassischen Verfahren wird die Gewichtung nicht auf die Niederschlagssummen direkt angewendet, sondern auf die relativen Abweichungen zu einer Langzeit-Klimatologie. Dadurch können Fehler als Folge der nicht-repräsentativen Stationsverteilung (z.B. Übervertretung von Talstationen im Gebirge) reduziert werden (siehe Widmann und Bretherton 2002). Als Grundlage diente dazu die Klimatologie von Schwarb et al. (2001), (siehe auch Daly et al. 2002, Schwarb 2001).

Das Resultat der *Stationen Analyse* sind tägliche Niederschlagsfelder für den August 2005 auf einem Gitter mit ca 2 km Maschenweite. Die effektive Auflösung liegt aber im Bereich 10-20 km, nahe dem mittleren Stationsabstand. (Siehe dazu ausführlicher Kapitel 3.1.)

Die *Radar Analyse* (siehe Beispiel Abb. 1b) stützt sich auf einen Algorithmus, welcher aus der Rückstreuung von Radarpulsen an Niederschlagspartikeln auf die Niederschlagsintensität schliesst. Das MeteoSchweiz WetterradarNetz besteht aus drei Stationen (La Dole, Albis, Monte Lema) und liefert in Echtzeit hochaufgelöste Niederschlagskarten im Fünfminutentakt für die ganze Schweiz sowie das angrenzende Ausland. Im Gebirge ist die Radar-Niederschlagsmessung mit Herausforderungen konfrontiert, welche besondere Hardware und raffinierte Datenbearbeitungsmethoden erfor-

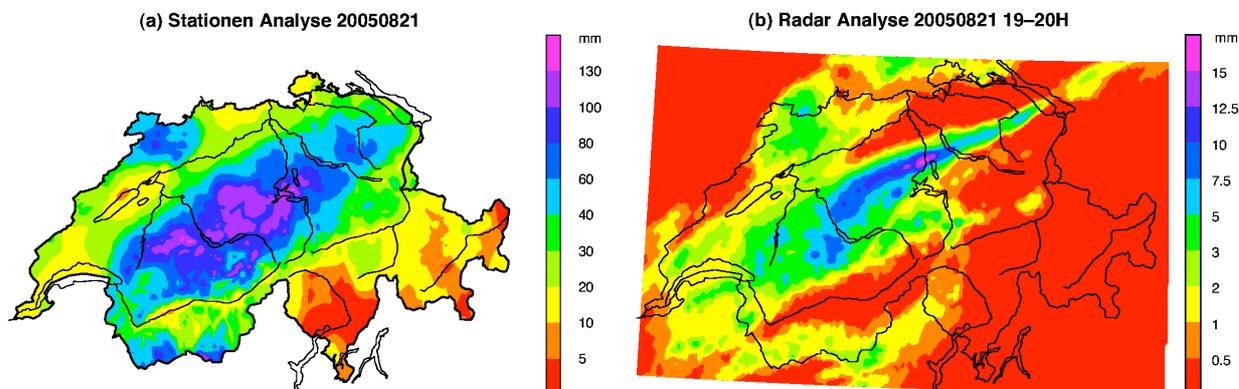


Abbildung 1: Niederschlagsverteilungen aus den beiden Analysen der MeteoSchweiz. (a) 24-Stunden Summe für den 21. August (06 – 06 Uhr UTC Folgetag) aus der Stationen Analyse. (b) 1-Stunden Summe für den 21. August (19-20 Uhr UTC) aus der Radar Analyse.

dern. Die heute eingesetzten Techniken beruhen auf einer Erfahrung von nunmehr 40 Jahren (Joss et al., 1998; Germann und Joss, 2004). Die Stabilität der Messung wird durch die automatisierte, laufende Überwachung und Kalibration der Hardware sowie einen periodischen Unterhalt vor Ort sichergestellt. Ein aufwendiger Clutter-Unterdrückungs-Algorithmus detektiert und eliminiert operationell 98% der Bodenechos. Die restlichen 2% Störechos wurden für die Radar-Analyse unter Verwendung eines zusätzlichen Filters auf kleiner 0.2% reduziert. Wo die Radar-Messung auf Bodenniveau durch Berge abgeschirmt ist, werden die Messungen aus der Höhe mittels einer Profilkorrektur extrapoliert. Durch Weiterentwicklungen in den letzten Jahren konnte der systematische Fehler und die zufälligen Unsicherheiten markant reduziert werden (siehe Germann et al. 2006b, Germann und Joss 2004, Joss et al. 1998, Joss und Waldvogel 1990).

Die *Radar Analyse* für den August 2005 deckt die Periode 18.-22. August 2005 ab und wurde mit einer Auflösung von einer Stunde und einer Maschenweite von einem Kilometer bereitgestellt. In Erweiterung zum operationellen Produkt wurde die Niederschlagssumme für das gesamte Ereignis lokal an die Bodenmessungen angeeicht, womit allfällige noch vorhandene systematische Fehler korrigiert wurden.

3 Resultate

Die vorhandenen Messungen (Radar und Stationen) liefern nur ein unvollständiges Bild der tatsächlichen Niederschlagsverteilung. Mit geeigneten Analysemethoden ist es zwar möglich Flächen deckende Information aus Messungen mit beschränkter Abdeckung zu rekonstruieren und Fehler behaftete Messungen zu korrigieren. Aber auch die modernsten Verfahren können diese Aufgabe nur mit eingeschränkter Genauigkeit erfüllen. Dieses Kapitel beschreibt die wichtigsten Unsicherheitsquellen für die beiden Niederschlagsanalysen der MeteoSchweiz und macht, wo möglich, quantitative Angaben dazu.

3.1 Unsicherheiten der Stationen Analyse

Die Stärke der Stationen Analyse liegt in der hohen absoluten Genauigkeit, ihrer Verfügbar-

keit über klimatologische Zeiträume und in der gleichmässigen Abdeckung über die Schweiz.

Die Stationen Analyse kann sowohl systematisch (unabhängig von Ort oder Zeit) als auch zufällig von der tatsächlichen Niederschlagsverteilung abweichen. Systematische Abweichungen entstehen einerseits durch die bekannten Messfehler, wenn als Folge des erhöhten Windes über dem Messgerät, ein Teil der Niederschlagspartikel nicht aufgefangen wird (Neff 1977, Nespor und Sevruk 1999). Die Grösse dieses Messfehlers nimmt mit der Windstärke zu, mit der Niederschlagsintensität ab und ist bei Schneefall grösser als bei Regen. Die Starkniederschläge im August 2005 waren von eher schwachen Winden begleitet und die Niederschläge sind fast überall in flüssiger Form gefallen. Der Messfehler dürfte deshalb kleiner sein als der klimatologische Fehler im Sommer. Letzterer wurde für den Alpenraum je nach Windexposition auf 4-12% geschätzt (Sevruk 1985, Richter 1995).

Systematische Abweichungen können auch als Folge der nicht-repräsentativen Verteilung der Messstationen im Gelände entstehen. (Untervertretung von Hang- und Bergstationen gegenüber Talstationen.) Diesem Umstand wurde in der Analyse begegnet, indem nicht die absoluten Mengen sondern die Abweichungen von einer Langzeitklimatologie analysiert wurden (siehe auch Widmann und Bretherton 2002). Die verwendete Klimatologie wurde mit einem speziell für den Alpenraum angepassten Verfahren erstellt, in welchem die Repräsentativität der Stationen explizite berücksichtigt wurde. Kreuzvalidierungen haben gezeigt, dass der systematische Fehler der Klimatologie unterhalb von 1500 m.ü.M kleiner als 1% und darüber kleiner als 5% ist (Schwarb 2001).

Zusammen dürften die systematischen Unsicherheiten eine Unterschätzung um einige wenige Prozent ausmachen. Im Vergleich zu den zufälligen Unsicherheiten sind sie unbedeutend (siehe unten) und es besteht deshalb kein dringender Bedarf die Analysen für diese Fehler zu korrigieren.

Zufällige Abweichungen der Analyse von der tatsächlichen Niederschlagsverteilung entstehen vor allem dadurch, dass mit den vorhandenen Messungen nur beschränkte Information über das wahre Niederschlagsfeld zur Verfügung steht. Die Niederschlagsverteilungen – auch für 24-Stunden Summen – weisen feinskalige Zellen und Bänder auf, die auch mit dem dichten

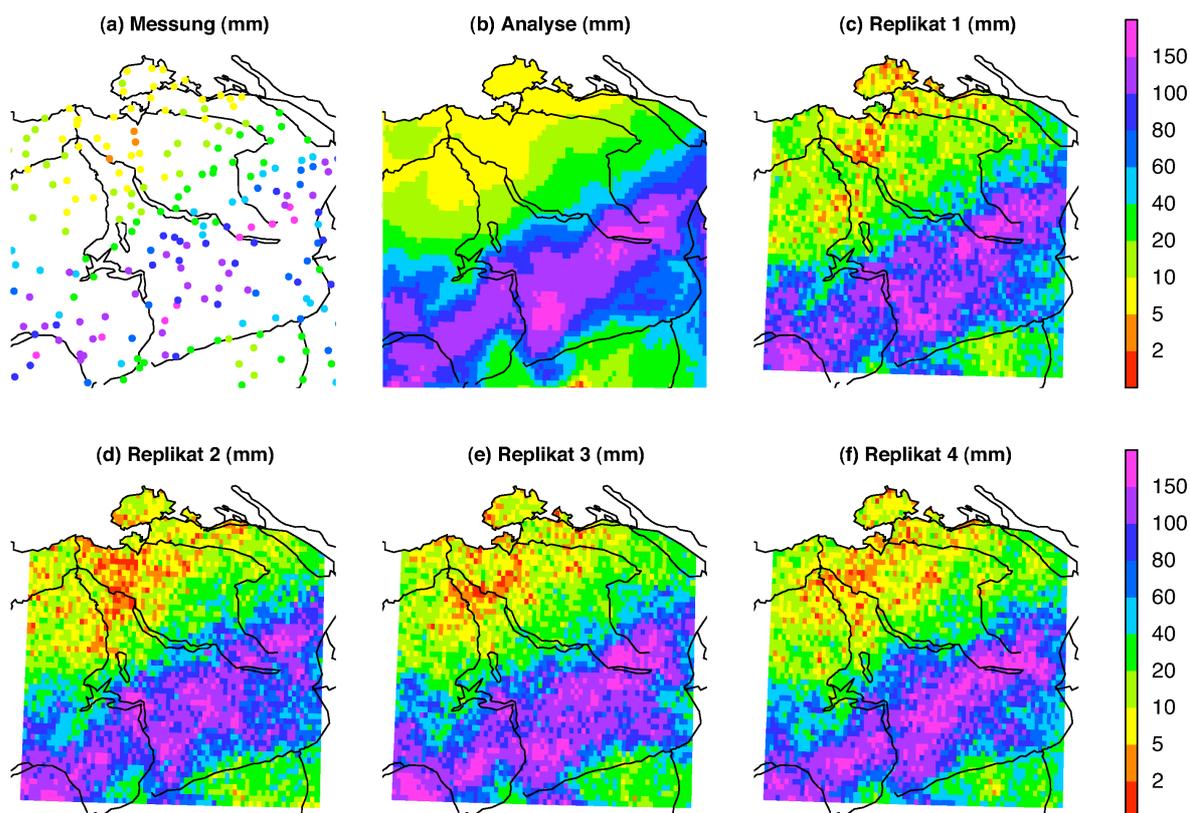


Abbildung 2: Niederschlagsverteilung in der Nordost Schweiz am 22. August 2005. (a) Messungen an Niederschlagsstationen, (b) von MeteoSchweiz zur Verfügung gestellte Stationen Analyse, (c)-(f) vier Zufallssimulationen möglicher realer Niederschlagsverteilungen, konsistent mit den Stationsmessungen und mit der räumlichen Kovarianzstruktur in den Messungen.

Messnetz in der Schweiz nur unvollständig erfasst werden. Ausdruck der hohen Variabilität sind die zum Teil grossen Unterschiede in Messungen benachbarter Stationen. Die Messungen für den 22. August (siehe Abb. 2a) zeigen eindrückliche Beispiele.

Das Messnetz bildet die wahren Niederschlags Variationen auf der km Skala nicht vollständig ab, aber die statistischen Eigenschaften der Variationen lassen sich aus den Messungen bestimmen, z.B. den Grad der räumlichen Diskontinuität, die typische Längenskala und Amplitude der Variationen. Abbildungen 2c-f zeigen hypothetische Niederschlagsverteilungen für den 22. August, welche einerseits dieselben statistischen Eigenschaften aufweisen wie die Messungen und andererseits an den vorhandenen Stationen mit den gemessenen Niederschlagswerten übereinstimmen. (Die Verteilungen wurden mit Methoden der Geostatistik und durch bedingte multivariate Zufallssimulation gewonnen.) Alle vier Verteilungen sind zufällige, aber im Rahmen der vorhandenen Unsicherheiten mögliche, reale Verteilungen des Nieder-

schlags am 22. August. Diese zufälligen Replikate weisen Feinstrukturen auf wie man sie in einem Niederschlagsfeld tatsächlich erwartet, sie enthalten Extrema (feucht und trocken), die ausserhalb dem Bereich der Stationsmessungen liegen, und sie unterscheiden sich deutlich voneinander, insbesondere in Gebieten mit weniger dichtem Messnetz. Die Replikate illustrieren den Grad der Unsicherheit der Stationen Analyse über das tatsächliche Niederschlagsfeld.

Abbildung 2b zeigt die von MeteoSchweiz erstellte *Stationen Analyse* für den 22. August. Die Verteilung ist „glatter“ als die Zufallsreplikate und mit Sicherheit nicht das Abbild eines realen Niederschlagsfeldes. Die Analyse stellt vielmehr für jeden Gitterpunkt den Erwartungswert der verschiedenen Replikate dar. Sie hat also die kleinste mittlere Abweichung zu allen realistisch möglichen Verteilungen. Obwohl unrealistisch in ihren Struktureigenschaften, ist sie jene Verteilung die im Mittel für alle Anwender den kleinsten Ärger (Fehler) beschert.

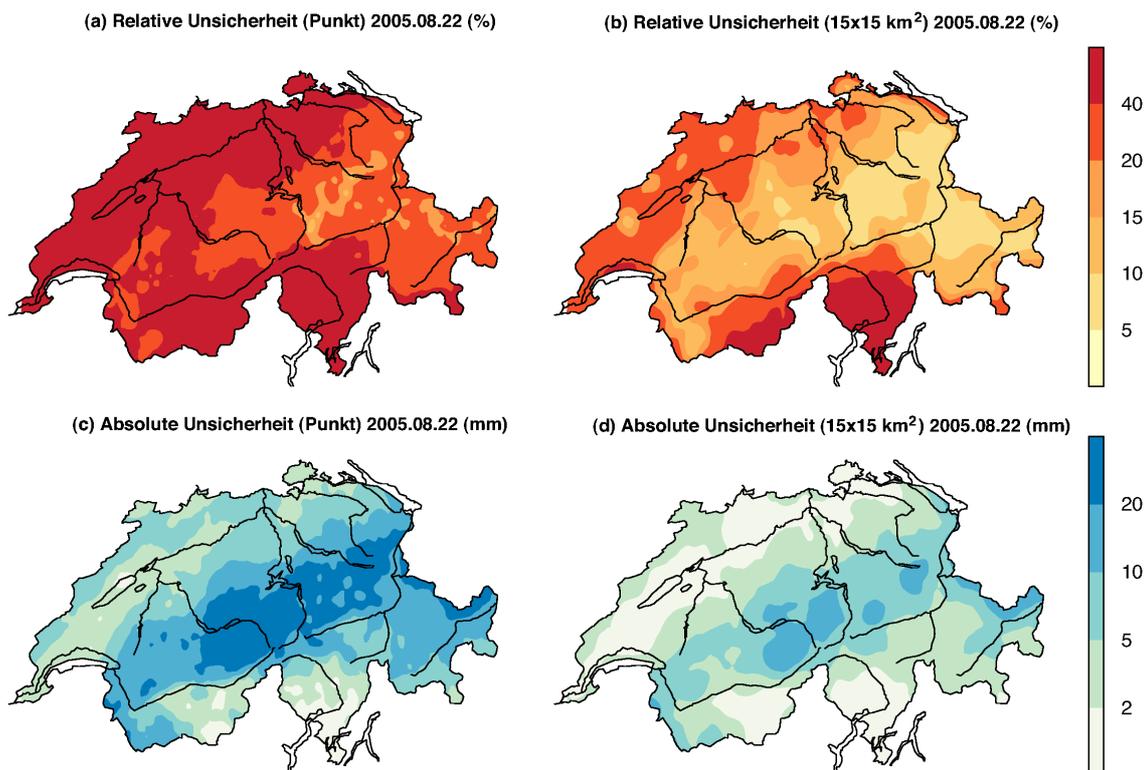


Abbildung 3: Unsicherheit der Stations Analyse für den 22. August 2005 als Folge der eingeschränkten Messnetzdichte. (a) und (c) Unsicherheit der Punktschätzung (einzelner Gitterpunkt). (b) und (d) Unsicherheit der Schätzung eines Gebietsmittels für ein $15 \times 15 \text{ km}^2$ Quadrat. Die Werte bezeichnen die *Standard Unsicherheit*: in relativen (a, b, %) und absoluten Einheiten (c, d, mm). Eine relative Unsicherheit von X% bedeutet, dass 68% der Replikate weniger als $\pm X\%$ von der Analyse entfernt sind.

Die reale Verteilung ist zwar nicht bekannt aber Zufallssimulationen wie in Abb 2 können als mögliche reale Verteilungen benützt werden, um die Unsicherheit der *Stations Analyse* spezifisch für diesen Starkniederschlag zu quantifizieren. Die Unsicherheit, gültig für einzelne Gitterpunkte der Analyse (Punktschätzung), sind in Abb. 3a,c dargestellt (für 22. August 2005). Absolut gesehen, sind sie dort gross wo viel Niederschlag gefallen ist (Alpennordrand), relativ gesehen dort wo wenig Niederschlag gefallen ist (Nordwestschweiz und Tessin). Für einzelne Punktmessungen sind die relativen Unsicherheiten aber auch in den betroffenen Starkniederschlagsgebieten substantiell: die Standardunsicherheit beträgt $\pm 20\text{-}40\%$ (Abb. 3c). Die feinskalige Variabilität erlaubt also nur sehr ungenaue Aussagen über Punktniederschläge.

Die Unsicherheit der Analyse reduziert sich markant für Gebietsniederschläge. Abb. 3b,d zeigt die Unsicherheit für quadratische Gebiete mit einer Fläche von $15 \times 15 \text{ km}^2$. In den hauptsächlich betroffenen Gebieten ist die Unsicherheit

zwischen $\pm 5\text{-}15\%$. Auf dieser gröberen Skala kompensieren sich die zufälligen Unsicherheiten an Punkten teilweise und die vorhandenen Messungen (mittlerer Stationsabstand 10 km) liefern Information über die tatsächlichen Niederschlagsverhältnisse im Gebiet. Für Gebiete mit einer Fläche von $20 \times 20 \text{ km}^2$ reduziert sich die Unsicherheit auf unter $\pm 10\%$. Abb. 4 illustriert die Verhältnisse für zwei reale Fluss-einzugsgebiete: Für das Einzugsgebiet der Sihl (Schindellegi, ca. 240 km^2) beträgt die Standard Unsicherheit $\pm 8\%$, für das wesentlich grössere Einzugsgebiet der Aare (Thun, ca. 2400 km^2) nur noch $\pm 5\%$.

Die hohe Unsicherheit der Stations Analyse auf der lokalen Skala legt es nahe diese gar nicht als Schätzung für Punkte oder Gebiete im km^2 Bereich zu verwenden. (Allenfalls mit Berücksichtigung der Unsicherheiten.) Mit dem Massstab einer „tolerierbaren“ Unsicherheit von etwa $10\text{-}15\%$ hat die *Stations Analyse* eine „effektive Auflösung“ von etwa 15 km, deutlich gröber als die nominelle Auflösung von 2 km. Die Analyse

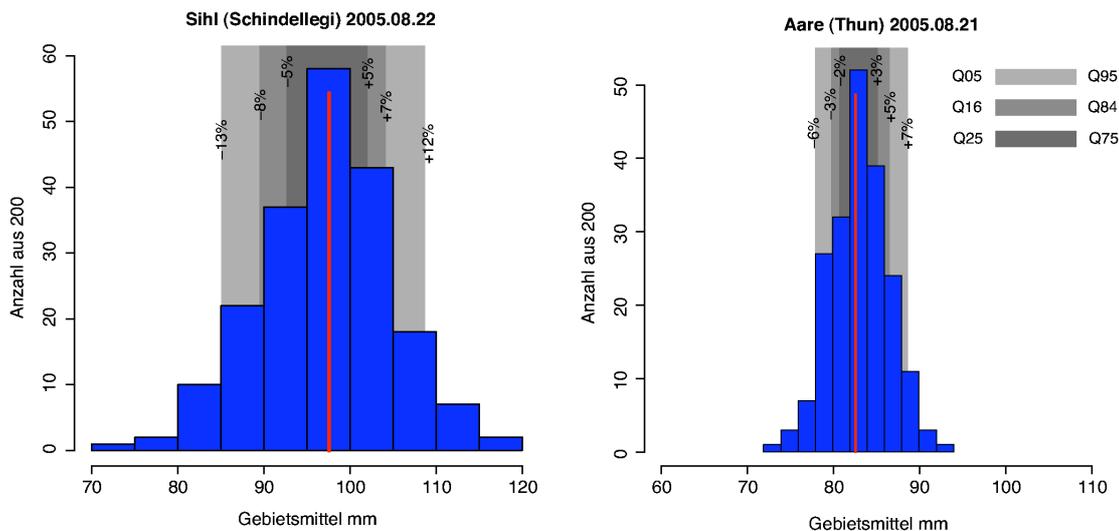


Abbildung 4: Unsicherheit in der Schätzung des Gebietsniederschlags für die Einzugsgebiete Sihl (Schindellegi, ca. 240 km²) und Aare (Thun, 2400 km²). Verteilung des 1-Tages Niederschlags aus 200 Zufallsreplikaten wie in Abb. 2. Für die beiden Gebiete wurde der jeweils niederschlagsreichere Tag gewählt. Graue Bereiche bezeichnen Interquantil Bereiche. Die prozentuale Abweichung der Quantile von der besten Schätzung sind als Zahlenwerte eingetragen. Der Bereich zwischen dem 16% und 84% Quantil (mittlerer Bereich) wird als Standard Unsicherheit bezeichnet.

wurde vor allem deshalb auf einem Gitter mit feiner Auflösung zur Verfügung gestellt, weil dies die Berechnung von Gebietsniederschlägen über grösseren Einzugsgebieten mit komplexen Formen für den Anwender wesentlich vereinfacht.

3.2 Unsicherheiten der Radar Analyse

Die Stärke der Radarinformation liegt in der sehr hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung, welche es erlaubt, Feinstrukturen und die zeitliche Entwicklung im Detail zu analysieren (siehe z.B. Abb. 1b, und Abb. 3.3 in MeteoSchweiz 2006). Die Unsicherheit der Radar Analyse bezüglich räumlicher und zeitlicher Ortung der Niederschläge ist minimal. Die nominelle Auflösung der Radar Analyse beträgt 1 Kilometer und 1 Stunde. Die effektive Auflösung weicht nur geringfügig von der nominellen Auflösung ab, da die Wetterradars die Atmosphäre über der Schweiz hochaufgelöst (360 Richtungen radial, 20 Elevationen) abtasten. Die Messungen werden bis zu einer maximalen Distanz von 230 km ausgewertet. Das Abtasten der 20 Elevationen benötigt nur gerade 5 min. Wir erhalten also alle 5 min ein einigermaßen vollständiges dreidimensionales Bild der Niederschläge über der Schweiz. Da die räumliche Auflösung dieser Radarinformation (1 km²) stark von derjenigen einer Stationsmessung (200 cm², Öffnung des

Messgerätes) abweicht, sind entsprechende Niederschlagswerte nur dann vergleichbar, wenn der Niederschlag über eine genügend grosse Zeitperiode (typischerweise >12 h) aufsummiert wird. Mehr zum Thema Auflösung und Abtaststrategie siehe Joss et al. (1998).

Die Schwäche der Radarinformation liegt in der relativ grossen Unsicherheit bezüglich der absoluten Niederschlagsmengen. Der systematische Fehler der Radar Analyse liegt im Prozentbereich. Der zufällige Fehler auf der Skala von 1km und 24h entspricht im Mittel in der Schweiz einem Faktor von 1.6. In den Schweizer Alpen ist der Faktor grösser und liegt zwischen 1.6 und 2, im Schweizer Mittelland sowie im Südtessin ist er tiefer und liegt bei 1.4. Fehlechos bei Schönwetter sind selten und entsprechen 0.1% des totalen Niederschlages. Die Unsicherheiten für Punktwerte in der Radar Analyse sind nur beschränkt korreliert in Raum und Zeit. Die resultierende Unsicherheit wird also kleiner, wenn die Radarwerte zuerst über grössere Gebiete respektive Zeiträume aggregiert werden. Um die Korrelation der Unsicherheiten quantitativ auszudrücken wird bei der MeteoSchweiz zur Zeit ein weltweit neues Verfahren entwickelt, welches anstelle einer einzigen deterministischen Schätzung ein Ensemble von Radarniederschlags-Feldern generiert (Germann et al 2006a).

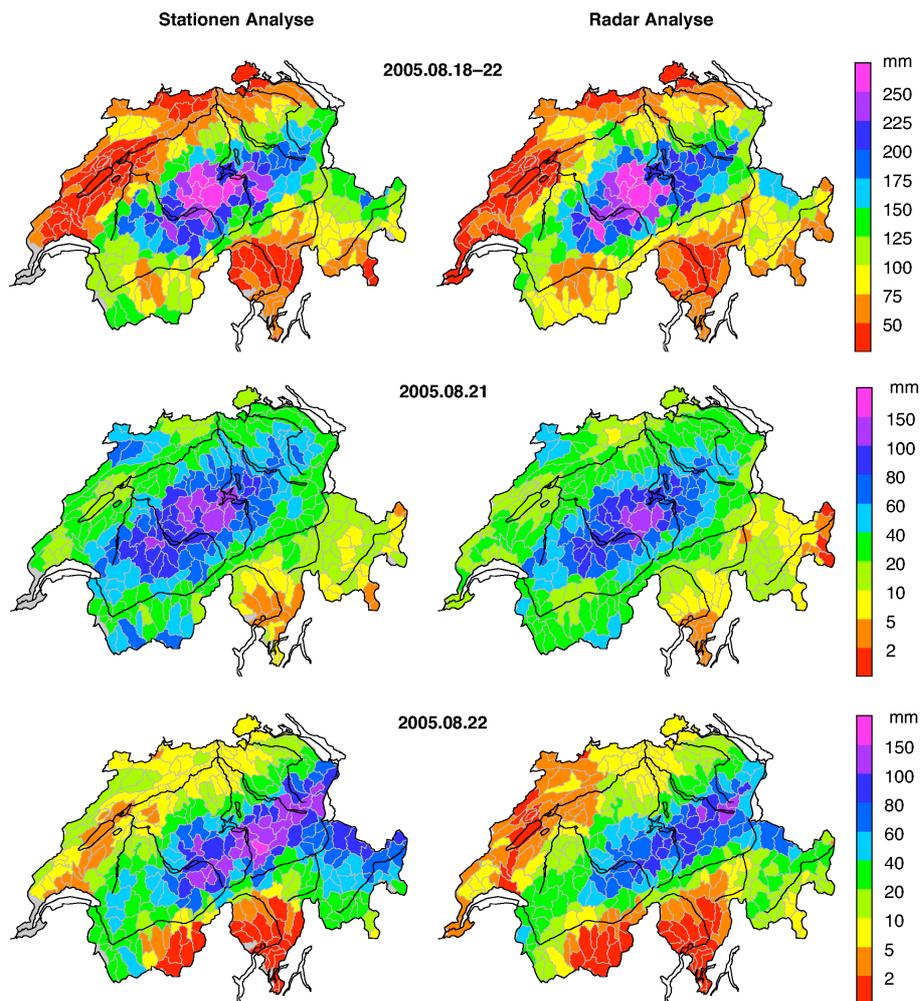


Abbildung 5: Gebietsniederschläge für die Bilanzierungsgebiete in der Schweiz. Links: Stationen Analyse, rechts: Radar Analyse. Mit grau sind Bilanzierungsgebiete bezeichnet die einen grossen Flächenanteil (>50%) ausserhalb der Landesgrenze haben und für welche in der Stationen Analyse deshalb kein Gebietsmittel berechnet wurde.

Das Hauptproblem der Radar-Niederschlagsschätzung in den Alpen liegt in der Abschattung des Radarstrahles durch die Berge und den Horizont. Als Folge davon ist die bodennahe Schicht der Atmosphäre nur gerade in nächster Nähe der drei Radarstandorte sichtbar. Über den Alpen sind die untersten 2-3 km der Atmosphäre oft nicht direkt sichtbar; in diesen Gebieten werden Radarsignale aus den darüber liegenden Schichten verwendet und mit raffinierten aber nicht perfekten Auswerteverfahren auf den Boden extrapoliert. Dies ist die Hauptursache für die relativ grossen oben genannten Unsicherheiten (zufällige Fehler) in der Radar Analyse (Germann et al. 2006b).

Die Aussagen bezüglich Unsicherheit im Radar-Datensatz basieren auf detaillierten Vergleichen zwischen den operationell verfügbaren Echtzeit-Radar-Niederschlagsschätzungen und den Stationsmessungen am Boden. Der zufällige Fehler

sollte als „Standard Fehler“ interpretiert werden, d.h. als Erwartungswert des Fehlers, im Einzelfall sind kleinere/grössere Fehler möglich. Diese Zahlen dürften die reellen Unsicherheiten überschätzen, und zwar aus zwei Gründen: Erstens sind Unterschiede zwischen Radarschätzung und Bodenmessung nicht nur auf Radarfehler zurückzuführen, sondern auch auf Unsicherheiten in der Stationsmessung, insbesondere im Gebirge sowie allgemein in konvektiven Gewitterlagen. Zweitens wurden für die Berechnung der Radar Analyse für das August 2005 Hochwasser zusätzlich zu den operationellen Methoden spezifische Algorithmen entwickelt und angewandt, welche in der Zwischenzeit bereits testweise auch in Echtzeit im Einsatz sind. Die aufgeführten Zufallsfehler von Faktor 1.4 bis 2.0 können also grob als obere „konservative“ Grenze eines „Standard Fehlers“ betrachtet werden.

4 Vergleich der Analysen für den Starkniederschlag 2005

Die Stationen- und die Radar Analyse weisen unterschiedliche räumliche und zeitliche Auflösungen auf. Ein direkter Vergleich ist also nur für diejenigen Skalen möglich welche durch beide Analysen abgedeckt werden, also für Tagessummen und auf für Gebietsmittel (ca 15x15 km, entsprechend der effektiven Auflösung der Stationen Analyse). Ein solcher Vergleich ist für den Anwender primär illustrativ, und als Auswahlkriterium in der Regel wenig hilfreich. Ein Anwender mit einem Bedürfnis für hohe Raum und Zeitauflösung hat ja nicht wirklich die Wahl.

Dieser Abschnitt dokumentiert einen Vergleich der Gebietsniederschläge für die hydrologischen Bilanzierungsgebiete der Schweiz. Die 290 Gebiete stellen eine hydrographische Gliederung der Schweiz in Flächen von etwa 50 – 300 km² dar (siehe z.B. Breinlinger et al. 1992). Für den Vergleich wurde die stündliche Radar Analyse zu Tagessummen aggregiert (konsistent mit der Stationen Analyse).

Schweizweit gesehen stimmt die Verteilung und der zeitliche Ablauf des Niederschlags in der Radar- und der Stationen Analyse sehr gut überein (Abb. 5). Sowohl in der Summe der gesamten Episode (18.-22. August), wie auch für die beiden Tage des Ereignisses (21., 22. August) sind die Gebiete mit hohen Niederschlagssummen fast identisch. Die Aneichung der Radar Analyse (siehe Kapitel 2) mag zwar die gute Übereinstimmung in der Summe über das gesamte Ereignis zum Teil erklären, aber für die Einzeltage sind die Niederschlagsanalysen unabhängig voneinander. Die landesweite Verteilung und der Ablauf des Niederschlags im August 2005 werden in beiden Analysen sehr ähnlich wiedergegeben.

Trotzdem gibt es zum Teil grössere quantitative Unterschiede (Abb. 6). Zwar unterscheiden sich die Analysen für die Ereignissumme fast überall um weniger als 20%, für Einzeltage sind die Unterschiede aber grösser. Die Radar Analyse ist vor dem Ereignis (18.-20. August) tendenziell feuchter aber während dem Ereignis (21., 22. August) trockener als die Stationen Analyse. Grössere Abweichungen gibt es auch im Gebirge (Alpen und Jura, 22. August). Dort weist die Radar Analyse zum Teil weniger als die Hälfte des Niederschlags der Stationen Analyse auf. Diese Regionen sind aber eher trocken, sodass sich kleine Abweichungen in den Mengen stark

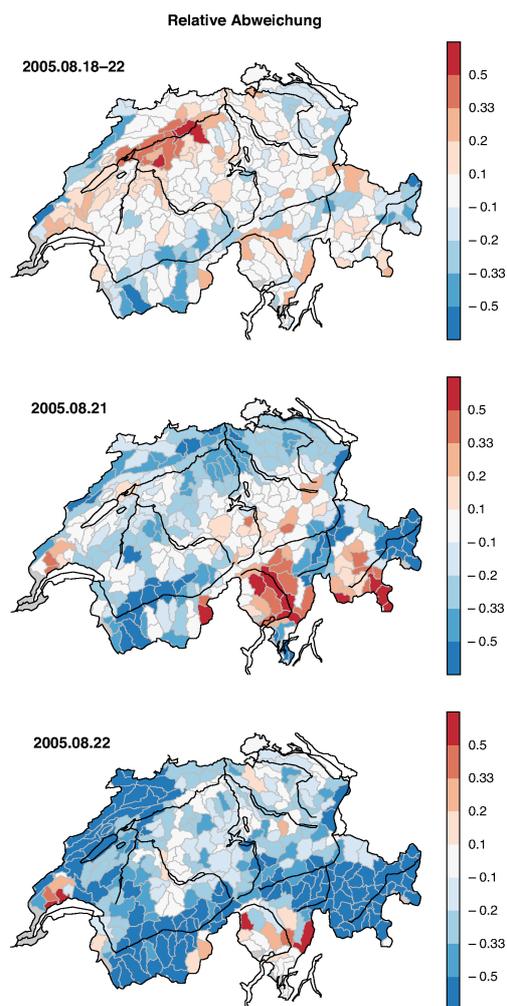


Abbildung 6: Relative Abweichungen der Gebietsniederschläge zwischen Radar- und Stationen Analyse. Die relative Abweichung ist definiert als $(\text{Radar-Stationen}) / (0.5 \cdot (\text{Radar} + \text{Stationen}))$. Ein Wert von 0.2 bedeutet ein Verhältnis von 1.23 zwischen Radar- und Stationen Analyse. Blaue (braune) Farben bezeichnen Gebiete in welchen die Stationen Analyse feuchter (trockener) ist als die Radar Analyse.

auf die relativen Unterschiede auswirken. In Gebieten mit hohen Niederschlagsmengen sind die relativen Unterschiede deutlich kleiner (siehe Abb. 7): Für mehr als die Hälfte der Gebiete mit einem Gebietsniederschlag von mindestens 90 mm pro Tag sind die Abweichungen kleiner als 10% (21. August) resp. kleiner als 25% (22. August).

Die Unterschiede zwischen den beiden Analysen kommen einerseits von zufälligen Unsicherheiten der Stationen Analyse (siehe Kapitel 3.1). Rund zwei Drittel der Bilanzierungsgebiete sind kleiner als 200 km². Für diese muss mit einer

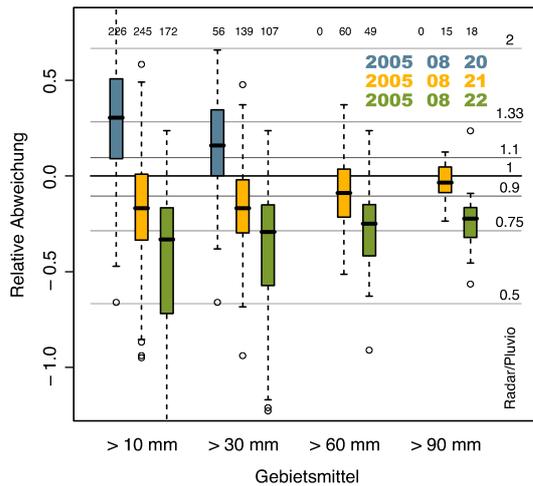


Abbildung 7: Boxplot der relativen Abweichungen zwischen Radar- und Stationen Analyse für die Bilanzierungsgebiete. Die Abweichungen sind für drei Tage des Ereignisses (in Farbe) dargestellt und aufgeteilt in vier Gruppen von Gebieten, für welche der Gebietsniederschlag jeweils eine bestimmte Menge überschritten hat (x-Achse). Die Anzahl der Gebiete in jeder Gruppe/Tag sind im oberen Teil der Graphik aufgeführt. Die Skala im rechten Teil der Graphik (horizontale Linien) zeigt das Verhältnis von Radar zu Stationen Analyse entsprechend der in der Legende zu Abb. 6 definierten relativen Abweichung.

Unsicherheit von 15% und mehr gerechnet werden. Andererseits dürften die eher systematischen Abweichungen (trockenere Verhältnisse im Radar) auf die eingeschränkte Genauigkeit der Radar Analyse zurückgehen. Offenbar war die verwendete Umrechnung von Radarsignal in Niederschlagsintensität nicht für die gesamte Episode gleich repräsentativ. Auch die Abweichungen in Gebirgsregionen dürften mit der eingeschränkten Radar Sichtbarkeit in diesen Gebieten zusammenhängen.

Trotz Unterschieden zeigen die beiden Analysen auf vergleichbaren Skalen eine konsistente Niederschlagsverteilung und eine gute quantitative Übereinstimmung in den vom Starkniederschlag am stärksten betroffenen Gebieten. Die Radar Analyse dürfte für die beiden Ereignistage 21./22. August leicht zu trocken sein, am 22. August in inneralpinen Regionen sogar um mehrere 10%.

Die eingeschränkte absolute Genauigkeit in den Niederschlagsmengen der Radaranalyse wird wettgemacht durch ihre hohe Auflösung und die unmittelbare Verfügbarkeit der Daten. Diese für viele Anwendungen zentralen Anforderungen können durch Stationsbeobachtungen – auch wenn sie automatisch in hoher Zeitauflösung erfolgen – nur ungenügend erfüllt werden. Wür-

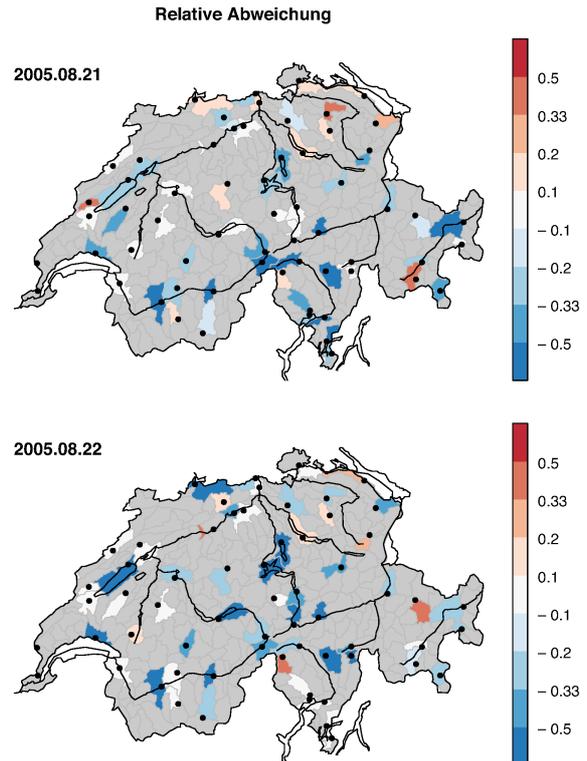


Abbildung 8: Relative Abweichung (analog zu Abb. 6) der täglichen Niederschlagstotale zwischen 60 ANETZ Stationen und Gebietsniederschlägen aus der Stationen Analyse. Der Vergleich ist für jene Bilanzierungsgebiete dargestellt in welchen ANETZ Stationen liegen. Die Abweichungen charakterisieren die Repräsentativität von ANETZ Stationen für den Gebietsniederschlag im Bilanzierungsgebiet in dem die Station enthalten ist. Blaue (braune) Farben bezeichnen Gebiete in welchen die Stationen Analyse feuchter (trockener) ist als der Messwert an der ANETZ Station.

den anstelle der Radaranalyse die Daten von Einzelstationen (ANETZ Stationen) als Datenquelle für stündliche Gebietsniederschläge verwendet, müsste man mit vergleichbaren oder sogar grösseren relativen Fehlern rechnen (Abb. 8). Dies sogar für Bilanzierungsgebiete, welche die jeweiligen Stationen enthalten. Für weiter entfernte Gebiete wären die Unterschiede noch deutlich grösser. Einzelstationen sind also bereits auf einer Skala von wenigen km weniger repräsentativ als die Radar Analyse. Automatische Einzelstationen sind keine Alternative zur Radar Analyse.

Ein Untersuchung über die Unsicherheit von punktuellen Niederschlagsschätzungen führt zu einer ähnlichen Schlussfolgerung. Ausgewertet wurden Radar Analysen des Hochwassers 2005 für Gebiete im Alpenraum und Akkumulationsperioden von 3, 6, 12 und 24 Stunden. Die Unsicherheit der Stationsmessung nimmt infolge der

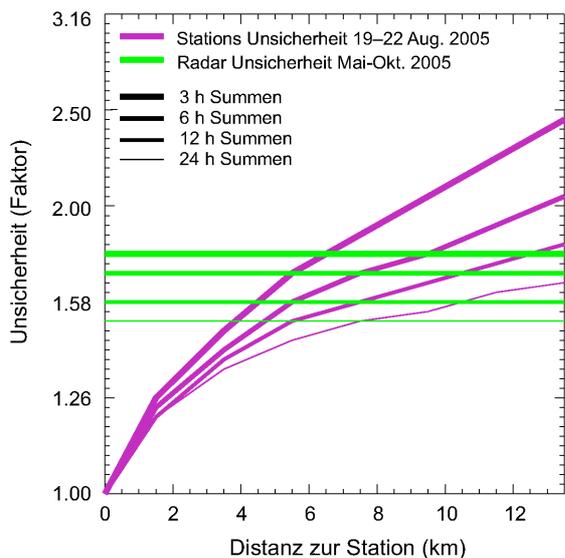


Abbildung 9: Unsicherheit einer Radarmessung (grün) im Vergleich zur Unsicherheit bei der Extrapolation einer Stationsmessung für einen von der Station entfernten Punkt (violett). Die Unsicherheit bei der Extrapolation einer Stationsmessung nimmt mit der Distanz zwischen Station und Zielpunkt (x-Achse) zu. Die Zunahme ist umso schneller je kürzer das betrachtete Niederschlagsintervall ist (verschiedene Linienstärken). Unsicherheit (y-Achse) in Faktoren (2 entspricht Verdoppelung/Halbierung) für die Standard Unsicherheit (16% bis 84% Quantil). Die Auswertung ist gültig für die Sommermonate 2005. Beispiel-Interpretation: Für drei-stündliche Sommer-Niederschläge ist die Unsicherheit bei Extrapolation einer Stationsmessung über 8 km grösser als die Unsicherheit der Radarmessung.

hohen räumlichen Variabilität des Niederschlages rasch mit zunehmender Distanz vom Messort zu. Für einen Punkt in den Alpen erreicht die Unsicherheit einer Stationsmessung diejenige der Radar Analyse in weniger als 7 km Abstand vom Messort (Abb. 9). Das Resultat gilt in erster Näherung unabhängig von der Akkumulationsperiode im Bereich 3 bis 24 Stunden. Für stark konvektive Ereignisse wie zum Beispiel die Niederschlagszellen im Vorfeld des Hochwassers (18 August) liegt der „cross-over“ bereits bei 2 bis 3 km. Dies ist eine wichtige Grundlage für die korrekte Interpretation von räumlich extrapolierten Punktmessungen.

5. Analyse-Unsicherheit und Extremwertstatistik

Mit einer systematischen Erstellung der Stationen Analyse über viele Jahre können lange Zeitreihen von Gebietsniederschlägen für hydrologische Einzugsgebiete berechnet werden. Eine Auswertung solcher Reihen mit den Methoden der Extremwertstatistik erlaubt die Bestimmung von extremen Gebietsniederschlägen, welche für Einschätzungen zur Hochwassergefahr interessant sind. Die Unsicherheiten in der räumlichen Analyse können sich dabei auf die Extremwertanalyse übertragen. Dieser Einfluss wurde anhand einer einfachen Fallstudie untersucht.

Für diese Fallstudie wurde die Stationen Analyse für mehrere Einzugsgebiete täglich von 1966 bis 2005 erstellt. Die Werte der resultierenden Gebietsniederschlags Zeitreihe wurden dann mit zufälligen Störungen versehen, die Extremwertanalyse mit den gestörten Werten wiederholt und der Einfluss auf die Schätzung von Extremwerten verfolgt. Für die Störungen wurden lognormal verteilte Faktoren gezogen, die einer typischen Änderung der Originalwerte um $\pm 5\%$ respektive $\pm 10\%$ entsprechen. Die Grösse der angenommenen Störung entspricht etwa der Unsicherheit der Stationen Analyse für Einzugsgebiete grösser als 250 km^2 (siehe Kapitel 3.1). Für die Berechnung der Extremwerte wurde die klassische Block Maxima Methode verwendet. (Analog zu den Auswertungen in MeteoSchweiz 2006.)

Abb. 10 zeigt Resultate dieser Fallstudie für zwei Einzugsgebiete. Die grünen und orangen Linien zeigen den Einfluss der Analyseunsicherheit auf die Extremwerte, d.h. den Bereich (90% Konfidenz) in welchem die Schätzung variiert wenn die Originalwerte um $\pm 5\%$ (grün) respektive $\pm 10\%$ (orange) gestört werden. (Die für den August 2005 ermittelten Unsicherheiten für die beiden Einzugsgebiete liegen in diesem Bereich. Siehe Abb. 4.) Die Variationen der Extremwerte bei diesen Störungen sind deutlich kleiner als die Unsicherheiten der Extremwerte als Folge der eingeschränkten Periode der Extremwertanalyse (blaue Linien). (Für die Extremwertstatistik eignen sich nur Perioden in welchen ein dichtes Messnetz betrieben wurde, d.h. ab Anfang bis Mitte der 60er Jahre.)

Analoge Fallstudien wurden für vier weitere Einzugsgebiete (Teileinzugsgebiete der Aare-Thun) durchgeführt, mit derselben allgemeinen

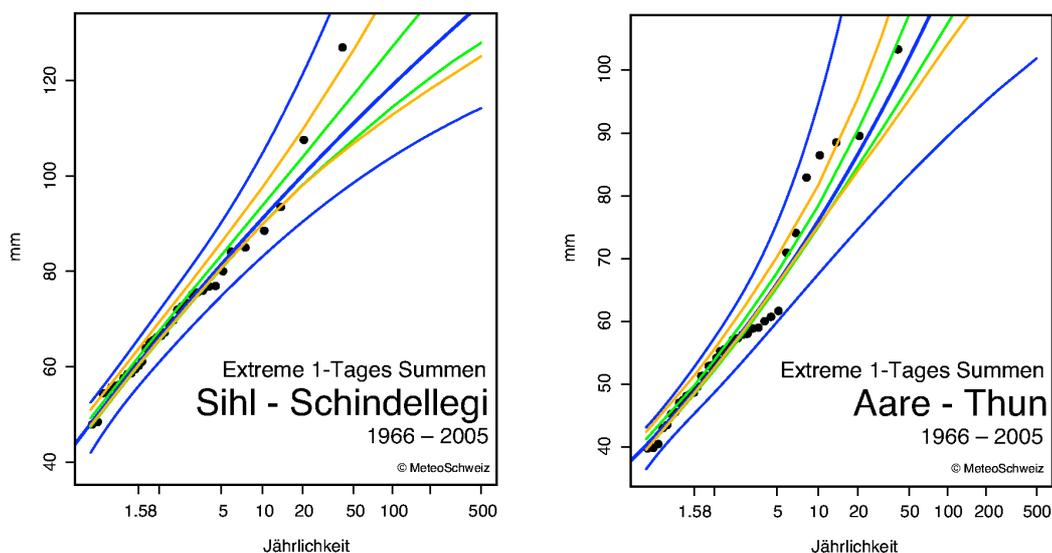


Abbildung 10: Extremwert Diagramm für den 1-Tages Gebietsniederschlag in den Einzugsgebieten Sihl (Schindellegi, ca. 240 km²) und Aare (Thun, ca. 2400 km²). Die Gebietsniederschläge wurden durch systematische Anwendung der Stationen Analyse für die Periode 1966-2005 bestimmt. Blaue Linien: Beste Schätzung und ihre Unsicherheit (90% Konfidenz) als Folge der eingeschränkten Dauer dichter Beobachtungen. Andere Linien: Unsicherheit (90% Konfidenz) der Schätzung bei einer angenommenen Unsicherheit der Stationen Analyse von ±5% (grün) resp. ±10% (orange). Vergleiche auch Abb. 4.

Schlussfolgerung: Analyseunsicherheiten in der Grössenordnung von 10% haben nur geringfügige zusätzliche Unsicherheiten in den Resultaten der Extremwertanalyse zur Folge. Zumindest sind diese deutlich kleiner als die Unsicherheiten aus der eingeschränkten Beobachtungsperiode. Nimmt man an, die in Kapitel 3.1 hergeleiteten Analyseunsicherheiten für den August 2005 seien repräsentativ für alle Starkniederschlagsereignisse, so ist die Anwendung der Extremwertstatistik für Einzugsgebiete ab einer Fläche von ca. 250 m² ohne nennenswerte zusätzliche Unsicherheit gerechtfertigt.

6. Folgerungen für den Anwender und Schlussbemerkungen

Unsicherheiten in der Analyse des Niederschlags sind nicht vermeidbar. Sie sind eine Folge der eingeschränkten Messgenauigkeit, der endlichen Anzahl von Messstationen und der feinskaligen Struktur im Niederschlag. In diesem Bericht wurden die Unsicherheiten der von MeteoSchweiz entwickelten Niederschlagsanalysen für den August 2005 quantifiziert. Für eine fachgerechte Anwendung dieser Analysen ist die Berücksichtigung ihrer Unsicherheiten

zentral. Folgende Implikationen sind in Anwendungen zu berücksichtigen. (Eine ausführlichere Anleitung findet der Anwender in Anhang A.)

- Die *Radar Analyse* eignet sich für Anwendungen die auf eine hohe Zeitauflösung (kürzer als ein Tag) und eine räumliche Auflösung im km Bereich angewiesen sind. Ihre absolute Genauigkeit ist aber eingeschränkt, besonders im Gebirge.
- Die *Stationen Analyse* eignet sich dort wo hohe absolute Genauigkeit gefordert ist und eine Zeitauflösung von einem Tag ausreicht. Sie eignet sich besonders für Gebietsniederschläge zu Einzugsgebieten mit mehr als 200 km² im Flachland und mehr als 400 km² im Gebirge.
- Die Nutzung einzelner Gitterpunkte der *Stationen Analyse* ist nicht sinnvoll. Auf dieser nicht effektiv aufgelösten Skala sind Unsicherheiten von zum Teil deutlich mehr als 20% zu erwarten.
- Für Anwendungen mit dem Anspruch einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung sowie hoher absoluter Genauigkeit im Gebirge eignet sich keine der Analysen.

- Automatische Einzelstationen sind in der Regel keine Alternative zur Radar Analyse, da sie bereits in einer Distanz von wenigen km weniger repräsentativ sind.

MeteoSchweiz hat für die Ereignisanalyse zum Hochwasser 2005 modernste Analysemethoden eingesetzt. Die in diesem Bericht beschriebenen Unsicherheiten sind nicht spezifisch für die konkret verwendeten Verfahren. Vielmehr muss für andere Verfahren mit vergleichbaren Unsicherheiten gerechnet werden. Der Vergleich der beiden Analysen (Kapitel 4) bestätigt die hohe Qualität der heutigen Analyse Produkte. Zwar sind im Innern der Alpen nicht alle vom Praktiker wünschbaren Anwendungen sinnvoll (z.B. für Wildbäche und Hangrutschungen), resp. die Resultate unterliegen einer grossen Unschärfe. Trotzdem haben die Datensätze einen breiten Einsatzbereich in der Aufarbeitung von Hochwasserereignissen. So erlauben die Radar Analysen eine detaillierte Beschreibung der Feinstrukturen im Niederschlag, welche für die Modellierung von Gebirgsflüssen im Alpenrandbereich interessant sind. Klassische Stationsmessungen (oder Analysen daraus) können die hierfür notwendige Auflösung nicht anbieten. Weiter zeigen die Untersuchungen in diesem Bericht auch neue Anwendungen auf. Zum Beispiel können durch die Kombination der Stationen Analyse mit Extremwertstatistik (Kapitel 5) neue interessante Hilfsmittel für die Hochwasserschutzplanung hergeleitet werden.

Die Unsicherheiten in den Analysen sind primär eine Folge von Einschränkungen in den verfügbaren Messungen. Ein Ausbau des konventionellen Niederschlags Messnetzes könnte die Unsicherheiten zwar reduzieren. Eine substantielle Verbesserung ist aber nur mit einem massiven Ausbau zu erwarten. Aufgrund allgemeiner statistischer Abschätzungen kann bei einer Verdoppelung der Messnetzdichte (also mit insgesamt rund 1000 Stationen in der Schweiz) eine Reduktion der absoluten Unsicherheiten um etwa 30% gerechnet werden. Die Verdichtung müsste dabei gleichmässig, also auch in schwer zugänglichen Gebirgsregionen erfolgen. Es ist fraglich ob der finanzielle Aufwand eines so massiven Ausbaus mit dem vergleichsweise bescheidenen Gewinn zu rechtfertigen ist. Die Zukunft liegt vielmehr in der noch weiteren Verbesserung der Analyse Methoden, z.B. durch Berücksichtigung der Wetterlage, der noch besseren Kombination von Radar- und Stationsmessungen, dem Einbezug von Analysen aus numerischen Modellen oder der Kombination mit anderen Datensätzen.

Dank:

Wir danken dem Bundesamt für Umwelt für die Unterstützung dieser Arbeit im Rahmen der Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Wir bedanken uns auch bei Gian Reto Bezzola (BAFU), Christoph Hegg und Anja Koschni (beide WSL), sowie Christof Appenzeller (MeteoSchweiz) für wertvolle Diskussionen und Verbesserungsvorschläge zu früheren Versionen dieses Berichts.

Referenzen:

- Bezzola G.R., und Hegg C., (Ed.) 2007: Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 1: Prozesse, Schäden und erste Einordnungen. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Umwelt-Wissen Nr. 07070. 215 p.
- Bezzola G.R., und Hegg C., (Ed.) 2007: Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 2: Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Umwelt-Wissen Nr. 0825. 429 p.
- Breinlinger R., P. Gamma und R. Weingartner, 1992: Kenngrössen kleinere Einzugsgebiete. Hydrologischer Atlas der Schweiz. Tafel 1.2.
- 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.
- Frei, C., 2006: Eine Länder übergreifende Niederschlags-Analyse zum August-Hochwasser 2005: Ergänzung zu Arbeitsbericht 211. Arbeitsberichte der MeteoSchweiz, 213, 10 pp.
- Frei, C. and C. Schär, 1998: A precipitation climatology of the Alps from high-resolution rain-gauge observations. *Int. J. Climatol.*, **18**, 873-900.
- Germann U and J Joss, 2004: Operational measurement of precipitation in mountainous terrain. In *Weather radar: Principles and advanced applications*, editor P Meischner, Springer Verlag, 52-77.
- Germann U, M Berenguer, D Sempere-Torres and G Salvadè, 2006a: Ensemble radar precipitation estimation – a new topic on the radar horizon.

- Proc. 4th European Conf. on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD)*, Barcelona, 559-562.
- Germann U, G Galli, M Boscacci and M Bolliger, 2006b: Radar precipitation measurement in a mountainous region. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **132**, 1669-1692.
- Joss J, B Schädler, G Galli, R Cavalli, M Boscacci, E Held, G Della Bruna, G Kappenberger, V Nespor, R Spiess, 1998: *Operational Use of Radar for Precipitation Measurements in Switzerland*. vdf Hochschulverlag AG, ETH Zürich. ISBN 3-7281-2501-6, 108pp. An extended and partly updated version is available online at <http://www.meteoswiss.ch>, weather, current weather, radar images, explanations, teaser "Swiss Radar Network", click "OnlineDocumentation.pdf".
- Joss J and A Waldvogel, 1990: Precipitation measurement and hydrology. In *Radar in Meteorology: Battan Memorial and 40th Anniversary Radar Meteorology Conference*, editor D Atlas, Amer. Meteor. Soc., 577-597.
- MeteoSchweiz 2006: Starkniederschlagsereignis 2006. Arbeitsberichte der MeteoSchweiz, 211, 63 pp.
- Neff, E.L., 1977: How much rain does a rain gage gage? *J. Hydrology*, **35**, 213-220.
- Nespor, V. and B. Sevruk, 1999: Estimation of wind-induced error of rainfall gauge measurements using a numerical simulation. *J. Atmos. Ocean. Techn.*, **16**, 450-464.
- Richter, D., 1995: Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Bericht des Deutschen Wetterdienstes, 194, 93pp.
- Schwarb M., 2001: The Alpine Precipitation Climate Evaluation of a High-Resolution Analysis Scheme Using Comprehensive Rain-Gauge Data. Diss. ETH Zürich Nr. 13911, *Zürcher Klimaschriften*, **80**, 138 pp.
- 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.
- 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, D.S., 1984: Computer Mapping: The SYMAP Interpolation Algorithm. In: *Spatial Statistics and Models*, Ed.: Gaile G.L., Willmott C.J., 133-145.
- Widmann, M. and C.S. Bretherton, 2000: Validation of mesoscale precipitation in the NCEP reanalysis using a new gridpoint dataset for the northwestern US. *J. Climate*, **13**, 1936-1950.

Anhang A:

Räumliche Niederschlagsanalysen zum Hochwasser 2005: Interpretationshilfe zu den Datensätzen von MeteoSchweiz

A1 Regeln für die Verwendung der Niederschlags-Datensätze

- 1 **„Im-Anfang-war-die-Unsicherheit Regel“:** Alle naturwissenschaftlichen Messungen und Modelle sind mit Unsicherheiten behaftet. Diese müssen bei der Wahl der Auswerte-Methoden und bei der Interpretation der Resultate berücksichtigt werden. Die Unsicherheiten in den Niederschlagsdatensätzen der MeteoSchweiz können die Aussagekraft von Anwendungen einschränken. Der Grad der Einschränkung hängt von der Anwendung ab. (Siehe auch Kapitel A2.)
- 2 **„Qual-der-Wahl Regel“:** Die Wahl des geeigneten Datensatzes (Pluviometer-Datensatz oder Radar-Datensatz) für eine konkrete Anwendung braucht eine sorgfältige Beurteilung der relativen Vor- und Nachteile sowie der Unsicherheiten:
 - a) Die beiden Datensätze haben unterschiedliche Charakteristika. Je nach Anwendung kann einer der Datensätze geeigneter sein (siehe Regeln 3 und 4).
 - b) Wenn keiner der beiden Datensätze ausgezeichnet ist und beide den Anforderungen vergleichbar genügen, können beide Datensätze als plausibles mögliches Abbild der wahren Niederschlagsverteilung betrachtet werden.
 - c) Eine einfache Mittelung der beiden Datensätze ist nicht sinnvoll. Dies würde die vorhandenen Unsicherheiten nur verschleiern.
 - d) Es kann sein dass die Anforderungen für gewisse Anwendungen von beiden Datensätzen nicht erfüllt werden und deshalb von einer Nutzung abgeraten werden muss. (siehe Regel 5)
- 3 **„Pluviometer-Regel“:** Dem Pluviometer-Datensatz soll dann der Vorzug gegeben werden, wenn genaue Schätzungen der absoluten Gebietsniederschlagsmengen auf einer Skala von mindestens 250 km² im Flachland oder 400 km² im Gebirge und einer Zeitauflösung von 24h (oder länger) benötigt werden. (Siehe auch Kapitel A3 und A4.)
- 4 **„Radar-Regel“:** Dem Radar-Datensatz soll dann der Vorzug gegeben werden, wenn die Feinstrukturen des Niederschlags auf der Skala von Kilometern und die Entwicklung auf der Zeitskala von Stunden wichtig sind, gleichzeitig aber keine allzu hohen Anforderungen an die absolute Genauigkeit der Mengen gestellt werden. (Siehe auch Kapitel A7-A9)
- 5 **„Achtung-heiss! Regel“:** Auswertungen im Gebirge, für welche sowohl hohe Genauigkeit der Niederschlagsmengen wie auch hohe Auflösung (weniger als 20 km oder 24 h) verlangt werden, sind in hohem Masse von Unsicherheiten betroffen. Hier sollte eine Anwendung der Datensätze nur nach eingehender Beurteilung des konkreten Falls gemeinsam mit der MeteoSchweiz unternommen werden.
- 6 **„Pluviometer-Unsicherheits-Regel“:** Der Pluviometer Datensatz unterschätzt den gefallenen Niederschlag für das Hochwasser 2005 systematisch um ca. 4% im Flachland und bis 12% im Hochgebirge. Hinzu kommt ein zufälliger Fehler der für ein Gebietsmittel von 400 km² auf etwa 5% im Flachland und auf etwa 20% im Gebirge geschätzt wird. (Siehe auch Kapitel A5 und A6.)
- 7 **„Radar-Unsicherheits-Regel“:** Der systematische Fehler der Radar-Niederschlagsschätzung liegt im Prozentbereich. Der zufällige Fehler auf der Skala von 1km und 24h entspricht im Mittel in der Schweiz einem Faktor von 1.6. In den Schweizer Alpen ist der Faktor grösser und liegt zwischen 1.6 und 2, im Schweizer Mittelland sowie im Südtessin ist er tiefer und liegt bei 1.4. Fehlechos bei Schönwetter sind selten und entsprechen 0.1% des totalen Niederschlages. (Siehe Kapitel A9 und A10.)
- 8 **„Skalen-Regel“:** Die Zufallsfehler hängen stark von der räumlichen und zeitlichen Skala ab. Je länger das Zeitintervall der Niederschlagssumme und je grösser die Raumskala (Gebietsmittel) umso kleiner der Zufallsfehler. Als Faustregel kann angenommen werden dass der Zufallsfehler mit der Wurzel der Gebietsfläche abnimmt. (Siehe Kapitel A6 und A11.)
- 9 **„Literatur-Regel“:** Die beiden Datensätze wurden mit international als „state-of-the-art“ anerkannten Methoden hergeleitet und in internationalen peer-review Medien publiziert. Für eine detaillierte Einschätzung der Qualität/Nützlichkeit der Datensätze empfiehlt sich ein Blick in die entsprechende Literatur. Empfohlen sind insbesondere Frei und Schär (1998), Schwarb et. al. (2001), Germann et al (2006b) und Joss et al (1998).

A2 Unsicherheiten und Fehlerfortpflanzung

Der Niederschlag ist eine in Raum und Zeit extrem variable Grösse. Im Abstand von wenigen Minuten oder Kilometern können Niederschlagsmengen um einen Faktor 10 oder mehr variieren. Messungen an Niederschlagsstationen sind für einen nur wenige Kilometer entfernten Ort also nur sehr beschränkt repräsentativ, erst recht im Gebirge. Diese extremen Eigenschaften stellen eine grosse Herausforderung dar für die Beobachtung, die flächendeckende Analyse aber auch für hydrologische Anwendungen.

Es gibt nicht den perfekten Niederschlags Datensatz der sich für alle Anwendungen gleichermaßen eignet. Vielmehr gibt es mehrere Techniken der räumlichen Niederschlagsanalyse, deren Produkte unterschiedliche Charakteristika aufweisen und sich deshalb für Anwendungen mit unterschiedlichen Anforderungen eignen. Jeder Datensatz ist zudem von Unsicherheiten betroffen die für die Aussage einer Anwendung zentral sein können. Zu entscheiden, welcher Datensatz sich für eine konkrete Anwendung eignet, bedingt, dass sich der Anwender mit den Charakteristika der Datensätze beschäftigt und deren Bedeutung für die Anwendung einschätzt. In vielen Fällen ist es sinnvoll, die Unsicherheiten quantitativ auf das Endresultat einer Anwendung weiterzuverfolgen (Fehlerfortpflanzung), und ihre Effekte mit den Modell-inhärenten Unsicherheiten oder denjenigen anderer Eingangsgrössen zu vergleichen. (Siehe dazu auch die aktuelle COST-Aktion „Propagation of uncertainty in advanced meteo-hydrological forecast systems“ <http://cost731.bafg.de/>).

A3 Der Pluviometer-Datensatz

Die räumliche Analyse von täglichen Niederschlagssummen stützt sich auf in-situ Messungen an insgesamt 482 Pluviometer Stationen (440 Stationen der MeteoSchweiz und 42 IMIS Stationen des SLF). (Siehe MeteoSchweiz 2006 für eine ausführliche Beschreibung des Messnetzes.) Die Stationsdaten wurden mit einem Gewichtungsverfahren interpoliert, welches Distanz und Richtungsisolierung um den Analysepunkt berücksichtigt (Shepard 1984, Frei und Schär 1998). Anders als in klassischen Anwendungen wurde das Gewichtungsverfahren für die Schweizer Niederschlagsanalyse nicht direkt auf Niederschlagsmessungen angewendet sondern

auf relative Anomalien zur Langzeit-Klimatologie. Dieses Vorgehen (siehe Widmann und Bretherton 2002) reduziert das Risiko von systematischen Fehlern als Folge der nicht-repräsentativen Verteilung der Messstationen mit der Meereshöhe (Talstationen sind gegenüber Bergstationen übervertreten). Als Grundlage wurde dabei die Klimatologie von Schwarb et al. (2001) verwendet, welche mit einem aufwändigen speziell für den Alpenraum angepassten Regressionsmodell erstellt wurde (Daly et al. 2002, Schwarb 2001).

A4 Nominelle und effektive Auflösung des Pluviometer-Datensatzes

Der Pluviometer-Datensatz wurde in einer nominellen Auflösung (Gitterabstand) von 2 km gerechnet. Die Berechnung aus umgebenden Stationen bewirkt aber eine Glättung des tatsächlichen Niederschlagsfeldes. Die Analyse ist deshalb gröber aufgelöst als die Skala der Gitterstruktur und die Werte an den Gitterpunkten repräsentieren nicht lokale Punktniederschläge sondern Gebietsmittel. Die sichtbaren feinskaligen Strukturen widerspiegeln eine Schätzung aus einer hochaufgelösten Klimatologie (siehe auch 3.1), die aber stark von der tatsächlichen Feinstruktur abweichen kann. Die effektive Auflösung des Pluviometer-Datensatzes dürfte im Flachland etwa 10-15 km und im Gebirge etwa 15-20 km betragen, entsprechend der Dichte des Messnetzes in diesen Gebieten. Der hauptsächliche Verwendungszweck des Pluviometer-Datensatzes ist deshalb die quantitative Beschreibung der Niederschlagsverteilung auf gröberen Raumskalen. Er kann insbesondere verwendet werden um Gebietsniederschläge in Einzugsgebieten zu schätzen wenn deren Fläche grösser als etwa 250 km² im Flachland resp. grösser als 400 km² im Gebirge ist. Die Aufbereitung des Datensatzes auf dem feinen 2-km Gitternetz vereinfacht dabei die Mittelung über die Einzugsgebiete.

A5 Systematischer Pluviometer Messfehler

Pluviometermessungen unterliegen systematischen Messfehlern. Als Folge des erhöhten Windes über der Messgeräteöffnung wird der tatsächliche Niederschlag unterschätzt (Neff 1977, Nespor und Sevruk 1999). Die Grösse des Messfehlers hängt von den Windverhältnissen und der Tropfengrössenverteilung ab, und

er ist bei Schneefall deutlich grösser als bei Regen. Die Messungen wurden für diesen Messfehler nicht korrigiert, weshalb sich dieser auch auf die Analysen im Pluviometer-Datensatz auswirkt. Die Starkniederschläge vom August 2005 waren von eher schwachen Winden begleitet und die Niederschläge sind an fast allen Stationen in flüssiger Form gefallen. Es ist deshalb davon auszugehen, dass der Messfehler in der Grössenordnung des klimatologischen Fehlers im Sommer liegt. Dieser wurde für den Alpenraum auf 4-12% geschätzt je nach Windexposition der Messstation (Sevrak 1985, Richter 1995).

A6 Zufallsfehler im Pluviometer-Datensatz

Als Folge der endlichen Anzahl von Stationen kann ein Gebietsmittelniederschlag nur mit beschränkter Genauigkeit geschätzt werden. Diese Fehlerkomponente wurde in Frei und Schär (1998) auf der Grundlage der Variationen zwischen den Stationsmessungen geschätzt. Aus diesen Untersuchungen lässt sich für die Analyse der Starkniederschläge im August 2005 ein Zufallsfehler von 5% im Flachland und 20% im Gebirge schätzen. Diese Fehlerangaben sind gültig für Gebiete von 400 km². Der Fehler nimmt für grössere Gebiete etwa mit der Wurzel der Fläche ab. (Z.B. für 800 km² um den Faktor 1.4 kleiner.) Diese Fehlerangaben sollten als „standard Fehler“ interpretiert werden, d.h. als Erwartungswert des Fehlers, im Einzelfall sind kleinere/grössere Fehler möglich. Die gegenwärtig verfügbaren Fehlerschätzungen sind sehr grob. Eine verbesserte Schätzung der Zufallsfehler im Pluviometer-Datensatz wird im zweiten Teil der Ereignisanalyse unternommen. Es ist also möglich, dass die heutigen Angaben später revidiert werden.

A7 Der Radar-Datensatz

Das MeteoSchweiz Wetterradarnetz bestehend aus drei Stationen auf La Dole (1675 m, bei Genf), auf Albis (925 m, bei Zürich) und auf Monte Lema (1625 m, bei Lugano) 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 kontinuierlichen 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 detektiert und eliminiert 98% der Bodenechos. Wo die Radarmessung auf Bodenniveau durch Berge abgeschirmt ist, werden die Messungen aus der Höhe mittels der Profilkorrektur auf das Bodenniveau extrapoliert.

Ein robustes statistisches Verfahren wird verwendet um die Radarwerte an die Pluviometer-Messungen anzueichen. Für den Radar-Datensatz zum Hochwasser 2005 wurde zudem eine spezifisch für das Ereignis gerechnete lokale Aneichung durchgeführt, die zusätzlich allfällige lokale systematische Fehler korrigiert. Mit dieser Korrektur wurde die über das gesamte Ereignis aufsummierte Radar-Niederschlagsmenge gebietsweise an die Bodennmessungen angeeicht.

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. Mehr dazu siehe Germann et al. (2006b), Germann und Joss (2004), Joss et al. (1998) sowie Joss und Waldvogel (1990).

A8 Nominelle und effektive Auflösung des Radar-Datensatzes

Die nominelle Auflösung des Radar-Datensatzes beträgt 1 km und 1 h. Die effektive Auflösung weicht nur geringfügig von der nominellen Auflösung ab, da die MeteoSchweiz Wetterradars die Atmosphäre über der Schweiz mit einer hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung abtasten. Ein Radar-Volumen besteht aus einer 360-Grad-Abtastung auf 20 Elevationswinkeln zwischen -0.3 Grad (leicht unter dem Horizont) und 40 Grad (relativ steil nach oben). Die maximale

Distanz von der Radarstation beträgt 230 km. Das Abtasten der 20 Elevationen benötigt nur gerade 5 min. Wir erhalten also alle 5 min ein einigermaßen vollständiges dreidimensionales Bild der Niederschläge über der Schweiz. Die Breite eines Radarstrahles beträgt zirka 1 Grad, die rohe radiale Auflösung 80 m. Das Volumen einer Rohmessung nimmt infolge des 1-Grad-Strahles mit zunehmender Distanz zu, und zwar proportional zum Quadrat der Distanz. Es beträgt zirka 0.13 km^3 in 100 km Distanz, respektive 0.52 km^3 in 200 km Distanz. Für die Berechnung des 1km-Gitter-Datensatzes werden sämtliche Rohmessungen aller 20 Elevationswinkel, welche in ein 1km^2 -Pixel fallen, berücksichtigt. Die daraus resultierende effektive Auflösung entspricht wie oben erwähnt relativ gut der nominellen Auflösung. Da die räumliche Auflösung dieser Radarinformation (1km^2) stark von derjenigen einer Pluviometermessung (200cm^2) abweicht, sind entsprechende Niederschlagswerte nur dann vergleichbar, wenn der Niederschlag über eine genügend grosse Zeitperiode (typischerweise $>12 \text{ h}$) aufsummiert wird. Mehr zum Thema Auflösung und Abtaststrategie siehe Joss et al. (1998).

A9 Abschätzung des Radarstrahles

Das Hauptproblem der Radar-Niederschlagsschätzung in den Alpen liegt nicht in der Raum-Zeit Auflösung, sondern in der Abschätzung des Radarstrahles durch die Berge und den Horizont. Als Folge davon ist die bodennahe Schicht der Atmosphäre nur gerade in nächster Nähe der drei Radarstandorte Albis (bei Zürich), Lema (bei Lugano) und La Dole (bei Genf) sichtbar. Über den Alpen sind die untersten 2-3 km der Atmosphäre oft nicht direkt sichtbar; in diesen Gebieten werden Radarsignale aus den darüberliegenden Schichten verwendet und mit raffinierten aber nicht perfekten Auswerteverfahren auf den Boden extrapoliert. Dies ist die Hauptursache für die relativ grossen Unsicherheiten (zufällige Fehler) in den Radar-Niederschlagskarten, siehe Regel 7. Mehr dazu siehe Germann et al. (2006b).

A10 Unsicherheiten im Radar-Datensatz

Die in der Regel 7 gemachten Aussagen bezüglich Unsicherheit im Radar-Datensatz basieren auf detaillierten Vergleichen zwischen den operationell verfügbaren Echtzeit-Radar-Nieder-

schlagsschätzungen und den Pluviometer-Messungen am Boden. Der zufällige Fehler sollte als „standard Fehler“ interpretiert werden, d.h. als Erwartungswert des Fehlers, im Einzelfall sind kleinere/grössere Fehler möglich. Wir müssen davon ausgehen, dass diese Zahlen die realen Unsicherheiten überschätzen, und zwar aus zwei Gründen: Erstens sind Unterschiede zwischen Radarschätzung und Bodenmessung nicht nur auf Radarfehler zurückzuführen, sondern auch auf Unsicherheiten in der Pluviometermessung, insbesondere im Gebirge sowie allgemein in konvektiven Gewitterlagen. Zweitens wurden für die Berechnung des Radar-Datensatzes für das August 2005 Hochwasser zusätzlich zu den operationellen Methoden spezifische Algorithmen entwickelt und angewandt, welche in der Zwischenzeit bereits teilweise auch in Echtzeit im Einsatz sind. Die in Regel 7 aufgeführten Zufallsfehler können also grob als obere „konservative“ Grenze eines „standard Fehlers“ betrachtet werden.

A11 Korrelation der Unsicherheiten im Radar-Datensatz

Die Unsicherheiten für Punktwerte im Radar-Datensatz sind nur beschränkt korreliert in Raum und Zeit. Die resultierende Unsicherheit wird also kleiner, wenn die Radarwerte zuerst über grössere Gebiete aggregiert werden.

Um die Korrelation der Unsicherheiten quantitativ auszudrücken wird bei der MeteoSchweiz zur Zeit ein weltweit neues Verfahren entwickelt, welches anstelle einer einzigen deterministischen Schätzung ein Ensemble von Radarniederschlags-Feldern generiert. Mehr dazu in Germann et al (2006a).

Arbeitsberichte der MeteoSchweiz

- 220** Ambühl J: 2008, Optimization of Warning Systems based on Economic Criteria, 79pp, CHF 75.-
- 219** Ceppi P, Della-Marta PM, Appenzeller C: 2008, Extreme Value Analysis of Wind Observations over Switzerland, 43pp, CHF 67.-
- 218** MeteoSchweiz (Hrsg): 2008, Klimaszenarien für die Schweiz – Ein Statusbericht, 50pp, CHF 69.-
- 217** Begert M: 2008, Die Repräsentativität der Stationen im Swiss National Basic Climatological Network (Swiss NBCN), 40pp, CHF 66.-
- 216** Della-Marta PM, Mathis H, Frei C, Liniger MA, Appenzeller C: 2007, Extreme wind storms over Europe: Statistical Analyses of ERA-40, 80pp., CHF 75.-
- 215** Begert M, Seiz G, Foppa N, Schlegel T, Appenzeller C, Müller G: 2007, Die Überführung der klimatologischen Referenzstationen der Schweiz in das Swiss National Climatological Network (Swiss NBCN), 47 pp., CHF 68.-
- 214** Schmucki D., Weigel A., 2006, Saisonale Vorhersage in Tradition und Moderne: Vergleich der "Sommerprognose" des Zürcher Bööggs mit einem dynamischen Klimamodell, 46pp, CHF 68.-
- 213** Frei C: 2006, Eine Länder übergreifende Niederschlagsanalyse zum August Hochwasser 2005. Ergänzung zu Arbeitsbericht 211, 10pp, CHF 59.-
- 212** Z'graggen, L: 2006, Die Maximaltemperaturen im Hitzesommer 2003 und Vergleich zu früheren Extremtemperaturen, 74pp, CHF 75.-
- 211** MeteoSchweiz: 2006, Starkniederschlagsereignis August 2005, 63pp., CHF 72.-
- 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, 34 Fr.
- 200** Bader S: 2004, Die extreme Sommerhitze im aussergewöhnlichen Witterungsjahr 2003, 25pp, 14 Fr.

Veröffentlichungen der MeteoSchweiz

- 77** Rossa AM: 2007, MAP-NWS – an Optional EUMETNET Programme in Support of an Optimal Research Programme, *Veröffentlichung MeteoSchweiz*, **77**, 67 pp., CHF 73.-
- 76** Baggenstos D: 2007, Probabilistic verification of operational monthly temperature forecasts, *Veröffentlichung MeteoSchweiz*, **76**, 52 pp., CHF 69.-
- 75** Fikke S, Ronsten G, Heimo A, Kunz S, Ostrozlik M, Persson PE, Sabata J, Wareing B, Wichura B, Chum J, Laakso T, Sääntti K, Makkonen L: 2007, COST 727: Atmospheric Icing on Structures Measurements and data collection on icing: State of the Art, 110pp, CHF 83.-
- 74** Schmutz C, Müller P, Barodte B: 2006, Potenzialabklärung für Public Private Partnership (PPP) bei MeteoSchweiz und armasuisse Immobilien, 82pp, CHF 76.-
- 73** Scherrer SC: 2006, Interannual climate variability in the European and Alpine region, 132pp, 86 Fr.
- 72** Mathis H: 2005, Impact of Realistic Greenhouse Gas Forcing on Seasonal Forecast Performance, 80pp, 75 Fr.
- 71** Leuenberger D: 2005, High-Resolution Radar Rainfall Assimilation: Exploratory Studies with Latent Heat Nudging, 103pp, 81 Fr.
- 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, 83 Fr.
- 69** Müller WA: 2004, Analysis and Prediction of the European Winter Climate, 115pp, 34Fr.
- 68** Bader S: 2004, Das Schweizer Klima im Trend: Temperatur- und Niederschlagsentwicklung seit 1864, 48pp, 18 Fr.
- 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, 40 Fr.
- 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, 100 Fr.
- 65** Stübi R: 2002, SONDEX / OZEX campaigns of dual ozone sondes flights: Report on the data analysis, 78pp, 27 Fr.
- 64** Bolliger M: 2002, On the characteristics of heavy precipitation systems observed by Meteosat-6 during the MAP-SOP, 116pp, 36 Fr.
- 63** Favaro G, Jeannet P, Stübi R: 2002, Re-evaluation and trend analysis of the Payerne ozone sounding, 99pp, 33 Fr.
- 62** Bettems JM: 2001, EUCOS impact study using the limited-area non-hydrostatic NWP model in operational use at MeteoSwiss, 17pp, 12 Fr.
- 61** Richner H, et al.: 1999, Grundlagen aerologischer Messungen speziell mittels der Schweizer Sonde SRS 400, 140pp, 42 Fr.
- 60** Gisler O: 1999, Zu r Methodik einer Beschreibung der Entwicklung des linearen Trends der Lufttemperatur über der Schweiz im Zeitabschnitt von 1864 bis 1990, 125pp, 36 Fr.
- 59** Bettems J-M: 1999, The impact of hypothetical wind profiler networks on numerical weather prediction in the Alpine region, 65pp, 25 Fr.
- 58** Baudenbacher, M: 1997, Homogenisierung langer Klimareihen, dargelegt am Beispiel der Lufttemperatur, 181pp, 50 Fr.