



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement des Innern EDI
Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz

Fachbericht MeteoSchweiz Nr. 247

Hydrometeorologische Analyse des Hochwasserereignisses vom 10. Oktober 2011 – Fachbericht Meteorologie/Klimatologie

Thomas Schlegel, Heinz Maurer, Sophie Fukutome, Simon Scherrer, Lysiane Mayoraz



ISSN: 2296-0058

Hydrometeorologische Analyse des Hochwasserereignisses vom 10. Oktober 2011 – Fachbericht Meteorologie/Klimatologie

Thomas Schlegel, Heinz Maurer, Sophie Fukutome, Simon Scherrer, Lysiane Mayoraz

Empfohlene Zitierung:

MeteoSchweiz, 2013, Hydrometeorologische Analyse des Hochwasserereignisses vom 10. Oktober 2011 – Fachbericht Meteorologie/Klimatologie, *Fachbericht MeteoSchweiz*, **247**, 72 pp.

Herausgeber:

Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, MeteoSchweiz, © 2013

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

Zusammenfassung

Das Hochwasserereignis vom Oktober 2011 im Wallis, Berner Oberland sowie in Teilen der Zentral- und Ostschweiz war für den Alpenraum klimatologisch gesehen ein aussergewöhnliches Ereignis. Vor allem im Kander- und Lötschental waren zum Teil beträchtliche Schäden zu verzeichnen. In der Zentralschweiz (v.a. Nid- und Obwalden) und in der Ostschweiz (Glarnerland) fielen die Schäden kleiner und lokal begrenzt aus. Gesamtschweizerisch betrug die Schadenssumme rund 85 Mio. CHF.

Das Ereignis vom 6.10.2011 bis am 10.10.2011 kann in drei Hauptphasen eingeteilt werden: (1) Kaltfront am 6.10. mit Schnee bis in tiefe Lagen um 1000 m ü.M., (2) längere Nord - Stauphase bis am 9.10. mit zum Teil ausgiebigen Schneefällen und (3) eine abschliessende Warmfront am 10.10. mit Dauerregen, rapidem Anstieg der Nullgradgrenze auf rund 3500 m ü.M. und rasantem Abschmelzen der Schneedecke.

Die Extremwertanalysen sämtlicher ausgewerteter Stationen und Zeitperioden ergeben statistische Wiederkehrperioden für den Niederschlag von maximal 10 Jahren. Die teilweise 300 jährlichen Abflussspitzen einzelner Bäche und Flüsse können demnach durch die Niederschlagsmengen alleine nicht erklärt werden. Aufgrund des Wetterablaufs ist es naheliegend, dass die Schneeschmelze während der Warmfront am 10. Oktober einen wesentlichen zusätzlichen Wassereintrag geliefert haben muss. Anhand von Beispielen an einzelnen Standorten kann gezeigt werden, dass schon relativ kleine Mengen an zusätzlichem Schmelzeintrag zu einer deutlichen Erhöhung der Wiederkehrperioden führen.

Die quantitative Abschätzung der Schmelzeinträge in den verschiedenen Gebieten und die unterschiedlichen Auswirkungen auf die Abflüsse sind folglich zentrale Fragestellungen des Ereignisses vom Oktober 2011. Dementsprechend entschloss der durch das Bundesamt für Umwelt BAFU vertretene Bund, eine hydrometeorologische Ereignisanalyse in Auftrag zu geben, welche neben der Bearbeitung der Hauptthemen Meteorologie, Schneehydrologie und Einzugsgebietshydrologie auch die Aspekte der Vorhersage und Warnung beleuchten soll. Die nachträgliche Bewertung der erfolgten meteorologischen und hydrologischen Vorhersagen wurde als besonders wichtig taxiert, nicht zuletzt weil die verantwortlichen Stellen auf den Ebenen Bund und Kantone vom lokal und regional teils heftigen Ausmass des Ereignisses weitgehend überrascht wurden. Durch den überregionalen Charakter der vom BAFU in Auftrag gegebenen Studie wird gewährleistet, dass sämtliche im Oktober 2011 betroffenen Kantone und Regionen von den erarbeiteten Resultaten und Schlüssen profitieren können. Es wurden zwei Untersuchungsgebiete (Fokusgebiete) ausgewählt. Das Fokusgebiet 1 umfasst die schwer in Mitleidenschaft gezogenen Talschaften der Kander und der Lonza, welche das Hauptschadensgebiet des Unwetterereignisses darstellen. Mit der Bestimmung eines geeigneten zweiten Fokusgebietes sollte ein prozessspezifisch möglichst aufschlussreicher Vergleich mit dem Fokusgebiet 1 gewährleistet werden. Dabei war erstens wichtig, dass die beiden Fokusgebiete eine ähnliche Gebietsstruktur aber unterschiedliche

Schadensausmasse infolge des Ereignisses aufweisen. Gesucht waren demnach zwei über eine hohe und vorzugsweise teilvergletscherte Gipfelregion verbundene Talschaften ähnlicher Grösse und topografischer Ausprägung auf der Alpennordseite, die nur moderat von Schadensprozessen betroffen worden waren. Zudem sollten sich die meteorologischen Verhältnisse in den beiden Gebieten möglichst kontrastieren, wobei eine gute Datenverfügbarkeit vorausgesetzt wurde. Die Wahl des Fokusgebiets 2 fiel auf das Linthtal und das Schächental. Im Vergleich liegen beide Fokusgebiete in einem Bereich mit ähnlich ausgiebigen Niederschlägen über die Gesamtdauer des Ereignisses (6. bis 10. Oktober). Allerdings liegt der Schneeanteil am Gesamtniederschlag im östlich gelegenen Fokusgebiet 2 deutlich höher als im Fokusgebiet 1, was auf laterale Temperaturunterschiede (v.a. vom 9. auf den 10. Oktober) mit tieferen Temperaturen im Osten zurückzuführen ist. Dementsprechend herrschten nach dem Ereignis, am Morgen des 11. Oktobers, unterschiedliche mittlere Schneehöhenverteilungen in den beiden Fokusgebieten. Im Osten (Fokusgebiet 2) war die verbleibende Schneedecke deutlich höher als im Westen (Fokusgebiet 1).

Zur Bearbeitung der Ereignisanalyse wurden die Arbeiten und Untersuchungen in vier Module eingeteilt: (1) Meteorologie/Klimatologie; (2) Schneehydrologie; (3) Hydrologie; und (4) Operationelle Abflussmodelle und anschliessend im Schlussbericht „Hydrometeorologische Analyse des Hochwasserereignisses vom 10. Oktober 2011“ (Badoux et al. 2013) zusammengefasst. Der vorliegende Fachbericht von MeteoSchweiz beschreibt das Modul 1 und weist im Vergleich zum Schlussbericht zusätzliche Stations- und Parameteranalysen auf.

In den Messdaten von MeteoSchweiz ist seit 1931 - gemäss Aufzeichnungen in den Chroniken „Unwetterschäden in der Schweiz“ der eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) und der Witterungsberichte von MeteoSchweiz vermutlich sogar seit mindestens 150 Jahren - kein analoges Ereignis im Herbst zu finden. Ähnliche Schneehöhen und Niederschlagssummen wurden früher durchaus schon erreicht, allerdings nicht in Verbindung mit einem so hoch reichenden Schmelzgebiet. Hier dürfte der Auftretenszeitpunkt des Ereignisses bereits Anfang Oktober eine wesentliche Rolle gespielt haben. Was die Zeit vor den Messungen betrifft gibt es in den genannten Chroniken Hinweise auf „schneesmelzbedingte“ herbstliche Fluten im 19. Jahrhundert. Allerdings bedeutet „schneesmelzbedingt“ nicht automatisch so stark schneesmelzgetrieben wie im Oktober 2011.

Die Frage, ob in Zukunft vermehrt mit solchen Ereignis zu rechnen ist lässt sich im Moment noch nicht beurteilen. Es ist nicht auszuschliessen, dass mit der fortschreitenden Klimaänderung die Kombination von intensiven Niederschlägen und starker Schneeschmelze im Gebirge häufiger auftreten wird. Allerdings sind die heutigen Klimamodelle nicht in der Lage die genauen Veränderungen der atmosphärischen Strömungsmuster mit der nötigen Genauigkeit zu beschreiben, um diese These stichhaltig zu untermauern. Da zudem nur eine seltene Kombination von Wetterlagenabfolgen und weiteren zum Teil nicht meteorologischen Bedingungen zu so grossen Niederschlägen/Schmelzereignissen im Gebirge führt, dürften solche Ereignisse weiterhin ein eher seltenes Phänomen, wenn auch mit beträchtlichem Schadenspotential, bleiben.

Résumé

Les pluies abondantes qui se sont produites en octobre 2011 en Valais, dans l'Oberland bernois ainsi que dans une partie de la Suisse centrale et orientale, représentent pour les Alpes, un événement climatique exceptionnel. Dans le Kandertal et le Lötschental, les dégâts ont été particulièrement lourds. En Suisse centrale (en particulier à Nidwald et Obwald) ainsi qu'en Suisse orientale (dans le Glarnerland), les dégâts ont été moins importants, localement même seulement faibles. Pour l'ensemble de la Suisse, les dégâts se montent à environ CHF 85 millions.

L'événement qui s'est produit entre le 6.10.11 et le 10.10.2011, peut être divisé en trois phases principales. (1) arrivée d'un front froid le 6.10 avec des chutes de neige s'abaissant jusque vers 1000 m. (2) Barrage du nord persistant jusqu'au 9.10 avec par endroits des chutes de neige importantes (3) suivi d'un front chaud le 10.10 avec des pluies continues et une isotherme du zéro degré remontant rapidement à 3500 m, provoquant une rapide fonte des neiges.

Une analyse des valeurs extrêmes pour les stations concernées, montrent une période de retour d'au maximum 10 ans. Les records de débits des cours d'eau pour certains vieux de 300 ans ne peuvent donc pas seulement être expliqués par les quantités de précipitations. Il semble donc probable, au vu du déroulement météorologique, que la fonte de la neige ait joué un rôle important dans les crues, lors du passage du front chaud le 10 octobre. Une analyse par station permet d'observer que déjà une faible fonte de la neige peut provoquer une période de retour nettement plus élevée.

L'estimation de la quantité des fontes dans les différentes régions ainsi que leurs effets sur les cours d'eau représente une question centrale depuis les événements d'octobre 2011. Par conséquent, la Confédération, représentée par l'Office fédéral de l'environnement OFEV a décidé de mandater une analyse hydrométéorologique de ce cas. L'étude doit non seulement traiter des thèmes principaux que sont la météorologie, l'hydrologie nivale, l'hydrologie des bassins versants ; elle doit également éclairer les aspects de la prévision et des alertes.

L'évaluation rétroactive des prévisions météorologiques et hydrologiques a été évaluée comme étant très importante, d'autant plus que les autorités fédérales et cantonales ont été largement surprises par l'intensité de cet événement au niveau local et régional. Le caractère suprarégional de l'étude mandatée par l'OFEV assurera aux cantons et aux régions concernés par les intempéries d'octobre 2011, une analyse qui permettra à chacun de tirer des conclusions pertinentes.

Deux régions d'études ont été définies. La première (région 1) regroupe les vallées de la Kander et de la Lonza, où les dégâts les plus importants se sont produits, suscitant une grande empathie. La définition d'une seconde région avait comme but de permettre une comparaison significative avec la première. Il a donc été important que cette seconde région représente les mêmes caractéristiques

géomorphologiques que la première, mais que les dégâts observés y soient différents. On a donc recherché deux vallées de grandeur similaire reliées par un sommet, de préférence partiellement recouvert par un glacier, se situant au Nord des Alpes, et n'ayant subi que des dégâts modérés. En fin de compte, la situation météorologique entre les deux régions définies devait se contraster, ce qui sous-entendait une disponibilité des données de mesures. Le choix de la seconde région d'étude (région 2) s'est portée sur le Linthal et le Schächental.

En comparant les deux régions d'études, il ressort que des quantités de précipitations semblables y sont tombées durant l'ensemble de l'événement (du 6 au 10 octobre). Toutefois, la proportion des précipitations tombées en neige dans la seconde région d'études, se situant plus à l'Est, est nettement plus élevée que dans la première région. Cette différence s'explique par des températures plus froide à l'Est (surtout entre le 9 et le 10 octobre). De ce fait, le 11 octobre au matin, les quantités de neige gisante différaient considérablement entre les deux régions d'études : à l'Est (région 2) la hauteur de la neige était bien supérieure qu'à l'Ouest (région 1).

Pour l'analyse des événements, les différents rapports et travaux ont été répartis en quatre modules. (1) Météorologie/climatologie ; (2) hydrologie nivale ; (3) hydrologie ; et (4) modèles opérationnels de ruissellement, puis ils ont été résumés dans le rapport final « Analyse hydro-météorologique des inondations du 10 octobre 2011 » (Badoux et al. 2013). Le présent rapport technique de MétéoSuisse décrit le module 1 et comporte une analyse supplémentaire de stations et de paramètres en comparaison avec le rapport final.

D'après les mesures de MétéoSuisse (voir les chroniques « Dégâts dus aux intempéries en Suisse » de l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL), on n'a pas observé pareil événement depuis 1931. Selon les rapports d'intempéries de MétéoSuisse, il semblerait même qu'il n'y ait pas eu d'événement semblable en automne depuis 150 ans. Auparavant, des hauteurs de neige ainsi que des quantités de précipitations comparables ont bien été observées, toutefois jamais en association avec une limite de fonte des neiges si haute. Il semblerait donc que la période à laquelle cet événement se soit produit (début octobre) ait joué un rôle primordial. En ce qui concerne la période avant que les mesures n'existent, les chroniques susmentionnées font référence à des crues automnales « dues à la fonte des neiges » datant du XIX^{ème} siècle. Rien ne nous indique cependant que ces crues « dues à la fonte des neiges » soient comparables à celles connues en octobre 2011.

La question de savoir si à l'avenir il va falloir compter plus souvent avec des événements semblables est encore ouverte. On ne peut pas exclure qu'avec le changement climatique, l'association entre importantes précipitations et forte fonte des neiges ne se répète pas plus régulièrement. Toutefois, les modèles climatiques actuels ne sont pas en mesure de simuler les configurations atmosphériques avec une telle précision, permettant l'appréhension de tels événements. De plus, cette suite relativement rare d'événements météorologiques, ponctuée de conditions (en partie non-météorologiques) qui ont occasionné les précipitations et l'importante fonte des neiges, devrait rester un événement rare, même si le potentiel de dégât est considérable.

Abstract

The floods of October 2011 in the Valais, Bernese Oberland and in parts of Central and Eastern Switzerland were an unusual event in the Alpine region from a climatological point of view. Substantial damage was registered mainly in some areas of the Kandertal and Lötschental. In Central Switzerland (mainly Nid- and Obwalden) and in Eastern Switzerland (Canton of Glarus) the damage was less severe and locally restricted. In Switzerland as a whole the damage total amounted to around CHF 85 Mio.

The event of 6.10.2011 to 10.10.2011 can be divided up into three main stages:

(1) Cold front of 6.10. with snow down to lower altitudes at about 1000 m a.s.l., (2) a steady influx of air masses from the north until 9.10. with partly extensive snowfall and (3) a final warm front on 10.10. with persistent rain, a rapid rise of the zero degree level to around 3500 m a.s.l. and a very fast melting of the snow cover.

The analysis of extreme values from all the stations and periods evaluated indicate statistical return periods of a maximum of 10 years for the precipitation measured. The peak runoff of certain streams and rivers - some of them 300-year events – cannot be explained sufficiently by the precipitation totals alone. Based on the weather development it can be assumed that the snowmelt caused by the warm front of 10 October must have substantially contributed to the water total. Using examples from individual stations it can be shown that even relatively small amounts of additional melt water can result in a marked increase of the return period.

The quantitative assessment of the melt water in the different regions and the varying impact on the runoff are therefore central to an understanding of the events of October 2011. Consequently the Confederation, represented by the Federal Office for the Environment (FOEN), decided to commission a hydro-meteorological analysis of the event which should not only include the main issues of meteorology, snow-hydrology and the hydrology of catchment areas, but also the aspects forecast and warning. The subsequent assessment of the meteorological and hydrological forecast was considered to be of prime importance, not least because the authorities responsible, both the Confederation and the individual cantons, were largely surprised by the magnitude of the event which had taken on dramatic proportions locally and regionally. The supra-regional character of the study commissioned by FOEN guarantees that all cantons and regions affected by the events of October 2011 can benefit from its results and conclusions. Two focus areas were selected: the focus area 1 encompasses the severely hit valleys of the Kander and the Lonza, which constitute the main damage area of the extreme weather event. When determining the focus area 2 the aim was to enable a comparison with the focus area 1 which would yield maximum insight into the processes at work. Firstly it was important for both focus areas to have a similar orography, but a different degree of damage caused by the event. Therefore two valleys were needed which are linked by a high and preferably partly glacier-covered summit region; they should be similar in size and topography, located north of the Alps, and only moderately affected by damage. In addition there should be maximum contrast between the meteorological conditions in both areas, a good availability of data being a prerequisite. This led to the selection of the Linthtal and the Schächental as focus area 2. When compared, both focus areas belong to a region with similarly extensive precipitation over the

entire duration of the event (6 to 10 October). However the part of the total precipitation which fell as snow was significantly higher in the eastern focus area 2 than in the focus area 1, caused by lateral temperature differences (mainly from 9 to 10 October) with lower temperatures in the east. As a result, medium snow depth levels were different in the two focus areas after the event on the morning of 11 October. In the east (focus area 2) the remaining snow cover was significantly higher than in the west (focus area 1).

To process the analysis of the event the areas of investigation and evaluation were divided into four modules: (1) meteorology/climatology; (2) snow-hydrology; (3) hydrology; and (4) operational runoff-models; in the subsequent final report „Hydrometeorologische Analyse des Hochwasserereignisses vom 10. Oktober 2011“ (Badoux et al. 2013) a synthesis was attempted. This scientific report by MeteoSwiss describes module 1 and contains additional station and parameter analyses not included in the final report.

In the data collected by MeteoSwiss since 1931 no analogous event in autumn can be found - or perhaps even in the past 150 years according to the recordings in the chronicles „Unwetterschäden in der Schweiz“ of the Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL) and the weather reports of MeteoSwiss. It is obvious that similar snow depths and precipitation amounts have been recorded before, however not in connection with a snow melt area which reaches such high altitudes. The time of the event already in early October may have played an important part. Looking at the period before systematic observations started the above-mentioned chronicles contain indications of “autumnal floods caused by snow-melt” in the 19th century. However, “caused by snow-melt” does not automatically mean that snow melt was as decisive a factor as it was in October 2011.

The question whether in future such events will be more frequent cannot be conclusively answered at the moment. It cannot be excluded that with progressive climate change the combination of intensive precipitation and severe snow-melt in the mountains will become more frequent. However, the present climate models are not able to describe the exact changes in the atmospheric flow patterns with the required exactitude required to confirm this theory sufficiently. Since, in addition, only a rare combination of weather developments and further conditions, not all of them meteorological, leads to precipitation/melt events of such magnitude in the mountains, similar events should remain a rather infrequent phenomenon, although one with a high potential for damage.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	V
Résumé	VII
Abstract	IX
1 Synoptische Analyse	13
1.1 Wetterlagenanalyse	13
1.2 Wetterablauf	16
2 Niederschlag	19
2.1 Niederschlagsmengen	20
2.2 Vergleich Bodenmessungen - Niederschlagsradar	23
2.3 Einordnung Niederschlag mit Extremwertanalyse	24
2.3.1 Analyisierte Messreihen	24
2.3.2 Methoden	25
2.3.3 Wiederkehrperioden ausgewählter Perioden	26
2.3.3.a Gesamtereignis vom 6.10. bis 10.10.2011	26
2.3.3.b Warmfront 12-h Niederschlag	27
2.3.3.c Warmfront als fixes 1 und 2 – Tagesereignis	28
2.3.3.d Warmfront als gleitendes 1-Tagesereignis mit Sensitivitäts-Analyse	29
2.3.3.e Einfluss der Schneeschmelze	31
3 Analyse der Modellvorhersage	33
3.1 Nullgradgrenze	33
3.2 Niederschlag	36
3.2.1 Kandertal	37
3.2.2 Lötschental	39
3.2.3 Schächental	40
3.2.4 Glarnerland	40
3.3 Zusammenfassung der Modellvorhersagen	41
4 Vorhersagen / Warnungen aus meteorologischer Sicht	42
5 Historische Analogfälle	44
5.1 Daten und Methoden	45
5.1.1 Methodik und Limitierungen	45
5.1.2 Limitierungen und Interpretation der Resultate	46
5.1.3 Datenverfügbarkeit	46

5.2	Objektive Suche	47
5.2.1	Ähnliche hydrometeorologische Fälle im Gebiet Berner Alpen/Lötschental	47
5.2.2	Ähnliche hydrometeorologische Fälle im zentralen und östlichen Alpenraum	49
5.2.3	Vergleichbare Fälle am zentralen und östlichen Alpennordhang und im Jura	51
5.2.4	Vergleichbare Fälle im Schweizer Mittelland	52
5.2.5	Zusammenfassung der objektiven Analyse basierend auf Messdaten an Stationen	53
5.3	Chronik: Hochwasserschadensfälle mit Schneeschmelze seit 1800	56
5.3.1	Dokumentierte Ereignisse von 1800 bis 2011	56
5.3.2	Vergleich mit den objektiv bestimmten Ereignissen 1931-2011	58
6	Klimaänderung und Auftretenshäufigkeit von Hochwasserereignissen vom Typ „Oktober 2011“	59
7	Literaturverzeichnis	60
A	Anhang: Analysen zusätzlicher Stationen	62

1 Synoptische Analyse

Das Ereignis vom 6.10.2011 bis am 10.10.2011 kann in drei Hauptphasen eingeteilt werden: Kaltfront am 6.10, anschliessend eine längere Stauphase bis am 9.10 und die abschliessende Warmfront am 10.10.

1.1 Wetterlagenanalyse

Vor dem Hochwasserereignis herrschte zwischen dem 20. September und dem 6. Oktober eine praktisch ununterbrochene Hochdrucklage. Dabei schien häufig die Sonne und die Temperaturen stiegen nochmals auf spätsommerliche Werte an. Die Höchsttemperaturen erreichten im Flachland 21 bis 26 Grad und auf 2000 m ü.M. rund 17 Grad. Am Donnerstag 6. Oktober zog sich das bisher bestimmende Hochdruckgebiet „Sepideh“ auf den Atlantik zurück. Gleichzeitig dehnte sich eine in den letzten Tagen mit Unterstützung des ehemaligen Wirbelsturms „Ophelia“ gebildete umfangreiche Tiefdruckzone „Immanuel“ rasch gegen Mitteleuropa aus. Der Kern des Tiefs zog bis am Freitagmittag (7.10.) unter Verstärkung nach Nordskandinavien. Die zum Tief gehörende aktive Kaltfrontstörung zog rasch von Nordwest nach Südost über Europa hinweg. Sie überquerte die Alpen zwischen dem späten Donnerstagabend (6.10.) und Freitagmorgen (7.10.). Am Freitagmittag lag sie bereits über der nördlichen Adria und dem westlichen Mittelmeer (Abbildung 1 / 2).

In der Folge stellte sich eine für die Jahreszeit ungewöhnlich starke gegen die Alpen gerichtete Nordwest- bis Nordstaulage mit Schneefall bis in mittlere Lagen ein. Die Analysekarte des europäischen Wetterdienstes EZMW vom 9.10. Samstagmittag zeigt eindrücklich das Starkwindband (Jetstream) in einer Höhe von etwa 9 km. Im seinem Kern wurden mittlere Windgeschwindigkeiten von bis zu 270 km/h gemessen, über den Alpen waren es maximal etwa 230 km/h. Darin eingelagert gelangte zunächst schubweise maritime Polarluft zur Alpennordseite und staute sich dort an den Bergen. Auf Montag 10. Oktober führte eine aktive Warmfront einerseits zu ergiebigen Niederschlägen, andererseits aber auch zu einer raschen und markanten Erwärmung. Begleitet waren diese Störungsstaffeln von starken bis stürmischen Nordwestwinden über den Bergkämmen. Dabei wurden in exponierten Lagen Böenspitzen von 90 bis 120 km/h gemessen (Abbildung 3).

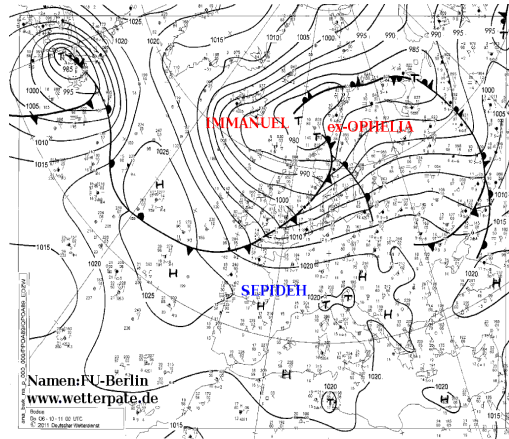
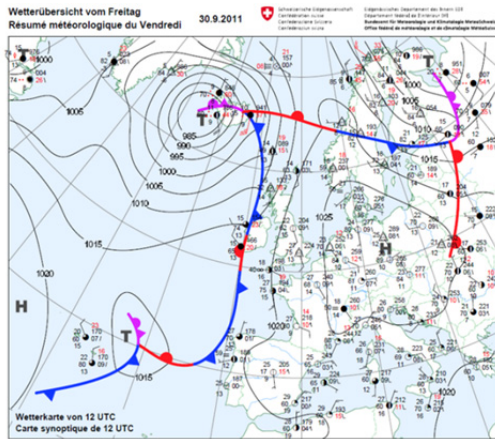


Abbildung 1: Bodenwetterkarte vom 30.09.2011 12 UTC (links) und 6.10.2012 00 UTC (rechts).

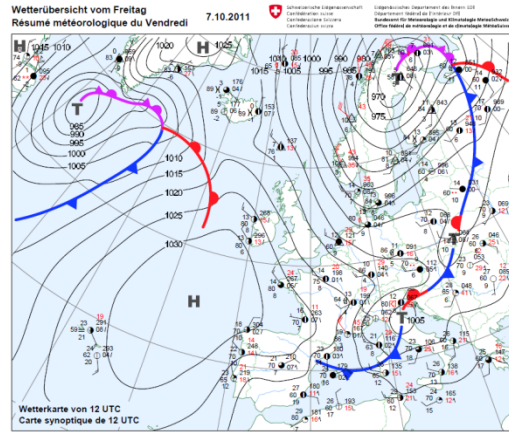
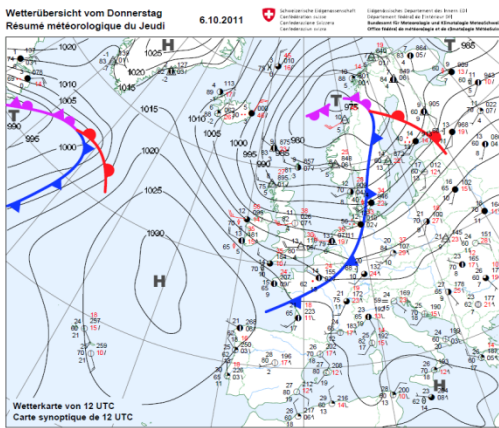


Abbildung 2: Bodenwetterkarte vom 06.10.2011 (links) und 7.10.2012 (rechts), jeweils 12 UTC.

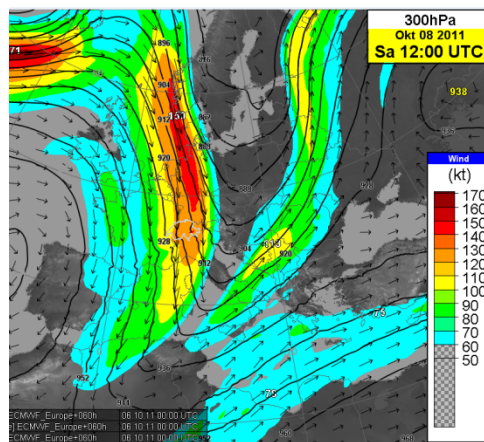
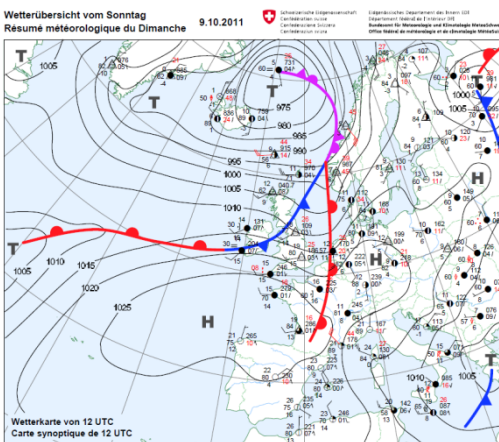


Abbildung 3: Bodenwetterkarte vom 09.10.2011 (links) und Jetstreamanalyse in 9km (rechts), jeweils 12 UTC.

Verfolgt man die Herkunft der Luftmasse einige Tage zurück so wird klar, wieso sie ausgesprochen warm war. Das Quellgebiet der Luft lag südlich der Azoren bei etwa 30° westlicher Länge und 30° nördlicher Breite im Einflussbereich eines subtropischen Tiefdruckwirbels. Die Luft wurde anschliessend in einem weiten Bogen - um ein ziemlich beständiges Hochdruckgebiet mit Zentrum westlich von Portugal - über den Nordatlantik und Grossbritannien zum Alpenraum geführt. In den letzten 36 Stunden vor dem Eintreffen in der Schweiz wurde diese feuchtwarme Luftmasse in praktisch allen Höhenschichten angehoben und somit weiter angefeuchtet. Die Zugbahnen der Luftpakete, welche am Montagmorgen 10.10. um 06 UTC (coordinated universal time) auf dem Jungfraujoch ankamen illustrieren diesen Vorgang (Abbildung 4).

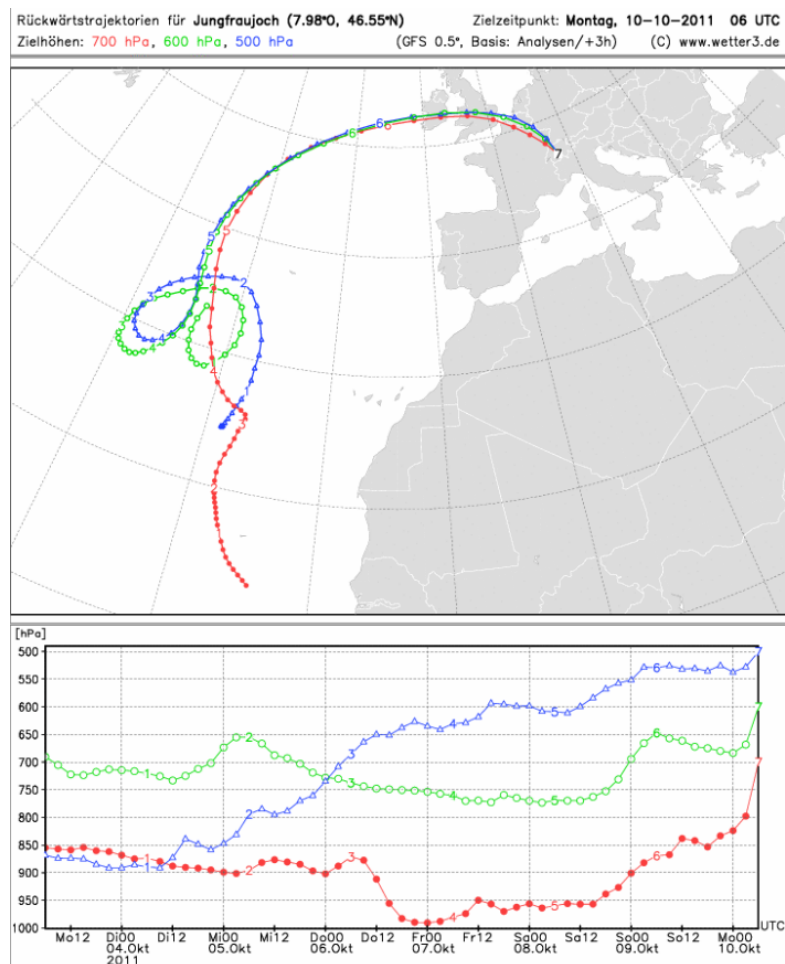


Abbildung 4: Herkunft und vertikale Bewegung der Luftmasse, die am Montagmorgen 10.10. 06 UTC auf und über dem Jungfraujoch eintraf. Quelle wetter3.de auf der Basis des Amerikanischen Vorhersagemodells GFS.

Der einem atmosphärischen Fluss gleichende Feuchtetransport aus den Tropen tritt aus der Satellitenperspektive am Besten in Erscheinung. An der amerikanischen Westküste (Kalifornien, Oregon, Washington) treten diese schmalen Bänder mit hoher Feuchtezufuhr (atmospheric rivers) häufig auf und bringen verheerende Niederschläge, wenn sie – ähnlich wie in diesem Fall in der Schweiz – zusätzlich auf Gebirge treffen und zum Ausregnen gezwungen werden

1.2 Wetterablauf

Nach einer längeren hochdruckbestimmten Schönwetterlage mit ausgesprochen hohen Temperaturen (vergl. Kap. 1.1) befindet sich die Nullgradgrenze am 6. Oktober 2011 bis am frühen Nachmittag noch in grossen Höhen zwischen 3500 und rund 4000 m ü.M. (Abbildung 5).

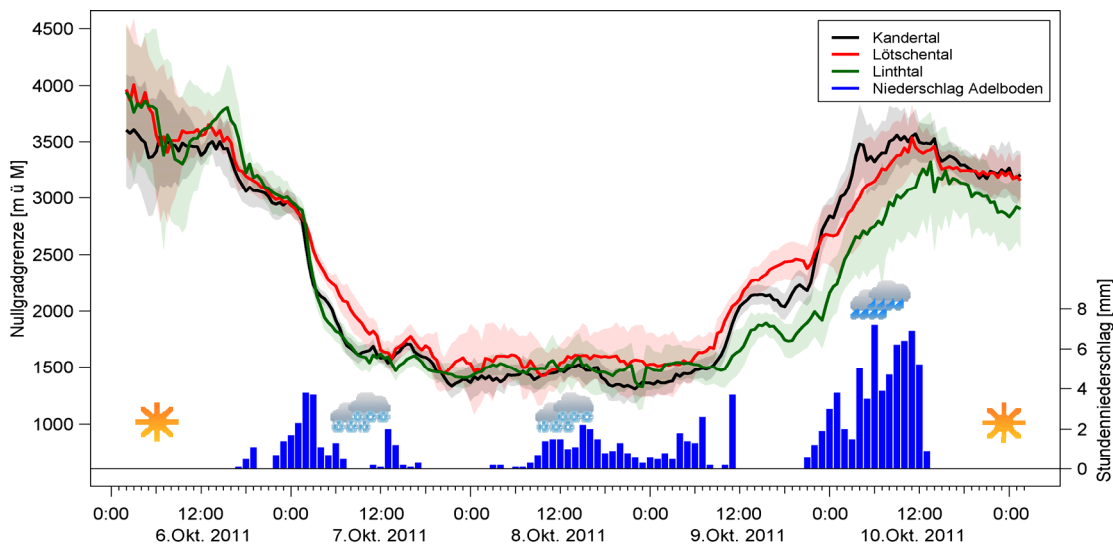


Abbildung 5: Wetterablauf vom 6.10. bis 10.10.2011. Für die Darstellung des groben Niederschlagsverlaufs wurden die Messwerte von Adelboden aus dem Fokusgebiet 1 verwendet. Der Verlauf im Niederschlagsgebiet 2 ist sehr ähnlich. Die Nullgradgrenzen, wie auch deren Unsicherheit (farbige Flächen) wurden mit Hilfe von Messstationen aus den Regionen (MeteoSchweiz/WSL-SLF) und einer linearen Regression geschätzt (s. Kap. 3.1).

Ab 16 Uhr fällt sie bis am 7. Oktober um 01 Uhr in der Nacht mit dem Durchzug einer aktiven Kaltfront und einsetzendem Niederschlag zuerst in allen Gebieten auf rund 2800 m ü.M. bevor sie dann ab 01 Uhr begleitet von Niederschlag sprunghaft auf rund 1500 m ü.M. sinkt und dort vom 7. Oktober ab etwa 10 Uhr mit leichten Schwankungen zwischen 1300 und 1700 m ü.M. bis am Vormittag des 9. Oktobers 2011 verharrt. Im Lötschental sinkt die Nullgradgrenze etwas langsamer bleibt dann aber auf ähnlicher Höhe konstant wie in den anderen Regionen. Die Schneefallgrenze sank entsprechend je nach Region auf 800 bis 1300 m ü.M. Die Periode vom 7.10. bis 9.10. war bestimmt durch eine Nordwest- bis Nordstaulage, welche für die Jahreszeit zu beträchtlichen Schneemengen führte. So meldete der Beobachter in Elm auf 965 m ü.M. am Sonntagmorgen (9.10.) 19 cm Neuschnee. In Arosa fielen innert 24 Stunden 48 cm Neuschnee, ein Wert, der im Oktober seit Messbeginn nur zweimal übertroffen wurde und für die erste Monathälfte umso bemerkenswerter ist. In höheren Lagen nahm die Gesamtschneehöhe bis am Sonntagmorgen verbreitet auf 50 bis 100 cm zu (Abbildung 6).

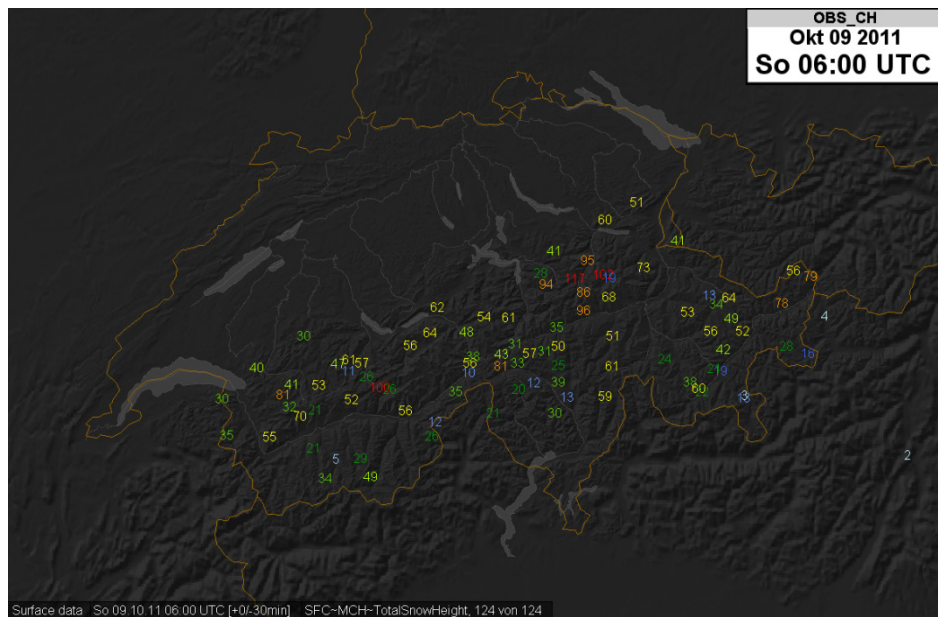


Abbildung 6: Schneehöhen am Sonntagmorgen 9.10.2011 6 Uhr UTC (Quelle MeteoSchweiz und WSL-SLF).

Bereits während des Tages des 10.10. begann die Schneedecke, wie am Beispiel Braunwald (Abbildung 7) schön ersichtlich, zumindest in Lagen bis 1500 m ü.M. zu tauen.



Abbildung 7: Schneesituation am 9.10.2011 in Braunwald mit beginnender Schneeschmelze nach dem Mittag. Quelle: Daniel Gerstgrasser

Nach einer Phase der Wetterberuhigung am Sonntag (9.10.) tagsüber setzten im Laufe des Sonntagabends erneut intensive Niederschläge ein, welche insbesondere in den höheren Lagen des Alpennordhangs und in den Alpen bis am Montagmittag (10.10.) anhielten. Begleitet waren die Niederschläge von einer markanten Erwärmung. Die Nullgradgrenze stieg innerhalb von 24 Stunden von 1600 m auf 3300 bis 3500 m ü.M. an (Abbildung 5). Der Anstieg verlief in den untersuchten Gebieten unterschiedlich schnell. Zunächst (am 09. Oktober) steigt die Nullgradgrenze im Lötschental am schnellsten an. Sie befindet sich um 10 Uhr auf 2000 und um 20 Uhr auf 2500 m ü.M. Im Kandertal wird 2000 m ü.M. erst gegen 12 Uhr und 2500 m ü.M. erst um etwa 22 Uhr erreicht. Am spätesten und langsamsten ist der Anstieg im Glarnerland und Schächental, wo 2000

erst um etwa 22 Uhr und 2500 m ü.M. am 10. Oktober um 02 Uhr in der Nacht erreicht werden. Im zweiten Teil des Anstiegs in der Nacht vom 9. zum 10. Oktober steigt die Nullgradgrenze im Kandertal besonders rasch an und erreicht 3000 m ü.M. um etwa 01:30 Uhr nachts. Im Lötschental werden 3000 m ü.M. erst gegen 04 Uhr nachts, im Glarnerland und Schächental sogar erst zwischen 08 und 09 Uhr morgens erreicht. Bis um 13 Uhr erreicht die Nullgradgrenze dann in beiden Fokusgebieten das Maximum mit Höhen zwischen 3300 und 3500 m ü.M. Danach verbleibt sie im weiteren Tagesverlauf und am 11. Oktober zwischen 2800 und 3500 m ü.M. Die Daten der Messstationen von MeteoSchweiz und dem SLF bestätigen einerseits den markanten Temperaturanstieg in den Modellen auf sehr hohe Werte und andererseits die zeitlich verzögerte Erwärmung in den östlichen Landesteilen bzw. im Fokusgebiet 2 (Abbildung 8/Abbildung 9). Begleitet war der Temperaturanstieg von starken Höhenwinden, welche während der Warmfront, je nach Höhenlage und Exposition, mittlere Geschwindigkeiten von 20 bis 60 km/h aufwiesen.

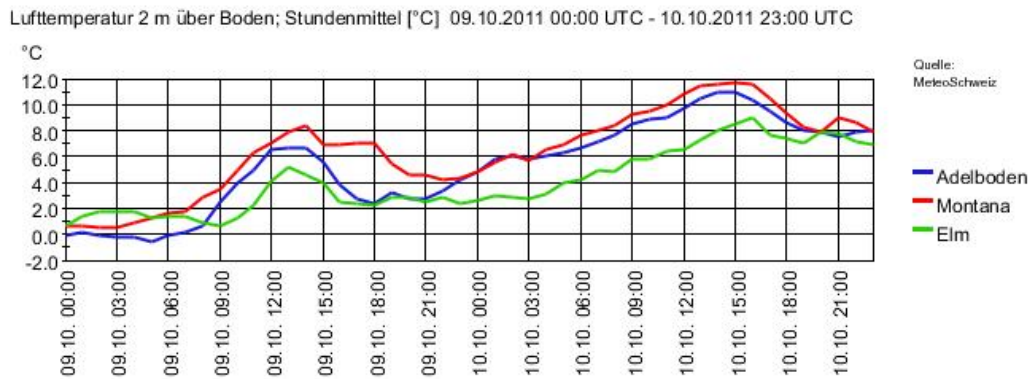


Abbildung 8: Temperaturverlauf an den Standorten Adelboden (1320 m), Elm (958 m) und Montana (1427 m).

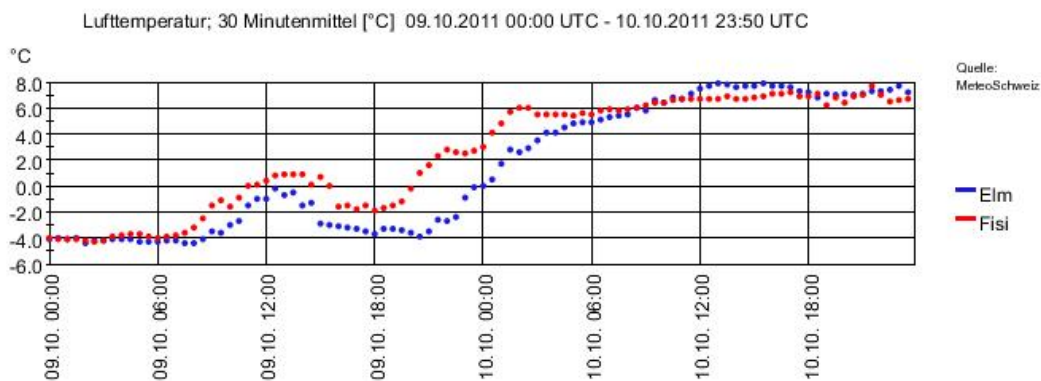


Abbildung 9: Temperaturverlauf an den Standorten Fisi/Fisichafberg (2160 m) und Elm Chüebodensee (2050 m)
Quelle: IMIS.

2 Niederschlag

Die zeitliche und räumliche Verteilung der Niederschläge ist eine zentrale Grösse in der Beurteilung der Auswirkungen in den verschiedenen Fokusgebieten. Die Betrachtung der Niederschlagsmengen und die Einordnung des Ereignisses erfolgt auf der Basis von Messstation. Zusätzlich zu Niederschlagsangaben an den Messpunkten werden flächige Niederschlagsverteilungen gezeigt.

Stationswerte

Bei allen Angaben zu Niederschlagsmengen an Messstationen handelt es sich um die effektiv gemessenen Werte. Windeinflüsse, welche insbesondere bei Schneefall zu systematischen Unterschätzungen in den Niederschlagsmengen führen können (undercatch), sind nicht berücksichtigt. Untersuchungen zeigen, dass in der Schweiz der systematische Messfehler in tiefen Lagen im Sommer ca. 4% und in erhöhten Lagen (> 1500 m ü.M.) im Winter sogar mehr als 40% betragen kann (Sevruk 1985). Auch im Ereignis Oktober 2011 waren die Windeinflüsse massiv und führten zu einer Unterschätzung des tatsächlichen Niederschlags von 40 bis 80% (Badoux et al 2013)

Gitterdaten

Die flächenhaften Darstellungen beruhen auf dem RhiresD – Datensatz von MeteoSchweiz. RhiresD stützt sich auf Messungen des täglichen Niederschlags an gut 400 Stationen im Messnetz von MeteoSchweiz. Die räumliche Analyse der Tagsniederschläge erfolgt in mehreren Schritten. (1) Räumliche Interpolation des durchschnittlichen Monatsniederschlags (Referenzperiode 1971-1990). (2) Berechnung der relativen täglichen Abweichungen an den Stationen im Vergleich zum klimatologischen Mittel 1971-1990. (3) Interpolation der relativen täglichen Anomalien. (4) Multiplikation des resultierenden Anomalie-Feldes mit dem klimatologischen Tagesniederschlag-Gitter. Eine ausführliche Beschreibung der Methodik ist in Frei und Schär (1998, Schritte 2 und 3), sowie in Schwarb (2000, Schritt 1) zu finden.

Durch die Verwendung eines Langzeit-Referenzfeldes bei der Interpolation der Tagesniederschläge wird dem Risiko begegnet, dass Niederschläge in grosser Höhe systematisch unterschätzt werden, wie dies bei einer einfacheren direkten Interpolation der Fall wäre (Widmann and Bretherton 2000). Dabei wird aber angenommen, dass die klimatologischen Niederschlags-Höhe Beziehungen zeitlich unabhängig sind. (Eine Schätzung dieser Beziehungen individuell für einzelne Tage ist statistisch nicht robust.) Bei der Interpretation von kleinskaligen Mustern in den täglichen Niederschlagsgittern ist deshalb zu beachten, dass diese Muster primär durch das klimatologische Referenzfeld bestimmt sind und möglicherweise nur beschränkt repräsentativ sind für ein Einzelereignis.

Die Genauigkeit der Analyse von RhiresD hängt einerseits von der Messgenauigkeit der Stationsdaten, andererseits von der Fähigkeit des Modells, Niederschläge an Orten ohne Messstation zu interpolieren. Die Grösse des Interpolationsfehlers ist abhängig davon wie die Gitterwerte durch den Anwender interpretiert werden. Wird der Gitterwert als punktuelle Schätzung (wie ein Messwert) interpretiert, kann der Fehler beträchtlich sein. Eine „leave one out“ Kreuzvalidierung zeigt hierzu einen Standardfehler um einen Faktor 1.7 bei leichten (<20% Quantil) und einen Faktor von 1.3 bei starken (>90% Quantil) Niederschlägen. Grundsätzlich besteht eine

Tendenz leichte Niederschläge zu überschätzen und starke Niederschläge zu unterschätzen. Werden Gitterpunkte hingegen als regionale Mittelwerte interpretiert (z.B. für ein mehrere km² grosses Gebiet um den Gitterpunkt) ist der Interpolationsfehler deutlich kleiner. Eine Quantifizierung dieses Fehlers ist schwierig weil für räumliche Mittelwerte keine Messungen als Referenz zur Verfügung stehen. Der Fehler dürfte zudem stark von der Art des Niederschlags abhängen. (Grösser/kleiner bei kleinräumigen/grossflächigen Niederschlägen.) Eine auf einem statistischen Modell beruhende Analyse des Starkniederschlags vom August 2005 ergab Fehler in der Grösse von 5-30% unter der Annahme, dass die Gitterpunkte als 15*15km Flächenmittel interpretiert werden (Frei 2008).

2.1 Niederschlagsmengen

Über das ganze Ereignis betrachtet hatten die Niederschlagsmengen ihren Schwerpunkt - wie bei solchen Wetterlagen üblich - vom Berner Oberland über die Zentralschweizer bis zu den Ostschweizer Alpen. Hier wurden innert 5 Tagen 100 bis 250 mm gemessen (Tabelle 1), wobei gegen Osten hin die höheren Werte registriert wurden. Insbesondere in Gebirgslagen wurden lokal auch noch höhere Werte gemessen (Abbildung 10). Im Wesentlichen kann das Ereignis (vergl. Kapitel 1.2) in drei Hauptphasen eingeteilt werden: Kaltfront, längere Stauphase und abschliessende Warmfront. In Abbildung 11 sind die Niederschlagssummen der drei Phasen räumlich dargestellt. Zu beachten ist, dass die Niederschlagssummen nicht exakt der Dauer der einzelnen Phasen entsprechen sondern auf die Ablesezeitpunkte der manuellen Niederschlagsstationen (06:00 UTC) angepasst wurden.

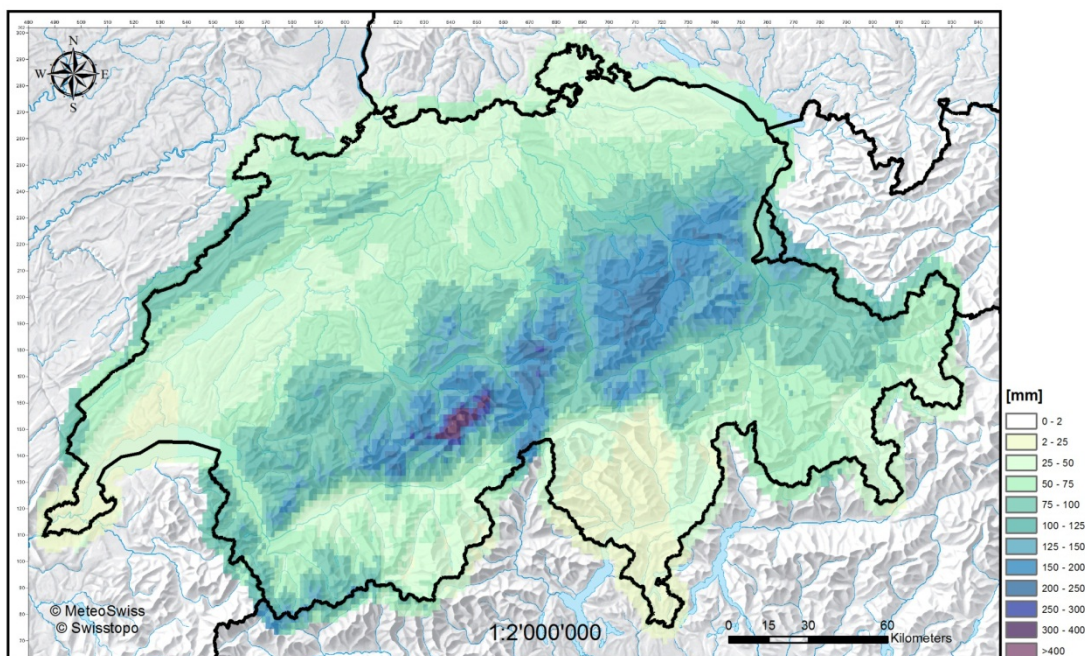


Abbildung 10: Verteilung der Niederschläge des gesamten Ereignisses vom 6.10. 06:00 Uhr bis 11.10. 06:00 Uhr.

Niederschlag

Tabelle 1: 5-Tagesniederschläge während des gesamten Ereignisses vom 6.10. 06:00 Uhr bis 11.10. 06:00 Uhr.

Station	Höhe m ü.M.	Niederschlag mm
Adelboden	1320	119
Kandersteg	1176	127
Blatten	1535	111
Leukerbad	1390	154
Bisistal	785	224
Unterschächen	1470	173
Elm	958	130
Braunwald	1330	223

Ohne die Berücksichtigung der manuellen Stationen wäre die räumliche Auflösung des Niederschlags ungenau. Zudem stehen für die historische Einordnung des Ereignisses vor 1978 nur manuelle Messungen zur Verfügung. Die Kaltfront umfasst somit den Zeitraum 6.10. 06:00 Uhr bis 07.10. 06:00 Uhr, die Stauphase den Zeitraum 7.10. 06:00 Uhr bis 09.10. 06:00 Uhr und die Warmfront 9.10. 06:00 Uhr bis 11.10. 06:00 Uhr. Statistisch betrachtet handelt es sich also bei der Stauphase und der Warmfront um 2-Tagesniederschläge, obwohl sie nur eine Dauer von gut 30 Stunden (Stauphase) bzw. sogar weniger als 24 Stunden (Warmfront) aufweisen.

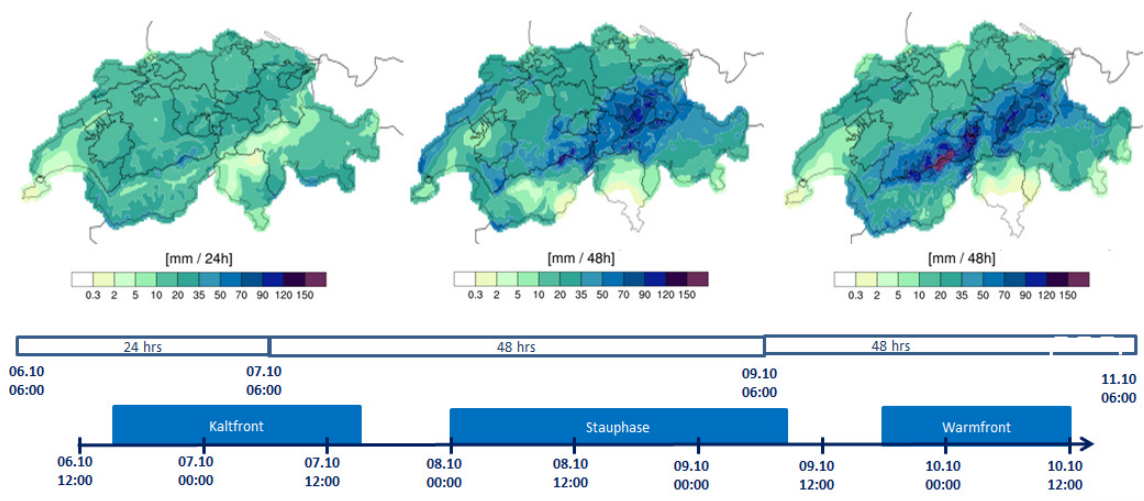


Abbildung 11: Grossräumige Verteilung der drei Niederschlagsphasen (aus automatischen und manuellen Messungen).

Betrachtet man die Niederschlagsmengen der einzelnen Phasen, so wird ersichtlich, dass die Unterschiede in den Gesamtniederschlagssummen zwischen den einzelnen Regionen hauptsächlich durch die Stauphase bedingt sind. In dieser Periode fiel am östlichen Alpennordhang des Fokusgebiets 2 deutlich mehr Niederschlag (Schnee) als in den westlichen Gebieten des Fokusgebiets 1 (Abbildung 11 und Abbildung 12). Die Unterschiede waren aber auch innerhalb der Fokusgebiete, insbesondere im Gebiet 2 beträchtlich. So belief sich zum Beispiel der 2-Tagesniederschlag vom 7.-8.10. in Elm auf ca. 60 mm während im gleichen Zeitraum in Braunwald gut 100 mm fielen. Der Niederschlagsschwerpunkt lag in der Stauphase in einem Gebiet „Muotathal – Schächental – westliches Glarnerland“.

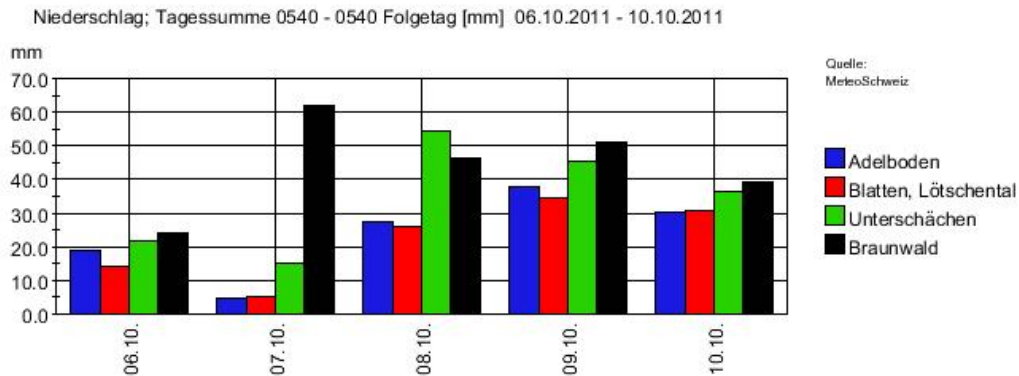


Abbildung 12: Tägliche Niederschlagsmengen während des gesamten Ereignisses vom 6.10. 06:00 Uhr bis 11.10. 06:00 Uhr für die Stationen Adelboden, Blatten (Lötschen), Unterschächen und Braunwald.

Während der Warmfront hingegen waren die Niederschläge in allen Gebieten ähnlich ausgeprägt. (Tabelle 2, Abbildung 13).

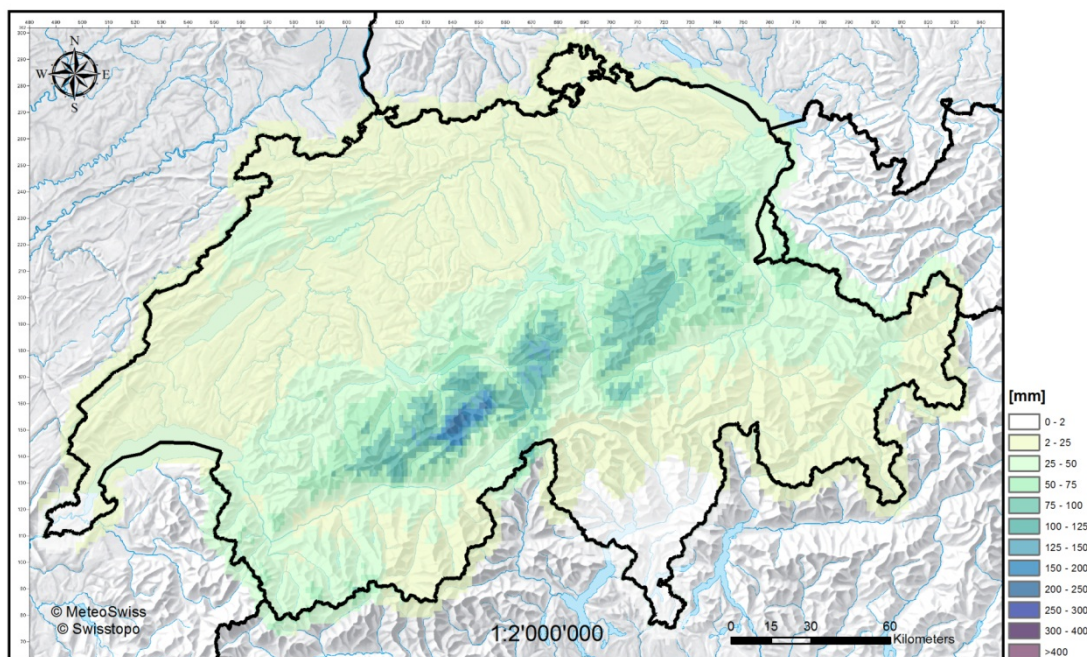


Abbildung 13: Verteilung der Niederschläge während der Warmfront vom 9.10. 06:00 Uhr bis 11.10. 06:00 Uhr. Für die Erfassung der Warmfront muss der 2-Tagesniederschlag gewählt werden, da das Ereignis über die Niederschlagsmessung von 06:00 Uhr UTC hinausgeht (vergl. Text).

Niederschlag

Tabelle 2: 2-Tagesniederschläge während der Warmfront vom 9.10. 06:00 Uhr bis 11.10. 06:00 Uhr. Für die Erfassung der Warmfront muss der 2-Tagesniederschlag gewählt werden, da das Ereignis über die Niederschlagsmessung von 06:00 Uhr UTC hinausgeht (vergl. Text).

Station	Höhe m ü.M.	Niederschlag mm
Adelboden	1320	68
Kandersteg	1176	66
Blatten	1535	65
Leukerbad	1390	89
Bisistal	785	92
Unterschächen	1470	82
Elm	958	58
Braunwald	1330	90

Wichtig bei der Betrachtung der Auswirkungen der Niederschläge ist der Umstand, dass der Niederschlag während der Kaltfront und der anschliessenden Stauphase bis in Höhenlagen von 1000 bis 1500 m ü.M. herunter in Form von Schnee fiel und somit nicht unmittelbar abflusswirksam wurde. Dieser Niederschlag wurde also zuerst zwischen gespeichert bevor er dann bei der abschliessenden Warmfront schmolz und zusätzlich zu den Warmfrontniederschlägen, welche bis in Höhen von ca. 3000 m ü.M. in Regen übergingen, in die Bäche und Flüsse gelangte. Der Schwerpunkt bei der Betrachtung der Niederschläge bzw. des Ereignisses liegt aus diesem Grunde bei der Warmfront. Abbildung 14 zeigt die stündlichen Niederschlagssummen während der Warmfrontphase. Die höchsten Werte werden im Fokusgebiet 1 an der Station Adelboden mit bis zu 7 mm/h erreicht, was für grossflächige Niederschläge eine beträchtliche Niederschlagsintensität darstellt.

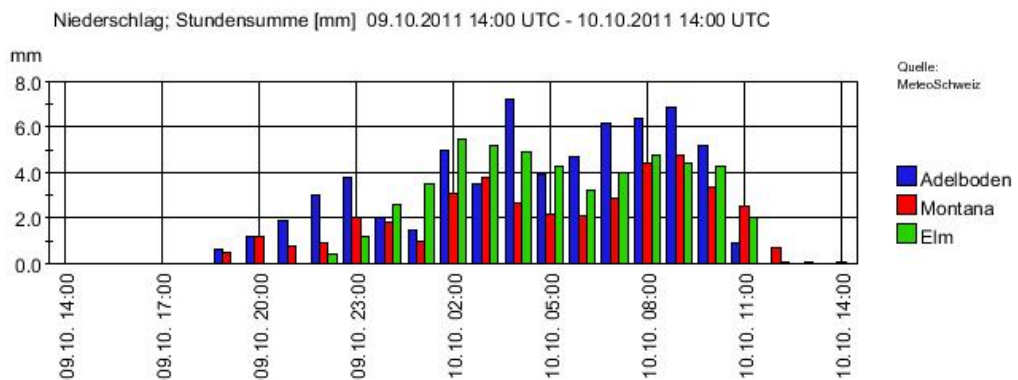


Abbildung 14: Stündliche Niederschlagssummen während der Warmfrontphase.

2.2 Vergleich Bodenmessungen - Niederschlagsradar

Der Einbezug von Radarinformationen führt zu einer räumlichen und zeitlichen Verfeinerung der gegitterten Niederschlagsmuster. Lokale Gegebenheiten bzw. Unterschiede lassen sich dadurch besser erkennen. Im Jahr 2011 wurde das Radar-Netz der MeteoSchweiz erneuert was mit mehrmonatigen Ausfällen der drei Radargeräte verbunden war. Im Oktober 2011 war z.B. das

LaDole Radar nicht in Betrieb. Im Westen der Schweiz waren deshalb die Radarsignale sehr heterogen. Ein verlässlicher Einbezug der Radarinformationen für die zeitliche Disaggregation der gegitterten Tagesniederschlagssummen Rhiresd0 z.B. auf Stundenwerte war unter diesen Umständen zum Zeitpunkt der Analysen (2012) nicht möglich. Es ist geplant die Rhiresd0 Datensätze unter Einbezug der reduziert verfügbaren Radarinformation auf Stundenwerte nachträglich aufzuteilen. Allerdings muss aufgrund der reduzierten Radarinformation mit Einbussen bezüglich der Qualität gerechnet werden.

2.3 Einordnung Niederschlag mit Extremwertanalyse

Die Niederschlagsmengen während es Hochwasserereignisses waren beträchtlich und die Auswirkungen regional verheerend. Es stellt sich nun die Frage wie selten solche Niederschlagsereignisse aus statistischer Sicht sind und ob die zum Teil 300 jährlichen Abflussspitzen einzelner Bäche und Flüsse durch die Niederschlagsmengen erklärt werden können. Mit Hilfe von Extremwert-Analysen können die Wiederkehrperioden der gefallen Niederschläge geschätzt werden. Dabei wird einerseits das gesamte Ereignis wie auch Teilperioden, insbesondere die Warmfront, untersucht.

Wie in Kapitel 2 ausgeführt halten sich Niederschlagsereignisse in der Regel nicht an die vorgegebenen fixen Ablesetermine der manuellen Messstationen. So fiel zum Beispiel der Niederschlag der Warmfront über zwei Niederschlagstage, obwohl das Ereignis an sich weniger als 24 Stunden dauerte. Es soll daher untersucht werden wie stark die Schätzung der Seltenheit eines Ereignisses von einer fixen Messperiode beeinflusst wird.

Auf die mögliche Amplifizierung der Niederschläge durch Schmelze des zuvor gefallenen Schnees während der Warmfrontphase wird in diesen Untersuchungen nur qualitativ eingegangen.

2.3.1 Analyisierte Messreihen

Untersucht werden hauptsächlich 1-Tages-, 2-Tages- und 5-Tages Niederschläge an ausgewählten Stationen der beiden Fokusgebiete. Wo möglich wurde die Analyse über die Periode 1961-2011 gerechnet.

Für Aussagen zum Fokusgebiet 1 wurden die Stationen Kandersteg, Blatten, Adelboden und Montana gewählt. Blatten weist nur Daten ab 1974 auf zudem musste das Jahr 1999 weggelassen werden, da nur einige Monate diese Jahres zur Verfügung standen. Aus dem Fokusgebiet 2 wurden die Stationen Glarus und Braunwald aus dem Glarnerland, sowie Altdorf und Bisisthal aus der näheren Umgebung berücksichtigt. Unterschächen konnte nicht berücksichtigt werden, weil die Beobachtungszeitreihe mit knapp 30 Jahren nicht ausreichend lang ist. Als Ersatz wurde deshalb Bisisthal (Daten ab 1969) gewählt.

Die Analysen des 12-Stunden Niederschlags, relevant bei der Betrachtung der Warmfront, und die Sensitivitätsanalysen für den Vergleich gleitende/fixe Niederschlagsperioden benötigen stündliche Messdaten. Daher reduziert sich die Anzahl der Stationen auf Adelboden, Montana, Altdorf und Glarus. Für höher gelegene Standorte innerhalb der beiden Fokusgebiete stehen keine genügend langen Datenreihen (mind. 30 Jahre) mit hoher zeitlicher Auflösung zur Verfügung.

2.3.2 Methoden

Die Extremwert Statistik ermöglicht Schlüsse über die Seltenheit von extremen Ereignissen zu ziehen. Die Methodik beruht auf der Annahme, dass die Maxima einer genügend grossen Zahl unabhängiger gleichverteilter Zufallszahlen der Generalised Extreme Value Verteilung (GEV) folgen (Coles, 2001). Ist dies der Fall, dann ist auch die Verteilung der Werte, die eine genügend hohe Schwelle überschreiten bekannt. Letztere wird Generalized Pareto Verteilung (GPD) genannt. Diese bildet die Grundlage für die Peaks-over-Threshold Methode (POT), welche in diesem Bericht verwendet wird. Die GPD wird anhand der Beobachtungen geschätzt, die einen vom Anwender gewählten Schwellenwert überschreiten.

Ein Problem der POT-Methode ist, dass der Schwellenwert innerhalb eines definierten Ereignis-Zeitraumes mehrmals überschritten werden kann. Es besteht also die Möglichkeit, dass Gruppen von Überschreitungen - in der Literatur Cluster genannt - zum gleichen Ereignis gehören und somit keine unabhängigen Beobachtungen darstellen. Sollte dies vorkommen, wird nur der höchste Wert eines Clusters von Überschreitungen beibehalten. Diese Maxima der Cluster sind immer noch GPD verteilt (Davison & Smith, 1990).

In der Praxis ist nicht bekannt, welche Beobachtungen einer Messreihe zum gleichen Ereignis gehören. Cluster werden künstlich mittels eines sogenannten „run parameter“ festgelegt, der die minimale zeitliche Distanz zwischen unabhängigen Überschreitungen bezeichnet. Für die Extremwert Analyse mittels der POT-Methode muss sowohl ein Schwellenwert, wie auch ein „run parameter“ vom Anwender gewählt werden. Für diese Untersuchungen wurde wo möglich die Methode von Süveges & Davison (2010) für die Wahl der beiden Parameter angewendet. Wo dies nicht möglich war wurde auf die graphische Methode von Davison & Smith (1990) zurückgegriffen.

Die Seltenheit eines Ereignisses einer gegebenen Amplitude folgt aus der geschätzten Verteilung. Jedem Niederschlagswert entspricht eine Wahrscheinlichkeit, in einem gegebenen Jahr überschritten zu werden. Wird diese Wahrscheinlichkeit als ein Bruchteil T von 1 ausgedrückt ($1/T$), dann wird der Niederschlagswert im Durchschnitt einmal in T Jahren überschritten. T wird Wiederkehrperiode oder Jährlichkeit genannt und der entsprechende Niederschlagswert Wiederkehrwert. Wiederkehrwerte werden gegenüber Wiederkehrperioden in einem Pareto-Diagramm aufgetragen. Abbildung 15 zeigt das Pareto-Diagramm des 5-Tagesniederschlags von Montana.

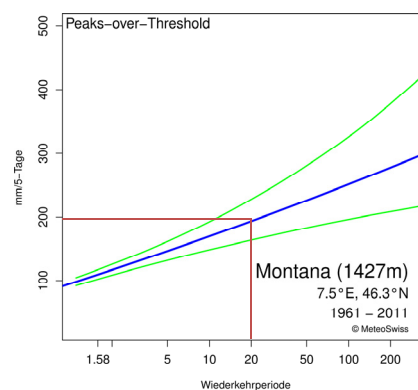


Abbildung 15: Pareto-Diagramm des 5-Tagesniederschlags von Montana .

Eine 20-jährige Wiederkehrperiode entspricht im Beispiel Montana einem Wiederkehrwert von ca. 190 mm. Das heisst, dass die Niederschlagsmenge von rund 190 mm im Durchschnitt alle 20 Jahre überschritten wird; die Wahrscheinlichkeit, dass sie in einem gegebenen Jahr überschritten wird ist 5%. Auf dem Pareto-Diagramm werden neben der besten Schätzung (blaue Kurve) auch die Konfidenz-Intervalle (grüne Linien) der Wiederkehrwerte aufgezeichnet. Dies um der Unsicherheit der Schätzung Rechnung zu tragen. Die Konfidenz-Intervalle werden in diesem Bericht mit nicht-parametrischem Resampling gerechnet.

2.3.3 Wiederkehrperioden ausgewählter Perioden

Das gesamte Ereignis sowie die verschiedenen Phasen werden jeweils exemplarisch anhand von Pareto-Diagrammen ausgewählter Stationen analysiert. Die vollständige Analyse sämtlicher Pareto-Diagramme aller Standorte und Auswertezwischenräume ist im Anhang 1 aufgeführt.

2.3.3.a) Gesamtereignis vom 6.10. bis 10.10.2011

Bei der Analyse der 5-Tages Niederschlagssummen des Gesamtereignisses, insbesondere beim Vergleich mit anderen Ereignissen gleicher Dauer, muss berücksichtigt werden, dass bei den höher gelegenen Standorten der Niederschlag zwischenzeitlich als Schnee gespeichert wurde und somit der Niederschlag nicht fortlaufend abfliessen konnte.

Wie in den Pareto-Diagrammen von Kandersteg und Braunwald (Abbildung 16) sowie in der Zusammenstellung in Tabelle 3 ersichtlich, liegen die Wiederkehrperioden der 5-Tagesniederschläge in beiden Fokusgebieten in der Grössenordnung von 2-10 Jahren.

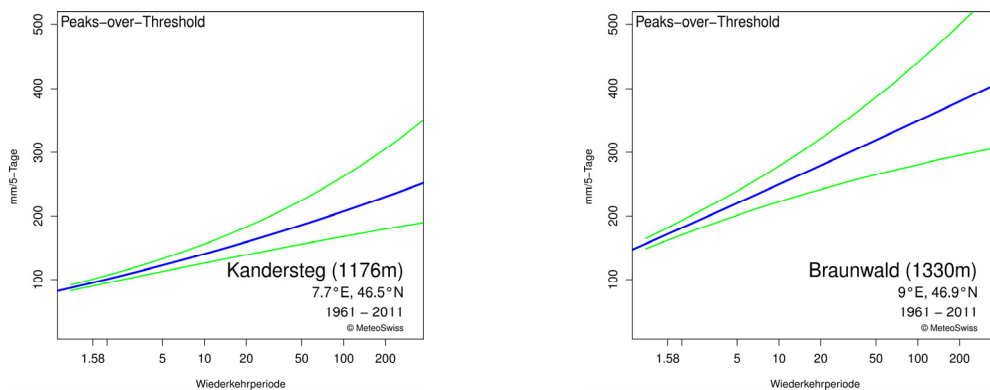


Abbildung 16: Pareto-Diagramm des 5-Tages Niederschlags an den Stationen Kandersteg und Braunwald über die Periode 1961-2011. Blau: beste Schätzung. Grün: Konfidenz-Intervalle. 5-Tages Niederschlag vom 06.10. 06:00 Uhr bis 11.10.2011 06:00 Uhr: Kandersteg: 127.0 mm, Braunwald: 222.6 mm.

Betrachtet man die absoluten Niederschlagsmengen derselben Wiederkehrperiode in den beiden Fokusgebieten, so wird ersichtlich, dass im Fokusgebiet 2 grundsätzlich höhere Mengen für die gleiche Wiederkehrperiode auftreten.

Tabelle 3: Wiederkehrwerte in mm des 5-Tages Niederschlags. In Klammern: 0.025 und 0.975 Konfidenz-Intervalle. Beachte: Bei Station Blatten fehlt das Jahr 1999. 5-Tages Niederschlag am vom 06.10. 06:00 Uhr bis am 10.10.2011 06:00 Uhr: Adelboden: 119.0 mm, Kandersteg: 127.0 mm, Montana: 57.1 mm, Blatten: 110.9 mm, Altdorf: 111.3 mm, Bisisthal: 223.5 mm, Glarus: 148.8 mm, Braunwald: 222.6 mm.

	Adelboden	Kandersteg	Montana	Blatten	Altdorf	Bisisthal	Glarus	Braunwald
2	105 (100,111)	101 (95,107)	117 (109,126)	114 (105,124)	102 (97,108)	177 (167,187)	128 (122,135)	181 (170,193)
5	123 (114,132)	123 (113,133)	147 (132,162)	140 (124,157)	121 (111,131)	206 (191,222)	151 (140,162)	220 (201,240)
10	136 (122,149)	140 (127,156)	170 (149,193)	161 (137,185)	136 (121,151)	227 (206,248)	168 (153,183)	250 (222,280)
20	149 (129,166)	159 (140,184)	193 (165,227)	182 (149,218)	150 (129,173)	246 (219,274)	185 (164,206)	279 (241,323)
30	156 (133,176)	171 (147,202)	208 (173,250)	194 (156,238)	159 (134,187)	257 (226,290)	195 (170,221)	297 (252,350)
50	165 (138,189)	186 (157,228)	226 (184,280)	210 (164,266)	170 (139,205)	270 (234,311)	207 (176,240)	319 (265,386)
100	176 (143,207)	207 (169,266)	251 (198,326)	232 (173,308)	184 (145,233)	287 (244,339)	223 (185,267)	349 (281,439)
300	193 (150,238)	244 (187,340)	293 (217,412)	267 (187,385)	208 (153,281)	312 (256,383)	249 (196,316)	398 (304,534)

2.3.3.b) Warmfront 12-h Niederschlag

Die intensiven Niederschläge dauerten während der Warmfrontphase etwa 12 Stunden, weshalb Wiederkehrperioden dieser Zeitgranularität grundsätzlich sehr interessant sind. In Adelboden wurde am 10.10. eine 12-Stunden Niederschlagssumme von 56.3 mm erreicht. Diese Summe entspricht einem 5-bis 10-jährigen Ereignis. In Glarus betrug der 12-Stunden Niederschlag 51.3 mm. Eine solche Niederschlagsmenge ist für Glarus nicht sehr aussergewöhnlich und kommt etwa alle Jahr einmal vor. Dasselbe gilt für die Stationen Montana und Altdorf. Für die unmittelbar in den Fokusgebieten liegenden Stationen, wie z.B. Blatten oder Braunwald, sind keine 12-h Analysen möglich, da automatische Sensoren für die notwendigen kontinuierlichen Messungen fehlen. Ein weiteres Problem bei der Betrachtung der 12-Stunden Niederschläge ist die Kürze der Messreihen. Die automatischen Messungen in der Schweiz wurden ab 1978 eingeführt. Die Schätzung insbesondere von langen Wiederkehrperioden ist bei solch kurzen Datenreihen mit grossen Unsicherheiten behaftet und entsprechend vorsichtig zu interpretieren. Dennoch lassen die 12-Stunden Analysen den Schluss zu, dass die Niederschlagsmengen der Warmfront alleine die verheerenden Auswirkungen nicht erklären können. (s. Abbildung 17, Tabelle 4).

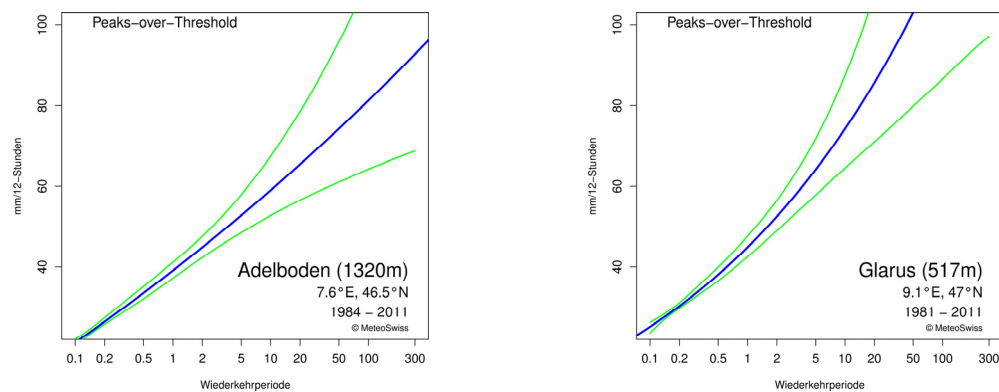


Abbildung 17: Pareto-Diagramm des 12-Stunden Niederschlags an den Stationen Adelboden (Periode 1981-2011) und Glarus (1981-2011). Blau: beste Schätzung. Grün: Konfidenz-Intervalle. Höchster 12-Stunden Niederschlag am 10.10.2011: Adelboden: 56.3 mm, Glarus: 51.3 mm.

Tabelle 4: Wiederkehrwerte in mm des 12-Stunden Niederschlags. In Klammern: 0.025 und 0.975 Konfidenz-Intervalle. Beachte: 12-Stunden Niederschlag am 10.10.2011: Adelboden: 56.3 mm, Montana: 34.7 mm, Altdorf: 37.9 mm, Glarus: 51.3 mm. Die Stationen Kandersteg, Blatten, Bisisthal, Braunwald können aufgrund fehlender automatischer Messungen nicht ausgewertet werden.

	Adelboden	Kandersteg	Montana	Blatten	Altdorf	Bisisthal	Glarus	Braunwald
2	45 (42,48)	-	45 (42,49)	-	51 (47,55)	-	53 (49,56)	-
5	53 (48,58)	-	55 (48,62)	-	62 (54,69)	-	64 (58,72)	-
10	59 (53,67)	-	63 (53,74)	-	70 (58,80)	-	74 (64,88)	-
20	65 (56,78)	-	71 (57,89)	-	78 (61,94)	-	86 (71,108)	-
30	69 (58,85)	-	76 (59,98)	-	83 (63,103)	-	93 (75,121)	-
50	74 (61,95)	-	83 (61,112)	-	89 (64,116)	-	103 (80,142)	-
100	81 (64,110)	-	93 (65,135)	-	98 (66,136)	-	118 (86,177)	-
300	88 (67,127)	-	103 (67,162)	-	107 (68,159)	-	135 (93,220)	-

2.3.3.c) Warmfront als fixes 1 und 2 – Tagesereignis

Das Fehlen von automatischen Messstationen mit kontinuierlichen Messungen innerhalb der Fokusgebiete sowie kurzen Messreihen der Stationen in der Nähe der Fokusgebiete (s. 2.3.3.b) lassen eine Auswertung der reinen Ereignisdauer der Warmfront (ca. 12-14 h, je nach Station) nur beschränkt zu. Für eine längerfristige Einordnung muss daher auf die historisch weiter zurückreichenden Granularitäten 1- bzw. 2-Tagesniederschlag ausgewichen werden. Wie in Kapitel 2 ausgeführt fielen die Niederschläge der Warmfront, obwohl weniger als 24 h dauernd, über zwei Niederschlags-Messtage. Der Ablesetermin am frühen Morgen teilt das Ereignis auf zwei Tage auf. Als Folge davon sind die Wiederkehrperioden der 1- aber auch die der 2-Tagessummen verhältnismässig klein und betragen bei allen ausgewerteten Stationen weniger als 2 Jahre (Tabelle 5, Tabelle 6). Da die Werte in den Pareto-Diagrammen zum Teil nicht ersichtlich sind, wird an dieser Stelle auf die Abbildung der Diagramme verzichtet.

Tabelle 5: Wiederkehrwerte in mm des 1-Tages Niederschlags. In Klammern: 0.025 und 0.975 Konfidenz-Intervalle. Beachte: Bei Station Blatten fehlt das Jahr 1999. 1-Tages Niederschlag am 10.10.2011: Adelboden: 30.3 mm, Kandersteg: 21.4 mm, Montana: 21.1 mm, Blatten: 30.7 mm, Altdorf: 23.3 mm, Bisisthal: 41.9 mm, Glarus: 28.2 mm, Braunwald: 39.3 mm.

	Adelboden	Kandersteg	Montana	Blatten	Altdorf	Bisisthal	Glarus	Braunwald
2	52 (49,55)	51 (48,55)	55 (51,59)	59 (55,64)	57 (54,61)	83 (77,89)	66 (62,71)	80 (75,86)
5	63 (58,68)	63 (57,69)	68 (61,75)	74 (66,82)	71 (64,77)	100 (91,110)	80 (73,86)	98 (89,107)
10	72 (64,80)	73 (64,83)	78 (68,88)	86 (73,99)	82 (72,93)	114 (101,129)	90 (81,98)	113 (100,127)
20	81 (70,94)	83 (71,100)	88 (74,103)	99 (81,119)	93 (79,111)	128 (110,150)	100 (88,111)	128 (111,148)
30	87 (74,103)	90 (74,111)	94 (78,112)	106 (86,133)	100 (83,124)	137 (115,164)	105 (92,119)	138 (117,162)
50	94 (78,115)	99 (79,126)	102 (82,125)	117 (91,151)	110 (88,142)	148 (122,184)	112 (96,131)	150 (125,181)
100	105 (83,135)	111 (85,151)	113 (87,144)	132 (98,180)	123 (94,170)	163 (130,211)	122 (101,149)	168 (135,211)
300	124 (92,173)	133 (94,200)	131 (95,177)	158 (108,236)	147 (103,226)	190 (142,266)	137 (108,183)	200 (153,266)

Tabelle 6: Wiederkehrwerte in mm des 2-Tages Niederschlags. In Klammern: 0.025 und 0.975 Konfidenz-Intervalle. Beachte: Bei Station Blatten fehlt das Jahr 1999. 2-Tages Niederschlag vom 09.10. 06:00 Uhr bis am 11.10.2011 06:00 Uhr: Adelboden: 68.0 mm, Kandersteg: 65.9 mm, Montana: 41.2 mm, Blatten: 65.3 mm, Altdorf: 39.1 mm, Bisisthal: 92.3 mm, Glarus: 60.0 mm, Braunwald: 90.3 mm.

	Adelboden	Kandersteg	Montana	Blatten	Altdorf	Bisisthal	Glarus	Braunwald
2	73 (68,77)	73 (68,77)	80 (74,86)	83 (76,90)	77 (72,82)	120 (113,128)	90 (85,95)	120 (113,127)
5	88 (81,96)	89 (82,97)	99 (90,110)	105 (92,118)	94 (85,103)	145 (133,159)	109 (100,117)	145 (133,159)
10	102 (91,113)	103 (92,115)	115 (101,130)	123 (104,144)	107 (94,122)	165 (147,187)	124 (112,138)	166 (147,188)
20	116 (100,134)	117 (101,135)	131 (111,153)	142 (114,174)	121 (102,143)	185 (161,218)	141 (123,164)	188 (161,220)
30	125 (106,147)	126 (107,149)	140 (117,167)	154 (120,195)	129 (106,157)	197 (169,239)	151 (129,183)	201 (168,241)
50	137 (113,166)	137 (114,168)	152 (124,187)	170 (128,224)	140 (112,176)	213 (178,267)	165 (136,211)	219 (177,272)
100	154 (123,195)	153 (123,197)	170 (133,216)	193 (137,270)	155 (119,204)	235 (191,309)	185 (146,257)	243 (190,319)
300	184 (138,250)	181 (137,253)	198 (146,268)	232 (152,363)	181 (129,258)	272 (209,391)	221 (159,357)	285 (208,406)

2.3.3.d) Warmfront als gleitendes 1-Tagesereignis mit Sensitivitäts-Analyse

Niederschlagsereignisse halten sich, wie in Kapitel 2.3.3.c) erwähnt, grundsätzlich nicht an die Beobachtungszeiten der Messnetze, so dass sie meistens als zwei oder mehrere schwächere Ereignisse registriert werden. Dies hat beispielsweise zur Konsequenz, dass die Extremwertanalyse die Wiederkehrwerte des fixen 1-Tages Niederschlags im Vergleich zu der effektiven 24-Stunden Summe unterschätzt. Diesem Sachverhalt wurde in der hydrologischen Literatur früh versucht Rechnung zu tragen. Hershfield (1961) erwähnt einen Faktor von 1.13 in seinem Atlas der Niederschlagsfrequenz für die Vereinigten Staaten. Van Montfort (1990, 1997) widmet sich der Frage und schlägt eine Methode basierend auf Extremwertstatistik vor, um diesen Faktor oder Koeffizient zu berechnen (auch Hershfield-Faktor genannt). Er weist darauf hin, dass das jährliche Maximum des 24-Stunden Niederschlags nicht grösser als das jährliche Maximum des 2-Tages Niederschlags sein kann (ebenfalls ist der maximale 48-Stunden Niederschlag auch zwingend kleiner gleich dem maximalen 3-Tages Niederschlag, und so weiter). Van Montfort schätzt den Hershfield-Faktor aufgrund des Unterschiedes in den Maxima der 1- und 2-Tages Niederschläge. Er nimmt an, dass diese Verteilung grundsätzlich nur eine Verschiebung der Verteilung der 1-Tages Maxima ist.

Für die Warmfront vom 10.10.2011 werden die gleitenden 24-Stunden Summen mit den fixen 1-Tagessummen mit Hilfe der Peaks-over-Threshold Methode an den Standorten Adelboden, Glarus, Altdorf und Montana verglichen und die Wiederkehrperiode der gleitenden Tagessummen bestimmt. In Abbildung 18 (links) sind die Pareto-Diagramme inklusiv ihrer Konfidenz-Intervalle des gleitenden 24-Stunden und des fixen 1-Tages Niederschlags für Adelboden dargestellt. Der Unterschied zwischen den Niederschlagsmengen der gleitenden 24-Stunden und der fixen 1-Tages Analyse beträgt zwischen 17% bei einer Wiederkehrperiode von 2 Jahren und 20% bei einer Wiederkehrperiode von 300 Jahren. Das heisst, Wiederkehrwerte von hohen Jährlichkeiten werden bei der fixen Betrachtung um etwa 20% unterschätzt. Allerdings liegt der 24-Stunden Wiederkehrwert für Jährlichkeiten über 20 Jahre innerhalb der Konfidenz-Intervalle des 1-Tages Wiederkehrwertes. Das bedeutet, dass sich der 24-Stunden Wiederkehrwert von Adelboden streng statistisch genommen nicht vom 1-Tages Wiederkehrwert unterscheidet.

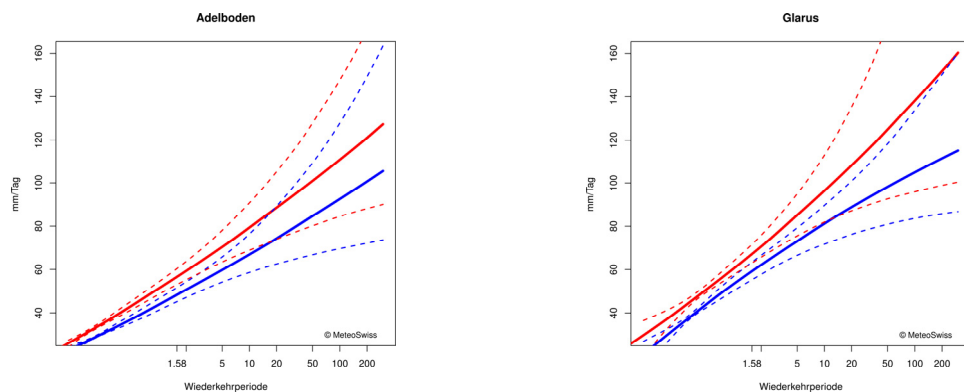


Abbildung 18: Pareto Diagramme des 24-Stunden (rot) und des 1-Tages (blau) Niederschlags an den Stationen Adelboden (links, Periode 1984-2011) und Glarus (rechts, Periode 1981-2011) mit Konfidenz-Intervallen (gestrichelt). Höchster gleitender 24-Stunden Niederschlag am 10.10.2011: Adelboden 63.9 mm, Glarus 51.3 mm.

Für die Stationen Glarus (Abbildung 18, rechts) und Altdorf (s. Anhang) unterscheiden sich die Wiederkehrwerte für den gleitenden 24-Stunden und den fixen 1-Tages Niederschlag zwischen 14% und 40% und die beste Schätzung des gleitenden 24-Stunden Niederschlags ist stets ausserhalb der Konfidenzintervalle des 1-Tages Niederschlags, also signifikant verschieden. In anderen Worten: wird der fixe 1-Tages Niederschlag anstatt des gleitenden 24-Stunden Niederschlags zur Schätzung der Wiederkehrwerte verwendet, werden die Wiederkehrwerte umso mehr unterschätzt je grösser die Wiederkehrperiode ist. Ausserdem ist die Unterschätzung signifikant und kann nicht auf eine unglückliche Stichprobe zurückgeführt werden. Die Einordnung der gleitenden 24-Stunden Niederschläge muss auf der Basis der historischen gleitenden 24-Stunden Niederschläge geschehen, weshalb sie nur mit Daten der automatischen Stationen bzw. der automatisch gemessenen Perioden möglich sind. Entsprechend kurz sind die verfügbaren Reihen. Dennoch zeigen die Resultate in Tabelle 7, dass die auch die Wiederkehrperioden der gleitenden 24-Stunden Niederschläge kein aussergewöhnliches Ereignis darstellen. Adelboden weist mit ca. 3 Jahren noch die grösste Wiederkehrperiode auf. Bei den anderen Standorten kommen die gleitenden 24-Stunden Niederschlagsmengen mehrmals pro Jahr vor.

Tabelle 7: Wiederkehrwerte in mm des gleitenden 24-Stunden Niederschlags. In Klammern: 0.025 und 0.975 Konfidenz-Intervalle. 24-Stunden Niederschlag am 10.10.2011: Adelboden: 63.9 mm, Montana: 41 mm, Altdorf: 39 mm, Glarus: 51.3 mm. Die Stationen Kandersteg, Blatten, Bisisthal, Braunwald können aufgrund fehlender automatischer Messungen nicht ausgewertet werden.

	Adelboden	Kandersteg	Montana	Blatten	Altdorf	Bisisthal	Glarus	Braunwald
2	59 (55,64)	-	64 (58,71)	-	68 (63,75)	-	71 (66,76)	-
5	71 (64,78)	-	80 (68,92)	-	84 (74,97)	-	85 (76,95)	-
10	79 (69,90)	-	92 (74,111)	-	98 (81,117)	-	96 (82,114)	-
20	88 (75,105)	-	105 (80,133)	-	112 (86,141)	-	108 (87,137)	-
30	94 (77,114)	-	113 (83,147)	-	120 (89,158)	-	116 (89,152)	-
50	101 (81,127)	-	123 (87,167)	-	132 (93,181)	-	125 (92,175)	-
100	111 (85,146)	-	138 (92,198)	-	148 (97,219)	-	138 (96,213)	-
300	121 (89,169)	-	153 (96,234)	-	165 (101,264)	-	152 (98,262)	-

2.3.3.e) Einfluss der Schneeschmelze

Die Extremwertanalysen sämtlicher ausgewerteter Stationen und Granularitäten (Kapitel 2.3.3.a) ergeben Wiederkehrperioden für den Niederschlag von maximal 10 Jahren. Die zum Teil 300 jährlichen Abflussspitzen einzelner Bäche und Flüsse können demnach durch die Niederschlagsmengen allein nicht erklärt werden. Aufgrund des Wetterablaufs ist es naheliegend, dass die Schneeschmelze während der Warmfront einen wesentlichen zusätzlichen Wassereintrag geliefert haben muss. Wie gross der Schmelzeintrag bei den einzelnen Stationen bzw. den entsprechenden Pegeln war wird in diesem Kapitel nicht diskutiert. Hierfür wird auf den Schlussbericht verwiesen. Anhand des Beispiels von Adelboden in Abbildung 19 ist jedoch gut ersichtlich, dass schon relativ kleine Mengen zu einer deutlichen Erhöhung der Wiederkehrwerte führen können. Eine Abschätzung auf Basis der gefallen Schneemengen und den darauf folgenden Schmelzprozessen lässt auf einen Schmelzeintrag in der Grössenordnung von 30 mm schliessen. Dadurch erhöht sich die Jährlichkeit des Ereignisses von rund 3 auf etwa 30 Jahre. In höher gelegenen Gebieten in denen mehr Schnee lag kann der Schmelzeintrag auch grösser sein. Schneehydrologische Analysen (Badoux et al. 2013) ergeben im Gebiet einen Schmelzeintrag von 30 bis 50 mm.

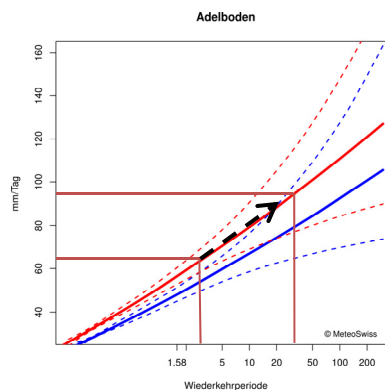


Abbildung 19: Pareto Diagramme des 24- Stunden (rot) und des 1- Tages (blau) Niederschlags an der Station Adelboden (Periode 1984-2011) mit Konfidenz-Intervallen (gestrichelt). Gleitender 24-Stunden Niederschlag. Der schwarze Pfeil zeigt eine Erhöhung der Wiederkehrperiode von 3 auf 30 Jahre durch zusätzlichen Schmelzeintrag von 30 mm.

In Abbildung 20 werden die beiden Fokusgebiete einander bezüglich der Auswirkung einer Erhöhung des Niederschlags durch zusätzlichen Schmelzeintrag anhand der beiden Stationen Adelboden und Glarus gegenübergestellt. Zusätzlich zu den gleitenden 24-Stunden Wiederkehrperioden (Adelboden ca. 3 Jahre, Glarus weniger als 1 Jahr) ist in Schwarz ist der Schmelzeintrag von 30 mm von Adelboden eingetragen. Dieser Schmelzeintrag führt, wie in Abbildung 19 diskutiert, bei Adelboden zu einer Erhöhung der Wiederkehrperiode auf ca. 30 Jahre während in Glarus lediglich ein knapp 10 jähriges Ereignis resultiert (steilere Wiederkehrkurve). Auch wenn es sich hier um ein konzeptuelles Beispiel handelt (Glarus hatte keinen Schnee vor der Warmfront), kann doch festgehalten werden, dass die gleiche Niederschlagssumme in Verbindung mit der gleichen Schneeschmelze in den beiden Fokusgebieten zu deutlich unterschiedlichen Auftretens-Häufigkeiten führen. Das Fokusgebiet 2 scheint also grundsätzlich robuster bezüglich grossen Niederschlagsmengen ausgelegt zu sein.

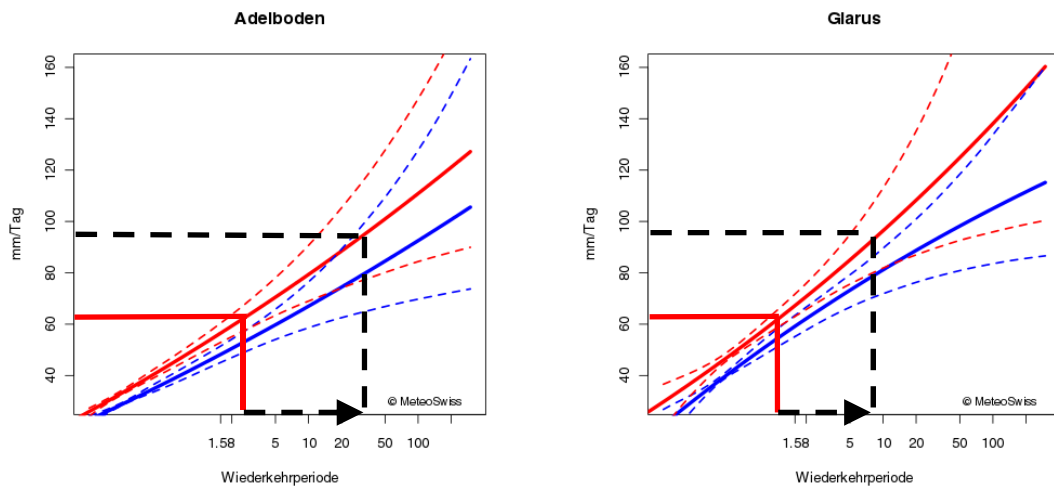


Abbildung 20: Pareto Diagramme des 24-Stunden (rot) und des 1-Tages (blau) Niederschlags an den Stationen Adelboden (links, Periode 1984-2011) und Glarus (rechts, Periode 1981-2011) mit Konfidenz-Intervallen (gestrichelt). Gleitender 24-Stunden Niederschlag. Schwarz gestrichelt die Auswirkungen eines zusätzlichen Schmelzeintrages von 30 mm auf die Wiederkehrperioden. Der Schmelzeintrag von 30 mm entspricht etwa der Grössenordnung für die Station Adelboden. In Glarus gab es während des Ereignisses selber keinen Schmelzeintrag (kein Schneefall vor Warmfront). Es handelt sich also zu einem gewissen Masse um eine konzeptionelle Überlegung.

3 Analyse der Modellvorhersage

Für die Beurteilung der Vorhersage und der Warnabläufe ist zentral, wie gut die Modelle den Niederschlag für das Ereignis vorhergesagt haben. Aufgrund der Bedeutung der Schmelzprozesse bei der Gesamtbetrachtung der Auswirkungen des Ereignisses wird zusätzlich zum Parameter Niederschlag auch die Vorhersage der Temperaturentwicklung anhand der Grösse Nullgradgrenze verifiziert. Vier von MeteoSchweiz für die Prognosen standardmässig verwendete Modelle werden mit den Gebietsniederschlägen in den Fokusgebieten verglichen. Es sind dies die drei Modelle der von MeteoSchweiz betriebenen COSMO-Modellgruppe sowie das IFS-Modell des europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersagen (EZMW). Zusätzlich wird die aus den Modellen abgeleitete manuelle Prognose von MeteoSchweiz dem Gebietsniederschlag gegenübergestellt. Für die Betrachtung der Nullgradgrenze werden COSMO7 und COSMO2 – Modellläufe verwendet.

- COSMO2: Alle 3 Stunden ein Modelllauf (00, 03, 06.... UTC) mit räumlicher Auflösung 2.2 km, zeitlicher Auflösung 1h, Vorhersagezeitraum +24h
- COSMO7: Alle 12 Stunden ein Modelllauf (00, 12 UTC) mit räumlicher Auflösung 6.6 km, zeitlicher Auflösung 1h, Vorhersagezeitraum +72h
- COSMO-LEPS: Alle 24 Stunden ein Modelllauf (12 UTC) mit räumlicher Auflösung 7.0 km, zeitlicher Auflösung 1h und Vorhersagezeitraum 132 h. Es handelt sich um ein probabilistisches Modell aus 16 Ensembles.
- IFS: Alle 12 Stunden ein Modelllauf (00, 12 UTC) mit räumlicher Auflösung 16 km, zeitlicher Auflösung 3h, Vorhersagezeitraum 240h.

3.1 Nullgradgrenze

Methode

Das dichte Netz der Temperaturmessungen an WSL-SLF IMIS- und MeteoSchweiz- Stationen erlaubt die Bestimmung der Nullgradgrenze am Boden in hoher zeitlicher (30 Minuten) und räumlicher Auflösung (für grössere Alpentäler). Mit Hilfe linearer Regression kann so sowohl die Nullgradgrenze, wie auch deren Unsicherheit geschätzt werden. Für die Bestimmung wurden im Fokusgebiet 1 für das Kandertal die Messwerte von 19 Stationen zwischen 1320 und 3580 m ü.M. und für das Lötschental 13 Stationen zwischen 1427 und 3580 m ü.M. verwendet. Im Fokusgebiet 2 wurde eine gemeinsame Nullgradgrenze für das Glarnerland und Schächental mit Hilfe von 15 Stationen zwischen 958 und 3187 m ü.M. bestimmt. Die Unsicherheit der Schätzung ist in den Figuren jeweils mit dem 95% Konfidenzintervall als Band dargestellt. Die Schätzung ist speziell dann unsicher, wenn die Temperatur nicht strikt linear mit der Höhe abnimmt, die Werte der Stationen stark streuen oder die Nullgradgrenze ausserhalb der von den Stationen abgedeckten Höhe liegt.

Vergleich mit dem prognostizierten Verlauf der Modelle COSMO-2 und COSMO-7

Für die Beurteilung der Warnabläufe ist wichtig, wie gut die Modelle die Nullgradgrenze für das Ereignis vorhergesagt haben. Abbildung 21 und Abbildung 22 zeigen den Verlauf der von den numerischen Wettervorhersagen-Modellen von MeteoSchweiz COSMO-2 und COSMO-7 prognostizierten Nullgradgrenze an einer Station nahe des Zielgebietes zusammen mit der aus den

Messstationen bestimmten Nullgradgrenze über den Zeitraum vom 5.-11. Oktober 2011. Im Allgemeinen liefern beide Modelle Resultate, die gut mit den Beobachtungen übereinstimmen. Vor allem der Kaltflutteinbruch in der Nacht vom 6. auf den 7. Oktober wird für beide Gebiete recht genau vorhergesagt und zwar sowohl was den Zeitpunkt wie auch die Amplitude angeht. Das Plateau am 7.-9. Oktober wird ebenfalls sehr gut getroffen, wobei die Werte für das Kandertal 200-300 m höher sind als in der Schätzung der Messungen. Im Glarnerland/Schächental liegt die Nullgradgrenze des Modells einige 100 m tiefer als in der Schätzung der Messungen. Der Anstieg der Nullgradgrenze beim Eintreffen der Warmfront in der Nacht vom 9. auf den 10. Oktober wird von COSMO-7 schon in den Läufen vom 7. Oktober (also 2-3 Tage vor dem Ereignis) gut wiedergegeben.

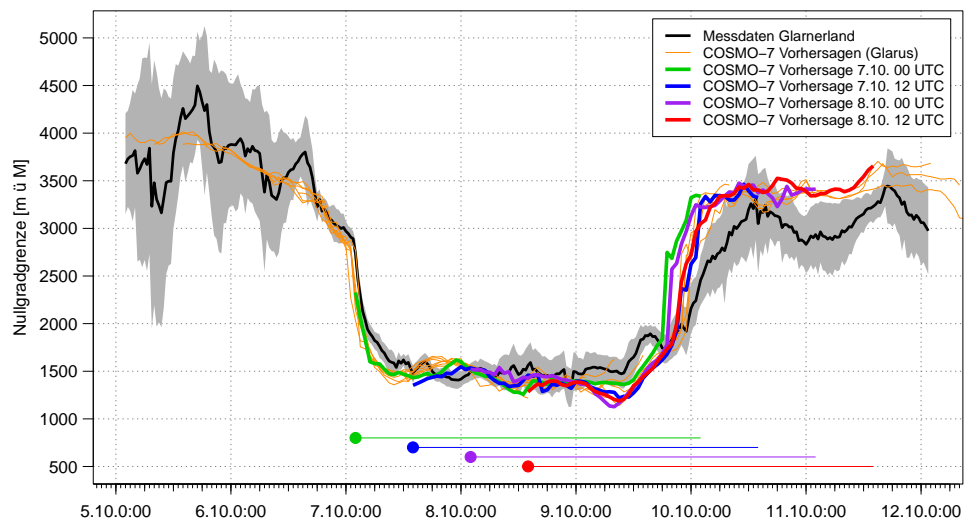
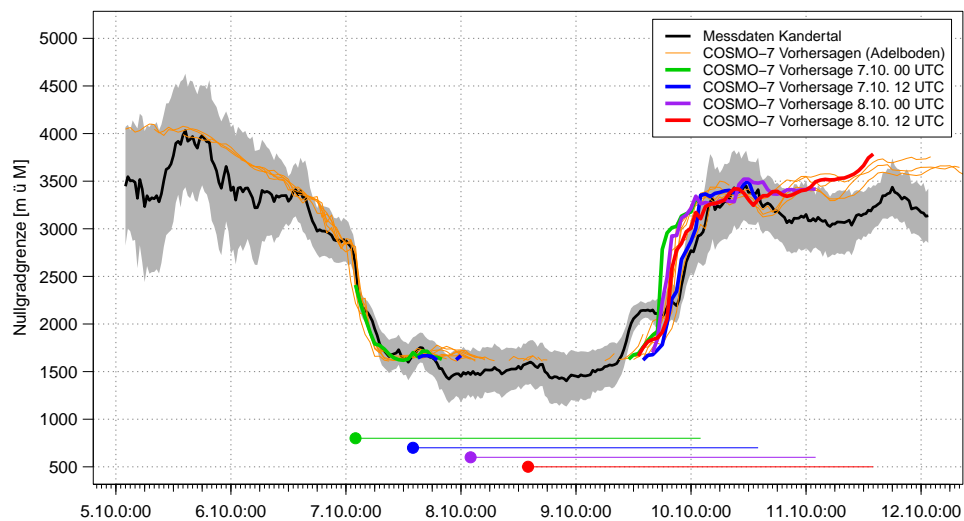


Abbildung 21: Verlauf Nullgradgrenze geschätzt aus den Messdaten (schwarze Linie, Unsicherheit grau) und COSMO-7 72 Stunden Vorhersagen (bunte Linien) vom 5. Oktober -11. Oktober 2011 für die Regionen Kandertal bzw. Station Adelboden (oben) und Glarnerland bzw. Station Glarus (unten). Die vier Vorhersagen vom 7.10. 00 UTC, 7.10. 12 UTC, 8.10. 00 UTC und 8.10. 12 UTC sind farblich hervorgehoben. Die Zeitachse zeigt mitteleuropäische Sommerzeit (MESZ).

Die Amplitude wird sehr gut vorhergesagt, allerdings in allen Gebieten etwas abrupter und vor allem auf der Alpennordseite einige Stunden früher als beobachtet. Auch in COSMO-2 war der abrupte Anstieg der Nullgradgrenze schon in den Läufen der Nacht vom 8. zum 9. Oktober prognostiziert. Am 11. Oktober ist die Nullgradgrenze in den Modellen für beide Gebiete rund 500 m höher als aus den Beobachtungen bestimmt.

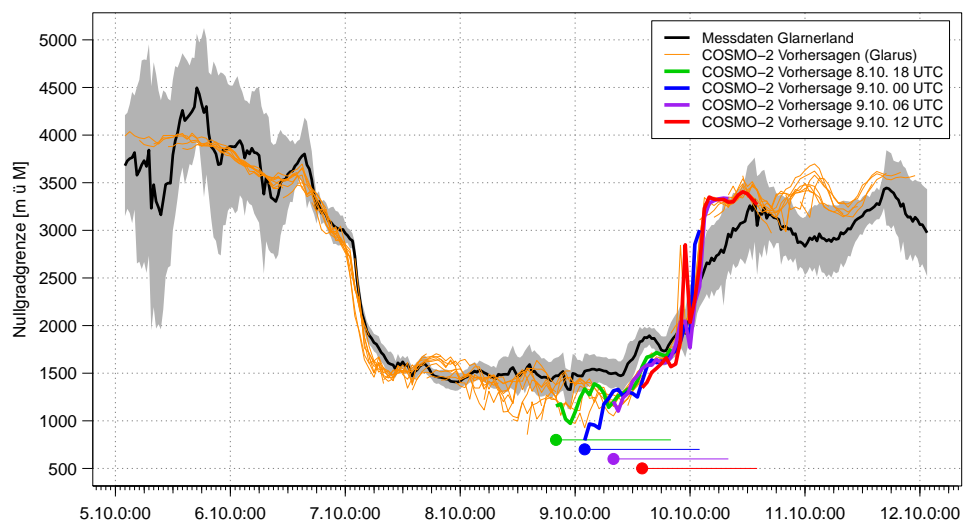
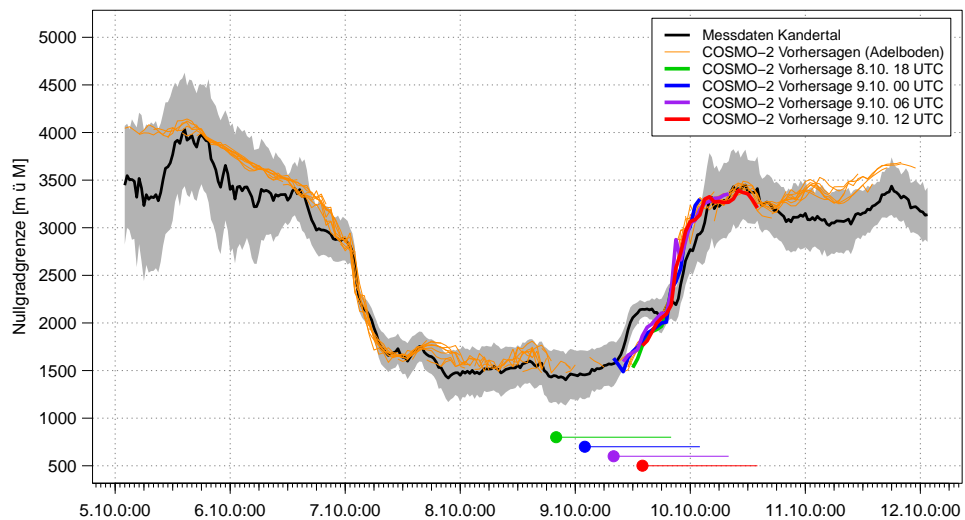


Abbildung 22: Wie Fig. 3, aber für COSMO-2 24 Stunden Vorhersagen (bunte Linien). Die vier Vorhersagen vom 8.10. 18 UTC, 9.10. 00 UTC, 9.10. 06 UTC und 9.10. 12 UTC sind farblich hervorgehoben.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Verläufe der Nullgradgrenze vom 5. bis 11. Oktober 2011 für das Kander-, Lötschen-, Schächental und Glarnerland sehr genau prognostiziert werden. Für die verschiedenen Täler treten gewisse zeitliche Detailunterschiede auf. Die Nullgradgrenzenprognose der Modelle COSMO-7 und COSMO-2 waren schon 72 bzw. 24 Stunden vor dem Ereignis sehr gut.

3.2 Niederschlag

Methode

Wie bei der Betrachtung der Nullgradgrenze liegt der Fokus des Vergleichs der Modellvorhersagen mit den Messungen am Boden auf der Warmfront vom 10.10.2011.

Analysiert wird der Gesamtniederschlag der Warmfront und nicht der Verlauf der Summen der einzelnen Stundenwerte. Für die detaillierte Niederschlagsanalyse wurden jeweils die Modell-Gitterpunkte der zwei Fokusgebiete bzw. deren Teilgebiete bestimmt. Je nach Grösse der Einzugsgebiete sind es bei COSMO-2 im Kandertal 35, im Lötschental 54, im Schächental 32 und im Glarnerland 58 Gitterpunkte, siehe Abbildung 23.

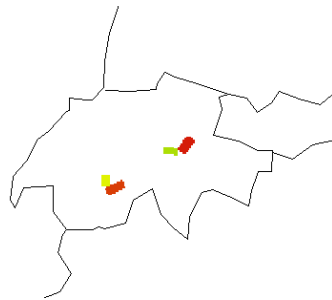


Abbildung 23: COSMO-2-Gitterpunkte der zwei Fokusgebiete mit den Teilregionen (Kandertal, Lötschental, Schächental, Glarnerland).

Bei COSMO-7 und COSMO-LEPS reduziert sich die Anzahl der Gitterpunkte im Kandertal auf 4, im Lötschental- und Glarnerland auf je 6 und im Schächental auf 3 Gitterpunkte. Bei IFS (globales Modell des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersagen) kann bei allen Fokusgebieten jeweils nur noch ein Gitterpunkt verwendet werden.

Für die Vergleiche der Modellläufe mit den Messdaten wurde jeweils das Mittel der Gitterpunktwerte bestimmt. Die zeitliche Auflösung beträgt grundsätzlich eine Stunde, einzig bei IFS sind es 3 Stunden. COSMO-2 wird alle 3 Stunden, COSMO-7 und IFS alle 12 Stunden und COSMO-LEPS (Mittel von 16 Varianten) alle 24 Stunden neu gerechnet und dargestellt. Verglichen werden die einzelnen Modellvorhersagen mit dem Mittel der Niederschlagssummen der Warmfront gemessen an den verschiedenen Messstationen in den Fokusgebieten und/oder in deren näheren Umgebung. Dabei wurden vor allem IMIS-SLF-Stationen aber auch SwissMetNet Stationen verwendet. Für das Fokusgebiet Lötschental wurde zusätzlich die Tageswert-Station Blatten miteinbezogen. Eine weitere Möglichkeit wäre anstatt der Stationswerte die täglichen Niederschlagsgitter zeitlich mit Radarinformationen zu disaggregieren und dann als Gebietsmittel zu verwenden. Die zeitliche Disaggregation ist notwendig, da das Ereignis über den für Gitterdaten gerechneten Niederschlagstag 06:00 bis 06:00 UTC hinausgeht. Diese Methode würde aber einerseits lückenlose Radarinformationen für die Disaggregation benötigen (Ausfall La Dole) und ist andererseits zeitlich aufwändig. Die Verwendung der ersten Methode (Stationsdaten) wird durch einen exemplarischen Vergleich legitimiert. Der Vergleich der stündlichen Niederschläge am FEWS Pegel Hondrich (Kander) einerseits basierend auf einem Mittel der vorhandenen Stationswerte und andererseits auf dem Gebietsniederschlag gerechnet aus den hochaufgelöste Rhiresd0 Gitterdaten sowie einer

zeitlichen Disaggregation auf Basis des Niederschlagverlaufes an der Station Adelboden zeigt eine gute Übereinstimmung des Niederschlagverlaufes (Abbildung 24) und ergab für die Niederschlagssumme der Warmfront lediglich einen Unterschied von rund 3 mm (Stationsmittel 69.6 mm / Gitterdaten 66.0 mm). Die Niederschläge dürften also, wie für eine Warmfront typisch, zumindest über grosse Gebiete relativ gleichförmig gefallen sein (vergl. auch Messwerte in Tabelle 2). Aufgrund dieses Vergleiches wurden für die übrigen Gebiete die Vergleiche der Modellvorhersagen mit den Stationsmitteln gemacht. Generell ist hier noch festzuhalten, dass während der Periode mit tiefer Schneefallgrenze (Stauphase) nur die automatischen SMN-Stationen und die manuelle Station Blatten verwendet werden können, da die IMIS-WSL-SLF-Stationen nicht beheizt sind.

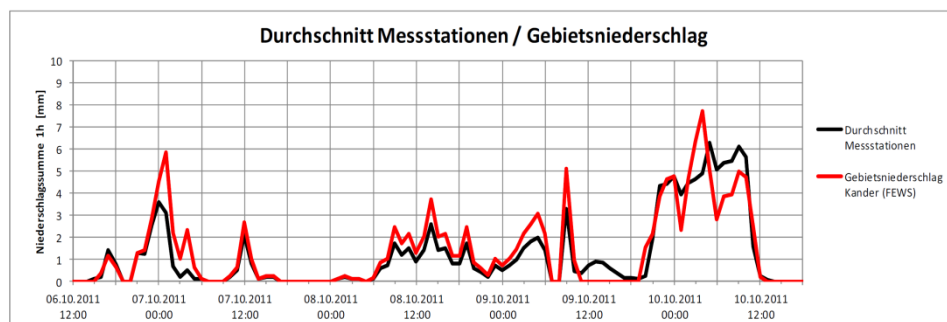


Abbildung 24: Vergleich des stündlichen Gebietsniederschlags gerechnet aus den Stationen Elsig, Fisi, Ottere (SLF, IMIS) und Adelboden (MeteoSchweiz) im Einzugsgebiet (schwarz) mit dem Mittel aus den gegitterten hochaufgelösten rhiresd0 Niederschlagsdaten am Pegel FEWS Hondrich (Flood Early Warning System). Da die Gitterdaten nur in täglicher Auflösung vorliegen, musste eine zeitliche Disaggregation anhand des Niederschlagverlaufes am Standort Adelboden vorgenommen werden.

3.2.1 Kandertal

Die Kander am FEWS Pegel Hondrich bildet ein Schwerpunkt bei der Betrachtung der hydrologischen Modelle (Badoux et al. 2013). Aus diesem Grund werden hier für das Gebiet Kandertal die Modellläufe aller zur Verfügung stehenden Modellen gezeigt. Die Auswertungen der anderen Teilgebiete befinden sich im Anhang. Abbildung 25 zeigt den Verlauf des stündlichen Gebietsniederschlags berechnet aus den verfügbaren Stationen aus dem Messnetz MeteoSchweiz und des SLF. In Tabelle 8 werden die in den einzelnen Modellläufen der vier analysierten Modelle (COSMO7, COSMO2, COSMO-LEPS, IFS) vorhergesagten Niederschlagsmengen für das Kandertal dargestellt und mit dem Gebietsniederschlag verglichen. Der Niederschlag wurde insgesamt, von COSMO-LEPS, IFS und der manuellen Prognose zum Teil deutlich, unterschätzt.

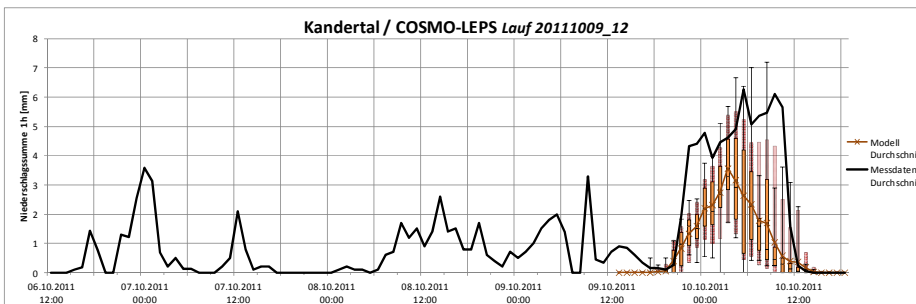
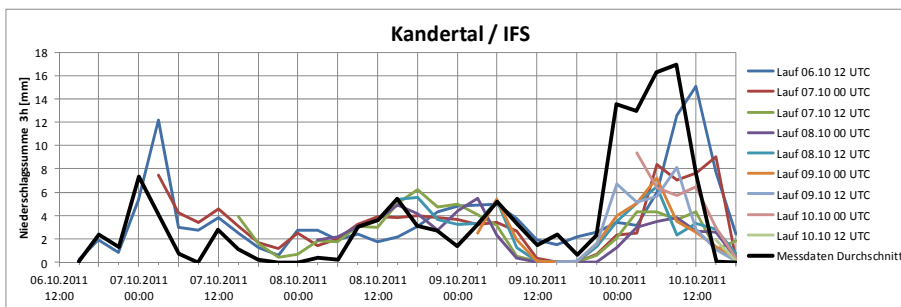
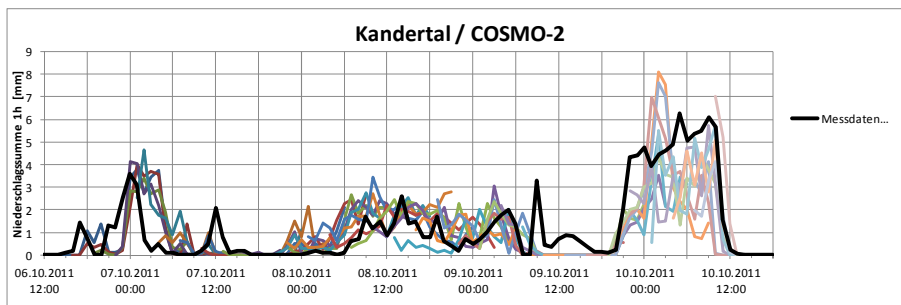
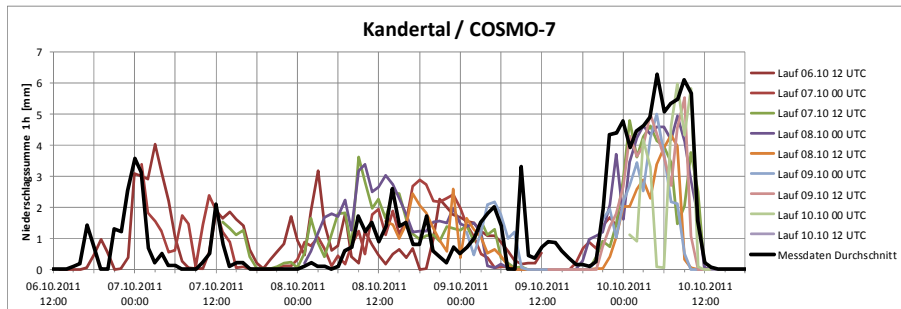


Abbildung 25: Vorhergesagte Niederschlagsmengen für die Periode 6.10 bis 10.10.2011 im Vergleich zu den Messdaten (Stationsmittel) für die deterministischen Modelle COSMO7, COSMO2 und IFS. Für das probabilistische Modell COSMO-LEPS wird der letzte Lauf vor dem Ereignis gezeigt. Die einzelnen Läufe von COSMO2 lassen sich aufgrund ihrer grossen Anzahl nicht im Detail aufschlüsseln.

Tabelle 8: Vorhergesagte Niederschlagsmenge in mm im Gebiet Kandertal für die Ereignisphase Warmfront vom 9.-10.10.2011 im Vergleich zum Gebietsniederschlag von 69.6 mm (Abweichung in Klammer). Gebietsniederschlag als Mittel aus den Stationen Elsig 2140 m ü.M., Fisi 2160 m ü.M., Ottere 2020 m ü.M. und Adelboden 1320 m ü.M. Für COSMO-LEPS wird das Minimum, der Median und das Maximum der einzelnen Members angegeben. Das Mittel der manuellen Prognose (Prognostiker) ist bestimmt aus den Vorhersagen 8. und 9.10.

Modellauf	COSMO7	COSMO2	IFS	COSMO-LEPS	Prognostiker
Lauf 06.10 12 UTC			55.1 (-14.6)	0.5/11.4/57.2	
Lauf 07.10 00 UTC			37.9 (-31.7)		
Lauf 07.10 12 UTC			22.3 (-47.3)	3.2/17.7/48.1	
Lauf 08.10 00 UTC	54.6 (-15.0)		17.2 (-52.4)		
Lauf 08.10 12 UTC	29.2 (-40.4)		25.6 (-44.0)	5.4/25.5/53.0	
Lauf 09.10 00 UTC	33.5 (-36.1)		25.7 (-43.9)		
Lauf 09.10 12 UTC	45.4 (-24.2)	46.7 (-22.9)	31.4 (-38.3)	12.4/27.8/57.6	
Lauf 09.10 15 UTC		44.4 (-25.2)			
Lauf 09.10 18 UTC		44.1 (-25.5)			
Mittel der Modellläufe	40.7 (-29.0)	45.1 (-24.5)	30.7 (-38.9)	5.4/20.6/54.0	28.0 (-41.6)

3.2.2 Löttschental

In Tabelle 9 werden die in den einzelnen Modellläufen vorhergesagten Niederschlagsmengen für das Löttschental der vier analysierten Modelle (COSMO7, COSMO2, COSMO-LEPS, IFS) dargestellt und mit dem Gebietsniederschlag verglichen. Der Niederschlag wurde insgesamt, von COSMO-LEPS, IFS und der manuellen Prognose zum Teil deutlich, unterschätzt. Die mit Abstand besten Werte liefert COSMO2, welches den Niederschlag praktisch erfasst hat.

Tabelle 9: Vorhergesagte Niederschlagsmenge in mm im Gebiet Löttschental für die Ereignisphase Warmfront vom 9.-10.10.2011 im Vergleich zum Gebietsniederschlag von 62.9 mm (Abweichung in Klammer). Gebietsniederschlag als Mittel aus den Stationen Blatten 1535 m ü.M., Belalp 2556 m ü.M., Mund 2210 m ü.M., Fisi 2160 m ü.M., Trubelboden 2480 m ü.M. Für COSMO-LEPS wird das Minimum, der Median und das Maximum der einzelnen Members angegeben. Das Mittel der manuellen Prognose (Prognostiker) ist bestimmt aus den Vorhersagen 8. und 9.10 und gilt für das Goms (keine Prognose Löttschental).

Modellauf	COSMO7	COSMO2	IFS	COSMO-LEPS	Prognostiker
Lauf 06.10 12 UTC			31.3 (-31.6)	5.7/19.9/80.9	
Lauf 07.10 00 UTC			24.5 (-38.3)		
Lauf 07.10 12 UTC			25.0 (-37.9)	14.3/27.0/38.4	
Lauf 08.10 00 UTC	46.7 (-16.2)		21.2 (-41.7)		
Lauf 08.10 12 UTC	28.1 (-34.8)		28.2 (-34.6)	16.1/28.5/42.4	
Lauf 09.10 00 UTC	35.6 (-27.2)		29.1 (-33.8)		
Lauf 09.10 12 UTC	40.1 (-22.8)	54.3 (-8.5)	28.5 (-34.4)	24.0/30.4/46.5	
Lauf 09.10 15 UTC		55.6 (-7.2)			
Lauf 09.10 18 UTC		62.1 (-0.7)			
Mittel der Modellläufe	37.6 (-25.2)	57.4 (-5.5)	26.8 (-36.0)	15.0/26.5/52.1	23.2 (-39.7)

3.2.3 Schächental

In Tabelle 10 werden die in den einzelnen Modellläufen vorhergesagten Niederschlagsmengen für das Schächental der vier analysierten Modelle mit dem Gebietsniederschlag verglichen. Der Niederschlag wurde insgesamt, von COSMO-LEPS, IFS und der manuellen Prognose deutlicher, unterschätzt.

Tabelle 10: Vorhergesagte Niederschlagsmenge in mm im Gebiet Schächental für die Ereignisphase Warmfront vom 9.-10.10.2011 im Vergleich zum Gebietsniederschlag von 61.5 mm (Abweichung in Klammer). Gebietsniederschlag als Mittel aus den Stationen Altdorf 438 m ü.M., Schächental 2030 m ü.M., Muotathal 2083 m ü.M. Für COSMO-LEPS wird das Minimum, der Median und das Maximum der einzelnen Members angegeben. Das Mittel der manuellen Prognose (Prognostiker) ist bestimmt aus den Vorhersagen 8. und 9.10.

Modelllauf	COSMO7	COSMO2	IFS	COSMO-LEPS	Prognostiker
Lauf 06.10 12 UTC			48.5 (-13.0)	1.0/21.6/103.8	
Lauf 07.10 00 UTC			32.9 (-28.7)		
Lauf 07.10 12 UTC			26.4 (-35.1)	4.8/30.9/62.6	
Lauf 08.10 00 UTC	60.7 (-0.8)		18.4 (-43.1)		
Lauf 08.10 12 UTC	41.3 (-20.3)		26.8 (-34.7)	8.5/29.6/68.2	
Lauf 09.10 00 UTC	40.8 (-20.7)		37.7 (-23.9)		
Lauf 09.10 12 UTC	41.6 (-19.9)	34.8 (-26.7)	31.3 (-30.2)	16.7/41.1/53.8	
Lauf 09.10 15 UTC		37.1 (-24.4)			
Lauf 09.10 18 UTC		41.9 (-19.7)			
Mittel der Modellläufe	46.1 (-15.4)	37.9 (-23.6)	31.7 (-29.8)	7.8/30.8/72.1	31.5 (-30.0)

3.2.4 Glarnerland

In Tabelle 11 werden die in den einzelnen Modellläufen vorhergesagten Niederschlagsmengen für das Gebiet Glarnerland der vier analysierten Modelle mit dem Gebietsniederschlag verglichen. Der Niederschlag wurde insgesamt, von COSMO-LEPS, IFS und der manuellen Prognose zum Teil deutlich, unterschätzt.

Tabelle 11: Vorhergesagte Niederschlagsmenge in mm im Gebiet Glarnerland für die Ereignisphase Warmfront vom 9.-10.10.2011 im Vergleich zum Gebietsniederschlag von 59.2 mm (Abweichung in Klammer). Gebietsniederschlag als Mittel aus den Stationen Guppen/Glärnisch 1630 m ü.M., Muttsee 2474 m ü.M., Elm 2050 m ü.M., Elm 958 m ü.M., Glarus 517 m ü.M. Für COSMO-LEPS wird das Minimum, der Median und das Maximum der einzelnen Members angegeben. Das Mittel der manuellen Prognose (Prognostiker) stammt aus den Vorhersagen 8. und 9.10.

Modelllauf	COSMO7	COSMO2	IFS	COSMO-LEPS	Prognostiker
Lauf 06.10 12 UTC			37.3 (-21.9)	2.1/28.4/90.5	
Lauf 07.10 00 UTC			32.2 (-27.0)		
Lauf 07.10 12 UTC			24.6 (-34.6)	6.1/29.6/64.7	
Lauf 08.10 00 UTC	47.9 (-11.3)		21.7 (-37.5)		
Lauf 08.10 12 UTC	40.8 (-18.4)		27.8 (-31.4)	10.8/27.9/55.6	
Lauf 09.10 00 UTC	33.1 (-26.1)		40.8 (-18.4)		
Lauf 09.10 12 UTC	43.0 (-16.2)	43.0 (-16.2)	29.5 (-29.7)	17.0/33.3/46.7	
Lauf 09.10 15 UTC		47.6 (-11.6)			
Lauf 09.10 18 UTC		55.9 (-3.3)			
Mittel der Modellläufe	41.2 (-18.0)	48.8 (-10.4)	29.7 (-29.6)	9.0/29.8/64.4	32.0 (-27.2)

3.3 Zusammenfassung der Modellvorhersagen

Die Zusammenfassung der Vergleiche der Modelle mit den Messungen fokussiert auf die Warmfrontphase. Generell lässt sich festhalten, dass alle Modelle die Niederschläge der Warmfront unterschätzt haben.

Die COSMO-2-Modellläufe simulierten das Hauptereignis in beiden Fokusgebieten bzw. deren Teilgebieten im Vergleich mit den anderen Modellen – ausser im Schächental - am besten.

An zweiter Stelle folgt in der Gesamtbeurteilung COSMO-7, das aber - ausser im Schächental – gegenüber COSMO-2 - die Niederschlagsmengen tendenziell etwas mehr unterschätzte.

Vergleichsweise schlecht schneiden die Modelle IFS und COSMO-LEPS ab. Beide unterschätzten die Niederschläge der Warmfront in allen Fokusgebieten recht deutlich. Dabei sind die negativen Abweichungen in den Regionen Kandertal und Lötschental am Grössten.

Dieses Gesamtergebnis bedeutet nicht, dass COSMO-2 und COSMO-7 grundsätzlich immer bessere Niederschlagssimulationen liefern als IFS und COSMO-LEPS. Es gibt auch Wetterlagen, wo das Gegenteil der Fall sein kann. Deshalb ist es nach wie vor nötig bei der Prognose und der Herausgabe von Warnungen, eine situative Einschätzung der Qualität der Simulationsergebnisse vorzunehmen.

Die räumlich und zeitlich weniger hochaufgelöste manuelle tägliche Prognose von MeteoSchweiz liegt für die Einschätzung der Warmfront im Bereich von IFS bzw. COSMO-LEPS und unterschätzte die Warmfront ebenfalls zum Teil deutlich. Anzumerken ist, dass Warmfrontlagen häufiger zu Fehleinschätzungen führen als andere Wetterlagen. In diesem Fall kam noch erschwerend hinzu, dass es sich um eine Luftmasse handelte, die ursprünglich aus dem tropischen Bereich stammte. Eine solche Luftmasse – in Verbindung mit einem ehemaligen tropischen Wirbelsturm – hat in unseren Breiten tendenziell das Potential zu grösseren Fehleinschätzungen und zwar sowohl bei der Simulation der Modelle, als auch bei der Einschätzung der Entwicklung. Abschliessend ist festzuhalten, dass dem Meteorologen zurzeit nur wenige objektive statistische Hilfestellungen zur Modelleinschätzung zur Verfügung stehen. Die Einschätzung erfolgt daher überwiegend qualitativ.

4 Vorhersagen / Warnungen aus meteorologischer Sicht

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass das Gesamtereignis vom 6.10. bis 10.10.2011 als Ganzes gut erfasst wurde. Sowohl die Wetterwarnung (Abbildung 26) als auch die gleichzeitige ausgegebene Schneefrühwarnung (Abbildung 27) haben das Ereignis über die drei bis vier Tage entsprechend vorhergesagt. Ein offensichtlicher Fehler war, dass das Lötschental nicht gewarnt wurde. Die Niederschläge sind in der Realität zum Teil etwas grösser ausgefallen, liegen aber als 87-Stundensumme von 90 bis 140 mm im Bereich der Schwellen für eine Stufe 3 Warnung, wie sie mit den Kantonen vereinbart sind. Auch war die Wahrscheinlichkeit für Neuschneesummen über 3 Tage von mehr als 100 cm lokal etwas grösser.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement des Innern EDI

Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz

WETTERWARNUNG des Bundes der Stufe 3

Betroffene Regionen:	Adelboden-Kandersteg, Altstätten-Alpstein, Amden-Flums, Appenzell-Urnäsch, Brienz-Interlaken, Brigels, Buchs SG, Dallenwil-Sisikon, Davos-Silvretta, Domleschg, Einsiedeln-Steinen, Erstfeld-Engelberg, Flims, Frutigen-Kiental, Glarus Nord-Mitte, Glarus Süd, Gstaad, Haslital, Klosters, Landquart, Liechtenstein, Luzern-Alpnach, Meiringen-Gadmertal, Muotathal, Obersimmental, Obertoggenburg, Pizol, Sarnen, Schächen-Maderanertal, Schanfigg, Schiers, Schrattenflue, Sernftal, Spiez-Sigriswil, Tavetsch, Unteriberg-Wägital, Urner Oberland, Urserental, Wengen-Grindelwald
Warnereignis:	Intensiver Dauerregen mit mehr als 100 mm Am Donnerstag Abend und in der Nacht auf Freitag erfasst eine Kaltfront die Schweiz. In der Folge stellt sich am Alpennordhang mit stürmischen nördlichen Höhenwinden eine Staulage ein. Dabei fällt zum Teil anhaltender Niederschlag. Im Laufe des Sonntags erreicht eine Warmfront die Schweiz und bringt weiter Niederschläge. Die Schneefallgrenze sinkt in der Nacht auf Freitag von 2600 m rasch auf etwa 1000 m ab. Im Laufe des Sonntags steigt sie dann mit der Warmfront wieder über 2000 Meter an. Die erwarteten Niederschlagsmengen zwischen Donnerstagabend und Montagmittag liegen am zentralen und östlichen Alpennordhang zwischen 80 und 120 mm, in den übrigen gewarnten Gebieten zwischen 70 und 100mm.
Ausgabezeit:	Donnerstag, 06.10.2011 10:59 Uhr
gültig von:	Donnerstag, 06.10.2011 21:00 Uhr
bis:	Montag, 10.10.2011 12:00 Uhr
Bulletin Nr.:	1
Nächstes Bulletin:	Montag, 10.10.11 12:00 Uhr
Ausgabestelle:	Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, MeteoSchweiz / Zürich

Weitere Informationen zum Warnereignis sind im Unwetterbulletin auf unserer Internetseite oder auf der ELD der NAZ zu finden.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement des Innern EDI
Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz

Schneefrühwarnung

Gültig von Freitag 07.10.2011 um 7 Uhr bis Montag 10.10.2011 um 7 Uhr

Hinweise: Von Freitag bis Montag stellt sich eine Nordwestlage im Alpenraum ein. Zwischen dem Azorenhoch über dem Atlantik und dem Tief mit Zentrum über Skandinavien wird durch eine kräftige Strömung aus Nordwesten schubweise feuchte und kalte Polarluft gegen den Alpenordhang gestaut. Besonders exponiert sind die Zentral- und Ostschweizer Alpen. In der Nacht auf Freitag überquert eine erste Kaltfront die Alpen. Die Schneefallgrenze sinkt dabei auf knapp 1000 Meter ab. Die nächste und intensivere Niederschlagswelle folgt zwischen Samstagabend und in der Nacht zum Montag. Dabei steigt die Schneefallgrenze wieder über 2500 Meter an.

Zürich, Donnerstag 06.10.2011

LEGENDE:

Wahrscheinlichkeit für Neuschneesumme über 3 Tage von mehr als 100 cm

0%-10%: unwahrscheinlich
10%-40%: wenig wahrscheinlich
40%-70%: eher wahrscheinlich
70%-100%: sehr wahrscheinlich

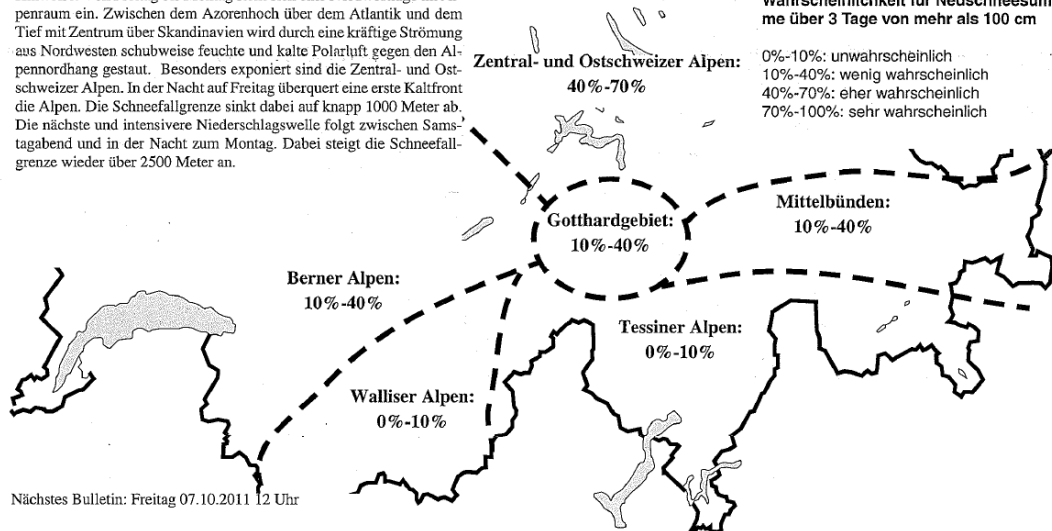


Abbildung 27: Schneefrühwarnung von MeteoSchweiz vom 6.10.2011 10:59 Uhr.

Während dem Ereignis wurde die meteorologische Entwicklung laufend überwacht. Die Erkenntnisse wurden täglich im Unwetterbulletin festgehalten und bilateral mit dem BAFU ausgetauscht. Dabei wurde die sich nähernde Warmfront am Sonntagmittag - auf Grund von IFS und COSMO-LEPS - eher weniger stark eingeschätzt als nach COSMO-2 und COSMO-7: letztere hatten nämlich die vorangehenden Front- und Stauniederschläge teilweise überschätzt.

Die am Donnerstag ausgegebene Warnung (Abbildung 26) war bis am Montag 10.10 um 12 Uhr aktiv. Am Sonntag wurde die Wetterwarnung der Stufe 3 nicht erneuert oder aktualisiert, denn zwischen der MeteoSchweiz und den Kantonen gilt die Übereinkunft, dass bei dieser Stufe auf Wiederholungen verzichtet wird, sofern sich keine erheblichen Änderungen ergeben. Rückblickend betrachtet wäre aber auch bei einer anderen (höheren) Einschätzung der Modelle am Sonntag - aus rein meteorologischer Sicht - eine Heraufstufung auf Stufe 4 oder 5 nicht angezeigt gewesen. Auch die effektiv gemessenen Gebietsniederschläge bestätigen diese Schlussfolgerung. Hingegen hätte im Unwetterbulletin klarer auf die sich anbahnende Verschärfung in der Nacht auf Montag hingewiesen werden können. In Zukunft ist in einer solchen oder ähnlichen Lage der gemeinsamen Betrachtung von Meteorologie und Hydrologie, hier insbesondere Schneehydrologie, noch mehr Beachtung zu schenken.

5 Historische Analogfälle

Beim Hochwasserereignis vom Oktober 2011 mit Schwerpunkt im Kander- und Lötschental handelte es sich um eine Kombination von schnellem Abschmelzen grosser Schneemassen in Verbindung mit Dauerregen. Die Folge waren schadenbringende z.T. 100-jährliche Hochwasser u.a. in der Kander. Von der Art her ähnelt das Ereignis einer sogenannten Tauflut. Klassische Taufluten sind ein vor allem im Winter und Frühling für das Alpenvorland bekanntes Phänomen. Sie treten in unregelmässigen Zeitabständen zum Beispiel in den Einzugsgebieten grosser mitteleuropäischer Flüsse wie z.B. der Donau (s. Hartmann, 1914) oder dem Rhein-Main Gebiet (Haeuser, 1926) mit zum Teil verheerenden Schäden auf. Im Schweizer Mittelland ist das Phänomen auch bekannt, allerdings sind in der Vergangenheit laut Schadensstatistiken nur rund 1% der Hochwasserschadenskosten der Schweiz mit Beteiligung von Schneeschmelze verursacht worden (Hifiker et al, 2009). Im Alpenraum sind Taufluten bisher kaum bekannt und noch nie genauer beschrieben worden. Da der Begriff Tauflut nicht genau dem Ereignistyp vom Oktober 2011 entspricht, wird er für das Ereignis nicht verwendet.

Mit Hilfe von zwei Ansätzen wird versucht, eine klimatologische Einordnung des aussergewöhnlichen Ereignisses vom Oktober 2011 vorzunehmen um dessen Ausserordentlichkeit besser einschätzen zu können. Erstens wird mit einer objektiven Suche in den Messdaten an MeteoSchweiz Stationen nach ähnlichen Situationen betreffend Schneesverhältnissen, Dauerregen und schneller Schneeschmelze gesucht. Da die Auslösemechanismen für ein solches Ereignis komplex sind und mehrere hydrometeorologische Prozesse zusammenwirken, können an Stationen mit längeren Messreihen nur nach „so etwas wie“ notwendigen hydrometeorologischen Bedingungen für grösseres, schnelles Schneeschmelzen im Zusammenhang mit Dauerregen gesucht werden, die aber unter Umständen nicht hinreichend für ein Hochwasser sind, da weitere, Faktoren, wie z. B. der Bodenzustand (u.a. die Bodensättigung), nicht berücksichtigt werden konnten. Zu beachten ist auch, dass die Suche auf Ereignisse nach dem Schema Oktober 2011 (schnelle, hochreichende Schneeschmelze) ausgerichtet ist und unter Umständen langsamer ablaufende oder ganz anders „gelagerte“ Ereignisse nicht gefunden werden. Um ein genaueres Bild über das räumliche Auftreten von Ereignissen des Typs Oktober 2011 zu bekommen, werden die Analysen nicht nur im Schadensgebiet, sondern für Stationen verschiedener Naturräume und Höhenlagen der Schweiz (Alpen, Voralpen, Mittelland und Jura) gemacht. Abflussganglinien zur Verifikation stammen aus dem hydrologischen Jahrbuch der Schweiz des Bundesamts für Umwelt (BAFU).

Mit objektiven Messdaten kann allerdings nur rund 50 bis 80 Jahre in die Vergangenheit geschaut werden. Um weiter in die Vergangenheit zu sehen, wird zusätzlich zur objektiven Methode in Dokumenten nach Schadensereignissen, die im Zusammenhang mit Schneeschmelze und Dauerregen stehen, gesucht. Hierfür wird auf die Chronik der Unwetterschäden in der Schweiz (Röthlisberger, 1991), die Unwetterschadensberichte des WSL (publiziert in der Zeitschrift Wasser, Energie, Luft) sowie die Aufzeichnungen der Witterungsberichte und der Annalen der MeteoSchweiz zurückgegriffen.

5.1 Daten und Methoden

5.1.1 Methodik und Limitierungen

Mittels eines explorativen Verfahrens werden Kombinationen von Messgrössen bestimmt, die Hinweise auf potentielle Ereignisse ähnlich wie im Oktober 2011 geben können. Es muss betont werden, dass es dabei explizit nicht darum ging alle Formen abzudecken, sondern nur Hinweise auf schnelle Schmelzereignisse grosser Schneemassen in Verbindung mit Dauerregen nach dem Schema „Oktober 2011“ zu finden.

Für Flachlandstationen (Höhen < 800 m ü.M.) wurden folgende Bedingungen gewählt:

- komplette Schmelze einer Schneedecke von mind. 15 cm innerhalb von 48 Stunden
- mehr als 40 mm Niederschlag in Form von Regen über 72 Stunden

Es zeigte sich, dass dafür für die uns in Höhen zwischen etwa 800 und rund 2000 m ü.M. zur Verfügung stehenden Stationen vor allem zwei Bedingungen augenscheinlich sind:

- eine komplette Schneeschmelze einer Schneedecke von mindestens 10 cm innerhalb von 48 Stunden
- ein grösseres Niederschlagsereignis (mehr als 50 mm) in Form von Regen (über 72 Stunden)

Für die hochalpinen Stationen über 2000 m ü.M. werden folgende Bedingungen verwendet:

- Schneehöhenreduktion um mind. 25 cm innerhalb von 48 Stunden
- mehr als 50 mm Niederschlag in Form von Regen über 72 Stunden
- es wird hier keine komplette Schneeschmelze vorausgesetzt

Die unterschiedlichen Grenzwerte für den Niederschlag erklären sich dadurch, dass im Flachland im Allgemeinen etwas weniger Niederschlag fällt als im Gebirge. Entsprechend wurden für Gebirgslagen die Grenzwerte höher gewählt als im Flachland. Den unterschiedlichen Grenzwerten für die Schneeschmelze liegt folgende Überlegung zu Grunde: In grossen Höhen liegen oft bedeutende Schneemassen und es kann dort öfter zu Regen und gleichzeitiger Schmelze kommen. Aus diesem Grunde wurde eine verhältnismässig grössere Schneereduktion angenommen. Zudem werden Schneemengen häufig nicht vollständig weggeschmolzen. So lag zum Beispiel auch im Oktober 2011 auf der Grimsel nach dem Ereignis noch Schnee. Im Flachland liegt im Allgemeinen wenig Schnee. Trotzdem wird eine relativ grosse Reduktion der Schneehöhen vorausgesetzt. Dies damit die Schmelze einen bedeutenden Anteil am Ereignis annimmt. Die Bestimmung der Grenzwerte für Stationen in mittleren Höhen erwies sich als schwierig, da ein grosser Höhenbereich abgedeckt werden muss und nur wenige Stationen zur Verfügung stehen. Damit auch Ereignisse erfasst werden, welche ihre Ursache im oberen Bereich der Höhestufe haben, musste aufgrund der Tatsache, dass sich die zur Verfügung stehenden Stationen grundsätzlich am unteren Ende der Höhenstufe befinden, ein tieferer Grenzwert gewählt werden. Entsprechend diesen Überlegungen wurden die Grenzwerte für die Schneeschmelze für hochalpine Lagen am höchsten (25 cm), für mittelhohe Lagen am tiefsten (10 cm) und fürs Flachland dazwischen (15 cm) gewählt.

Die Temperatur während eines Ereignisses ist kein direktes Auswahlkriterium wird aber für die einzelnen Ergebnisse angegeben. Die maximale Temperatur in den letzten 48 Stunden des

Ereignisses ist vor allem für die mittleren Höhenlagen essentiell um die „vertikale Ausdehnung“ und somit die potentielle Grösse der Schmelze besser einordnen zu können. Je höher die maximale Temperatur, je höher die Nullgrad- und Schneefallgrenze und deshalb je grösser das potentielle Gebiet der abflusswirksamen Schmelze.

5.1.2 Limitierungen und Interpretation der Resultate

Die Suchmethode hat verständlicherweise ihre Limitierungen. So ist nicht a priori klar, wie die oben bestimmten Grenzwerte eingestellt werden sollen. Es wurden weitere Grenzwertkombinationen von Schneeschmelze und Niederschlagsereignissen getestet (z.B. kürzere Dauer der Schneeschmelze und Niederschlagsereignisse oder andere Limiten). Obwohl die oben genannten Bedingungen konstruiert wurden, um in erster Linie Ereignisse nach dem Schema „Oktober 2011“ zu finden, lieferten sie die beste Übereinstimmung mit den Aufzeichnungen der Schadenschroniken betreffend Hochwasser in Verbindung mit Schneeschmelze und Dauerregen insgesamt.

Ein weiteres Problem ist, dass längere Schneereihen nur für relativ tiefliegende Standorte in Tälern vorliegen. Deshalb konnten nur Schneeschmelzereignisse im Zusammenhang mit Dauerregen, bei denen Schnee bis in die tieferen Lagen der Stationen fiel und wieder schmolz erfasst werden. Fälle wo nur in höheren Lagen viel Schnee fiel, der dann durch Erwärmung bis in grosse Höhen und Dauerregen zum Schmelzen gebracht wurde, können mangels fehlender langer Schneemessreihen nicht erfasst werden. Es besteht also die Gefahr Ereignisse mit Ursprung in grosser Höhe zu verpassen. Allerdings ist anzunehmen, dass die grössten und wichtigsten Ereignisse im Zusammenhang mit Schnee bis in mittlere oder tiefe Lagen verbunden sind und somit mit dem gewählten Ansatz erfasst werden.

Zu beachten ist auch, dass durch die kleine Anzahl verfügbarer Stationen ein Ereignis nicht in jeder Region als Ereignis erfasst wird. Konkret heisst das, dass es sein kann, dass ein Ereignis an einer Station ausserhalb des Schadensgebietes erkannt wurde, nicht aber an der Station in der Nähe des Schadensgebiets. Deshalb wird ein Ereignis als von der Suche als „erkannt“ angesehen, wenn an einer untersuchten Station die Bedingungen erfüllt werden. Trotzdem kann es natürlich sein, dass möglicherweise gewisse Ereignisse „verpasst“ werden, da die zur Verfügung stehenden Stationen nicht genug repräsentativ für das Schadensgebiet sind. Zudem können nur sehr beschränkt Aussagen über die räumliche Ausdehnung eines Ereignisses machen werden. Es soll auch betont werden, dass mit den oben vorgestellten Bedingungen Ereignisse, die durch langsames Abschmelzen und relativ geringe über längere Zeit fallende Niederschläge zu Stande kommen, nicht erfasst werden können. Die beste Verifikation ist allerdings die Übereinstimmung mit Schadensereignissen. Solange die Methode die wichtigen Schadensereignisse findet, darf angenommen werden, dass die Methode gut funktioniert.

5.1.3 Datenverfügbarkeit

Da der Fokus auf der zeitlichen Analyse einer langen Zeitreihe liegt, hält sich die Anzahl Stationen mit den notwendigen Daten in Grenzen. Tabelle 12 gibt eine Übersicht über die analysierten Stationsdaten in diesem Kapitel. Neben dem Ort, der geografischen Region und der Höhe ist auch die Datenverfügbarkeit für die objektive Analyse angegeben. Die Datenverfügbarkeit für Schnee und

Niederschlag ist meist vom Beginn der Schneemessungen bestimmt. Die Niederschlagsmessungen reichen meist deutlich weiter zurück. Die maximale Untersuchungsperiode beschränkt sich für vereinzelte Stationen auf die Periode ab 1931, also gut 80 Jahre, für andere ist die Datenverfügbarkeit geringer (50 Jahre oder noch weniger). Zu beachten ist auch, dass die Tagesmaxima der Temperatur nur für wenige Stationen bis 1931 zurück reichen. Oft beginnen diese erst in den 1960er oder 1970er Jahren.

Tabelle 12: Übersicht der analysierten Stationen auf Schneeschmelzereignisse mit Dauerregen ähnlich dem Oktober 2011 Fall im Kandertal und Lötschberggebiet. Für die Verfügbarkeit der Schnee- & Niederschlagsdaten wird die jeweils kürzere Datenverfügbarkeit gewählt.

Ort	Gebiet	Höhe m ü.M.	Niederschlag / Schnee seit	Temperaturmaxima seit
Grimsel Hospiz	Berner Alpen	1980	1964-	1971-
Adelboden	Berner Alpen	1320	1965-	1966-
Meiringen	Berner Alpen	589	1958-	1959-
Ried & Blatten	Berner Alpen	1500/1535	1974-	1974-
Crans-Montana	Berner Alpen	1427	1931-2003	1931-
Elm	Glarner Alpen	965	1949-	1972-
Weissfluhjoch	Graubünden	2690	1959-	1971-
Davos	Graubünden	1594	1931-	1931-
Segl-Maria	Graubünden	1798	1952-	1977-
Einsiedeln	Voralpen	910	1931-	1968-
Château-d'Oex	Voralpen	1029	1940-	1940-
La Chaux-de-Fonds	Jura	1018	1931-	1959-
Zürich SMA	Mittelland	556	1931-	1931-
Bern	Mittelland	553	1931-	1931-

5.2 Objektive Suche

5.2.1 Ähnliche hydrometeorologische Fälle im Gebiet Berner Alpen/Lötschental

Für das Fokusgebiet Kandertal erlaubt die Datenlage eine Untersuchung an der MeteoSchweiz Station Adelboden auf 1320 m ü.M. die als repräsentativste langjährige Station angesehen werden kann. Die Schneeschmelze spielt in diesem Einzugsgebiet durchaus eine zentrale Rolle und kann sogar die höchsten Hochwasser generieren, die je gemessen wurden (Helbling et al., 2006). Allerdings handelt es sich um Sommerereignisse im Juli/August, also zu einer Zeit wo Schnee und Eis in grossen Höhen schmelzen und die meist nicht im Zusammenhang mit Starkniederschlägen stehen.

Tabelle 13: Identifizierung von grösseren Schneeschmelzen im Zusammenhang mit Dauerregen anhand der in den Methoden besprochenen Kriterien für Stationen in den Berner Alpen. Als Schadensfälle identifizierte Ereignisse sind fett geschrieben.

Station	Enddatum Ereignis	Schnee ↓ 48h [cm]	Niederschlag 72h [mm]	T _{max} 48h [°C]
Adelboden 1320 m ü.M. seit 1965	14.11.1972	20	114.7	8.8
	15.02.1990	20	167.2	5.6
	21.12.1993	18	82.4	11.0
	11.10.2011	10	68.0	18.9
Meiringen 589 m ü.M. seit 1958	17.04.1969	13	74.8	6.1
	17.01.1983	12	59.9	7.0
	23.12.1991	20	86.2	8.0
	21.11.1992	12	66.6	8.9
Grimsel Hospiz 1980 m ü.M. seit 1964	23.06.1973	39	83.5	6.4
	17.10.1980	26	106.1	6.2
	11.10.2011	28	74.8	11.0
Ried 1500 m ü.M. 1974-1999 Blatten 1535 m ü.M: ab 2001	13.05.1985	14	65.1	11.0
	31.10.1990	12	68.1	6.6
	09.04.1993	10	53.5	11.5
	11.10.2011	26	65.3	18.0
Crans-Montana 1427 m ü.M: 1931-2006	17.02.1958	21	68.3	10.6
	15.11.1972	18	71.5	7.2
	08.11.1979	22	65.2	10.7
	08.04.1993	15	86.1	9.5
	11.10.2011	?	46.2	17.8

Betreffend Schneeabnahme und Niederschlagsmenge findet man mittels der oben genannten Bedingungen neben Oktober 2011 noch drei weitere ähnliche Schmelzereignisse (1972, 1990 und 1993) im Zeitraum von 1965 bis 2011 (Tabelle 13). Der Vergleich mit der maximalen Temperatur in letzten 48 Stunden des Ereignisses zeigt jedoch, dass diese drei weiteren Fälle alle mit viel tieferen Maximaltemperaturen verbunden waren als der Oktober 2011 Fall, wo die Maximaltemperatur mit 18.9 °C auf ein sehr hochreichendes Schmelzgebiet hinweist. Dies bestätigt der Verlauf der Nullgradgrenze, welche in der Schmelzperiode in Höhen zwischen 3000 und 3500 m ü.M. lag (vergl. Kapitel 1.2). Ein Grossteil der hohen Niederschlagsmengen im November 1972 und Februar 1990 dürften in grösseren Höhen als Schnee liegen geblieben und nicht zum Abfluss gelangt sein. Das bestätigen die eher geringen Abflüsse der BAFU Station Adelboden Allenbach während diesen Ereignissen.

Der Abfluss im Oktober 2011 war mit maximal 78.8 m³/s das höchste seit 1950 gemessene Hochwasser (bisheriger Rekord: 75 m³/s im August 1977) und gut das 4.5 fache des bisherigen Oktober Rekordwertes von 17.3 m³/s von 1963. Somit kann mit grosser Sicherheit gesagt werden, dass für diese Einzugsgebiet zumindest seit 1965 (vermutlich sogar seit 1950) kein mit dem Oktober 2011 vergleichbares Schmelzereignis aufgetreten ist (schon gar nicht im Herbst).

Für Fälle, wo die Schmelze im Höhenbereich unter 1500 m ü.M. zentral war, sind Analysen an tiefer liegenden Stationen interessant, z.B. die Station Meiringen knapp 600 m ü.M. Für Meiringen liefert die Suche vier namhaftere Ereignisse seit Beginn der Messungen im Jahr 1958: 1969, 1983, 1991 und 1992. Das Oktober 2011 Ereignis ist nicht darunter, unter anderem weil an der Station Meiringen kein Schnee lag und von unserer Suche nicht identifiziert werden kann. Das zahlenmässig grösste gefundene Ereignis ist dasjenige vom Dezember 1991. Es war mit grossen Schäden (>10 Mio. CHF) vor allem im Berner Oberland (speziell im Frutig- und Kandertal) verbunden und stellt nach dem Februar 1999 das zweitletzte grössere Schadensereignis mit Schmelze und Dauerregen dar (Andres et al., 2012). Schäden wurden auch für den Fall im Jahr 1992 registriert. Für die Daten im Jahr 1969, 1983 wurden in den Aufzeichnungen keine namhaften Schadensmeldungen gefunden.

Eine der wenigen langjährigen Stationen in den Berner Alpen mit Niederschlag, Temperatur- und Schneedaten deutlich über 1500 m ü.M. ist Grimsel Hospiz. Die oben definierten Bedingungen liefern 3 Ereignisse seit 1964 (1973, 1980 und 2011, s. Tabelle 13). Das 2011 Ereignis konnte also auch hier identifiziert werden. Der Schnee auf dem Grimsel Hospiz ist allerdings erst ein bis zwei Tage nach dem Ereignis vollständig geschmolzen. Das 1973er Ereignis hat zu keinen deutlich erhöhten Abflüssen geführt. Das 1980er Ereignis zeigt zwar erhöhte Abflüsse in der Aare und im Goms. In den nationalen Quellen lassen sich aber keine konkreten Hinweise auf grössere Schäden finden.

Für das zweite grosse Schadensgebiet Lötschental ist leider keine optimale Messstation für eine historische Analyse vorhanden. Im Lötschental selber kann die kombinierte Reihe der Stationen Ried und Blatten für eine Analyse von 1974 bis heute genutzt werden. Neben dem Oktober 2011 Ereignis werden drei weitere Ereignisse (1985, 1990 und 1993, s. Tabelle 13) identifiziert. Alle Fälle sind mit viel tieferen Maximaltemperaturen verbunden und dürften keine schadenrelevanten Hochwasser ausgelöst haben. Der Abfluss in der Lonza bei Blatten war im Oktober 2011 mit maximal 71.2 m³/s rund 88% des bisher höchsten Hochwassers (August 1971). Es war aber das bisher grösste im Oktober, wo der bisherige Rekord bei 61 m³/s stand (Messungen seit 1956).

Mit gewissen Abstrichen kann die zeitlich weiter zurück reichende Station Crans-Montana 1427 m ü.M. (MeteoSchweiz Schneedaten 1931-2003) genutzt werden, um für das nördliche Wallis grössere Ereignisse seit 1931 zu identifizieren. Der Oktober 2011 Fall wird in Crans-Montana nicht mehr optimal abgebildet (Tabelle 13). Auch hier kommt vor allem betreffend maximaler Temperatur und damit vertikaler Ausdehnung des Schmelzgebiets keiner der vier weiteren identifizierten Fälle (1958, 1972, 1979 und 1993) an denjenigen des Oktobers 2011 heran. Weiter finden sich auch keine Hinweise auf grössere Schäden für die identifizierten Fälle.

5.2.2 Ähnliche hydrometrologische Fälle im zentralen und östlichen Alpenraum

Eine gute Station zur Analyse weiter im Osten ist Elm im Glarnerland auf knapp 1000 m ü.M. (Daten ab 1949). Die Suche mit den obigen Bedingungen liefert 4 Ereignisse (s. Tabelle 14), wovon eines das Oktober 2011 Ereignis ist. Die Kennzahlen für den Oktober 2011 sind für alle Grössen sehr ähnlich wie für Adelboden. Glücklicherweise gab es im Glarnerland weniger Schäden, obwohl die Abflusswerte auch hoch waren. Mit 294 m³/s wurden in der Linth an der Messstation in Mollis 73% des höchsten Abflusses seit 1971 erreicht und auch hier wurde der bisherige Oktoberrekord von 175 m³/s deutlich übertroffen (+68% gegenüber dem bisherigen Oktoberrekord). Auf jeden Fall, ist auch in Elm seit 1949 nicht annähernd ein Fall aufgetreten, bei dem zusammen mit schneller

Schneesmelze und intensivem Regen so hohe Maximaltemperaturen (18.3 °C in Elm) und somit auch eine so hohe Nullgradgrenze beobachtet wurde wie im Oktober 2011. Lokale Schäden wurden auch für das Ereignis vom November 1992 dokumentiert. Für die anderen zwei identifizierten Fälle 1956 und 2002 konnten in unseren nationalen Quellen keine grösseren Schadensmeldungen gefunden werden.

Im östlichen Alpenraum der Schweiz ist eine Datenanalyse für Davos (1594 m ü.M.) und die sehr hoch liegende Station Weissfluhjoch (2690 m ü.M.) möglich. Die obigen Bedingungen führen allerdings für Davos zu keinem Treffer, unter anderem vermutlich auch weil Davos eine ziemlich trockene Station ist. Es wurde deshalb die Niederschlagsbedingung auf 30 mm in 72 Stunden gelockert. Mit diesen gelockerten Bedingungen werden nur zwei Fälle gefunden, einen im September 1940 und einen im Mai 1961 (Tabelle 14). Der September Fall weist nur eine geringe Maximaltemperatur auf (+5.6 °C) und es ist nicht anzunehmen, dass dadurch ein Hochwasser ausgelöst wurde. Wesentlich höhere Temperaturen (bis +14.5 °C) gingen mit dem Ereignis im Mai 1961 einher. Allerdings ist auch hier wegen der vergleichsweise kleinen Niederschlagsmenge nicht von einem Hochwasser mit Schadenpotential auszugehen. Die Chroniken zeigen auch keine Hinweise auf Schäden. Es wurde also auch in Davos seit 1931 kein vergleichbarer Fall zum Oktober 2011 Ereignis gefunden.

Für die Gipfelstation Weissfluhjoch auf 2690 m ü.M. wird kein Ereignis mit den Kriterien für hochalpine Stationen gefunden. Vermutlich sind die Suchbedingungen für so hochliegende Stationen nicht optimal. Es ist auch unklar inwiefern eine Suche in diesen Höhen aussehen soll bzw. sinnvoll ist, um schadensrelevante Ereignisse im Tal zu erkennen.

Tabelle 14: Wie Tabelle 13, aber für Stationen der Glarner- und Bündner Alpen. Für Fälle wo keine Tmax gemessen wurde (NA), wird die Tagesmitteltemperatur (T_{mittel}) angegeben.

Station	Enddatum Ereignis	Schnee ↓ 48h [cm]	Niederschlag 72h [mm]	T _{max} 48h [°C]
Elm 965 m ü.M. seit 1949	09.06.1956	12	64.5	NA, T _{mittel} : 5.7
	21.11.1992	10	88.0	6.5
	11.11.2002	12	56.3	10.0
	11.10.2011	19	58.1	18.3
Davos 1594 m ü.M. seit 1931 (mit >30 mm in 72h)	12.09.1940	10	33.7	5.6
	15.05.1961	31	31.9	14.5
Weissfluhjoch 2690 m ü.M. seit 1959	kein Fall gefunden (Schnee ↓≥25 cm, Niederschlag ≥50mm)			
Segl-Maria 1798 m ü.M. seit 1952	13.09.1976	15	83.0	NA, T _{mittel} : 5.4
	22.05.1978	11	66.5	7.9
	05.05.2010	10	58.1	9.2

Im Engadin kann Segl-Maria untersucht werden. Die Suche liefert 3 Ereignisse (1976, 1978, 2010, s. Tabelle 13), die aber mit grosser Wahrscheinlichkeit ebenfalls ohne Schäden abliefen. Somit gibt es auch hier keinen vergleichbaren Fall seit 1952.

Für die alpinen Regionen konnte somit mit der gewählten punktweisen Analyse in den letzten 50-80 Jahren kein einziges dem Oktober 2011 vergleichbares Ereignis identifiziert werden. Klar ist, dass offenbar eine sehr seltene Kombination von Wetterlagenabfolge in Kombination mit weiteren z.T. nicht meteorologischen Bedingungen zu so grossen kombinierten Niederschlag/Schmelzereignisse im gebirgegeführt hat. Es kann deshalb auch keine Aussage über mögliche Veränderungen im Beobachtungszeitraum gemacht werden kann.

5.2.3 Vergleichbare Fälle am zentralen und östlichen Alpennordhang und im Jura

Mit Einsiedeln wird eine Station in mittleren Höhen am östlichen Alpennordhang analysiert. 6 Fälle werden detektiert (Tabelle 15):

- November 1944: hohe Temperaturen (Tmittel: 8.1 °C, max. Temperatur unbekannt, aber wohl deutlich über 10 °C), Nullgradgrenze am 23.11. um 8 Uhr auf 2500 m ü.M. (Quelle: Die Niederschläge des Jahres 1944, Annalen 1944); ein bekannter Schadensfall mit Überschwemmungen im westschweizerischen Seeland sowie im Aare und Rhone Einzugsgebiet infolge anhaltender Regenfälle und durch Föhn einsetzender Schneeschmelze. Das Hochwasser der Aare und der Jurarandseen überflutete die flachen Gebiete zwischen Murten-, Neuenburger- und Bielersee. Die Überschwemmungen gelten als die grössten seit der ersten Juragewässerkorrektion (1868-1880).
- November 1950: Hinweise auf Überschwemmungen im Witterungsbericht (ohne Details)
- März 1956: keine Hinweise auf grössere Schäden
- Februar 1957: Hinweise auf Überschwemmungen im Witterungsbericht und den Annalen 1957
- März 1979: keine Hinweise auf grössere Schäden
- Januar 2004: Schäden durch Überschwemmungen und Murgänge (<2.5 Mio. CHF)

Als Ergänzung für den westlichen Alpennordhang kann die Station Château-d'Oex gute Dienste leisten. Für die Periode ab 1940 werden ebenfalls einige Ereignisse gefunden, die zum Teil mit denen von La Chaux-de-Fonds (Nov .1950, Feb. 1990 und Dez. 1993) und Einsiedeln (Jan. 2004) übereinstimmen. Für die Fälle in den Jahren 1952, 1986 und 1999 finden sich in den vorhandenen Quellen keine Schadensmeldungen (s. Tabelle 15).

Als Proxy für den Jura und die 3 Seenregion kann La Chaux-de-Fonds dienen. Hier finden sich zwischen 1931 und 2011 sieben Kandidaten. Hinweise auf Schäden und Behinderungen wurden zu folgenden fünf Ereignissen gefunden:

- November 1950: Hinweise auf Überschwemmungen im Witterungsbericht (ohne Details)
- Dezember 1982: leichtere Überschwemmungen und Rutschungen in der Westschweiz
- Februar 1990: schwere Überschwemmungen und Rutschungen am Alpennordrand und im Jura, Schadenssumme 125-130 Mio. CHF.
- Dezember 1993: Sturm und Behinderungen im Verkehr
- März 2007: leichte Schäden durch Überschwemmungen im Seeland und Jura

Tabelle 15: Wie Tabelle 13, aber für die zwei Stationen Einsiedeln und Château-d'Oex am Alpennordhang sowie La Chaux-de-Fonds im Jura. Für Fälle wo keine Tmax gemessen wurde (NA), wird die Tagesmitteltemperatur (Tmittel) angegeben.

Station	Enddatum Ereignis	Schnee ↓ 48h [cm]	Niederschlag 72h [mm]	T _{max} 48h [°C]
Einsiedeln 910 m ü.M. seit 1931	24.11.1944	17	74.0	NA, T _{mittel} : 8.1
	17.11.1950	18	79.2	NA, T _{mittel} : 5.1
	03.03.1956	20	85.5	NA, T _{mittel} : 5.9
	25.02.1957	23	103.9	NA, T _{mittel} : 6.9
	13.03.1979	14	86.8	11.5
	13.01.2004	11	76.1	11.1
Château-d'Oex 1029 m ü.M. seit 1940	17.11.1950	15	52.7	8.5
	03.11.1952	10	63.3	6.2
	09.02.1955	26	80.6	7.2
	19.12.1986	20	55.0	9.9
	15.02.1990	20	109.3	9.2
	21.12.1993	15	51.5	10.9
	27.12.1999	10	75.1	11.1
13.01.2004	12	117.0	10.4	
La Chaux-de-Fonds 1018 m ü.M., seit 1931	07.04.1939	10	61.7	NA, T _{mittel} : 7.0
	11.11.1950	10	76.5	NA, T _{mittel} : 8.0
	14.11.1972	10	105.6	9.5
	17.12.1982	19	59.6	6.2
	15.02.1990	29	147.4	6.9
	21.12.1993	15	51.1	10.9
01.03.2007	15	66.3	6.7	

5.2.4 Vergleichbare Fälle im Schweizer Mittelland

Auch im Mittelland sind intensive Niederschläge mit gleichzeitiger Schmelze möglich, allerdings in grösserem Ausmass ebenfalls eher selten. Das bekannteste Ereignis der jüngeren Geschichte stammt vom Februar 1999, wo vor allem regional im Kanton Aargau und Baselland Gesamtschäden in Höhe von rund 40 Mio. CHF entstanden. Dies ist zwar beträchtlich, aber nur etwas über 10% der Schäden eines durchschnittlichen Schadenjahres. So hat das nur rund zwei Monate später folgende Pfingsthochwasser 1999 mit rund 600 Mio. CHF Schäden verursacht, die ungleich höher waren (Unwetterschäden in der Schweiz 1999).

In noch näherer Vergangenheit sei auf das starke Schneefall- und kurz darauf eintretende Schmelzereignis vom März 2006 hingewiesen. Obwohl hier grosse Schneemengen (über 50 cm in Zürich) innerhalb von wenigen Tagen schmolzen, wurde nur sehr wenig Schaden (laut WSL Schadensbericht 2006 nur etwa 2.5 Mio. CHF. oder weniger als 1% der Schäden eines durchschnittlichen jährlichen Schadenssumme) angerichtet. Ein solches Ereignis muss somit von den gewählten Suchkriterien nicht zwingend gefunden werden, da die Auswirkungen eher bescheiden sind.

Tabelle 16: Wie Tabelle 13, aber für 2 Stationen im Mittelland

Station	Enddatum Ereignis	Schnee ↓ 48h [cm]	Niederschlag 72h [mm]	T _{max} 48h [°C]
Zürich SMA 556 m ü.M. seit 1931	22.02.1970	25	80.5	7.0
	21.02.1999	18	93.5	7.1
	10.03.2006	33	42.2	9.9
Bern 553 m ü.M. seit 1931	08.12.2010	35	42.4	9.4

Besprochen werden hier die Resultate für zwei Stationen im Mittelland (Zürich und Bern, s. Tabelle 16). In Zürich lassen sich in den letzten gut 80 Jahren drei Fälle mit schneller grosser Schneeschmelze in Verbindung mit Dauerregen (Schneehöhenreduktion ≥ 15 cm in 48 Stunden und ≥ 40 mm Niederschlag in 72 Stunden) identifizieren. Im Gegensatz zu den alpinen Fällen traten alle drei Ereignisse im Februar oder März auf. Sie sind deshalb auch mit tieferen Maximaltemperaturen verbunden als die (vor-)alpinen Ereignisse, welche meist im Frühling oder Herbst auftreten. Beide oben beschriebenen Schadensfälle von 1999 und 2006 werden identifiziert. Zudem wird ein Fall im Februar 1970 gefunden. In den Schadenschroniken und Witterungsberichten ist ausser einem grossen Murgang im Kanton Solothurn wenig Konkretes zu diesem Ereignis zu finden, allerdings gab es im Februar 1970 ein grosses Rheinhochwasser mit grossen Schäden vor allem im Deutschland. Das zeigt, dass dieses Ereignis wohl durchaus Schadenspotential hatte. Für Bern wurde in der Periode von 1931-2011 nur ein Fall identifiziert (Dezember 2010). Die Schneeschmelze führte vor allem in der Region Fribourg, Münchenbuchsee, dem Gürbetal und Lyss zu Überflutungen mit kleineren Schäden. Insgesamt zeigt die Analyse für das Mittelland, dass namhaftere Schneeschmelze mit Dauerregen im Schweizer Mittelland auch selten sind. Es lassen sich keine eindeutigen Trends über die Zeit erkennen, dazu ist die Auftretenshäufigkeit eindeutig zu gering.

5.2.5 Zusammenfassung der objektiven Analyse basierend auf Messdaten an Stationen

Abbildung 28 fasst die objektiv identifizierten Ereignisse von Schneeschmelze mit Dauerregen seit 1931 an den untersuchten Stationen auf einer Karte zusammen. Neben dem Ergebnis, dass schadenreiche Ereignisse selten sind - die letzten Fälle mit grösseren Schäden sind diejenigen vom Februar 1999 im Mittelland und Dezember 1991 vor allem im Berner Oberland (Andres et al., 2012) - zeigt Abbildung 28 auch, dass an den untersuchten Stationen in den letzten 80 Jahren keine schweren Schadensereignisse so früh im Herbst aufgetreten sind wie dasjenige vom Oktober 2011. Abbildung 29 zeigt das Auftreten der identifizierten Ereignisse auf der Zeitachse. Auffallend ist, dass für die eher tiefer gelegenen Gebiete Mittelland, Jura und Voralpen in den letzten 80 Jahre immer mal wieder Ereignisse mit Schäden aufgetreten sind, während in den Alpen das 2011 Ereignis fast alleine da steht. Da die Schadensereignisse allgemein selten sind, sind seriöse Aussagen über Trends nicht möglich. Obwohl seit dem Jahr 1931 alle klar dokumentierten grossen Schadensereignisse mit Schäden über 10 Mio. CHF in den letzten gut 20 Jahren aufgetreten sind, ist auch hier betreffend Interpretation Vorsicht geboten. Es ist nicht ausgeschlossen, dass einige Schadensfälle vor 1972 nicht aufgeführt sind, da die systematischen Aufzeichnungen erst dann

gestartet wurden. Zudem ist die Bestimmung einer mit heutigen Werten vergleichbaren Schadenssumme nur mit grossen Unsicherheiten möglich.

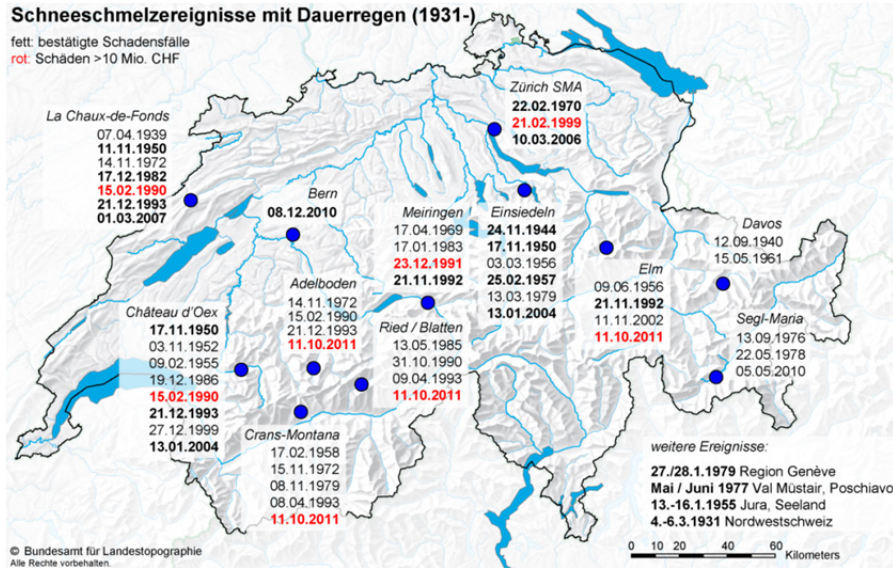


Abbildung 28: Identifizierte Enddaten von grösseren Schneesmelzereignissen im Zusammenhang mit Dauerregen an Schweizer Stationen. Daten mit dokumentierten Schäden in der Umgebung der untersuchten Station sind fett geschrieben. Ereignisse mit Schäden >10 Mio. CHF sind rot geschrieben. Weitere Ereignisse, die nicht von der Suche gefunden wurden, sind unten rechts aufgelistet (s. auch Tabelle 17).

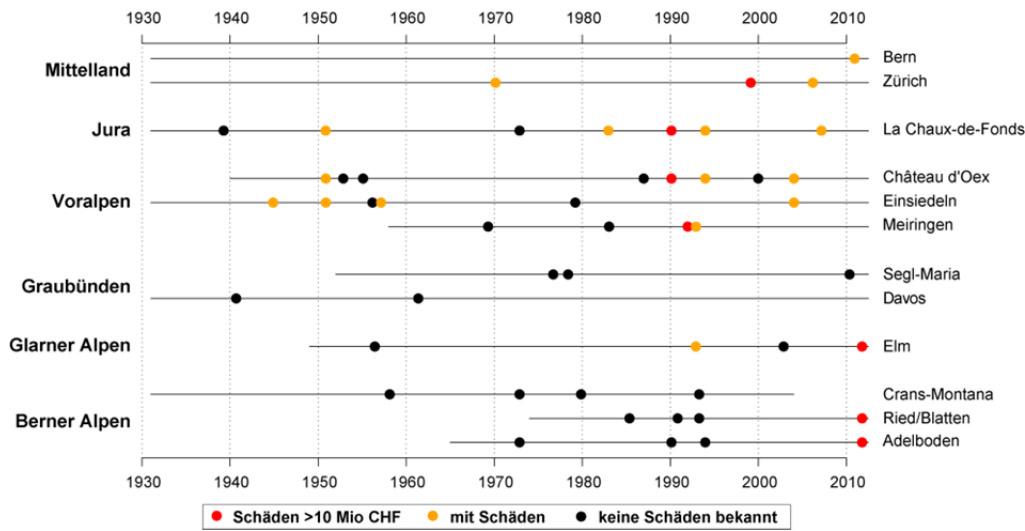


Abbildung 29: Zeitliches Auftreten von grösseren Schneesmelzen im Zusammenhang mit Dauerregen für die untersuchten Stationen (schwarze Kreise). Ereignisse mit dokumentierten Schäden sind mit orangenen Kreisen gekennzeichnet. Ereignisse mit einer gesicherten Schadenssumme >10 Mio. CHF sind rot gekennzeichnet. Die Ereignisse beschränken sich räumlich nicht zwingend auf die Naturräume der Station, wo das Ereignis identifiziert wurde. So wird z.B. das 1944er Ereignis an der Station Einsiedeln erkannt, das Hauptschadensgebiet liegt aber in der 3-Seenregion Neuenburger-, Murten-, und Bielersee).

In Abbildung 30 wird das jahreszeitliche Auftreten der Ereignisse visualisiert. Sie zeigt schön auf, dass Ereignisse von Schneesmelze mit Dauerregen im Mittelland, im Jura und in den Voralpen

vorwiegend im Winter und den Randmonaten November und März auftreten, während diejenigen an Stationen in den Alpentälern eher im Herbst oder Frühling auftreten. Herbst bedeutet allerdings in den meisten Fällen November also Spätherbst und nicht Anfang Oktober wie im Jahr 2011. Noch deutlicher wird die Trennung zwischen Flachland und alpin geprägten Regionen, wenn man nur tatsächliche kombinierte Niederschlag/Schmelzereignisse einbezieht, also wo auch Schäden beobachtet wurden (Abbildung 31). Während im Flachland Schadensfälle immer mal wieder, aber immer zwischen November und März auftreten, findet man im alpinen Raum bis auf den Oktober 2011 und November 1992 gar keine Schadensfälle.

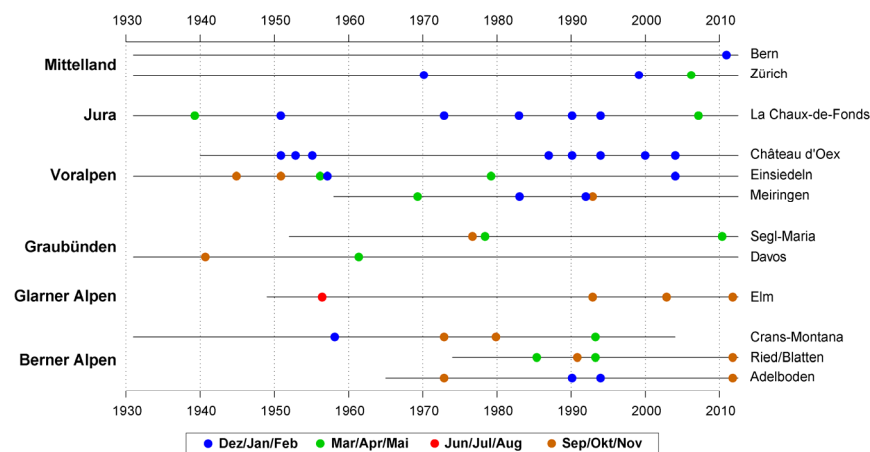


Abbildung 30: Jahreszeitliches Auftreten von grösseren Schneeschmelzen im Zusammenhang mit Dauerregen für die untersuchten Stationen. Winter (Dezember, Januar, Februar): blau, Frühling (März, April, Mai): grün, Sommer (Juni, Juli, August): rot und Herbst (September, Oktober, November): braun. Die Ereignisse beschränken sich räumlich nicht zwingend auf die Naturräume der Station, wo das Ereignis identifiziert wurde.

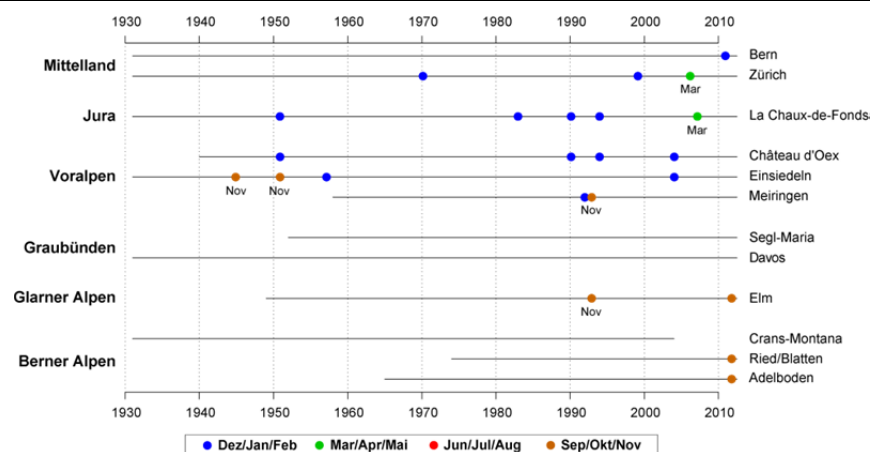


Abbildung 31: Jahreszeitliches Auftreten von grösseren Schneeschmelzen im Zusammenhang mit Dauerregen mit Schäden für die untersuchten Stationen. Winter (Dezember, Januar, Februar): blau, Frühling (März, April, Mai): grün, Sommer (Juni, Juli, August): rot und Herbst (September, Oktober, November): braun. Die Ereignisse beschränken sich räumlich nicht zwingend auf die Naturräume der Station, wo das Ereignis identifiziert wurde.

5.3 Chronik: Hochwasserschadensfälle mit Schneeschmelze seit 1800

Namhafte Hochwasserschäden durch grössere Schneeschmelze im Zusammenhang mit Dauerregen sind recht selten, wie die objektive Analyse basierend auf Messdaten seit 1931 schon deutlich gezeigt hat. Es gibt aber Zusammenstellungen von Schäden die viel weiter zurück reichen. Um die Ergebnisse seit 1931 in Bezug zu den Schadenschroniken zu setzen und zu prüfen, ob die objektive Analyse die schadensrelevanten Ereignisse tatsächlich identifizieren konnte, wurde die Chronik der Unwetterschäden in der Schweiz (Röthlisberger, 1991) für die Jahre 1800-1989 nach den Stichworten „Schmelze“ und „Schnee“ ausgewertet. Für die Jahre 1972 bis 2011 wurden die Ergebnisse mit Zusatzinformationen aus den Berichten „Unwetterschäden in der Schweiz“ ergänzt. Für die Jahre 1861-2011 stehen auch Informationen der Witterungsberichte der MeteoSchweiz zur Verfügung, die ebenfalls durchsucht wurden.

5.3.1 Dokumentierte Ereignisse von 1800 bis 2011

Die dokumentierten Schadensfälle im Zusammenhang mit Schneeschmelze und Dauerregen sind in Tabelle 17 zusammengestellt. Insgesamt wurden in den Chroniken in den letzten 212 Jahren nur 34 Ereignisse in der ganzen Schweiz identifiziert, bei denen Schneeschmelze eine namhafte Rolle spielte. Somit bestätigt auch diese Analyse, dass schadensträchtige schmelzbedingte Hochwasser mit Dauerregen auch historisch gesehen seltene Ereignisse sind. Obwohl sich einige Schadensereignisse im Herbst finden lassen, liegen bis auf den Oktober 2011 Fall und den schadensarmen Fall vom November 1992 alle weiteren Herbstereignisse mehr als 125 Jahre zurück (Tabelle 17). Im 19. Jahrhundert finden sich 5 alpine Herbstereignisse innerhalb 62 Jahren, die als „schneeschmelzbedingt“ klassifiziert werden. Zu beachten ist jedoch, dass „schneeschmelzbedingt“ nicht automatisch vergleichbar mit dem „Oktober 2011 Ereignis“ bedeutet, da für diese Fälle der Anteil der Schmelze am Ereignis oft unklar ist. Im Detail kann das leider für keines der Ereignisse im 19. Jahrhundert untersucht werden. Für die Fälle von 1868 und 1885 sind zumindest einige Daten vorhanden, um eine grobe Idee der Ereignisse zu bekommen.

Beim Fall von Ende September / Anfang Oktober 1868 handelt es sich mit 50 Todesopfern und riesigen materiellen Sachschäden um eines der grössten Schadensereignisse in der Schweiz der letzten Jahrhunderte überhaupt. Die sehr spärlichen Messdaten legen allerdings nahe, dass bei diesem Ereignis vorwiegend die gewaltigen Niederschlagsmengen in Form von Regen bis in grosse Höhen wichtig waren und die Schneeschmelze wohl nur einen „verstärkenden Nebeneffekt“ darstellte. Der Fall von Ende November 1885 wies grössere Ähnlichkeiten mit dem Oktober 2011 Fall auf. Aufgrund der Niederschlags- und Temperaturreihen kann man davon ausgehen, dass am Anfang des Ereignisses eine beträchtliche Schneedecke in Höhen über 2000 m ü.M. gelegen haben dürfte. Diese kam dann zusammen mit den ergiebigen Niederschlägen vom 28. November bis 1. Dezember (z.T. deutlich über 100 mm), die erst in einer Höhe von ca. 3000 m ü.M. in Schnee übergangen (Annalen, 1885) zum Abfluss. Allerdings dürften die Maximaltemperaturen diejenigen vom Oktober 2011 nicht erreicht haben und die Temperatur- und Niederschlagsdaten weisen darauf hin, dass die Schneedecke deutlich weniger weit ins Tal gereicht haben dürfte als im Oktober 2011, wo Schnee zeitweise bis unter 1000 m ü.M. fiel und später entsprechend zum Abfluss beitrug. Allerdings scheint das Ereignis räumlich deutlich grössere Ausmasse gehabt zu haben als im Oktober 2011 (Röthlisberger, 1991). Somit kann zusammenfassend gesagt werden, dass weder in

den Messdaten der letzten gut 80 Jahre noch in den Chroniken (zumindest in den letzten rund 150 Jahren) ein dem Oktober 2011 ähnliches Ereignis ausfindig gemacht werden konnte.

Tabelle 17: Übersicht über Dauerregenereignisse mit Beteiligung von Schneeschmelze in der Schweiz seit dem Jahr 1800. Quellen: C: WSL Chronik der Unwetterschäden (Röthlisberger, 1991). S: Unwetterschäden in der Schweiz. A: Annalen der MeteoSchweiz. uD = ungenügend Daten

#	Ereignis	Quelle	objekt. Suche	betroffene Regionen	alpines Ereignis im Herbst	Schadensausmass & Bemerkungen (z.B. möglicher Grund für Nichtfinden)
1	Okt./Nov. 1824	C	uD	BE, GL, SG	Ja	grosse Schäden, mind. 3 Tote
2	5.-6. Okt. 1839	C	uD	UR, GR, SG, VS, TI	Ja	grosse Schäden, Murgänge
3	Jul./Aug. 1851	C	uD	BE, NW, BS, VS, VD, LU	Nein	zahlreiche Überschwemmungen
4	1.-2. Sep. 1860	C	uD	UR, BE, SG, GR, VS, VD	Ja	verheerendes alpines Hochwasser
5	Sep./Okt. 1868	C	uD	TI, GR, SG, UR, VS	Ja	katastrophale Verheerungen Zentralalpen & Alpensüdseite, Schäden: 14 Mio. CHF = 4.2 Arbeitstage aller Schweizer
6	18.-19. Jun. 1871	C	uD	SG, GR	Nein	grosse Schäden (2.5 Mio. CHF, damalige Währung)
7	13.-14. Feb. 1877	C	uD	UR, SZ, OW, LU, GL, ZH, AG, SO, SG, AI, AR, TG, SH, BE, BS, NE	Nein	Überschwemmungen, Schadenssumme unbekannt
8	Ende Dez. 1882	C	uD	VD, NE, BE, SO, BS, LU, TG	Nein	Wasserschäden in 7 Kantonen
9	Ende Nov. 1885	C	uD	UR, OW, VS, VD, BE	Ja	schwere Hochwasserschäden
10	8.-11. Mär. 1896	C	uD	NE, VD, FR, VS, SO, BS, SH, AG, ZH, BE, SG, TG, ZG	Nein	Wasserschäden und Rutschungen in 13 Kantonen
11	4.-12. Apr. 1901	C	uD	UR, SZ, NW, LU, AI, BE, VD, FR, VS	Nein	Hochwasser, Überschwemmungen und Rutschungen in 9 Kantonen
12	18.-21. Jan. 1910	C	uD	VD, NE, GE, VS, SO, FR, BE, BL, AG, SH, UR, OW, LU	Nein	schwere Überschwemmungen v.a. in der Westschweiz
13	14.-15. Jun. 1910	C	uD	21 Kantone	Nein	Hochwasserkatastrophe auf der Alpennordseite, West- und Südschweiz weitgehend verschont
14	23./25. Dez. 1918	C	uD	16 Kantone	Nein	Hochwasser, Überschwemmungen und Rutschungen
15	Mitte Feb. 1928	C	uD	UR, SZ, OW, LU, GR, SG, AI, TG, ZH, BE, SO, VD	Nein	Überschwemmungen und Rutschungen
16	4.-6. Mar. 1931	C	Nein	u.a. LU, BE, SO, BL	Nein	Überschwemmungen in 10 Kantonen, gesättigte Böden und nur kleine Schneeschmelze während Ereignis, mässiger Niederschlag
17	Nov./Dez. 1944	C	Ja	v.a. Seeland, BE, NE, VS, VD	Nein	Überschwemmungen im Seeland sowie im Aare- und Rhone Einzugsgebiet, grösste Schäden seit Juragewässer-Korrektion 1868-1880
18	11.-17. Nov. 1950	A	Ja	NE, Alpenvorland	Nein	Hinweise auf kleinere Schäden
19	13.-16. Jan. 1955	C	Nein	Westschweiz, v.a. Juratäler, Seeland und VS	Nein	Wasserschäden, grosse Niederschläge nach dem komplettem Abschmelzen

20	25. Feb. 1957	A	Ja	Juratäler und Alpenordhang	Nein	vermutlich nur kleinere Schäden
21	22. Apr. 1970	C	Ja	mind. SO	Nein	Murgang, Schäden mehrere Mio. CHF.
22	Mai/Jun. 1977	C	Nein	Münstertal und Puschlav	Nein	Rutschungen und Murgänge, grosse Schäden, keine Station im Münstertal und Puschlav analysiert
23	27./28. Jan. 1979	C	Nein	v.a. GE	Nein	hunderte Häuser unter Wasser, keine Station in Region Genf analysiert
24	17. Dez. 1982	A/S	Ja	Westschweiz	Nein	leichtere Überschwemmungen und Rutschungen
25	15. Feb. 1990	S	Ja	VS, FR, VD, NE, JU, SG, BE,	Nein	Schäden 125-130 Mio. CHF, erwähnte Kantone plus 11 weitere mit kleinen Schäden
26	23. Dez. 1991	S	Ja	16 Kantone, u.a. BE, VS, NE	Nein	grosse Schäden (>10 Mio. CHF), 5 Tote
27	21. Nov. 1992	S	Ja	UR, TI, GL, LU	Ja	kleine, lokale Schäden
28	21. Dez. 1993	A/S	Ja	v.a. Mittelland	Nein	Sturm und Behinderungen im Verkehr, kaum Schäden
29	21. Feb. 1999	S	Ja	BL, AG, ZH	Nein	Schäden etwa 40 Mio. CHF
30	13. Jan. 2004	S	Ja	BE, FR, GE, JU, NE, SZ	Nein	Schäden klein (~2.5 Mio. CHF)
31	10. Mar. 2006	S	Ja	JU, BL, BE, AG, SO, ZH, TG, LU, ZG	Nein	Schäden klein (~2.5 Mio. CHF)
32	1. Mar. 2007	S	Ja	JU, BE, NE, FR, GR	Nein	Schäden sehr klein <0.5 Mio. CHF
33	8. Dez. 2010	S	Ja	BE	Nein	Schäden sehr klein <0.5 Mio. CHF
34	11. Okt. 2011	S	Ja	BE, VS, GL, NW, OW, SG	Ja	Schäden 85 Mio. CHF

5.3.2 Vergleich mit den objektiv bestimmten Ereignissen 1931-2011

Seit 1931 wurden neben den 13 mit der objektiven Methode identifizierten Schadensereignissen nur vier zusätzliche Schadensereignisse in den Chroniken erwähnt (1979, 1977, 1955 und 1931), die mit den obigen Grenzwerten und verwendeten Stationen nicht identifiziert werden konnten. Die Fälle von 1977 und 1979 wurden unter anderem deshalb nicht erfasst, da es sich um relativ lokale Ereignisse in den Regionen Genf und Puschlav/Münstertal handelte, wo im weiten Umkreis keine Station untersucht wurde bzw. werden kann. Im Januar Fall von 1955 findet die Schmelze über längere Zeit (einige cm täglich über eine gute Woche) statt und die Schäden entstehen vorwiegend durch die grossen Niederschläge in den Tagen nach dem kompletten Abschmelzen der Schneedecke. Für diesen Fall war der Suchalgorithmus nicht ausgelegt. Beim März Fall von 1931 spielten wohl die gesättigten Böden eine sehr wichtige Rolle. Grössere Schneemengen schmolzen eine gute Woche vor dem Ereignis. Während dem Ereignis war die Schneeschmelze relativ bescheiden und mässig starke Niederschläge reichten aus, um grössere Überschwemmungen mit Schäden anzurichten. Der verwendete Algorithmus konnte diese komplexe Konstellation nicht erkennen. Zusammenfassend kann man sagen, dass die hier angewandte einfache Suche zwar nicht jede mögliche Form eines potentiellen Niederschlag/Schmelzereignisses erkennen kann (v.a. bei Bodensättigung und Niederschläge nach langsamem Abschmelzen oder kleinen Schneehöhen), aber für Fälle mit schnellem Abschmelzen und gleichzeitigem Starkniederschlag leistet sie erstaunlich gute Resultate.

6 Klimaänderung und Auftretenshäufigkeit von Hochwasserereignissen vom Typ „Oktober 2011“

Wie in Kapitel 5 aufgezeigt handelt es sich beim Hochwasserereignis vom Oktober 2011 um ein sehr komplexes Ereignis, wo erst die Wechselwirkung vieler verschiedener hydrometeorologischer Prozesse miteinander zum Hochwasser geführt hat. Zudem sind solche Ereignisse im alpinen Raum bisher kaum beobachtet worden. Es ist deshalb nicht möglich aufgrund der historischen Veränderung der Häufigkeiten Aussagen über zukünftige Änderungen zu machen.

Eine deutlich bessere Informationsquelle sind die neuesten Klimaszenarien, die 2011 vom CH2011 Konsortium publiziert wurden (CH2011). Diese zeigen, dass zusammen mit den Änderungen der mittleren Temperatur und des Niederschlags auch eine Änderung von Wetterextremen zu erwarten ist. Es gibt eine ganz klare Tendenz hin zu mehr warmen Extremen. Aber auch die Häufigkeit, Intensität und Dauer von Niederschlagsextremen könnte sich bei steigenden Treibhausgaskonzentrationen verändern. Diese Änderungen sind allerdings komplex und von verschiedenen sich teilweise konkurrierenden Mechanismen abhängig. Für den Herbst zeigen mehrere Modelle eine schwache Tendenz zu intensiveren Regenfällen. Allerdings führen die steigenden Temperaturen zu einem Anstieg der Schneefallgrenze und somit dürfte mehr Niederschlag in Form von Regen anstatt Schnee fallen.

Obwohl also für einige beteiligte Prozesse, die zum Hochwasserereignis Oktober 2011 geführt haben, zumindest Richtungstendenzen für die Zukunft angegeben werden können, ist dies für das komplexe Zusammenspiel der Prozesse kaum möglich. Es ist nicht auszuschliessen, aber keinesfalls klar, dass die Kombination von intensiven Niederschlägen und starker Schneeschmelze im Gebirge nach dem Schema Oktober 2011 mit der fortschreitenden Klimaänderung häufiger auftreten könnte. Allerdings sind die heutigen Klimamodelle, wie oben erklärt, nicht in der Lage die genauen Veränderungen der atmosphärischen Strömungsmuster mit der nötigen Genauigkeit zu beschreiben um diese These stichhaltig zu untermauern. Da zudem nur eine seltene Kombination von Wetterlagenabfolgen und weiteren zum Teil nicht meteorologischen Bedingungen zu so grossen und intensiven Niederschlägen/Schmelzereignisse im Gebirge führt, dürften solche Ereignisse weiterhin ein eher seltenes Phänomen, wenn auch mit beträchtlichem Schadenspotential, bleiben.

7 Literaturverzeichnis

Andres, N., Badoux, A., Hilker N., und C. Hegg, 2012: Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 2011. *Wasser Energie Luft*, 104, Heft 1, 41-49.

Annalen der MeteoSchweiz 1864-2011, Zürich. Diverse Jahrgänge.

Badoux, A.; Hofer, M.; Jonas, T. (Red.) 2013: Hydrometeorologische Analyse des Hochwasserereignisses vom 10. Oktober 2011. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL; Davos, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF; Zürich, Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz; Bern, geo7, geowissenschaftliches Büro; Bern, Bundesamt für Umwelt BAFU. 92 S.

CH2011 (2011), Swiss Climate Change Scenarios CH2011, published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zurich, Switzerland, 88 pp. ISBN: 978-3-033-03065-7.

Coles, S., 2001: An introduction to statistical modeling of extreme values (p. 210). London: Springer-Verlag.

Davison, A. C., & Smith, R. L., 1990: Models for exceedances over high thresholds. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 52(3), 393–442. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/10.2307/2345667>

Frei, C., and C. Schär, 1998: A precipitation climatology of the Alps from high-resolution rain-gauge observations. *Int. J. Climatol.*, 18, 873-900.

Frei, C., U. Germann, S. Fukutome and M. Liniger, 2008: Möglichkeiten und Grenzen der Niederschlagsanalysen zum Hochwasser 2005. In: Ereignisanalyse Hochwasser 2005 Teil 2: Analyse von Prozesse, Massnahmen und Gefahregrundlagen. (Eds. Bezzola G.-R. and C. Hegg), Bundesamt für Umwelt, Eidgenössische Forschungangstalt WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0825, 429pp., 15-32.

Hartmann, O., 1914: Der Aufbau und Verlauf der Tauflut vom Februar 1909 im Bayer. Donaugebiet. Abhandlung des königlichen Bayerischen Hydrotechnischen Bureaus, 31 p. München.

Haeuser, J., 1926: Die meteorologischen Ursachen der Tauflut vom Ende Dezember 1925 auf Januar 1926 im Maingebiet und in der Rheinpfalz. *Die Wasserkraft*. 81.

Helbling, A., C. Kan und S. Vogt, 2006: Dauerregen, Schauer oder Schmelze - welche Ereignisse lösen in der Schweiz die Jahreshochwasser aus? *Wasser Energie Luft*, 98(3): 249-254

Hershfield, D. M., 1961: Rainfall frequency atlas of the United States for durations from 30 minutes to 24 hours and return periods from 1 to 100 years. Technical Paper No. 40. Washington D.C. U.S. Weather Bureau.

Hilker N., Badoux A., Hegg C., 2009: The Swiss flood and landslide damage database 1972-2007. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9(3), 913-925, doi:10.5194/nhess-9-913-2009.

Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz. Bundesamt für Umwelt BAFU . Diverse Jahrgänge.

IPCC, Climate Change (2001):impact, adaptation and vulnerability. Summary for policymakers. WMO, Geneva, Switzerland, p. 7, 2001.

MeteoSchweiz. Witterungsberichte 1861-2011. Diverse Jahrgänge.

Röthlisberger, G., 1991: WSL Chronik der Unwetterschäden. Ber. Eidgenöss. Forsch.anst. Wald Schnee Landsch. 330: 122 S.

Schwarb, M., 2000: The alpine precipitation climate: Evaluation of a high-resolution analysis system using comprehensive rain-gauge data. Diss. ETH Nr. 13911, 199 pp.

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.

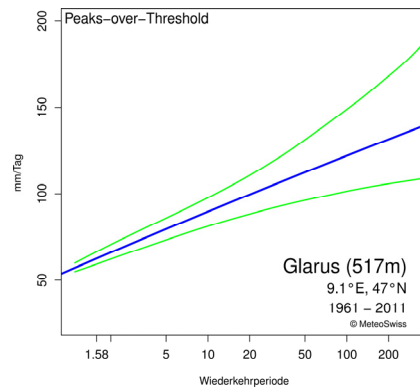
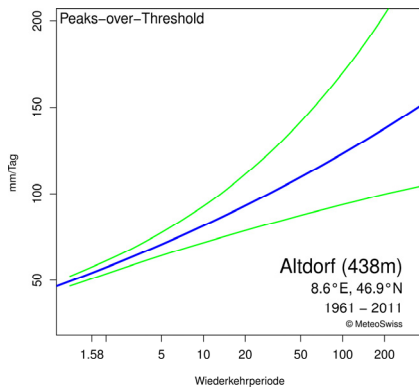
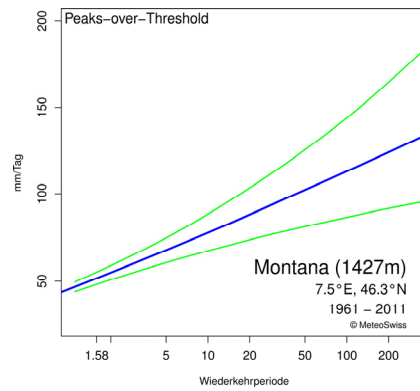
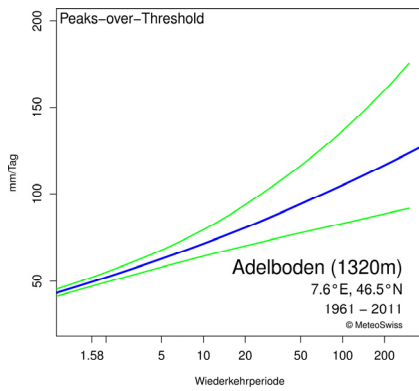
Süveges, M., & Davison, A. C., 2010: Model misspecification in peaks over threshold analysis. The Annals of Applied Statistics, 4(1), 203–221. doi:10.1214/09-AOAS292

Unwetterschäden in der Schweiz 1972-2011. Diverse Jahrgänge. In: Wasser, Energie, Luft. Zeitschrift.

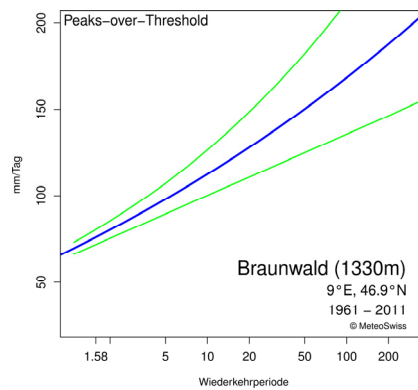
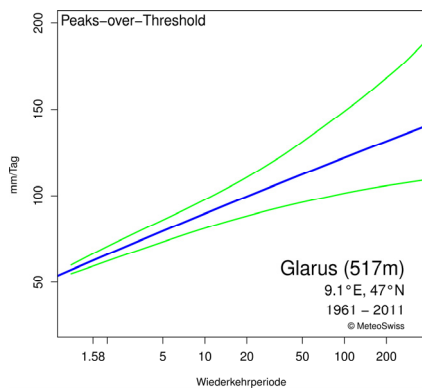
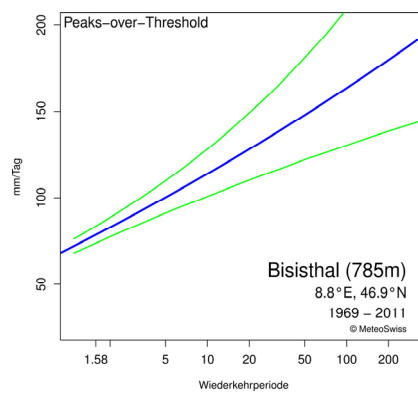
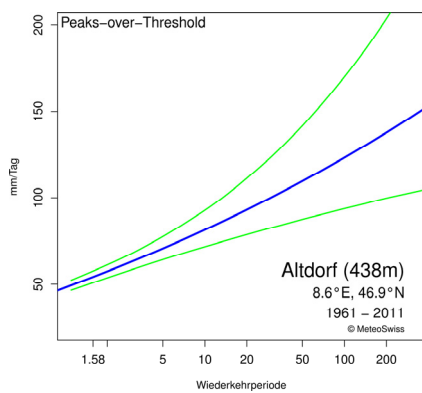
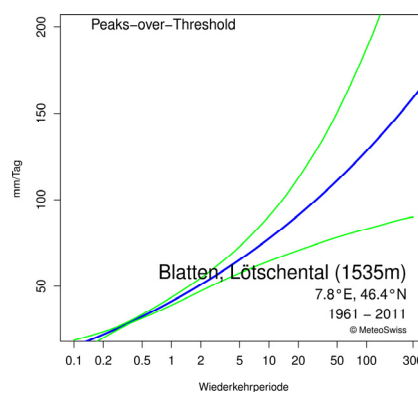
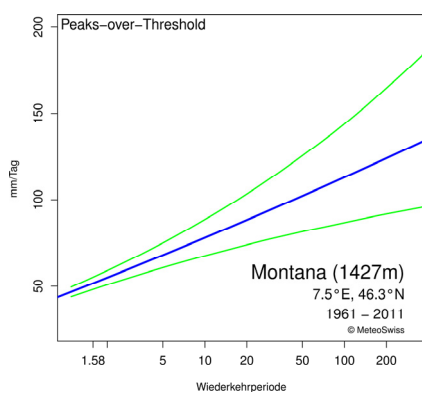
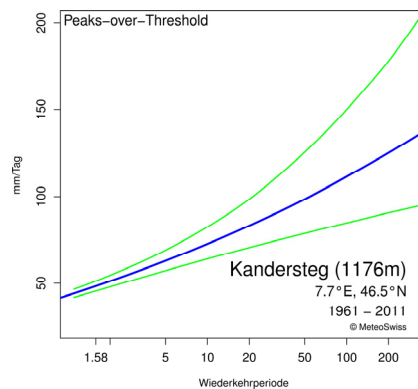
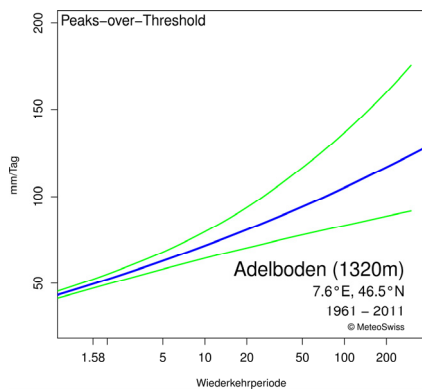
van Montfort, M. A. J., 1990: Sliding Maxima. Journal of Hydrology, 118(August 1989), 77–85.

van Montfort, M. A. J., 1997: Concomitants of the Hershfield factor. Journal of Hydrology, 194, 357–365.

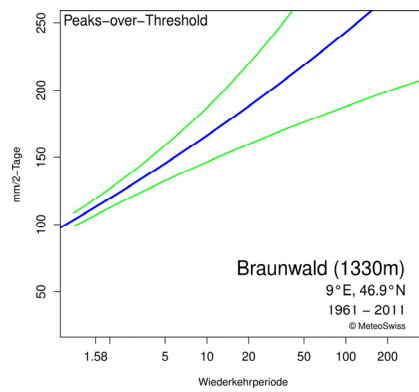
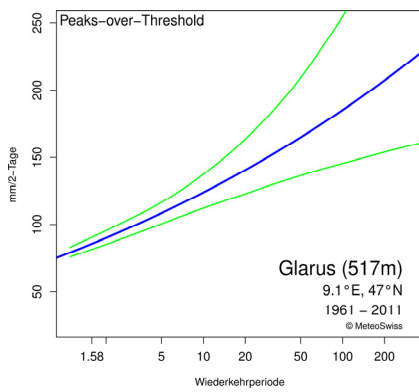
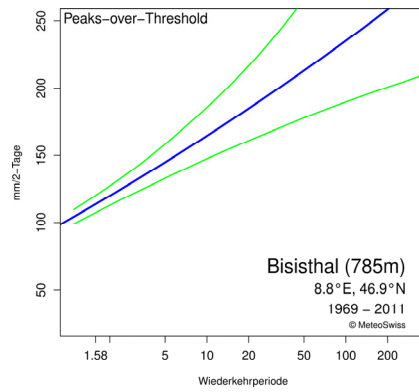
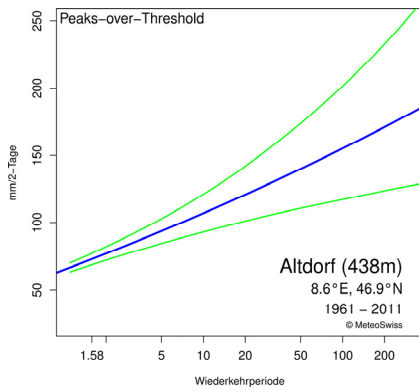
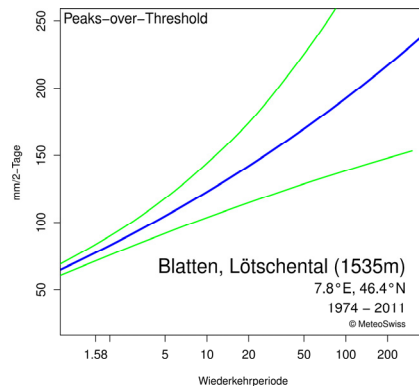
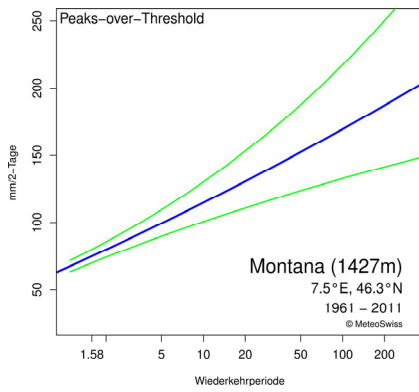
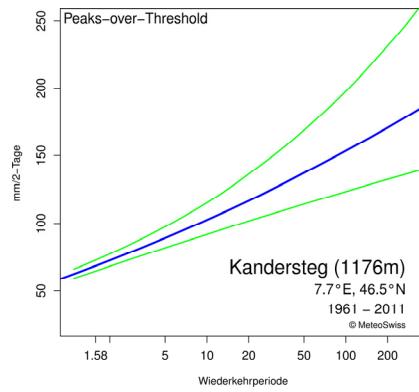
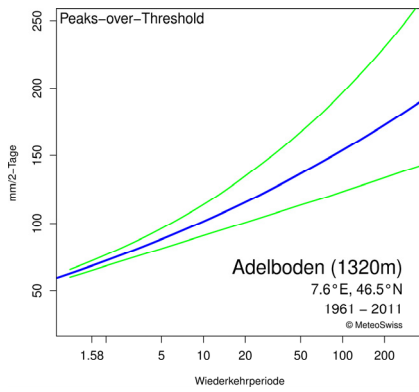
A Anhang: Analysen zusätzlicher Stationen



Pareto Diagramme des 12- Stunden Niederschlags. Blau: beste Schätzung. Grün Konfidenzintervalle.

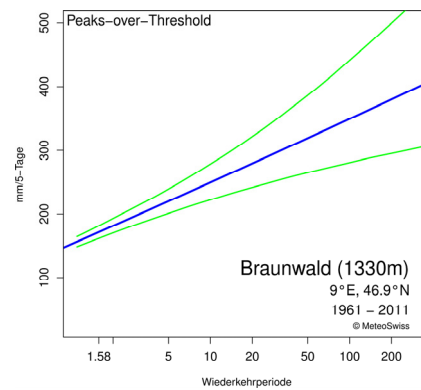
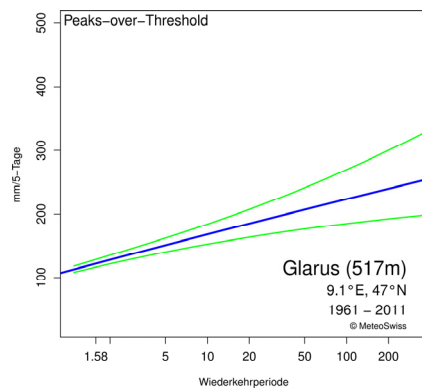
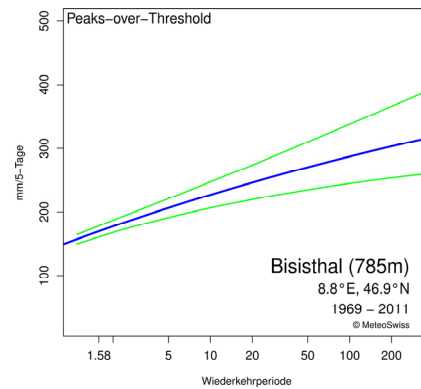
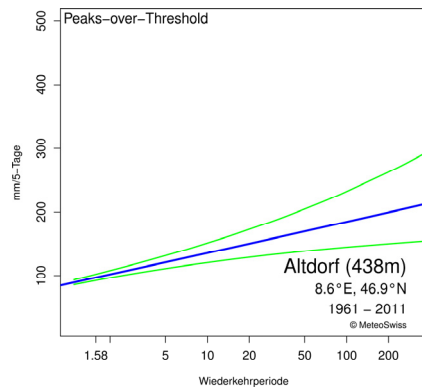
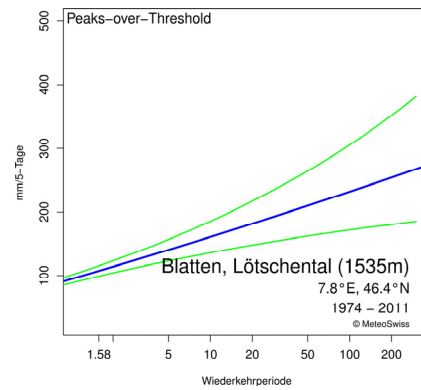
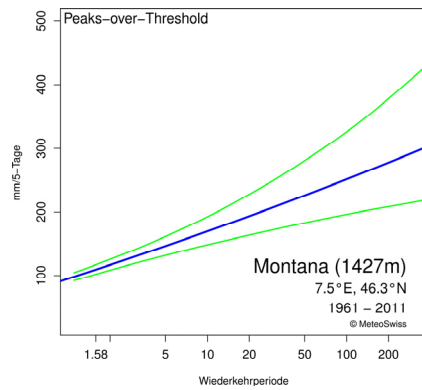
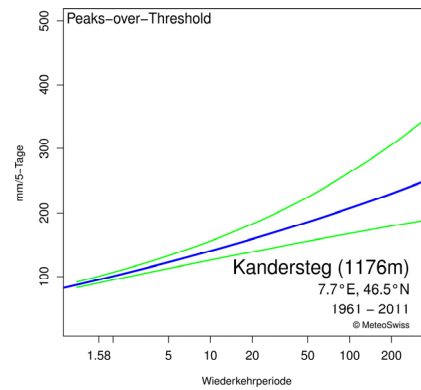
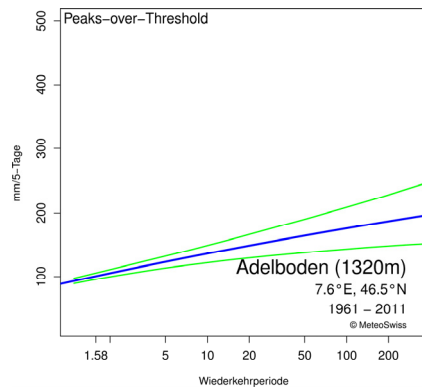


Pareto Diagramme des 1- Tages Niederschlag. Blau: beste Schätzung. Grün Konfidenzintervalle.

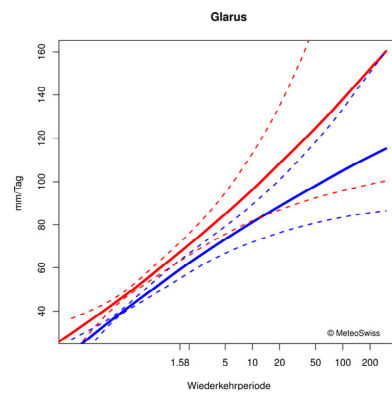
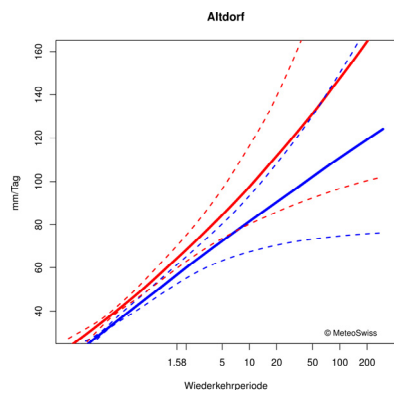
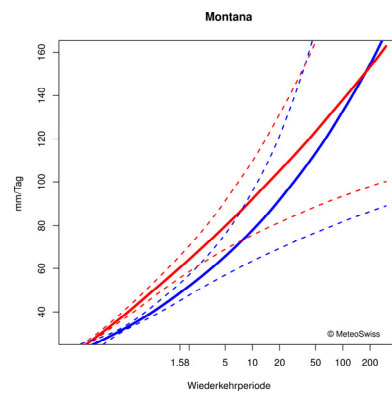
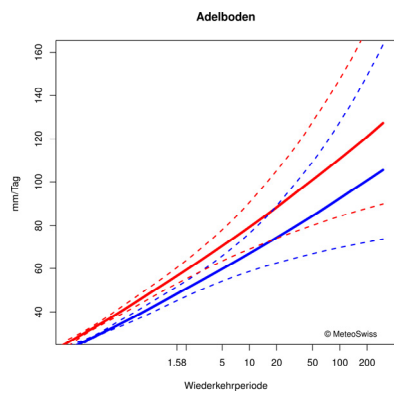


Pareto Diagramme des 2- Tages Niederschlag. Blau: beste Schätzung. Grün Konfidenzintervalle.

Anhang: Analysen zusätzlicher Stationen

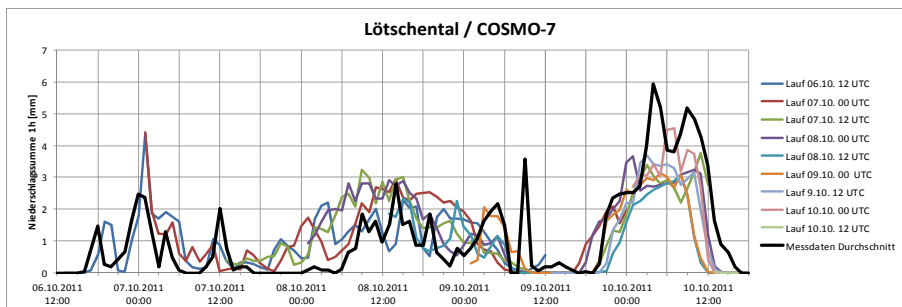


Pareto Diagramme des 5- Tages Niederschlag. Blau: beste Schätzung. Grün Konfidenzintervalle.

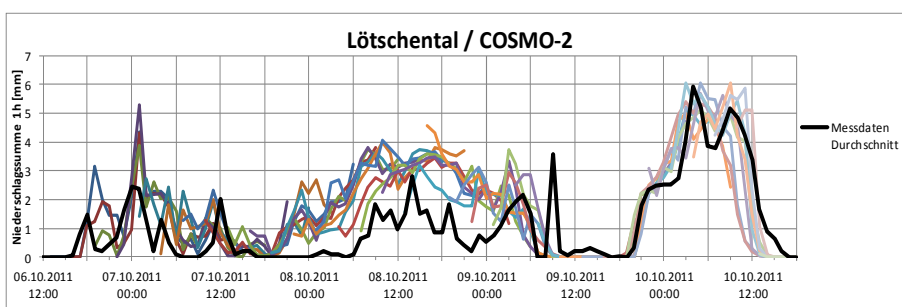


Pareto Diagramme für den gleitenden 24- Stunden Niederschlag (rot) im Vergleich zum fixen 1-Tagesniederschlag 06:06 UTC (blau). Gestrichelt: Konfidenzintervalle.

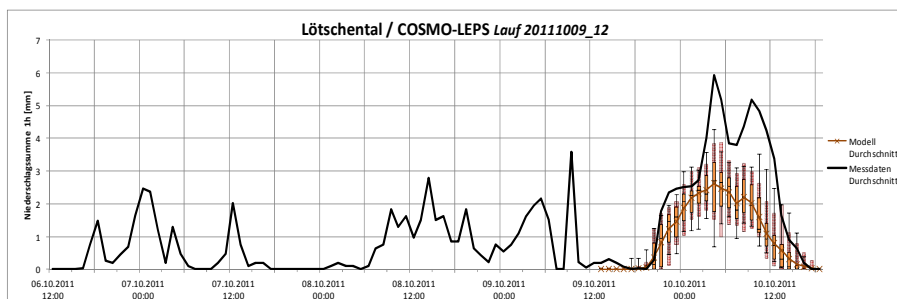
Anhang: Analysen zusätzlicher Stationen



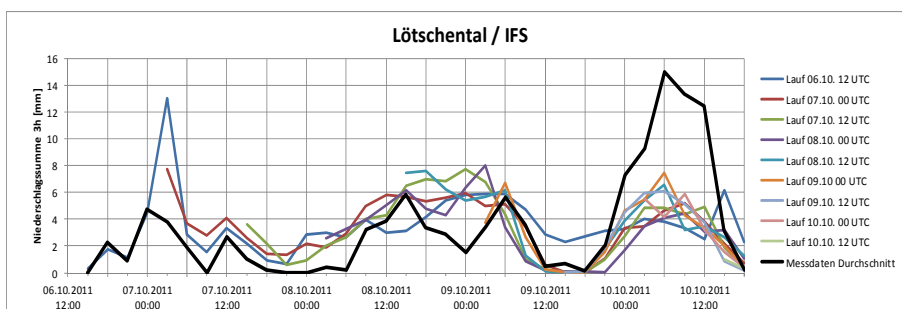
COSMO-7 für die Periode 6.10 bis 10.10.2011.



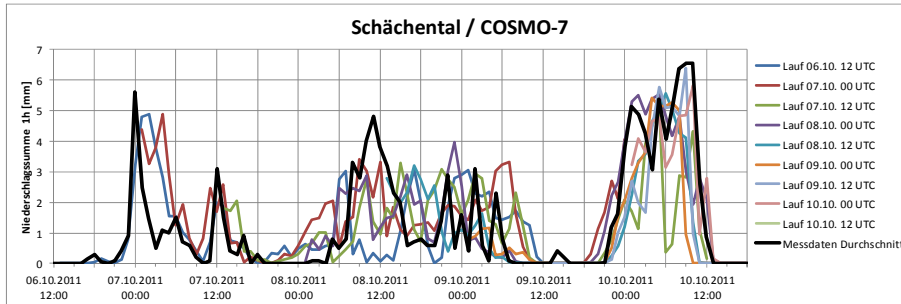
COSMO-2 für die Periode 6.10 bis 10.10.2011.



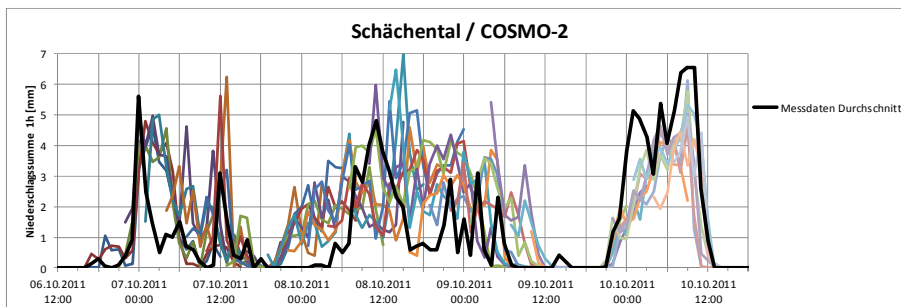
COSMO-LEPS Lauf vom 9.10.2011.



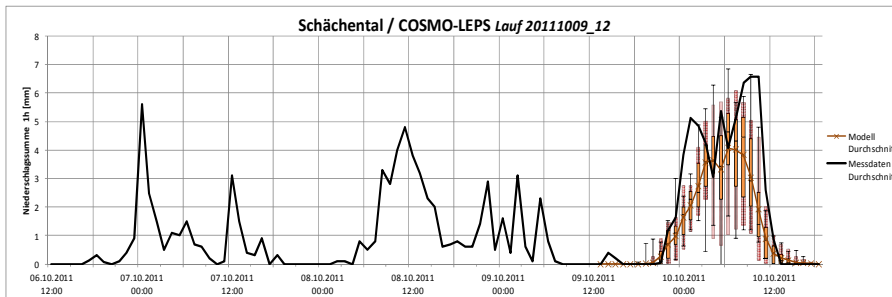
IFS für die Periode 6.10 bis 10.10.2011.



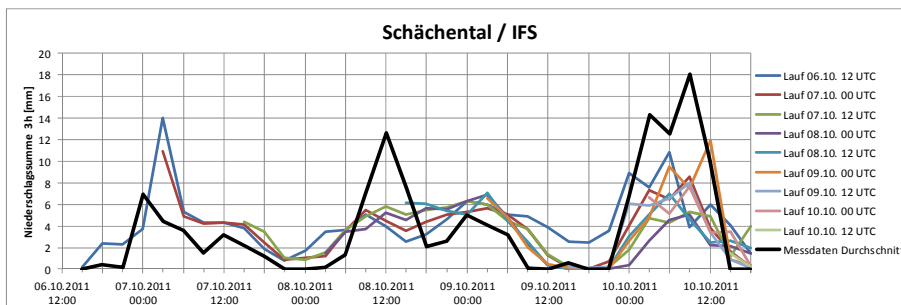
COSMO-7 für die Periode 6.10 bis 10.10.2011.



COSMO-2 für die Periode 6.10 bis 10.10.2011.

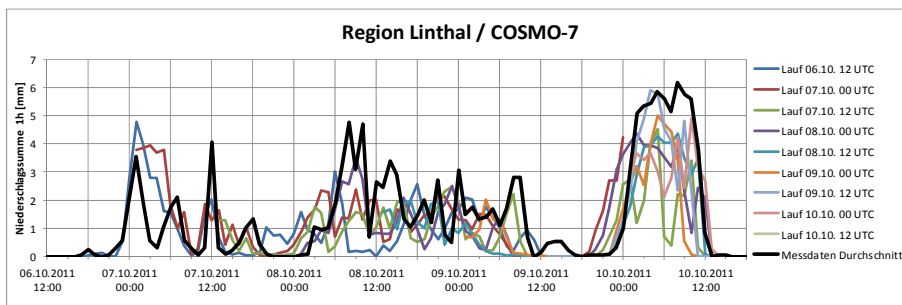


COSMO-LEPS Lauf vom 9.10.2011.

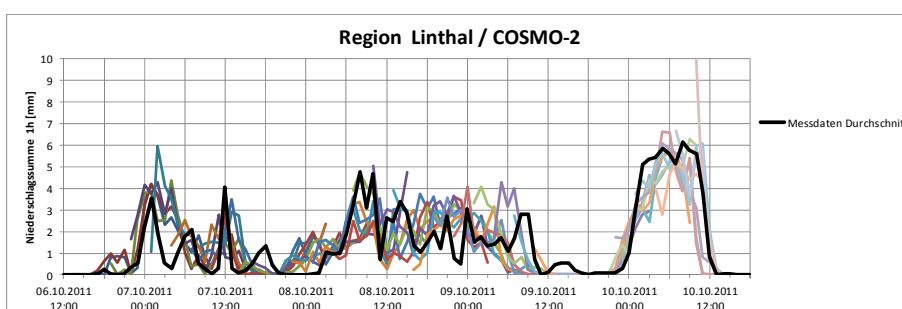


IFS für die Periode 6.10 bis 10.10.2011.

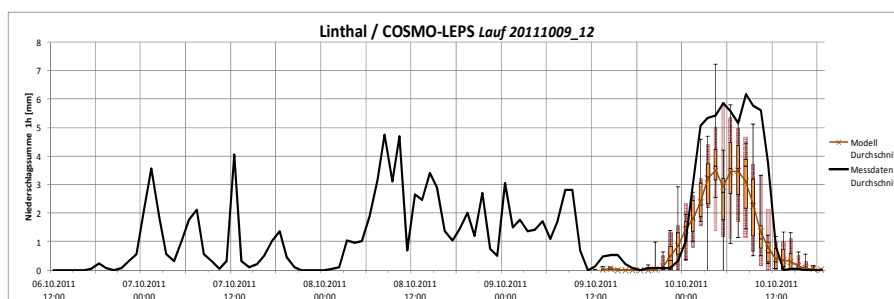
Anhang: Analysen zusätzlicher Stationen



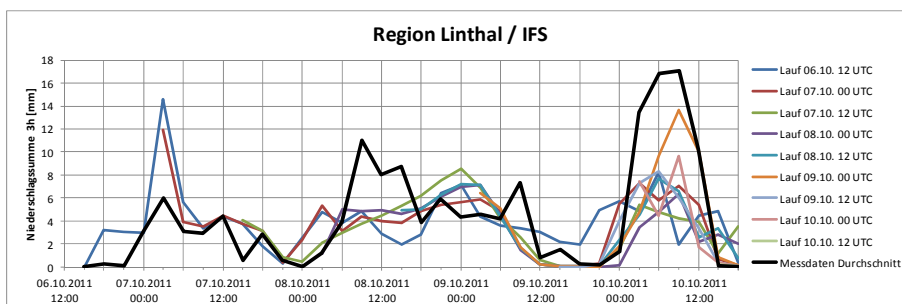
COSMO-7 für die Periode 6.10 bis 10.10.2011.



COSMO-2 für die Periode 6.10 bis 10.10.2011.



COSMO-LEPS Lauf vom 9.12.2011.



IFS für die Periode 6.10 bis 10.10.2011.

MeteoSchweiz
Krähbühlstrasse 58
CH-8044 Zürich

T +41 44 256 91 11
www.meteoschweiz.ch

MeteoSchweiz
Flugwetterzentrale
CH-8060 Zürich-Flughafen

T +41 43 816 20 10
www.meteoswiss.ch

MeteoSvizzera
Via ai Monti 146
CH-6605 Locarno Monti

T +41 91 756 23 11
www.meteosvizzera.ch

MétéoSuisse
7bis, av. de la Paix
CH-1211 Genève 2

T +41 22 716 28 28
www.meteosuisse.ch

MétéoSuisse
Chemin de l'Aérologie
CH-1530 Payerne

T +41 26 662 62 11
www.meteosuisse.ch