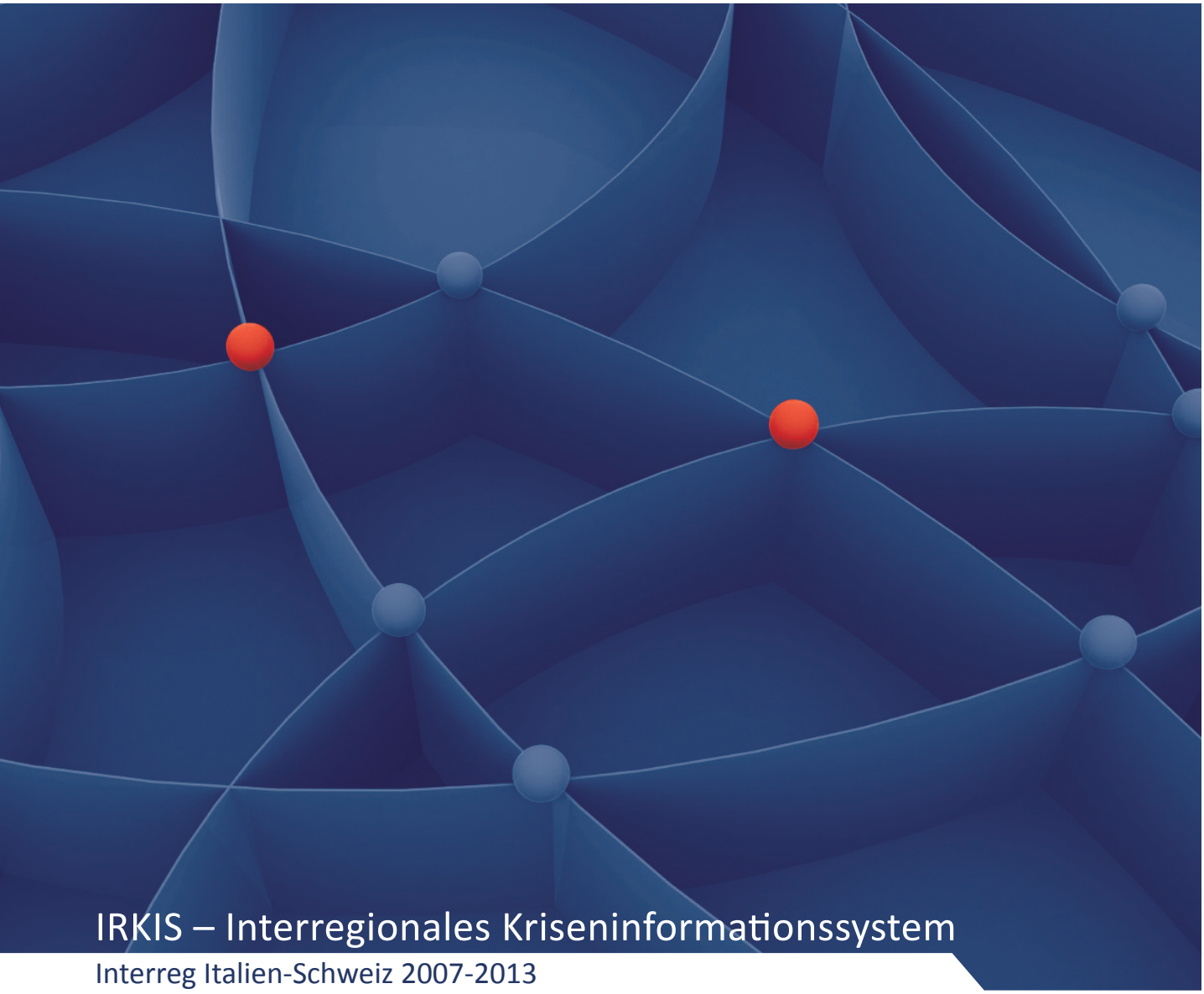
Programma di Cooperazione Transfrontaliera Italia-Svizzera 2007-2013
Le opportunità non hanno confini
FESR

INTERREG
ITALIA-SVIZZERA ITALIE-SUISSE ITALIEN-SCHWEIZ



IRKIS – Interregionales Kriseninformationssystem

Interreg Italien-Schweiz 2007-2013

2012

ZUSAMMENFASSENDER ENDBERICHT

AUTONOME PROVINZ BOZEN SÜDTIROL
PROVINCIA AUTONOMA DI BOLZANO ALTO ADIGE

KANTON GRAUBÜNDEN
AMT FÜR WALD UND NATURGEFAHREN

Herausgeber: Autonome Provinz Bozen Südtirol und Kanton Graubünden

Autonome Provinz Bozen Südtirol
Abteilung Brand- und Zivilschutz
Abteilungsdirektor Dr. Hanspeter Staffler, Drususallee 116, 39100 Bozen
hanspeter.staffler@provinz.bz.it, www.provinz.bz.it/zivilschutz

Kanton Graubünden, Amt für Wald und Naturgefahren
Fachbereich Naturgefahren
Christian Wilhelm, Loëstrasse 14, CH-7000 Chur
christian.wilhelm@awn.gr.ch, www.awn.gr.ch

© 2012

Redaktion
Andreas Zischg (Abenis Alpinexpert GmbH/Abenis AG)
a.zischg@abenis.it, www.abenis.it/www.abenis.ch

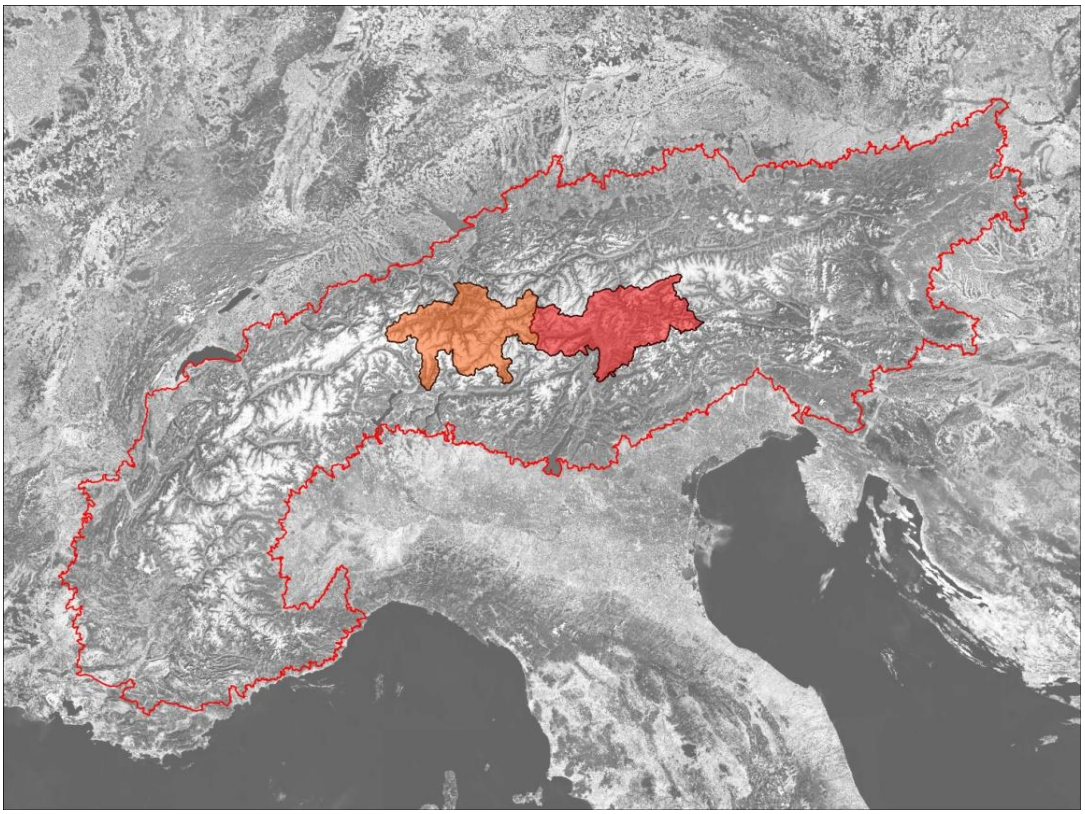
Grafik (Umschlag)
www.sonya-tschager.com

Nachdruck nur mit Zustimmung des Herausgebers gestattet.

IRKIS - Interregionales Kriseninformationssystem

Interreg Italien-Schweiz 2007-2013

Zusammenfassender Endbericht



Dieser Projektbericht basiert auf den Beiträgen von vielen Personen, eine Auflistung befindet sich in der Danksagung.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 6

2 Projektinhalt und Projektablauf 8

3 Monitoring- und Frühwarnsysteme 11

3.1 Analyse der Messnetze 11

3.2 Erweiterung der Messnetze und der Monitoring-Systeme 16

4 Informationsplattform 26

5 Entscheidungsgrundlagen für die Frühwarnung und Intervention (Ampelsystem) 29

5.1 Analyse der Benutzeranforderungen 29

5.2 Beurteilung der aktuellen Disposition für Hochwasserabfluss 31

5.3 Anpassung der Hochwasserprognosemodelle 40

5.4 Entscheidungshilfe für die Früherkennung von extremer Trockenheit 47

6 Frühwarnung und Notfallplanung auf Gemeindeebene 49

7 Schlussfolgerungen und Ausblick 52

8 Projektberichte 54

9 Weitere Literatur 57

10 Danksagung 58

Vorwort

Hochwasser und Murgänge führen in Südtirol und Graubünden immer wieder zu grossen Schäden. Mit dem Klimawandel dürften diese Schäden möglicherweise noch zunehmen. Damit verbunden sind grössere Unsicherheiten, wann und wo Ereignisse auftreten. Das bewährte Gefahrenmanagement mit Gefahrenzonen, Schutzbauten und Schutzwald muss mit organisatorischen Massnahmen verstärkt werden. Dazu zählen die möglichst frühzeitige Unwetterwarnung von Behörden, Einsatzkräften sowie Betreibern von kritischen Infrastrukturen und die angepasste Information der Bevölkerung.

Werden Starkniederschläge vorausgesagt, stellen sich bei den kantonalen bzw. Landesbehörden viele Fragen: Welche Folgen wird das prognostizierte Niederschlagsereignis haben? Kann es zu Hochwasser oder zur Auslösung von Murgängen kommen? Wie ist die Lage in den Einzugsgebieten? Ist die Schneedecke durchfeuchtet, wie ist der Bodenzustand? Müssen Warnungen ausgegeben werden und sind exponierte Verkehrswege zu sperren? Sind Gemeinden und Bevölkerung zu informieren?

Es werden heutzutage zwar viele Daten zu Wetter, Wasser, Boden, Schnee und Wind gemessen und deren Verbreitung wäre mit dem Internet beinah beliebig möglich. Damit einher geht auch eine grosse Erwartungshaltung der Öffentlichkeit, vor gefährlichen Ereignissen gewarnt zu werden. Daten allein beantworten die gestellten Fragen jedoch nicht, sondern es sind zusätzlich Informationen und Fachwissen erforderlich, um adäquate Entscheidungsgrundlagen bereitzustellen. Wir sind heute noch weit entfernt davon, Unwetterereignisse wie Hochwasser, Murgänge und Rutschungen zeitlich und örtlich ausreichend genau vorauszusagen. Diese offenen Fragen und Wissenslücken bestehen mehr oder weniger in allen Alpenregionen gleichermassen.

Aus diesen Gründen haben die Autonome Provinz Bozen Südtirol und der Kanton Graubünden das Projekt "IRKIS – Interregionales Kriseninformationssystem" im Rahmen des Förderprogramms Interreg Italien-Schweiz 2007-2013 gestartet. Ziele dieses Projekts waren einerseits die Analyse und die Erweiterung der Monitoring-Systeme und andererseits die Aufbereitung der vorhandenen Informationen für die Entscheidungsträger im Naturgefahrenmanagement. Das Projekt war sehr ambitiös formuliert, indem sowohl neuste Forschungsergebnisse einbezogen als auch die konkreten praktischen Umsetzungsprobleme vor Ort aufgegriffen wurden.

Das Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF in Davos wurde mit der wissenschaftlichen Bearbeitung verschiedener Fragestellungen beauftragt. Die Modellierungen zur Schneedecke und zur Bodenfeuchte konnten von Südtirol und Graubünden gleichermassen genutzt werden. Ebenfalls für beide Partner wurden vom Ingenieurbüro Geo7 Abflussprozesstypenkarten erarbeitet. Damit wurde ein reger Austausch aus praktischer und wissenschaftlicher Sicht gewährleistet. Das Ingenieurbüro Abenis hat schliesslich mit viel Erfahrungswissen die Arbeiten zwischen Südtirol, Graubünden und den Programmbehörden koordiniert und geleitet.

Das Projekt IRKIS ebnete in Südtirol den Weg zu einer ganzheitlichen Betrachtung von Naturgefahren. Der zeitliche und räumliche Systemzustand unseres Naturraumes stand im Mittelpunkt der Forschungstätigkeit mit dem Ziel, gefährliche hydrogeologische Prozesse so früh wie möglich zu erkennen. Zuverlässige Fühwarnung bewahrt unsere dynamische Gesellschaft vor Schäden, genauso wie Ampeln im hektischen Stadtverkehr die Verkehrsteilnehmer vor Schäden bewahren. Dafür hat IRKIS den Grundstein gelegt, worauf in den nächsten Jahren ein stabiles Gebäude der modernen Frühwarnung errichtet wird.

Für Graubünden konnte im Projekt IRKIS aufgezeigt werden, dass bei mehr als dreihundert Messtellen Daten zu Schnee, Niederschlag, Abfluss usw. von verschiedenen Akteuren gemessen werden. Der Zugriff auf alle Daten ist noch nicht gegeben und Lücken in den Messnetzen müssen in den nächsten Jahren geschlossen werden. Dank der Gemeinsamen Informationsplattform Naturgefahren GIN von Bund und Kantonen können auch die Daten von IRKIS zukünftig einfach und zeitgerecht den Gemeinden zur Verfügung gestellt werden. Im Dischma – einem Seitental von Davos – wurde vom SLF ein ausgedehntes Messsnetz vor Ort aufgebaut und betrieben, um die in IRKIS entwickelten Modelle zur Schneedecke, Bodenfeuchte und zum Abfluss verifizieren zu können. Modellierte und gemessene Daten werden den Sicherheitsverantwortlichen der Gemeinde Davos seit Frühjahr 2012 auf GIN zu Verfügung gestellt. Diese Informationen werden zukünftig im Hinblick auf notwendige Vorkehrungen in der Gemeinde bei Unwettern und grossen Schneeschmelzereignissen beurteilt und einbezogen. Was in kleineren Einzugsgebieten heute detailliert erfasst werden kann, sollte dereinst auch in grösseren Talschaften und für den ganzen Kanton greifbar sein.

Dank der bereits langjährigen Zusammenarbeit von Südtirol und Graubünden in mehreren Interreg - Projekten war die Zusammenarbeit sehr effizient und zielführend. Das nächste, gemeinsame Projekt ist bereits in den Startlöchern. Die Herausforderungen gegenüber Naturgefahren sind in Südtirol und Graubünden ähnlich und deren Bewältigung gelingt mit gemeinsamen Anstrengungen besser!

Hanspeter Staffler, Christian Wilhelm

1 Einleitung

Die Naturgefahrenereignisse der letzten Jahre haben einerseits den Erfolg des Naturgefahrenmanagements bei der Verhinderung von Schäden durch die präventiven Massnahmen aufgezeigt, andererseits aber auch auf erforderliche Massnahmen zur Optimierung des Risikomanagements hingewiesen. Die dringendsten Aufgaben in der Optimierung des Risikomanagements zum Zeitpunkt des Projektstarts waren die Verbesserung der Frühwarnung, die Vernetzung der lokalen, regionalen und nationalen Führungsstäbe und Einsatzkräfte, die Optimierung der Einsätze während und nach Extremereignissen und die Verbesserung der Notfall- und Einsatzplanung.

Die Erfahrungen der letzten Jahre in der Autonomen Provinz Bozen Südtirol und im Kanton Graubünden zeigten die grosse Bedeutung der Frühwarnung und der Lagebeurteilung vor und während eines extremen Niederschlagsereignisses. Je nach aktuellem Zustand der Einzugsgebiete bzw. spezifischer Umweltparameter wie der Füllungsgrad der Bodenwasserspeicher, die Höhe und der Feuchtigkeitsgrad der Schneedecke, die aktuelle Vegetationsbedeckung und die Bodentemperatur kann ein Niederschlagsereignis mehr oder weniger gravierende Auswirkungen auf die Naturgefahren wie Hochwasser, Murgänge und Rutschungen haben.

Um die Notfallplanung und die Interventionen der Sicherheitskräfte im Ereignisfall zu optimieren, sind den Einsatzkräften alle Informationen zur Verfügung zu stellen und aufzubereiten. Dafür sind funktionierende Frühwarnsysteme erforderlich und im Krisenfall muss eine rasche und sichere Informationsaufbereitung für Entscheidungsträger gewährleistet sein. Den Führungsebenen auf kantonaler Ebene bzw. auf Landesebene war es zum Zeitpunkt des Projektstarts im März 2009 noch nicht möglich, rasch einen Überblick über den aktuellen Systemzustand in den Einzugsgebieten im Kanton bzw. im Land zu verschaffen. Trotz der Vielfalt an gemessenen Daten war es nicht möglich, den Umweltzustand zum Zeitpunkt des Eintreffens einer Unwetterwarnung von Seiten der Meteodienste zu beschreiben und zu beurteilen, um darauf aufbauend die Folgen des prognostizierten Niederschlagsereignisses besser abschätzen zu können.

Projektziele

Um dieses Manko zu beheben, wurde das Projekt "IRKIS – Interregionales Kriseninformationssystem" gestartet. Da sowohl in Südtirol als auch in Graubünden parallel an einer Lösung für die oben beschriebenen Probleme gearbeitet wurde, bot es sich an ein gemeinsames Projekt im Rahmen des Förderprogramms Interreg 2007-2013 Italien-Schweiz zu initiieren. Das Projekt wurde von der Abteilung Brand- und Zivilschutz der Autonomen Provinz Bozen Südtirol und vom Amt für Wald und Naturgefahren des Kantons Graubünden initiiert und getragen. Durch die gemeinsame Bearbeitung der Fragestellung sollten mögliche Synergien ausgeschöpft werden.

Das gemeinsame Projekt sollte die Grundlagen für die Beurteilung der unwetterrelevanten Information vor und während eines Extremereignisses ausbauen und verbessern und diese für die Ereignisbewältigung auf verschiedenen administrativen Stufen aufbereiten. Neben der Verbesserung der Informationssysteme sollten Entwicklungs- und Forschungsarbeiten angestossen werden, um die nächste Generation von operationellen Frühwarnsystemen vorzubereiten. An konkreten Beispielen sollen Interventionsmassnahmen geplant und umgesetzt werden. Damit sollten den verantwortlichen Institutionen auf der zuständigen administrativen Ebene Kenntnisse und Instrumente zur Verfügung gestellt werden, die sie bei ihrer Arbeit im Ereignisfall unterstützen.

2 Projektinhalt und Projektablauf

Der Projektablauf wurde nach den in der Einführung erwähnten Projektzielen gegliedert. Die Projektaktivitäten wurden in fünf Arbeitspakete aufgeteilt. Die Arbeitspakete wurden von beiden Partnern durchgeführt, wobei auf die jeweiligen Rahmenbedingungen sowie auf die vorhandenen Vorarbeiten Rücksicht genommen werden musste. Einige Entwicklungsvorhaben wurden von beiden Projektpartnern gemeinsam finanziert. Im nachfolgenden werden die Arbeitspakete kurz beschrieben.

Arbeitspaket WP1: Monitoring- und Frühwarnsysteme

In alpinen Gebieten sind aufgrund der komplexen Topographie und der hohen Abflussgeschwindigkeiten bei Hochwasserereignissen die Zeiten für die Frühwarnung sehr kurz. Die damit verbundenen kurzen Reaktionszeiten stellen für ein angemessenes Eingreifen im Ereignisfall eine grosse Herausforderung dar. Mit der Klimaänderung sind zudem intensivere und häufigere Ereignisse zu erwarten. Weil die Warnung vor Hochwasser- und Murganggefahren in kleinen Einzugsgebieten aufgrund der Kleinräumigkeit von meteorologischen Phänomenen wie z.B. Gewitterzellen und aufgrund der Schwierigkeiten bei der Abflussprognose derzeit sehr schwierig ist, ist die laufende Beobachtung des Umweltzustands und der Disposition für erhöhten Oberflächenabfluss ein zentraler Bestandteil von Frühwarnsystemen in Gebirgseinzugsgebieten. Eine Ergänzung der bestehenden Umweltbeobachtungssysteme im Hinblick auf eine Beschreibung und Bewertung des Systemzustandes in den Einzugsgebieten ist eine Voraussetzung für eine verbesserte Abschätzung der möglichen Folgen des vorhergesagten Niederschlagsereignisses.

Das Hauptziel dieses Arbeitspaketes war die **Verbesserung und Ergänzung der bestehenden Systeme zur Umweltbeobachtung**, um eine Bewertung der aktuellen Disposition für Hochwasserereignisse zu ermöglichen.

Als Basis für alle weiteren Projektschritte wurden die bestehenden Messnetze, die sich für das Umweltmonitoring und die Frühwarnung bei möglichen Überschwemmungsereignissen oder sonstigen Umweltereignissen eignen, analysiert und qualitativ bewertet. In einem weiteren Schritt wurden neue Sensoren zur Messung von bestimmten Umweltparametern getestet und evaluiert und ein möglicher Ausbau der Messnetze geprüft. Besonderer Schwerpunkt wurde hierbei auf das Monitoring der Bodenfeuchtigkeit und der Schneedecke als eine Grundlage für die Vorhersage von hohen Gebietsabflüssen oder von Trockenheit gelegt. Dazu wurde die Eignung von Fernerkundungsdaten für die temporäre Entwicklung der Schneedecke und für die Bestimmung von Bodenfeuchte und -temperatur untersucht und mit in-situ Messungen verglichen. Schliesslich wurde ein Weg für die Einbindung dieser Daten in die bestehenden Monitoring- und Frühwarnsysteme aufgezeigt.

Arbeitspaket WP2: Informationsplattform

Vor und während eines Unwetterereignisses sind verschiedene Informationen etwa zur Wetterentwicklung, zur Situationsanalyse, zum Niederschlags- und Abflussgeschehen, zu den Prognosen, zu bereits entstandenen Schäden etc. gefragt. Diese Angaben sollten zudem einfach und rasch auf einer einzigen Informationsplattform verfügbar sein.

Das Hauptziel dieses Arbeitspaketes war die **benutzergerechte Aufbereitung aller für die Beurteilung der Lage und des Zustandes der Einzugsgebiete notwendigen Informationen**.

Als erster Schritt in diesem Arbeitspaket wurden die bestehenden Datenbanken für Monitoring- und Frühwarnsysteme im Hinblick auf eine Einbindung in die Informationsplattform bzw. in das Kriseninformationssystem überprüft und wo notwendig an die Projektziele angepasst.

Arbeitspaket WP3: Entscheidungsgrundlagen für die Frühwarnung und Intervention

Ausgangspunkt jeder Frühwarnung für niederschlagsbedingte Naturgefahren und Trockenheit ist die Meteoprognose. Die heute verfügbaren Hochwasserprognosemodelle können die Niederschlagsprognosen in die Berechnungen aufnehmen und aufzeigen, zu welchen Abflüssen der prognostizierte Niederschlag führen kann. Sie erfordern aber eine Kalibrierung für jedes Einzugsgebiet und sind für kleine Gebirgseinzugsgebiete nur bedingt geeignet. Wie sich ein vorhergesagtes Niederschlagsereignis bzw. eine vorhergesagte Trockenperiode auf das Abflussgeschehen auswirkt, hängt von vielen Faktoren und vor allem vom aktuellen Umweltzustand der hydrologischen Einzugsgebiete ab. Neuere Hochwasserprognosemodelle können den aktuellen Zustand einzelner Kenngrössen zum Umweltzustand der Einzugsgebiete berücksichtigen und damit die Aussagekraft und Qualität der Modellkette von der Wetterprognose über die Abflussprognose bis hin zur Folgenabschätzung als Basis für die Einsatzvorbereitung erheblich steigern. In ausgewählten Teilgebieten werden diese Modelle eingesetzt, um auf diese Weise bessere Hinweise zum möglichen Ereignisablauf zu erhalten. In kleineren Einzugsgebieten entspricht die räumliche Auflösung der Wettervorhersagen jedoch noch nicht dem Anspruch einer lokalen Entscheidungsfindung. Zudem sind die meteorologischen Prozesse in alpinen Einzugsgebieten so kleinräumig, dass ihr Auftreten und ihr Ablauf räumlich nicht genau abgegrenzt werden kann. Aus diesen Gründen ist in diesen eine detaillierte Abflussprognose, v.a. bei sommerlichen Gewitterniederschlägen nur bedingt möglich. In diesen Fällen kann nur die Kenntnis der aktuellen Zustände der Einzugsgebiete und eine Kenntnis des aktuellen Reaktionsverhaltens der Einzugsgebiete auf die prognostizierte Wetterlage eine Verbesserung der Frühwarnung ermöglichen.

Das Hauptziel dieses Arbeitspaketes war die Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems, das die **aktuelle Disposition für Hochwasserabflüsse in den Einzugsgebieten** auf Basis der gemessenen Daten beschreiben und klassifizieren kann. Damit soll die Abschätzung der Folgen eines vorhergesagten Niederschlagsereignisses erleichtert werden.

Als erster Schritt wurde ein Konzept eines Verfahrens zur Bewertung der Disposition von Einzugsgebieten für Hochwasserabflüsse erarbeitet. In mehreren Workshops wurden das vorgeschlagene Konzept diskutiert und die Rahmenbedingungen für die Entwicklung einer solchen Entscheidungshilfe

erarbeitet. Es wurden die zu berücksichtigenden Umweltparameter ausgewählt, die Grenzen zu den Meteoprognosen und die Nutzergruppe definiert, sowie die anvisierte räumliche und zeitliche Auflösung festgelegt. In einem anschliessenden Pilotprojekt wurde das Konzept umgesetzt. Weiters wurden die bestehenden Modelle zur Hochwasserprognose dahingehend erweitert, dass die Monitoring-Daten zum aktuellen Systemzustand der Einzugsgebiete berücksichtigt werden können. Es wurde insbesondere getestet, inwieweit der Einbezug dieser zusätzlichen Systemzustandsdaten (v.a. Schneedecke, Bodenfeuchte) die Prognose verbessern kann. Im Rahmen der Weiterentwicklung der Hochwasserprognosemodelle wurden an ausgewählten Stellen die Durchflusskapazitäten der Fliessgewässer ermittelt. Durch den Vergleich von prognostizierten Abflussmengen mit der jeweiligen Abflusskapazität können Vorhersagen von möglichen Ausuferungen erstellt werden. In Graubünden wurde ein Abflussprognosemodell in sehr kleinen Einzugsgebieten getestet, um später als Grundlage für das Frühwarnsystem Unwetter der Gemeinde Davos dienen zu können.

Arbeitspaket WP4: Notfallpläne und Interventionskarten in Pilotregionen

Schadenprävention und -verminderung auf lokaler Ebene (Gemeinde) sind Aufgaben der Gemeindebehörden und Feuerwehren. Je nach Ereignisgrösse werden diese von regionalen bzw. kantonalen Fachstellen, vom nationalen Zivilschutz oder von der Armee unterstützt. Die Intervention im Ereignisfall kann wesentlich wirkungsvoller gestaltet werden, wenn sie bereits im Voraus geplant, institutionalisiert und geübt wird und wenn im Ereignisfall die verschiedenen Informationen laufend, rechtzeitig und situationsgerecht in Massnahmen umgesetzt werden können. Interventionskarten als Teil der Zivilschutzpläne oder vorsorglichen Einsatzpläne können die lokalen Wehrdienste und Behörden bei der Bewältigung von Unwetterereignissen unterstützen. Aufbauend auf die Gefahrenkarten liefern sie konkrete Aufgaben zur Gefährdung und zu möglichen Eingriffen.

Das Hauptziel dieses Arbeitspaketes war die **Integration von Interventionskarten und Frühwarnsystemen**.

In Südtirol und Graubünden wurde diskutiert, wie die Interventionspläne der Gemeinden mit den sich ständig verbessernden Frühwarnsystemen für niederschlagsbedingte Naturgefahren zusammengebracht werden können. Es wurde evaluiert, welchen Nutzen die verbesserten Frühwarnsysteme und eine Entscheidungshilfe zur Bewertung der aktuellen Disposition von Einzugsgebieten für die lokalen Einsatzleitungen haben können. Das Projekt war Auslöser für die Erstellung von mehreren Interventionskarten.

Arbeitspaket WP5: Projektmanagement und Öffentlichkeitsarbeit

Die wissenschaftlich-technischen Arbeitspakete wurden durch ein Projektmanagement unterstützt. Die Projektergebnisse wurden an die Öffentlichkeit weitergegeben. Im Frühjahr 2012 hat in Davos eine Medieninformation stattgefunden. Es wurden mehrere Artikel über das Projekt in Zeitschriften publiziert.

3 Monitoring- und Frühwarnsysteme

Als erster Schritt und als Grundlage für alle weiteren Arbeitsschritte im Projekt wurden die bestehenden meteorologischen und hydrologischen Messnetze und Monitoring-Systeme erhoben und unter dem Aspekt auf die Einbindung in das geplante Frühwarnsystem evaluiert.

3.1 Analyse der Messnetze

Als Erstes wurden die Metadaten zu den gesamten hydrologischen und meteorologischen Messstationen im Projektgebiet zusammengetragen. Dem Projektziel entsprechend wurde der Schwerpunkt bei der Analyse des Messnetzes auf Stationen zur Messung von Niederschlag, Schneehöhe, Abfluss und Bodenfeuchte gelegt. Weitere Kriterien bei der Erfassung der Stationen waren die Umweltparameter wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wind und Globalstrahlung. Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser Analyse kurz zusammengefasst. Es wird hauptsächlich auf die Parameter Niederschlag, Schneehöhe und Abfluss eingegangen. Bei der Auflistung der Stationsdaten wurde besonders auf die Erhebung des Betreibers der Station und der Messfrequenz bzw. der Übermittlungsfrequenz Wert gelegt.

Eine detaillierte Beschreibung der Ergebnisse findet sich in den Projektberichten "IRKIS WP A, Deliverable A1: Übersicht Messnetze GR (Version 2)" (Marty & Henzen 2011) und "Zusammenfassender Bericht zur Analyse und Bewertung der bestehenden Messnetze in Südtirol" (Zischg et al. 2010).

3.1.1 Niederschlag

In **Südtirol** ist der Wetterdienst des Landes für die Niederschlagsmessung zuständig. Ende 2010 umfasst das Niederschlagsmessnetz 79 Wetterstationen, die Stationen werden seit 2007 laufend aufgerüstet. 2011 wurden 9 Stationen installiert. Das Ziel ist ein Gesamtbestand von 69 automatischen Stationen mit einem Abrufintervall von 10 Minuten.

In **Graubünden** wird der Niederschlag von mehreren Betreibern gemessen. Die drei wichtigsten Betreiber des Niederschlagsmessnetzes sind die MeteoSchweiz (SwissMetNet SMN und Klimamessnetz KLIMA), das SLF und Meteomedia. Zudem unterhält das Bundesamt für Landwirtschaft Stationen im Kanton (Agrometeo). An 12 SMN-Stationen wird der Niederschlag mittels geheizten Pluviometern gemessen, die Daten werden alle 10 Minuten übermittelt. Von den 6 KLIMA-Stationen stehen nur täglich Daten zur Verfügung. An den 55 NIME-Stationen werden klassische Niederschlagssammler ohne Heizung eingesetzt, die Daten werden durch den Beobachter übermittelt. Die Datenübertragung der NIME-Stationen wird derzeit so eingerichtet, dass sie zumindest täglich erfolgen kann. Das SLF betreibt das Interkantonale Mess- und Informationssystem IMIS, in Graubünden sind 25 IMIS-Stationen mit einem Pluviometer ausgerüstet, die Datenübertragung erfolgt stündlich. Zusätzlich betreibt der private Wetterdienst Meteomedia ein Netz von 46 automatischen Stationen. Das Mess-

netz der automatischen Stationen wird derzeit von MeteoSchweiz im Rahmen von OWARNA (ein Projekt des Bundes zur Optimierung von Warnung und Alarmierung) ausgebaut, v.a. in den Warnregionen ohne zufriedenstellende Abdeckung werden bestehende Stationen umgerüstet bzw. neu gebaut.

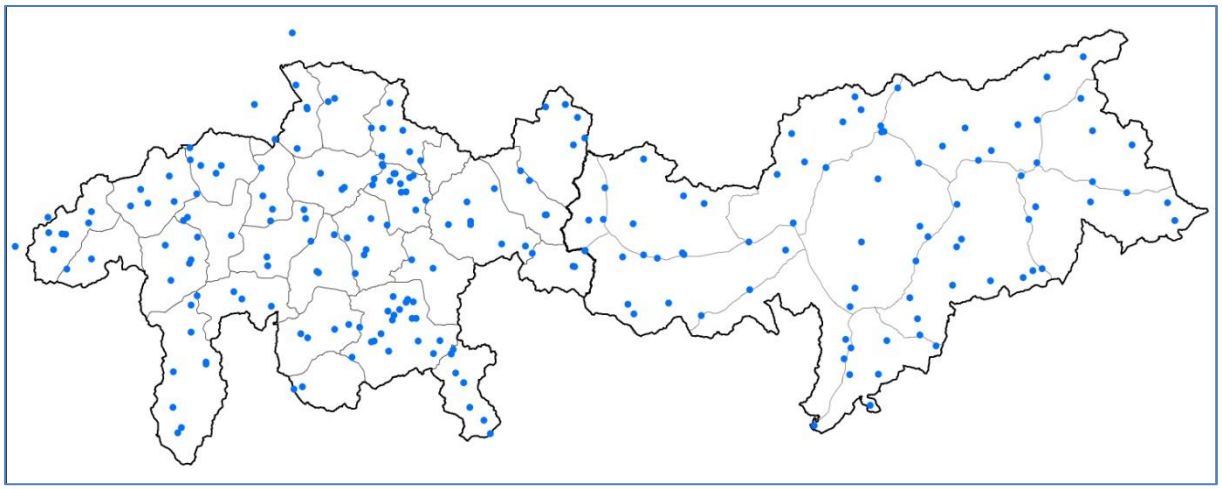


Abbildung 1: Niederschlagsmessstationen im Projektgebiet. Quelle: Marty & Henzen (2011), Zischg et al. (2010).

Das Wetterradarmessnetz in der Schweiz wird derzeit erneuert. Nach MeteoSchweiz soll einer von den beiden zusätzlichen Standorten in Graubünden sein, der genaue Standort ist noch nicht definiert. Nach dieser Erweiterung wird der östliche Teil von Graubünden auch besser als bisher abgedeckt sein. Durch diesen neuen Standort ergeben sich auch Synergien mit Südtirol, da dort der nordwestliche an die Schweiz angrenzende Landesteil vom Niederschlagsradar am Gantkofel (Mendelpass) nicht gut abgedeckt ist.

3.1.2 Abfluss und Wasserstand

In **Südtirol** werden die Abflussmessungen vom Hydrographischen Amt des Landes durchgeführt. Das Messnetz besteht aus 51 Pegelstationen (Stand 2010), wovon 23 eine strategische Bedeutung für den Hochwasserwarndienst haben und eine automatische Datenübermittlung alle 10 bzw. 30 Minuten gewährleisten. Der Rest sind Abflussmessstationen von kleineren Einzugsgebieten und mobile Stationen mit Projektcharakter. Im Rahmen des Projektes IRKIS wurden die Schlüsselkurven der automatisch gemessenen Stationen neu geeicht (Vignoli 2010). Eine Optimierung des Messnetzes ist anvisiert. Für die Erweiterung des Messnetzes ist eine Installation von 4 neuen Standorten als prioritärer Handlungsbedarf erkannt worden.

In **Graubünden** werden Abfluss- und Wasserstandsmessungen von der Abteilung Hydrologie des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), vom Amt für Umwelt (ANU) des Kantons Graubünden sowie von den zahlreichen Kraftwerksgesellschaften durchgeführt. Das Basismessnetz des BAFU im Kanton Graubünden umfasst heute 27 Messstationen an Oberflächengewässern. Neben dem Abfluss in den Flüssen wird zusätzlich an den drei grossen Engadiner Seen der Wasserstand gemessen. Der Kanton betreibt 16 Abflussmessstationen, wovon momentan 11 in Betrieb sind. Zusätzlich zu den oben be-

schriebenen Niederschlagsmessnetzes betreiben die Kraftwerke in manchen Fällen Niederschlagssensoren zur Messung der Zuflüsse zu den Stauseen und Abflussmessungen aus den Stauseen. Im Rahmen der Internationalen Regierungs-Kommission Alpenrhein (IRKA) finden Gespräche über ein koordiniertes Vorgehen zur Einbindung dieser Daten in das Messnetz statt. Es ist noch zu prüfen, ob sich der Kanton Graubünden auf das interkantonale bzw. internationale Vorgehen abstützen soll oder ob er selbst aktiv werden soll, um diese Abflussmessungen in das Messnetz einbinden zu können.

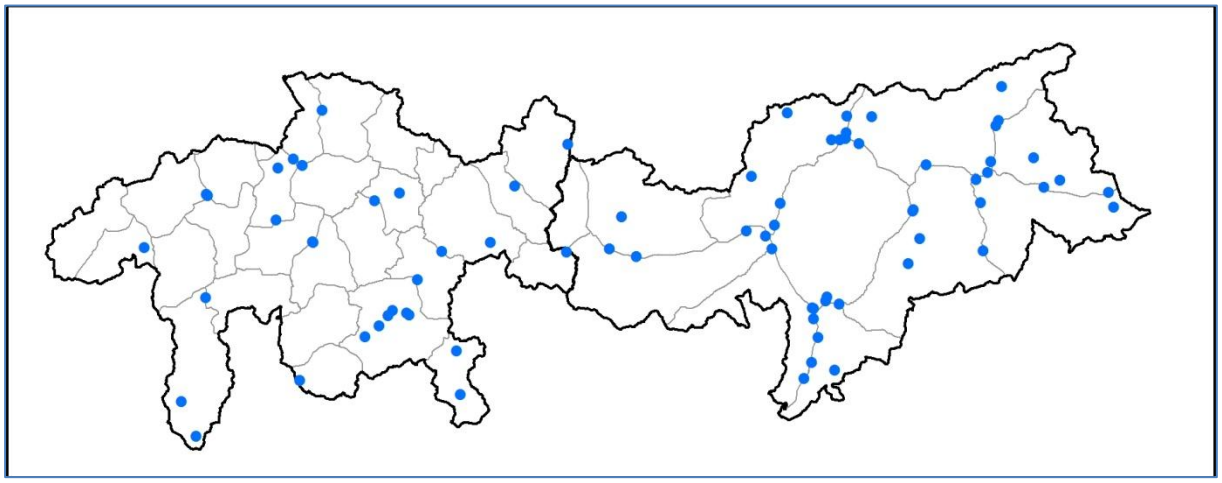


Abbildung 2: Abflussmessstationen im Projektgebiet. Quelle: Marty & Henzen (2011), Zischg et al. (2010).

3.1.3 Schneehöhe und Wasseräquivalent

In **Südtirol** umfasst das Messnetz 16 Stationen, an denen die Schneehöhe und die Windgeschwindigkeit automatisch gemessen werden. Dazu kommen noch 8 Höhenwindstationen. An den Beobachterstandorten wird die Schneedichte gemessen und täglich übermittelt. Die AINEVA (Associazione Italiana Neve e Valanghe) hat im Auftrag der nationalen Zivilschutzbehörde eine Evaluation aller Schneemessnetze in Italien durchgeführt. Diese Evaluation und die Arbeiten zur Assimilation der Daten zur Schneedecke zu Schneewasseräquivalentkarten ergaben, dass insbesondere die tieferen Lagen und z.T. die die höchsten Lagen nicht dicht genug abgedeckt sind (Jonas 2010). Eine Überlagerung der Stationen mit den Zonen des Lawinenlageberichts zeigt, dass nicht in jeder Zone mindestens eine automatische Station lokalisiert ist. In den Zonen "Westliche Dolomiten" und "Nonsberger Alpen" liegen keine automatische Schneemessstationen. Ausserdem hatte der Lawinenwarndienst in Südtirol zu Projektbeginn noch kein Instrument für die Erstellung von Karten zur räumlichen Verbreitung der Schneedecke und des Wasseräquivalents.

Im Kanton **Graubünden** existieren derzeit 48 automatische Schneestationen. An 55 Stationen (MeteoSchweiz 11, SLF 43) wird zudem im Minimum 1-mal täglich die Schneehöhe gemessen, wobei deren Anzahl in Zukunft leicht auf 52 zurückgehen wird. Die für die Modellierung wichtige Globalstrahlung wird an gut der Hälfte aller Stationen gemessen. Die langwellige Einstrahlung wird nur an 3 Standorten gemessen.

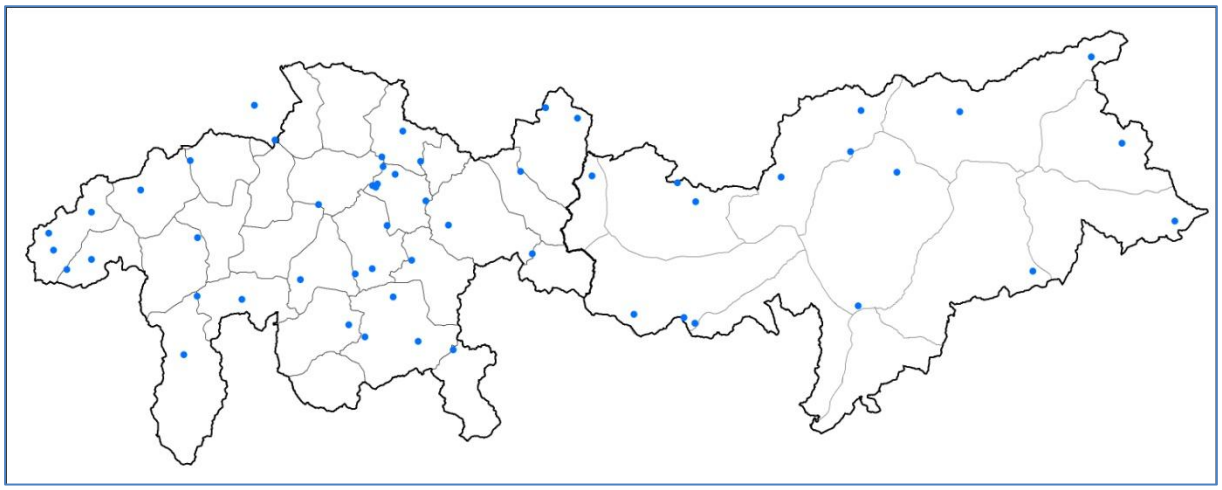


Abbildung 3: Automatische Schneemessstationen im Projektgebiet. Quelle: Marty & Henzen (2011), Zischg et al. (2010).

3.1.4 Bodenfeuchte

Mit operationellen Messungen der Bodenfeuchte wurde erst vor einigen Jahren begonnen. Die Initiativen zur Einrichtung eines Bodenfeuchtemessnetzes kamen hauptsächlich aus der Landwirtschaft. Aus der Sicht der Hochwasserprognose ist der Zustand der Böden - der Sättigungsgrad bzw. der Füllungsgrad der Bodenwasserspeicher – ebenso von Bedeutung. Je nach Fragestellung wird die Bodenfeuchte eher über die Saugspannung mit Tensiometern gemessen (Landwirtschaft) oder über die elektrische Leitfähigkeit mittels FDR/TDR-Sensoren (Frequency Domain Reflectometry, Time Domain Reflectometry). Im Rahmen von IRKIS wurden die bestehenden Bodenfeuchtemessungen in beiden Regionen erhoben und neue Standorte mit Sensoren ausgerüstet.

In **Südtirol** gibt es 19 Standorte, an denen das land- und forstwirtschaftliche Versuchszentrum Laimburg und der Beratungsring für Obst- und Weinbau Lana die Bodenfeuchte mittels Tensiometern gemessen hat. Die meisten Datenreihen haben eine Länge von ca. 5 Jahren. Die Europäische Akademie Bozen EURAC hat im Rahmen des Projektes "Klimawandel Südtirol" an 16 Standorten Bodenfeuchtemessungen mittels FDR Sensoren durchgeführt. Zusätzlich wurden an drei Standorten der Schneemessstationen des Lawinenwarndienstes über 2 Jahre die Bodenfeuchte gemessen (Busetto 2012).

Der Kanton **Graubünden** entwickelt derzeit zusammen mit anderen Ostschweizer Kantonen ein Bodenfeuchte-Messnetz für die Landwirtschaft (www.bodenfeuchte-ostschweiz.ch). An 6 Standorten wird die Saugspannung im Oberboden und Unterboden gemessen, die Daten sind online verfügbar. Im Rahmen von Swiss Experiment (Interdisciplinary Environmental Research), kurz SwissEx, werden vom SLF Klimastationen zu wissenschaftlichen Zwecken betrieben, welche auf der Plattform SwissEx (www.swiss-experiment.ch) aufgeschaltet sind. An 7 Stationen wird die Bodenfeuchte gemessen.

Daneben wird auch an der IMIS-Station Davos Flüelastrasse die Bodenfeuchte gemessen. Im Rahmen des Forschungsprojektes SwissMex (www.iac.ethz.ch/groups/seneviratne/research/SwissSMEX) erarbeiten die ETH Zürich, die Agroscope ART, die MeteoSchweiz und die WSL zusammen ein Bodenfeuchte-Messnetz für die Schweiz. Dieses Messnetz basiert auf TDR-Sensoren (Time Domain Reflectometry).

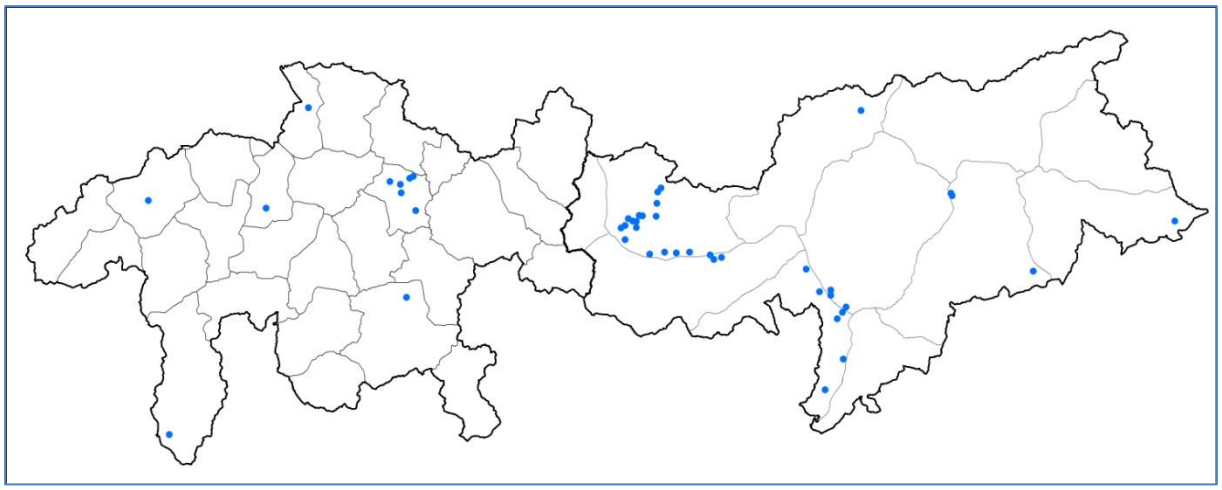


Abbildung 4: Standorte mit Bodenfeuchtemessungen im Projektgebiet. Quelle: Marty & Henzen (2011), Busetto (2012). Die Abbildung zeigt, dass die Messstandorte ungleich verteilt sind.

3.2 Erweiterung der Messnetze und der Monitoring-Systeme

Die Analyse der Messsysteme einerseits und die Anforderungen an ein Beurteilungsschema zur aktuellen Disposition der alpinen Einzugsgebiete für Hochwasser zeigen einen Bedarf an Information zur Schneedecke, zum Schneewasseräquivalent und zum Zustand der Bodenwasserspeicher auf. Im Folgenden werden die im Rahmen des Projektes IRKIS durchgeführten Untersuchungen zur Erweiterung der Monitoring-Systeme beschrieben.

3.2.1 Fazit zur Erweiterung der Messnetze

In **Südtirol** ist kurzfristig eine genügende Dichte an Meteostationen vorhanden, insbesondere nach Umsetzung der geplanten Erweiterungen. Die Daten sind in Abständen von 10 bis 30 Minuten abrufbar und fliessen in eine einheitliche Datenbank ein. Ein Optimierungsbedarf besteht bei den Schneedaten, insbesondere in den tieferen und in den höchsten Lagen sowie in den zentralen und südöstlichen Landesteilen. Die Vielfalt an Bodenfeuchtemessungen sollte in einen einheitlichen Rahmen gebracht werden und der Datenzugriff- bzw. der Datenaustausch muss geklärt werden. Die im Rahmen des Projektes gemachten Erfahrungen mit den Bodenfeuchtemessungen zeigen ein grosses Potenzial für eine mittelfristige Einbindung dieses Umweltparameters in das Messnetz der Landesverwaltung auf. Die bisher fehlende Möglichkeit zur Erstellung von Karten zur räumlichen Verbreitung der Schneedecke und des Wasseräquivalents wurde gefüllt.

Der Kanton **Graubünden** ist kurzfristig ausreichend mit automatischen Messstationen für Niederschlag, Schnee und Abfluss abgedeckt, wobei die Daten auf unterschiedlichen Plattformen zur Verfügung stehen. Die Entwicklungen von GIN (Gemeinsame Informationsplattform Naturgefahren) und damit die Darstellung der wichtigsten Informationen auf einer Informationsplattform haben die Dateneinsichtnahme wesentlich erleichtert. Ausgehend von den geplanten Automatisierungen und Umrüstungen steigt die Anzahl der in GIN verfügbaren automatischen Niederschlagsstationen von 12 im Jahre 2011 auf 63 im Jahre 2013. Die Verteilung all dieser automatischen Stationen auf die verschiedenen Höhenstufen unterhalb 2700 m ist relativ regelmässig mit ca. 10-12 Stationen je 300 Höhenmeter. Mittel- und langfristig bestehen einige Ausbaumöglichkeiten und Optimierungen der bestehenden Niederschlagsstationen. 7 Warnregionen der MeteoSchweiz sind ungenügend abgedeckt, in diesen sind neue Stationen zu errichten. An 12 Standorten sind die automatischen Stationen zu ergänzen. Die Messfrequenz der IMIS- und ENET-Stationen kann bei Bedarf von 30 Minuten auf 10 Minuten verkleinert werden. Die 22 zu automatisierenden NIME-Stationen der MeteoSchweiz könnten bei Bedarf und entsprechender Finanzierungslage auch noch mit weiteren Messinstrumenten ergänzt werden, insbesondere im Hinblick auf die Bodenfeuchtemessungen. Die restlichen 23 auch in Zukunft noch manuell bedienten NIME-Stationen können automatisiert werden.

3.2.2 Monitoring der räumlich-zeitlichen Entwicklung der Schneedecke und des Schneewassergehalts

In der Schweiz erarbeitet das SLF regelmässig und flächendeckend Informationsgrundlagen für die Beurteilung der Schneedeckensituation. Neben den Produkten des Lawinenbulletins werden vermehrt auch Schneedaten für hydrologische Fragestellungen aufbereitet. Dies sind im Wesentlichen die Karten der Schneehöhe, der Neuschneehöhe und neuerdings auch des Schneewasseräquivalents (siehe Abb. 5).

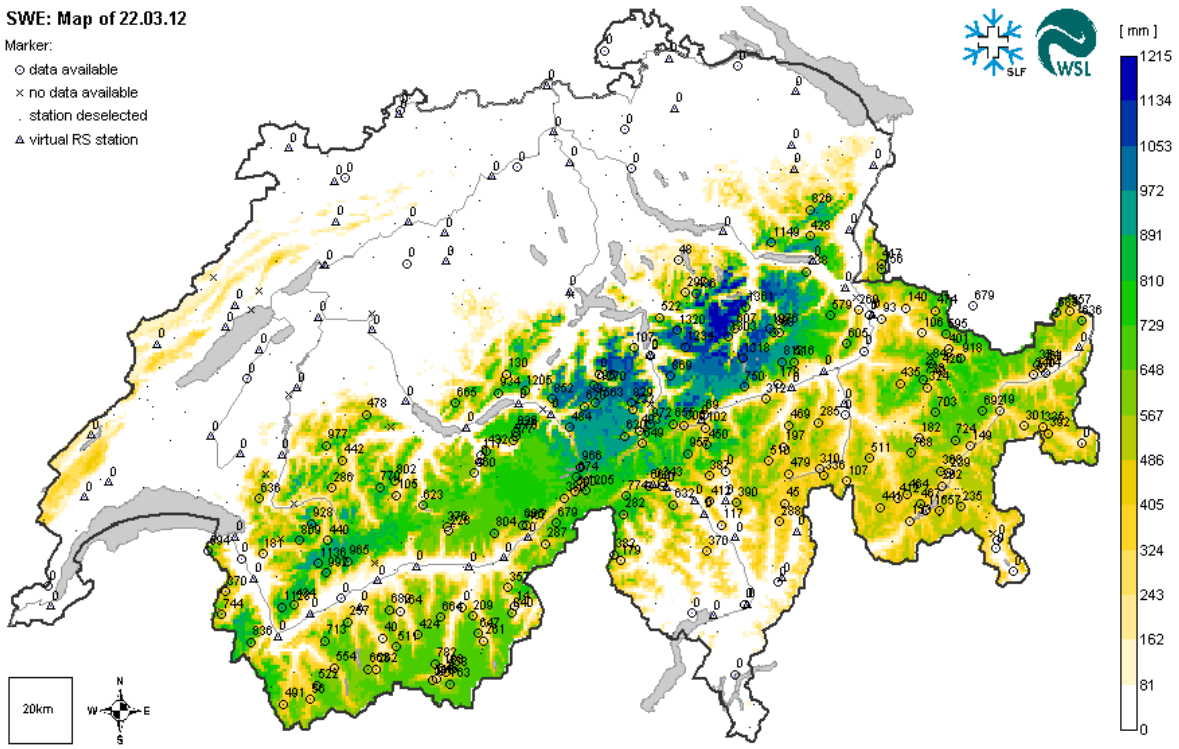


Abbildung 5: Karte des Schneewasseräquivalents in der Schweiz . Die Karte zeigt die räumliche Verteilung des in der Schneedecke gespeicherten Wasseräquivalents. Quelle: www.gin.admin.ch

Schneewasseräquivalentkarten in Südtirol

Der Lawinenwarndienst des Landes Südtirol verfügte zu Projektbeginn über keine routinetauglichen Instrumente und Methoden, um Schneewasseräquivalentkarten oder ähnliche Produkte zu erstellen. Im Rahmen des Projektes IRKIS wurde eine vergleichende Analyse der Methoden zur Erarbeitung von Schneehöhenkarten, Neuschneehöhenkarten und Schneewasseräquivalentkarten durchgeführt (Dall'Amico 2010). Im Rahmen dieses Arbeitsschrittes wurden die räumlichen Verteilungsmuster der Schneedecke über einen längeren Zeitraum beschrieben, um die Wahl der Methodik zu erleichtern. In der anschliessenden Diskussion stellte sich die Frage, ob die Erarbeitung der gewünschten Kartenprodukte eher auf eine Berechnung der Daten mithilfe eines physikalischen Modells und den ausreichend vorhandenen und verteilten Meteostationen basieren soll, oder ob die Kartenproduktion auf

ein Assimilationsverfahren mit den vorhandenen Daten der Schneemessstationen basieren soll. Schlussendlich hat man sich in Südtirol für die Anwendung des am SLF entwickelten Assimilationsverfahrens entschieden. Das SLF hat sich bereit erklärt, das Verfahren an die Situation in Südtirol anzupassen und eine Software für den Lawinenwarndienst zu programmieren, damit dieser auf Basis der Stationsdaten diese Karten in Eigenregie erstellen kann. Das Verfahren und die Anwendung in Südtirol werden in den Projektberichten Jonas (2010) und Magnusson (2011) beschrieben. Hier zeigte sich der Vorteil von Interreg-Projekten deutlich. Mit der Beauftragung des Forschungspartners SLF und dessen Bereitschaft zum kundenspezifischen Technologietransfer im Rahmen des Projektes IRKIS konnte sich der Projektpartner Südtirol viel Entwicklungsarbeit sparen.

Schneehöhen können relativ einfach, schnell und genau sowohl manuell als auch automatisch gemessen werden. Anders verhält es sich beim Schneewasseräquivalent. Die manuelle Bestimmung ist zeitaufwändig und relativ ungenau. Fix installierte Einrichtungen, wie etwa Schneekissen, ermöglichen heute automatische Messungen des Schneewasseräquivalents an fixen Stationsstandorten, aber der Aufwand liegt im Vergleich zu Schneehöhe-Sensoren deutlich höher und Fehlmessungen sind bei bestimmten Schneedeckeneigenschaften möglich (Jonas 2010). Einen guten Überblick über aktuelle Möglichkeiten der automatischen Bestimmung von SWE bieten Egli et al. (2009).

Die Berechnungen der Schneewasseräquivalentkarten in Südtirol basiert auf einem Schneedichtemodell, welches anhand von Daten aus der Schweiz kalibriert wurde (Jonas et al. 2009, Sturm et al. 2010). Erforderliche Eingangsdaten sind Schneehöhe, Datum der Messung, Lage der Messung. Das Modell hat den Vorteil, dass keinerlei meteorologische Informationen als Eingangsinformation benötigt werden. Dies hat einerseits eine gute Anwendbarkeit unter verschiedensten Randbedingungen zur Folge, andererseits können bei starken Abweichungen von normalen Witterungsverhältnissen systematische Fehler entstehen. Mittels räumlichen Interpolationsverfahren und einer Umrechnung der Daten auf eine Bezugshöhe (Detrending) werden die Schneehöhendaten an den Stationen auf die Fläche interpoliert und in Schneewasseräquivalenten umgerechnet (für Details siehe Jonas 2010). Die Stationsdichte im Untersuchungsgebiet ergibt, wie komplex das Detrending-Verfahren gestaltet werden kann.

Die Informationen zum Stationsnetz in Bozen legen nahe, dass Aussagen zu Höhenlagen oberhalb von 2100 kaum durch Daten abgedeckt sind, die Stationsdichte unterhalb von ca. 1000 relativ gering ist und das Zentrum des Landes nicht abgedeckt ist. Aus diesem Grund wurde das Modell so flexibel gestaltet, dass die Karten entweder mit dem reduzierten Datensatz der automatischen Stationen oder dem kompletten Datensatz mit den täglichen manuellen Messungen erarbeitet werden können. Die Daten können zusätzlich mit satellitenbasierten Schneeverteilungskarten ergänzt werden.

Die EURAC erarbeitet periodisch Karten zur räumlichen Verbreitung der Schneedecke. Diese Karten werden je nach Wolkenbedeckung für unterschiedliche Zeiträume erarbeitet und geben binär Auskunft über schneebedeckte und schneefreie Gebiete. Zusätzlich zeigt noch eine Signatur eine Wolkenbedeckung über den gesamten Zeitabschnitt hinweg auf (Composits von einer oder zwei Wochen). Das Verfahren zur Erstellung von Schneewasseräquivalentkarten nutzt diese satellitenbasierten Schneeverteilungskarten, indem an ausgesuchten vordefinierten Standorten (sogenannten virtuellen Stationen) geprüft wird, ob kein Schnee liegt. In diesem Fall wird diese Information in das Detrending-Verfahren mit aufgenommen.

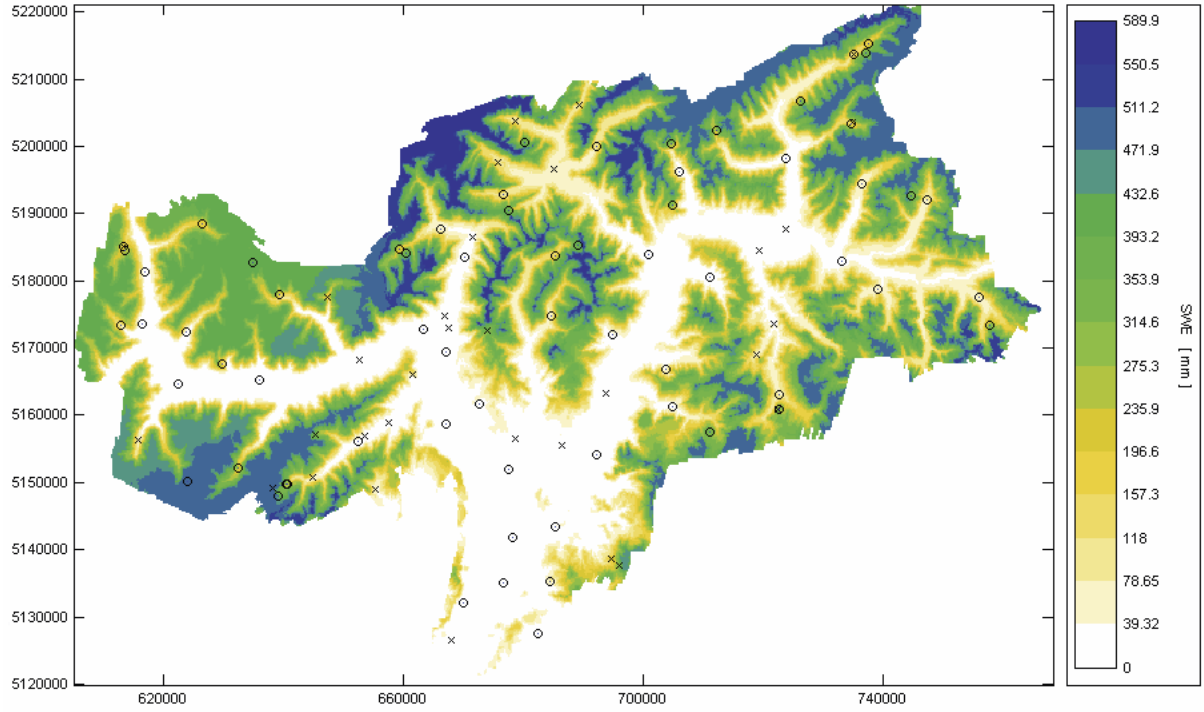


Abbildung 6: Schneewasseräquivalentkarte vom 01.03.2011. Standorte mit verfügbaren Daten sind durch Kreise, Standorte ohne verfügbare Daten durch Kreuze gekennzeichnet. Die Karte zeigt das am 22. März 2012 in der Schneedecke gespeicherte Schneewasseräquivalent auf. Quelle: Magnusson (2011).

Ergebnis des Verfahrens sind Schneewasseräquivalent-Karten (siehe Abb. 6). Das Verfahren erlaubt zudem die Erstellung von Schneehöhenkarten.

Eine detaillierte Beschreibung der Ergebnisse findet sich in den Projektberichten "Technischer Bericht zur Vorgehensweise zur periodischen Ermittlung der aktuellen Schneeverteilung in der Region Bozen im Rahmen des Interreg Projekts IRKIS" (Jonas 2010), "Technischer Bericht zur Berechnung der Schneewasseräquivalentkarten für den Winter 2010/11 für Südtirol" (Magnusson 2011), " Elaborato tecnico sui metodi di spazializzazione della neve e proposta di un algoritmo per la Provincia di Bolzano nell'ambito del progetto IRKIS" (Dall'Amico 2010).

3.2.3 Modellierung und Monitoring der Bodenfeuchte

Das Abflussgeschehen in hydrologischen Einzugsgebieten wird massgeblich vom Zustand und Sättigungsgrad der Bodenwasserspeicher unmittelbar vor einem Niederschlagsereignis geprägt. Die Böden in einem Einzugsgebiet bestimmen die Infiltrationskapazität und die Wasserspeicherkapazität. Je nach Mächtigkeit der Böden und je nach Bodenart kommt es während eines Niederschlagsereignisses zu verschiedenen Arten des Oberflächenabflusses. Ein sehr trockener Boden hat zu Beginn des Niederschlagsereignisses eine stark reduzierte Infiltrationsfähigkeit. Übersteigt die Niederschlagsintensität die Infiltrationskapazität oder ist die Speicherkapazität im Boden ausgeschöpft, so kann ein grosser Teil des Niederschlags nicht mehr versickern und fliesst oberflächlich ab. Dies führt zu einer raschen Reaktion des Einzugsgebiets und zu einem Hochwasserabfluss.

Der Füllungsgrad des Bodenwasserspeichers bzw. die Bodenfeuchtigkeit kann entweder gemessen oder modelliert werden. Da die Bodenfeuchte nur an wenigen Standorten gemessen wird, wurden im Rahmen des Projektes IRKIS mehrere Möglichkeiten ausprobiert, wie man diese Information mit anderen Methoden zur Verfügung stellen kann. Einerseits wurde das Modell für die Entwicklung der Schneedecke SNOWPACK für den Einsatz im Sommer weiterentwickelt, andererseits wurden die Möglichkeiten des Monitorings der Bodenfeuchte mittels Fernerkundungsverfahren ausprobiert und auf die Fragestellung des Projektes hin evaluiert. Sowohl in Südtirol als auch in Graubünden wurden parallel dazu Bodenfeuchtemessungen an ausgewählten Standorten durchgeführt, um Daten für eine Validierung zur Verfügung zu stellen (siehe Kap. 3.1.4)

Modellierung der Bodenfeuchte mittels SNOWPACK

Da wie oben erwähnt, die Messungen der Bodenfeuchte vor Ort sehr aufwändig sind und deshalb die Anzahl der Standorte mit Bodenfeuchtemessungen noch sehr gering ist, wurde in diesem Arbeitsschritt versucht, das im operationellen Lawinenwarndienst eingesetzte SNOWPACK Modell (Lehning et al. 1999) dahingehend zu erweitern, dass die Berechnung der Entwicklung der Schneedecke als auch des Bodens ganzjährig möglich ist. Das bisherige Modell (Hirashima et al. 2010) erlaubte keine realistische Simulation des Bodenwassergehalts , da es nur in der Lage war, Wasser nach unten zu transportieren, d.h. dass jeweils zwar Bodenwasser durch Evapotranspiration aus den obersten Bodenschichten entfernt wurde, das Wiederaufsteigen von Wasser in der Bodensäule aber nicht möglich war. Im Zuge des Projektes wurden jetzt verschiedene Verfahren zur Berechnung des Bodenwassertransports evaluiert und in SNOWPACK als Prototypen implementiert (Wever & Lehning 2011a, Wever & Lehning 2011b). Durch verschiedene numerische Optimierungen wurde erreicht, dass jetzt die Wassertransportgleichung (Richards Gleichung) in SNOWPACK mit vernünftigem Rechenaufwand gelöst werden kann. Diese Weiterentwicklung wurde gemeinsam von beiden Projektpartnern finanziert. Die Zielsetzungen waren die ganzjährige Berechnung des Schnee- und Wasserspeichers an den automatischen IMIS-Stationen im Kanton GR und an ausgewählten Schneemessstationen in Südtirol. Die Modellierung der Bodenfeuchte sollte einerseits ein Baustein für die Beurteilung der aktuellen Disposition der Einzugsgebiete für Hochwasserabflüsse darstellen und andererseits das Austrocknen der Böden bei langen Trockenphasen dokumentieren.

Abb. 7 zeigt exemplarisch Wassergehaltskurven für verschiedene Bodenschichten wie sie durch die neue SNOWPACK Routine simuliert werden. Es zeigt sich eine grosse Dynamik der Bodenfeuchte, die von verschiedenen Zeitskalen auf unterschiedlichen Höhen geprägt ist.

Weiters wurden durch Änderungen insbesondere im Setzungsverhalten aber auch durch eine leichte Anpassung der Albedofunktion eine hervorragende Wiedergabe des Schmelzverhaltens erreicht. Ein gutes Abschmelzverhalten ist Voraussetzung für die richtige Wiedergabe des lokalen Wasserspeichers insbesondere in Situationen und Höhenlagen in denen häufige Wechsel von Schnee mit schneefreien Situationen vorkommen. Es wurde ein Algorithmus eingeführt, der während der Sommermonate eine zuverlässige Unterscheidung zwischen dem Wachstum an niedriger Vegetation (Gras) und möglichem Schneefall erlaubt.

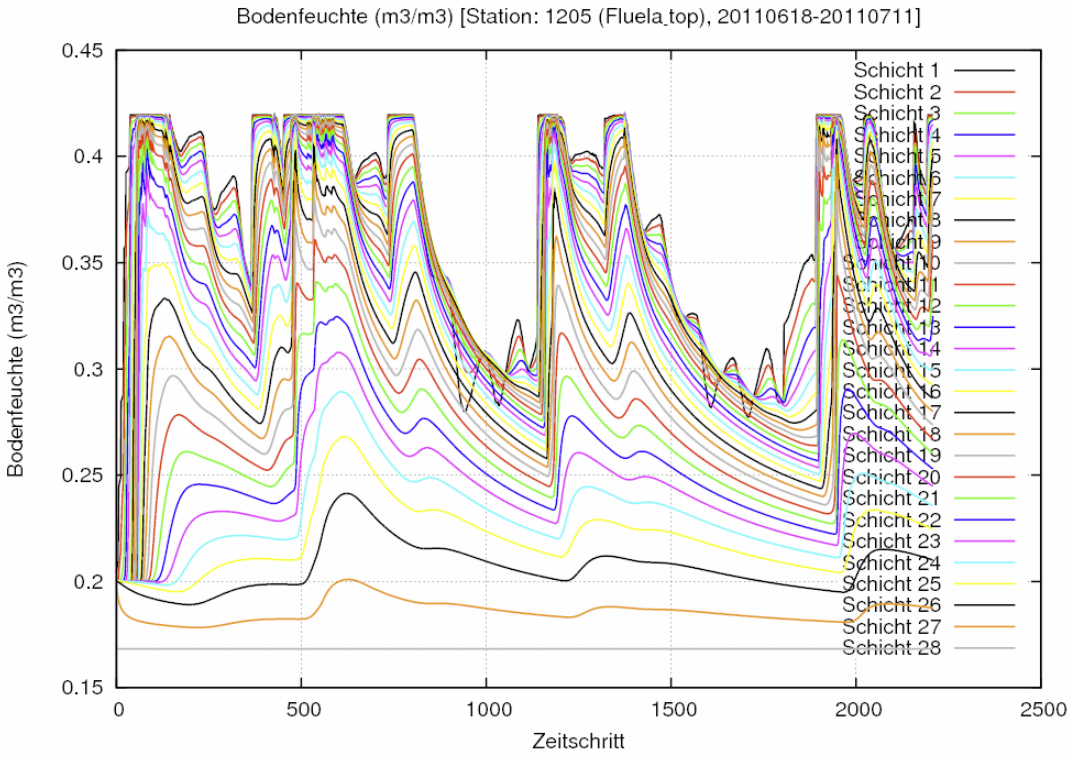


Abbildung 7: Hochaufgelöste Simulation der Bodenwasserwerte in verschiedenen Tiefen. Die Wassergehaltskurven für verschiedene Bodenschichten zeigen eine erhebliche Dynamik der Bodenfeuchte. Quelle: Wever & Lehning (2011b).

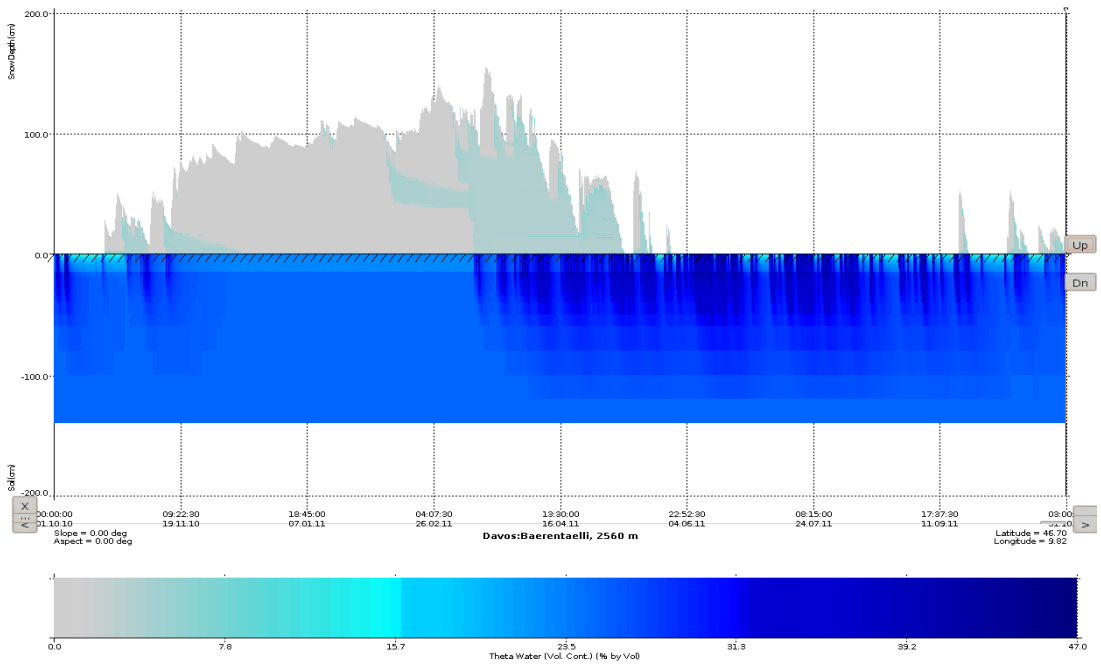


Abbildung 8: Hochaufgelöste Simulation des Wassergehalts in der Schneeecke (Grauskala) und der Bodenwasserwerte (Blaue Farbskala) im hydrologischen Jahr 2010/2011. Quelle: Wever & Lehning (2011b).

Um den möglichen Beitrag einer Modellierung der Bodenfeuchtigkeit bei der Beurteilung von Trockenphasen, wurde der Verlauf der Bodenfeuchtigkeit in zwei sehr unterschiedliche Sommern am Beispiel der Station Weissfluhjoch berechnet. Der Sommer 2003 kennzeichnet sich durch längere Trockenphasen, der Sommer 2010 hingegen war eher nass.

Abbildung 10 zeigt den Wassergehalt des Bodens in 10cm Tiefe. Die markante Trockenphase im Sommer 2003 ist deutlich zu sehen. Die Bodenfeuchte beträgt Mitte August nur mehr ca. 15%. Im Sommer 2010 führten regelmässige Niederschlagsperioden zu einer ständigen Anfeuchtung des Bodens. Die Bodenfeuchte bleibt damit fast immer oberhalb 25%.

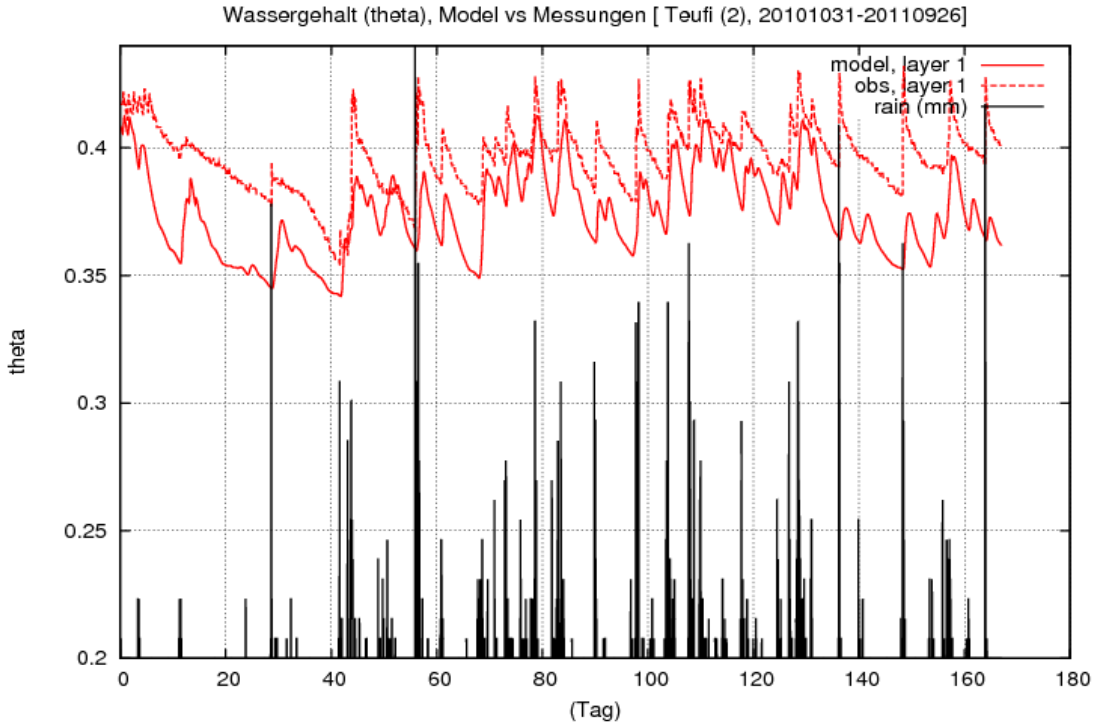


Abbildung 9: Vergleich zwischen modelliertem und gemessenen Wassergehalt an der Station Teufi im Dischmatal, Davos. Die Abbildung zeigt die relativ gute Übereinstimmung zwischen den modellierten und gemessenen Daten und die zeitliche Variabilität der Bodenfeuchte gut auf. Quelle: Wever & Lehning (2011b).

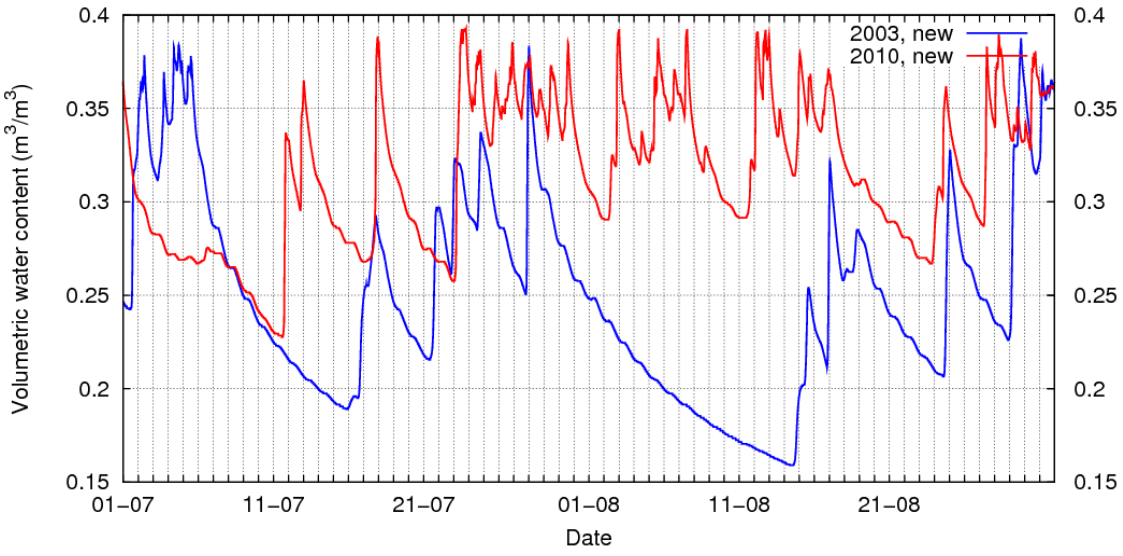


Abbildung 10: Vergleich zwischen der zeitlichen Entwicklung der Bodenfeuchte in 10 cm Tiefe in den Sommerhalbjahren 2003 (blaue Linie) und 2010 (rote Linie) an der Station Weissfluhjoch. Die markante Trockenphase im Sommer 2003 schlägt sich auch im zeitlichen Verlauf der Bodenfeuchte nieder, während im Sommer 2010 regelmässige Niederschlagsperioden zu einer ständigen Anfeuchtung des Bodens führten. Quelle: Wever & Lehning (2011b).

Monitoring der Bodenfeuchte mittels Fernerkundungsverfahren

Eine weitere Möglichkeit zum Monitoring der zeitlichen Entwicklung der Bodenfeuchte sind satellitenbasierte Fernerkundungsverfahren. Im Rahmen des Projektes IRKIS wurde der Wissensstand zu diesem Themenbereich zusammengefasst und das Potenzial von satellitenbasierten Messungen der Bodenfeuchte evaluiert. Es wurden zwei grundsätzliche Methoden am Beispiel von Südtirol getestet. In einem ersten Schritt wurde die Bodenfeuchtigkeit mittels satellitenbasierten Radarsystemen (Synthetic Aperture Radar, SAR) auf der Basis von RADARSAT2 Daten beobachtet. In einem zweiten Schritt wurde das Thermal-Inertia Verfahren auf der Basis von optischen Satellitendaten (MODIS) zur Ableitung von Information zur Bodenfeuchte getestet (Pasolli et al. 2011). Die Daten wurden anhand der in-situ Messungen der Bodenfeuchte im Matschertal (EURAC) validiert.

Die Ergebnisse zeigten, dass die radarbasierte Messung der Bodenfeuchte die zeitlichen und räumlichen Änderungen der Bodenfeuchte prinzipiell gut nachverfolgen können. Vor allem mit der aktuell laufenden Weiterentwicklung der Sensoren und der damit verbundenen Verkürzung des Überflugintervalls (5-6 Tage) zeigt diese Technik ein hohes Potenzial für ein effizientes und flächendeckendes Monitoring der Bodenfeuchte auf. Der Einsatz ist aber auf Gebiete ohne dichter Vegetationsbedeckung beschränkt. Im Gegensatz zu den radarbasierten Methoden haben die Satelliten mit optisch-thermischen Sensoren eine höhere Überflugfrequenz. Das ATI-Konzept (Apparent Thermal Inertia), das die Bodenfeuchte aus den Temperaturunterschieden an der Bodenoberfläche zwischen Tag und Nacht ableitet, hat deshalb eine höhere zeitliche Auflösung. Dies ist aber mit dem Nachteil einer geringeren räumlichen Auflösung (1 km) verbunden. Das Anwendungspotenzial dieser beiden Fernerkundungsverfahren zum Monitoring der Bodenfeuchte ist aus diesen Gründen limitiert. Die Daten können aber sehr gut die Analyse der räumlichen Verbreitungsmuster der Bodenfeuchte(-änderungen) unterstützen.

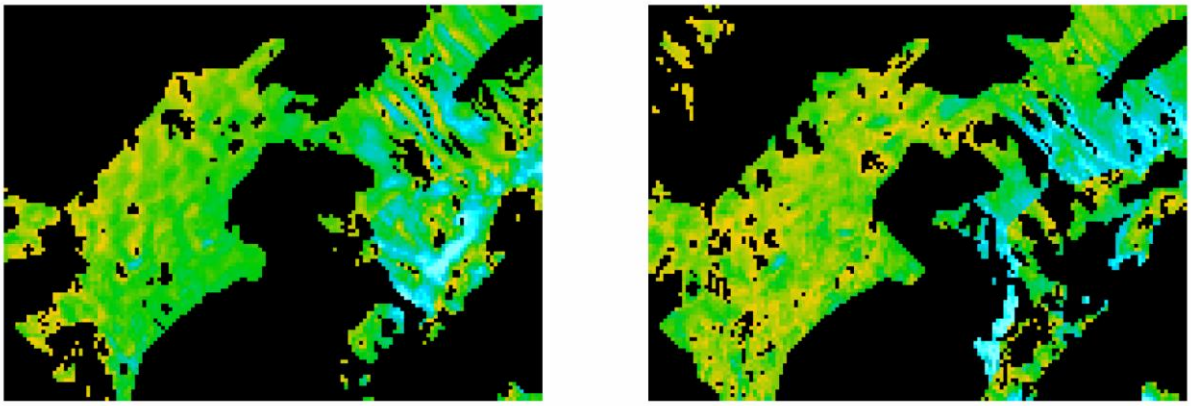


Abbildung 11: Räumliche Verteilung der Bodenfeuchtigkeit, ermittel auf Basis von RADARSAT2 Daten. Ausschnitt aus dem Matschertal, Südtirol. Links: August 2010, rechts: September 2011. Die Bildausschnitte entsprechen einer Horizontaldistanz von ca. 2 km. Die einzelnen Vernässungszonen (blaue Farbskala) sind gut erkennbar. Quelle: Pasolli et al. (2011).

Eine detaillierte Beschreibung der Ergebnisse findet sich im Projektbericht "Soil Moisture Retrieval over South Tyrol: methodologies and results" (Pasolli et al. 2011).

3.2.4 Weiterentwicklung des Wetterradars

In der Unwetterwarnung sind flächendeckend verfügbare Daten zum Niederschlag und insbesondere zum Niederschlag in den letzten 6, 12, 24, 48 und 72 Stunden erforderlich. Eine nahezu flächendeckende Abdeckung erlaubt nur der Niederschlagsradar. Ähnlich wie in der Schweiz, wo das Messnetz der Wetterradare durch die MeteoSchweiz laufend verbessert und ausgebaut wird, wurden im Rahmen von IRKIS auch Verbesserungs- und Optimierungsmöglichkeiten des Wetterradars am Gantkofel in Südtirol analysiert (Borga 2010). In einer Arbeit wurden die Archivdaten des Radars verwendet, um ausgewählte kleinräumige Hochwasser- und Murgangereignisse der letzten Jahre zu beschreiben und zu analysieren. Damit versuchte man Rückschlüsse auf die Auslösemechanismen und auf die Vorregenbedingungen von Murgangereignissen zu schliessen. In einer weiteren Untersuchung wurden die Verfahren zur Korrektur der durch die Topographie bedingten Radarsignale verbessert (Borga 2011).

4 Informationsplattform

In **Südtirol** werden die für die Frühwarnung von Hochwassergefahren notwendigen Messdaten von der Abteilung Brand- und Zivilschutz gemessen und verwaltet. Die Daten fliessen in eine Datenbank ein und somit liegt die Datenhoheit beim Amt selbst. Ausnahmen hierzu sind eigentlich nur die Bodenfeuchtemessungen. Die Visualisierung der Daten auf einer Plattform ist aufgrund der einheitlichen Datenbank recht einfach, die Landesverwaltung benutzt die Software "StationVis" (Stationsvisualisierung Hydrographisches Amt Bozen).

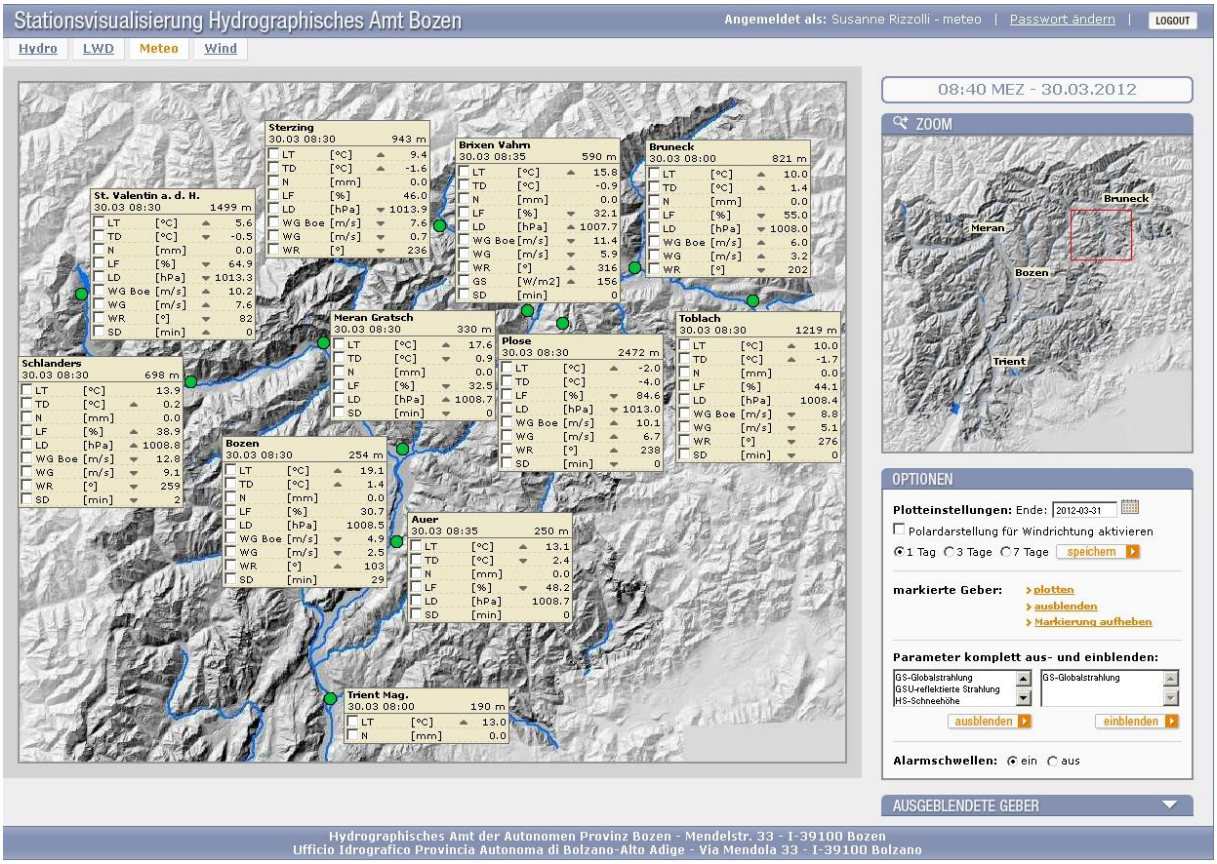


Abbildung 12: Benutzeroberfläche von StationVis. Die Software visualisiert die Stationsdaten und erlaubt benutzerspezifische Abfragen. Quelle: Autonome Provinz Bozen Südtirol.

In der Schweiz und somit auch in **Graubünden** werden die Daten einheitlich in der Gemeinsamen Informationsplattform Naturgefahren (GIN) visualisiert, diese ist seit dem 01.03.2010 in Betrieb (www.gin-info.ch). Mit GIN haben Naturgefahrenfachleute die Möglichkeit, diverse naturgefahrenrelevante Daten von Bundesstellen und Kantonen auf einer Plattform abzurufen. Dadurch sind erstmals Mess- und Vorhersagedaten der öffentlichen Hand für Naturgefahrenfachleute in einheitlicher Form zugänglich und beliebig kombinierbar zu visualisieren. Betreiber von GIN sind das BAFU (Bundeamt für Umwelt) und das BIT (Bundesamt für Informationstechnologie). Der Nutzerkreis soll weiter auf- und ausgebaut werden. Es ist geplant, die beiden Plattformen IFKIS (Lawinen) und IFKIS-Hydro (hydrologische Naturgefahren) schrittweise in GIN zu integrieren.

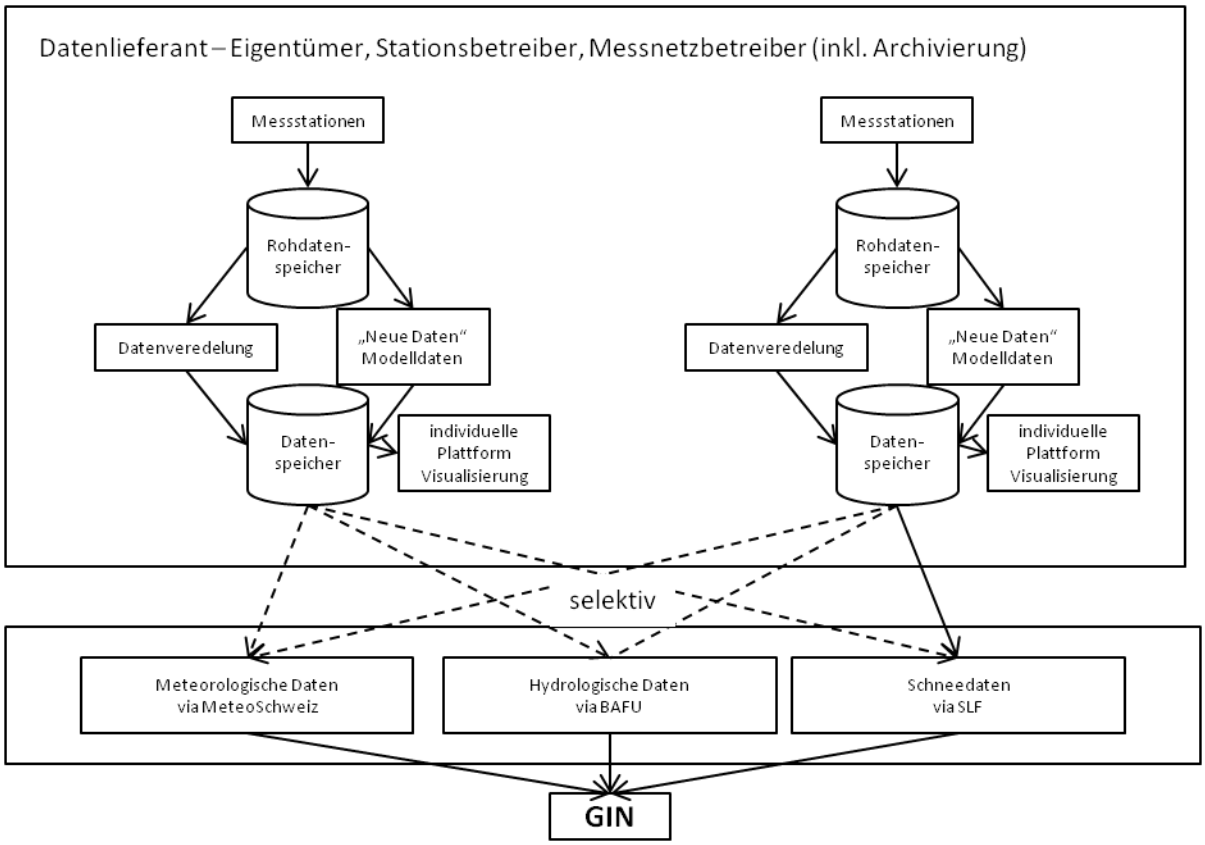


Abbildung 13: Flussdiagramm der Daten von der Messstation bis zur Visualisierung in GIN (Stand 11.2.2011, Ingo Petzold/SLF). Hydrologische Daten (Pegel- und Abflussmessungen) werden vom Bundesamt für Umwelt und vom Kanton verwaltet, Schneedaten vom SLF und Meteo-Daten von MeteoSchweiz. Quelle: Marty & Henzen 2011).

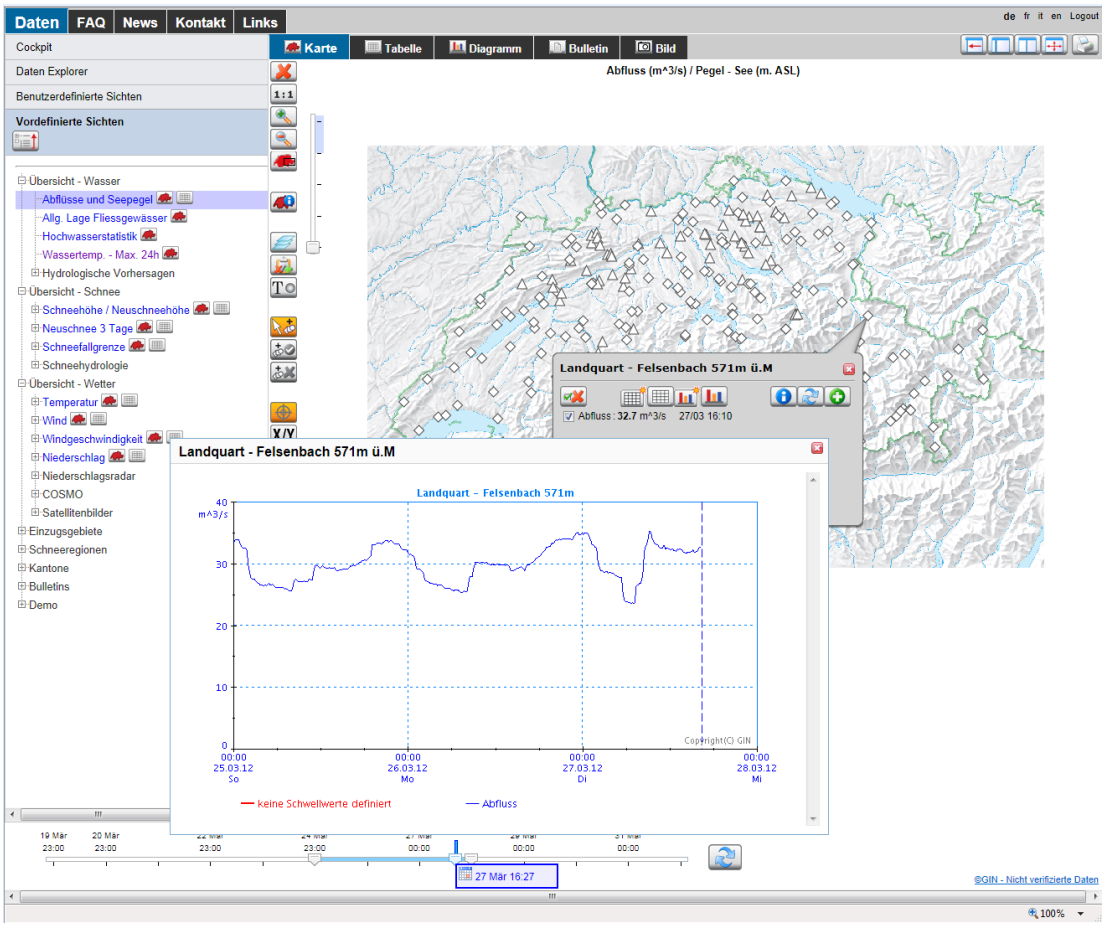


Abbildung 14: Benutzeroberfläche der Gemeinsamen Informationsplattform GIN. Zu jeder Station können die aktuellen Daten und die Daten von vergangenen Perioden abgerufen werden. Auf der Plattform sind ausserdem die Prognosen und Warnungen abrufbar. Quelle: www.gin.admin.ch.

Bei der Antragstellung des Projektes IRKIS im Jahre 2008 wurde darauf abgezielt, eine Informationsplattform für den Kanton Graubünden zu entwickeln. Dies sollte auf der Basis der Informationsplattform IFIKS Hydro (SLF) erfolgen. Da auf Bundesebene parallel an der Entwicklung von GIN gearbeitet wurde, hat man nach Projektbeginn entschieden, das Frühwarnsystem Unwetter in Graubünden auf der Basis von GIN anstatt auf Basis von IFKIS-Hydro zu entwickeln.

Das Frühwarnsystem Unwetter Davos wurde auf einem Testserver von GIN im Frühjahr 2012 betrieben. Nach der erfolgreichen Testphase sollte das Frühwarnsystem für die Gemeinde Davos auf der offiziellen Version von GIN verfügbar sein.

Beide vorgestellten Informationsplattformen bieten eine gute Grundlage für die Beurteilung des Systemzustandes der Einzugsgebiete und für die Frühwarnung. Beide Informationssysteme, sowohl GIN als auch StationVis sind modular aufgebaut und erlauben die Aufnahme von neuen Messstationen und grundsätzlich auch die Aufnahme von neuen Informationsebenen. Die in den nachfolgenden Kapiteln beschriebenen neuen Informationsgrundlagen können in die bestehenden Plattformen eingebaut werden.

5 Entscheidungsgrundlagen für die Frühwarnung und Intervention (Ampelsystem)

Die Hochwasserereignisse der letzten Jahre haben gezeigt, dass die Verantwortlichen für Naturgefahrenmanagement auf kantonaler Ebene ein Informationsdefizit zur aktuellen Situation in den Einzugsgebieten von Wildbächen und Flüssen haben. Dieses Informationsdefizit wurde mit dem Aufbau eines Informationssystems zu Naturgefahren behoben.

Zu Projektbeginn wurden einige wissenschaftliche Untersuchungen zur Bedeutung der Vorgeschichte bzw. des Systemzustandes in den Einzugsgebieten von Wildbächen und Flüssen für Hochwasser- und Murgangereignisse durchgeführt. Parallel und komplementär zu den laufenden Arbeiten und wissenschaftlichen Untersuchungen sollte im Rahmen von IRKIS aus praktischer Sicht ein Verfahren entwickelt werden, das die Disposition der Einzugsgebiete für Hochwasserereignisse auf Basis des Systemzustandes bewertet. Dieses Verfahren sollte nicht die Niederschlags-Abfluss-Simulationen ersetzen, sondern sollte mittels eines Warnstufenkonzepts (Ampelsystem) ähnlich wie der Lawinenlagebericht die Disposition für sommerliche Naturgefahren in den Meteoregionen bewerten. Das Verfahren sollte räumlich differenzierte Aussagen zum Ausgangszustand der Einzugsgebiete vor dem Eintreffen eines vorhergesagten Starkregenereignisses machen können. Dies ist v.a. in Einzugsgebieten mit kurzen Reaktionszeiten relevant, da dort quantitative Hochwasserabflussprognosen nur unter Umständen durchgeführt werden können.

5.1 Analyse der Benutzeranforderungen

Als erster Schritt bei der Entwicklung dieses "Ampelsystems" für die Hochwasserdisposition von Einzugsgebieten wurde ein konzeptionelles Rahmengerüst für die Bewertung der Systemzustände in Wildbacheinzugsgebieten ausgearbeitet. Wie bei vielen Projekten lief das Projekt IRKIS parallel zu vielen anderen Projekten und Aktivitäten, deren Ziele sich z.T. mit den Zielen von IRKIS überlagerten. Deshalb war es während der gesamten Laufzeit des Projektes wichtig, sich mit den anderen laufenden Aktivitäten im integralen Risikomanagement abzusprechen. Um einerseits das konzeptionelle Rahmengerüst zur Diskussion zu stellen und andererseits die Anforderungen der Benutzer von Frühwarn- und Kriseninformationssystemen von Beginn an mit zu berücksichtigen, wurden mehrere Workshops durchgeführt. Gemeinsam von beiden Projektpartnern wurden neben mehreren Koordinationssitzungen ein Workshop am 25.10.2010 in Chur und ein Workshop am 17.08.2011 in Landquart organisiert. Diese beiden Workshops hatten die Konkretisierung des Ansatzes zur Beschreibung der aktuellen Hochwasserdisposition von alpinen Einzugsgebieten zum Ziel.

Grundsätzlich haben alle Workshopteilnehmer die Notwendigkeit eines Einbezugs der Vorgeschichte und des Systemzustandes von Wildbacheinzugsgebieten in der Frühwarnung bestätigt. Bei den zu berücksichtigenden Parametern wurden im Wesentlichen die im Konzept aufgezeigten Vorschläge bestätigt. Wichtig für die Beurteilung der Disposition sind die grundsätzlichen Gebietseigenschaften und der aktuelle Zustand der Speichergrössen wie die Bodenfeuchte, die Charakteristik der Schneedecke und die Geschiebeverfügbarkeit. Das Konzept der Unterscheidung zwischen Grunddisposition,

variabler Disposition, Systembelastung und auslösendem Ereignis (Zimmermann et al. 1997) eignet sich grundsätzlich gut für die Fragestellung. Die Grunddisposition kann auf Basis der verfügbaren Geodaten mit hoher räumlicher Auflösung auf Einzugsgebietsebene ermittelt werden. Für die tägliche Beurteilung der variablen Disposition stehen aktuell die meisten der notwendigen Daten zur Verfügung. Als Ersatz für die fehlenden Messungen der Bodensättigung kann entweder die Niederschlagsgeschichte oder der Bodenspeicherzustand aus hydrologischen Modellen verwendet werden.

Die räumliche Skala sollte nach den Workshopteilnehmern bei bestehenden Abgrenzungen liegen wie z.B. den Meteoregionen, Warnregionen, Bilanzgebieten, oder Basisgebieten HADES. Die für die vorliegende Fragestellung wohl geeignetste räumliche Auflösung ist die der gemeinsamen Warnregionen oder der Meteoregionen. Es ist auch möglich, die Beurteilung der Disposition für grössere Einzugsgebiete (> 40 km^2) oder für Talschaften zu differenzieren. Während die Bewertung der Grunddisposition und der variablen Disposition in einer höheren Auflösung möglich ist, ist die räumliche Auflösung der Gesamtaussage an die Auflösung der Meteoprognose gebunden. Das Verfahren kann auf Basis des vorhandenen Wissens und des aktuellen Prozessverständnisses erarbeitet werden. Es muss aber beachtet werden, dass das Verfahren modular aufgebaut ist, damit es laufend verbessert und optimiert werden kann. Grundsätzlich kann die Beurteilung der Disposition für grosse Gebiete durchgeführt werden (z.B. auf nationaler Ebene).

Am häufigsten diskutiert wurde der Aspekt der Zielgruppe eines Ampelsystems nach dem Dispositionsansatz. Die Resultate des Verfahrens zur Bewertung der Disposition müssen an das Anforderungsprofil der Zielgruppe angepasst werden. Je nachdem, ob das Verfahren an kantonale Verantwortliche mit Spezialistenwissen oder an Verantwortliche der Gefahrenkommissionen auf Gemeindeebene gerichtet ist, muss der Interpretationsspielraum der Ergebnisse grösser oder kleiner sein. Diese benutzerorientierte Darstellung der Ergebnisse stand bei allen Gruppen im Vordergrund.

Der Dispositionsansatz soll grundsätzlich den Naturgefahrenverantwortlichen helfen, unabhängig von der Meteoprognose die aktuelle Situation zu bewerten und diese räumlich zu differenzieren. Idealerweise ist der Dispositionsansatz an die Einleitung der Beobachtungsphase vor Ort geknüpft bzw. an die Vorbereitungsphasen der Interventionspläne angelehnt. D.h. eine Stufe "Rot" des Ampelsystems läutet die erste Phase des Interventionsplanes ein (Achtsamkeitsstufe, Vorbereitungsarbeiten, Beobachtungsposten). Die Kenntnisse der Wildbachtypologien und der Feststoffszenarien ist auf Gemeindeebene Voraussetzung für die Interpretation des "Ampelsystems". Es muss strikt zwischen "Beurteilung des aktuellen Zustandes" und "Prognose" sowie zwischen "Beurteilung des aktuellen Zustandes" und "Warnung" unterschieden werden. Das vorgeschlagene Konzept soll auf keinen Fall eine Warnung ausgeben – die Warnung erfolgt durch den jeweiligen Verantwortlichen. Wichtig ist die Gewährleistung der vertikalen Integration zwischen der (groben) Grundversorgung des Bundes (GIN, Vorhersagen) und den kantonalen sowie lokalen Entscheidungsträgern (Interventionsebene). Damit kann auch eine Schnittstelle zur Interventionsplanung geschaffen werden.

Ein offener Punkt ist, ob ein Verfahren zur Bewertung der Disposition von Einzugsgebieten für Hochwasser- und Wildbachereignisse nur automatisiert erstellt werden soll oder ob es von Prognostikern bewertet werden soll. Auf jeden Fall soll das Ampelsystem die Erklärungen und Gründe zur Bewertung der aktuellen Disposition textlich liefern und die Geländebereiche angeben, die eine hohe Disposition aufweisen. Dies soll mittels eines begleitenden Textes ähnlich dem Lawinenlagebericht er-

folgen. Das Verfahren kann nie alle Fälle abdecken, die Einschränkungen müssen klar kommuniziert werden. Spezialfälle sollen nicht berücksichtigt werden.

Im Rahmen von IRKIS wurde in Südtirol eine **pragmatische Risikoanalyse** zu einer Auswahl von Gefährdungsszenarien durchgeführt (Willi & Schulze 2010). Fachexperten des Brand- und Zivilschutzes und weiterer Abteilungen der Südtiroler Landesverwaltung diskutierten in mehreren Workshops ein mögliches Referenzszenario pro Gefahrenart. Es wurden Szenarien für die Gefahrenarten Hochwasser, Murgang, Rutschung, Felssturz, Lawine, Dürre, Hitzewelle, Waldbrand, AKW-Unfall, Chemieunfall und Pandemie beschrieben. Im Anschluss an die Situationsanalyse und die Festlegung der Referenzszenarien fand eine pragmatische Risikoanalyse statt, d.h. die Risiken wurden nicht im Detail analysiert, sondern auf der Basis der Erfahrungen und der verfügbaren Daten abgeschätzt. Für alle Gefahren schätzten die Fachexperten die Eintretenshäufigkeit und die zu erwartenden Schäden. Die Resultate dieser Analyse wurden mit der EDV-Applikation RiskPlan (www.riskplan.admin.ch) visualisiert. Durch dieses Vorgehen konnten die verschiedenen Gefahrenarten miteinander verglichen und anschliessend abgeleitet werden, in welchen Bereichen zukünftig ein vermehrter Handlungsbedarf besteht und Massnahmen geprüft werden müssen. Diese vergleichende Risikoanalyse zeigte, dass mehr als 60% der erkannten und analysierten Risiken von meteorologischen und hydrologischen Umweltbedingungen beeinflusst werden. Ein Frühwarnsystem für diese meteorologisch und hydrologisch bedingten Naturgefahren, wie es im Rahmen des Projektes IRKIS entwickelt wurde, kann damit einen wesentlichen Beitrag zur Optimierung des Risikomanagements insgesamt darstellen.

Eine detaillierte Beschreibung der Ergebnisse findet sich in den Projektberichten "Ampelsystem zur Früherkennung von Unwettersituationen. Ergebnisse des Projektworkshops vom 25.10.2010 in Chur" (Zischg et al. 2010), "IRKIS: Modellentwicklung variable Disposition. Methodenbericht" (Mani 2011), „IRKIS – Projektmeeting 17.08.2011. Zusammenfassung der Workshopergebnisse“, „Gefahren- und Risikoanalyse Südtirol – Schlussbericht“ (Willi & Schulze 2010).

5.2 Beurteilung der aktuellen Disposition für Hochwasserabfluss

Die Frühwarnung vor schadenbringenden Hochwasser- und Wildbachprozessen erfordert Kenntnisse über die zu erwartende Entwicklung des Wetters in den nächsten Stunden bis Tagen. Dies umfasst Informationen zum erwarteten Ausmass eines Ereignisses und zum Zeitpunkt des Eintretens. Für die Abschätzung der Folgen des vorhergesagten Starkregenereignisses gelten in Abhängigkeit der Gebietsgrösse, für die eine Prognose zu erstellen ist, unterschiedliche Anforderungen bezüglich Reaktionszeit und räumliche Auflösung der Vorhersage. Für grosse Flusseinzugsgebiete (mehrere 1000 km²) sind Prozesse, die über ein bis mehrere Tage ablaufen, relevant. Auslöser sind meistens grossräumige, advektive Wetterlagen. Für solche Gebiete existieren heute bereits verschiedene Hochwasservorhersagesysteme. In Wildbach- und Wildflusseinzugsgebieten von einigen 10 bis einigen 100 km² Grösse spielen konvektive Wetterlagen mit intensiven, teilweise sehr lokalen Niederschlägen eine entscheidende Rolle. So haben konvektive Gewitterzellen üblicherweise eine Ausdehnung von 10 bis 100 km². Eine Gewitterzelle kann nur ein oder zwei Einzugsgebiete betreffen. Diese räumliche Auflö-

sung kann durch die heute gängigen Wettervorhersageverfahren und Hochwasserprognosemodellen nicht abgebildet werden.

Im Rahmen von IRKIS wurde ein Vorschlag für ein Bewertungsverfahren für die aktuelle Disposition von Einzugsgebieten im Hinblick auf Hochwasser- und Wildbachprozesse erarbeitet (Mani 2011). In einem Konzept wurde aufgezeigt, wie auf der Basis von vorhandenen flächendeckenden und zeitlich aufgelösten Monitoring-Daten die Disposition klassifiziert werden kann. Im ersten Schritt ging es noch nicht um die Festlegung von quantifizierten Bewertungsregeln, sondern um die Evaluation von Verfahren, Messgrössen und Indikatoren, die für die Bewertung der Disposition eingesetzt werden können. Dieses Konzept wurde dann an Workshops vorgestellt und diskutiert. Dabei wurde entschieden, vorerst nur die Disposition für Abflussprozesse zu berücksichtigen. Die Entwicklung eines Bewertungsschemas für die Disposition für Geschiebelieferungsprozesse wird auf einen späteren Zeitpunkt verschoben. Nach den Workshops wurde das vorgestellte Konzept in einem Pilotprojekt im **Prättigau** getestet und evaluiert (Mani 2012).

Für die Beurteilung der Disposition in kleineren Einzugsgebieten im Hinblick auf Hochwasserabflüsse können entweder Messungen und Beobachtungen vor Ort vorgenommen werden, was bei der betrachteten Gebietsgrösse mit einem immensen Aufwand verbunden wäre, oder es können Indikatoren verwendet werden, aus denen sich Aussagen zur Abflussbereitschaft herleiten lassen. Dies ermöglicht es, in Kombination mit der zu erwartenden Wetterentwicklung Prognosen zu Hochwasser- und Wildbachprozessen zu machen. Wichtig ist, dass ein solches Verfahren tagesaktuelle und räumlich differenzierte Aussagen zum Zustand von Einzugsgebieten liefert. Dies erlaubt es, die Reaktion dieser Gebiete auf einen zu erwartenden Starkniederschlag abzuschätzen und so die notwendigen Vorbereitungen zu treffen.

Bei der Beurteilung der Gefahrensituation im zeitlichen Verlauf kann vom **Dispositionskonzept** ausgegangen werden (Abb. 15). Die Disposition beschreibt die Anfälligkeit eines Systems bzw. eines Gebietes für einen bestimmten Prozess. Dabei kann zwischen Grunddisposition und variabler Disposition unterschieden werden. Die **Grunddisposition** wird bestimmt durch über längere Zeiträume konstant bleibende Parameter wie Relief, Geologie, Klima, Pflanzenbestand usw. Zu beachten ist jedoch, dass einzelne Grössen durchaus einen längerfristigen Entwicklungstrend in eine bestimmte Richtung aufweisen können. So bedeutet die Hebung der Permafrostuntergrenze für viele betroffene Gebiete eine Erhöhung der Grunddisposition gegenüber Erosion und Massenbewegungen. Die **variable Disposition** wird bestimmt durch zeitlich variable, z.T. durch die Jahreszeit und Tageszeit gesteuerte Grössen wie Bodenwasserhaushalt, Vegetationszustand, usw. Die **aktuelle Disposition** setzt sich aus der Grunddisposition und der variablen Disposition eines Systems zusammen. Sie beschreibt die Auslösebereitschaft eines Systems für einen Prozess. Ist die aktuelle Disposition hoch, bedarf es nur noch einer geringen Systembelastung, um einen Prozess auszulösen. Ist die aktuelle Disposition jedoch tief, braucht es eine entsprechend höhere Systembelastung. Die **Auslösung** beinhaltet die Prozesse, mit denen ein System über den Schwellenwert für die Prozessauslösung belastet wird. Dabei kann es sich beispielsweise um einen Starkniederschlag handeln oder um eine intensive Schneeschmelze.

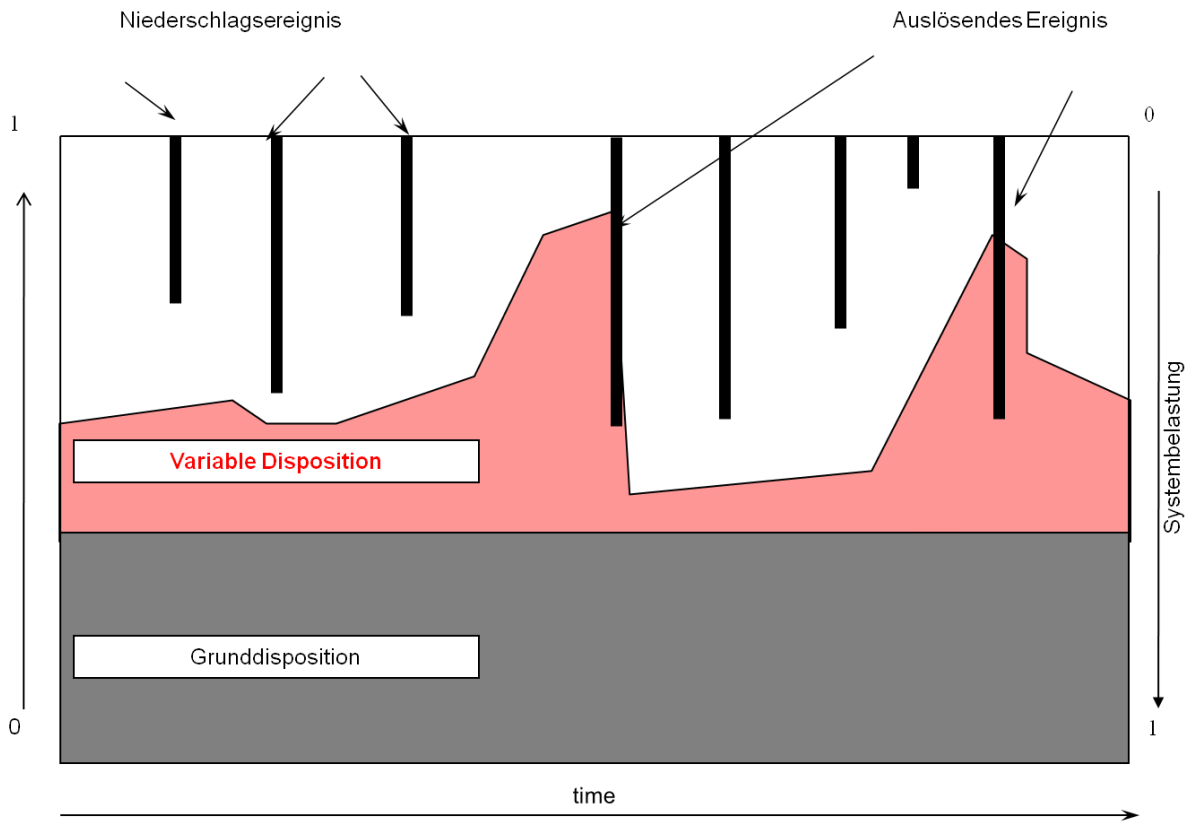


Abbildung 15: Konzept der Disposition. Die standörtlich gegebene Grunddisposition verändert sich über die Zeit nicht, die variable Disposition verändert sich täglich. Ein auslösendes Ereignis (Systembelastung) führt nur zur Auslösung eines Gefahrenprozesses, wenn die Grunddisposition, die variable Disposition und die Systembelastung genügend hoch sind. Quelle: Mani (2011).

Im Hinblick auf ein Warnsystem kann die aktuelle Disposition aufzeigen, ob ein Gebiet auf eine zu erwartende Belastung eher gutmütig oder sensibel reagiert. Daraus lassen sich Bewertungsstufen für die aktuelle Situation ableiten. Sind zusätzlich Schwellenwerte für die Prozessauslösung bekannt, lässt sich unter Bezug von Prognosen abschätzen, ob eine Prozessauslösung zu erwarten ist oder nicht.

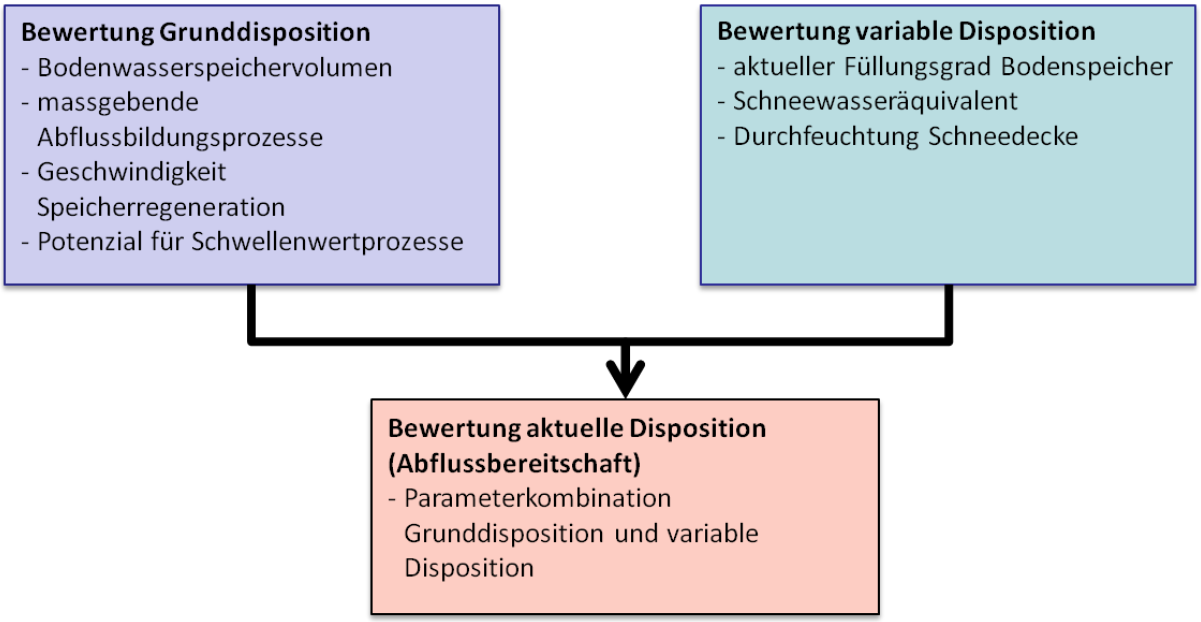


Abbildung 16: Überblick Beurteilung aktuelle Disposition für Abflussbildung. Quelle: Mani (2011).

Grunddisposition Abflussbildung

Für die Bewertung der Grunddisposition für die Abflussbildung müssen Parameter oder Indikatoren für die Grösse des Bodenwasserspeichers, die relevanten Fliessprozesse im Boden und die Infiltrationskapazität definiert werden. Diese Informationen lassen sich aus geologischen oder hydrogeologischen Karten sowie Bodenkarten herleiten. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass diese Grundlagen, vor allem in alpinen Gebieten, häufig grob und räumlich nur wenig differenziert vorliegen. Für die Schweiz wurde von Naef & al. (2007) ein Verfahren entwickelt, das auf der Basis bestehender Raumdaten räumlich differenziert die relevanten Abflussprozesstypen ermittelt. Ein ähnliches Verfahren wurde von Dobmann (2009) entwickelt. Eine solche Abflussprozesstypenkarte kann als Indikator für die Beurteilung der Grunddisposition eingesetzt werden. Aus den Abflussprozesstypen lässt sich ableiten, ob die **Abflussbildung in einem Einzugsgebiet** rasch oder verzögert abläuft.

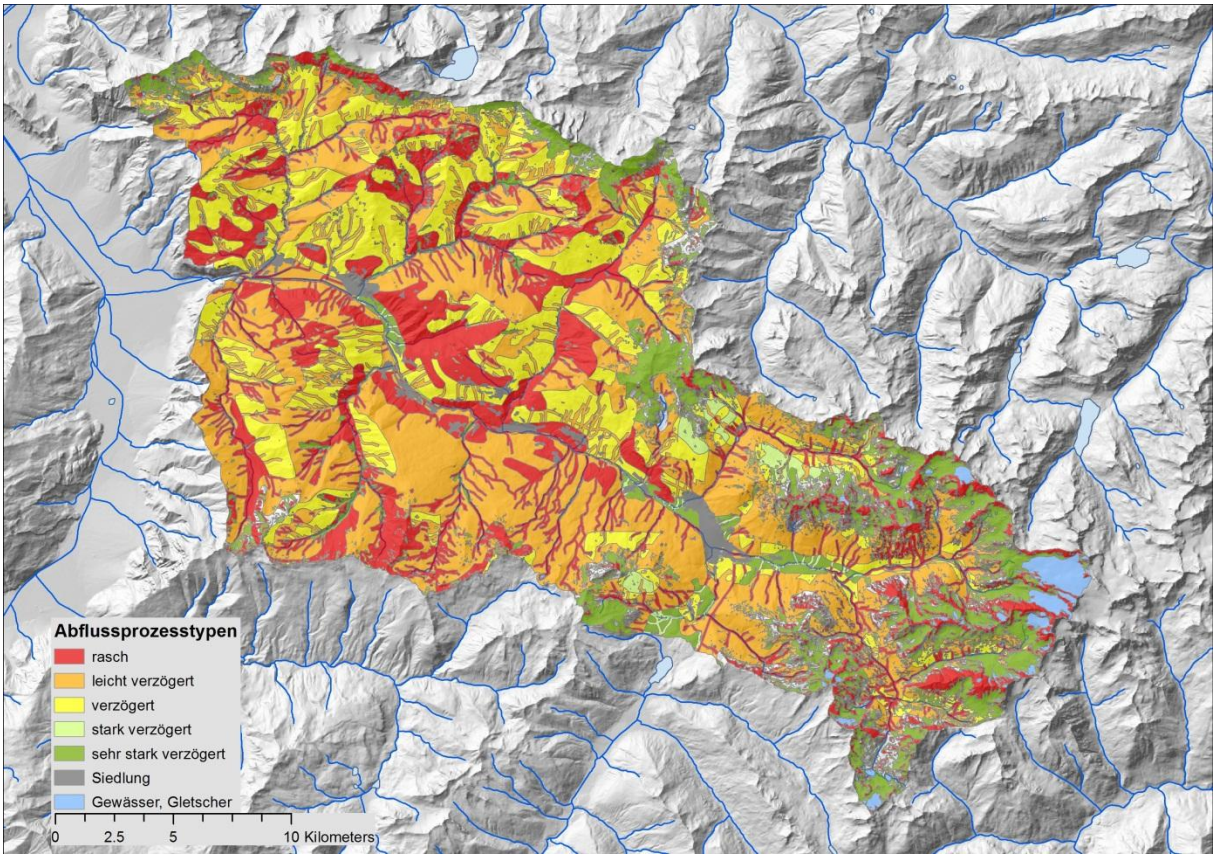


Abbildung 17: Abflussprozesstypenkarte für das Prättigau. Die Karte zeigt die räumliche Verteilung des Reaktionsverhaltens der Böden. Quelle: Mani (2012).

In Südtirol sind die für die Klassifizierung der Grunddisposition notwendigen Datengrundlagen nur zu einem Teil vorhanden. Vor allem Bodenkarten fehlen völlig. Aus diesem Grund wurde ein Konzept für eine Erarbeitung einer **Bodenkarte** in Südtirol ausgearbeitet (Busetto 2010). In einem ersten Schritt wurden alle Bodenkartierungen und alle verfügbaren Bodenprofile zusammengetragen und in eine einheitliche Form gebracht. Nach einer Sichtung der verschiedenen Kartierungsformen und Bewertungsverfahren wurde ein Schema für die Erstellung einer Bodenkarte auf Basis der verfügbaren Daten erarbeitet (Busetto 2011). Die Umsetzung des Kartierkonzeptes wurde am Beispiel des Vinschgaus evaluiert. Es wurde eine Bodenkarte im Massstab 1:25'000 erarbeitet. Diese stellt die Grundlage für die Erstellung der Karte der Abflussdisposition dar.

Aus den hier beschriebenen Grundlagendaten kann neben der grundsätzlichen **Abflussbereitschaft** das **Regenerationspotenzial** der Einzugsgebiete und deren **Sensitivität gegenüber Schwellenwertprozessen** abgeleitet werden (Mani 2011). Das Regenerationspotenzial beschreibt, wie rasch nach einem Niederschlagsereignis wieder eine grössere Menge Wasser im Boden gespeichert werden kann. Einzugsgebiete mit einem grossen Wasserspeichervermögen im Boden reagieren bei Niederschlägen in der Grössenordnung des Wasserspeichervermögens eher sanft; sind die Speichervolumina aufgefüllt, wird aber der zusätzliche Niederschlag schnell abgeführt. Dies führt zu sogenannten Schwellenwertprozessen wie beispielsweise ein plötzliches Ansteigen des Hochwasserabflusses. Die Art der Abflussreaktion, die Geschwindigkeit der Speicherregeneration und das Potenzial der Schwel-

lenwertprozesse zusammen ergeben die Grunddisposition für Hochwasserabflüsse der betrachteten Einzugsgebiete. Diese Grunddisposition als Gesamtindikator wird mithilfe von Bewertungsregeln aus den drei Teilindikatoren abgeleitet, wobei zwischen der Disposition für kurze (gewittrige) und lange Ereignisse unterschieden wird.

Die Bewertung erfolgt im Pilotgebiet Prättigau für sieben Beurteilungsgebiete, die aus der Einzugsgebietsgliederung Schweiz abgeleitet wurden. Dazu wurde für beide Grundlagen, die Abflussprozesstypenkarte und die Hochwasserdispositionskarte ein auf Fuzzy Logic beruhendes Bewertungsverfahren entwickelt. In einem ersten Schritt wurden für die Teileinzugsgebiete die Flächenanteile für die verschiedenen Parameter ermittelt. Darauf basierend wurde jedes Einzugsgebiet mit Hilfe von Fuzzy Logic Regeln bewertet. In einem weiteren Schritt wurden die Flächenanteile der Dispositionsstufen für die Beurteilungsgebiete ermittelt und anschliessend aufgrund von Fuzzy Logic Regeln bewertet. Das Ergebnis zeigt, dass die beiden Kartengrundlagen zu deutlich unterschiedlichen Resultaten führen. Welche Bewertung eher der Realität entspricht und anschliessend eingesetzt werden soll, wurde zusammen mit Lokalkennern diskutiert.

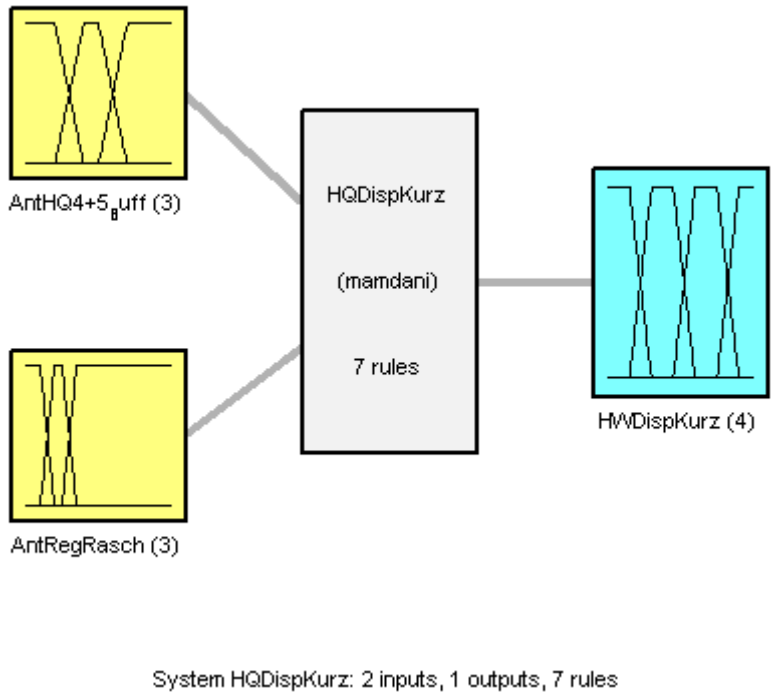


Abbildung 18: Beispiel für ein Bewertungsschema der Grunddisposition für Abfluss und für kurze Niederschlagsereignisse. Quelle: Mani (2012).

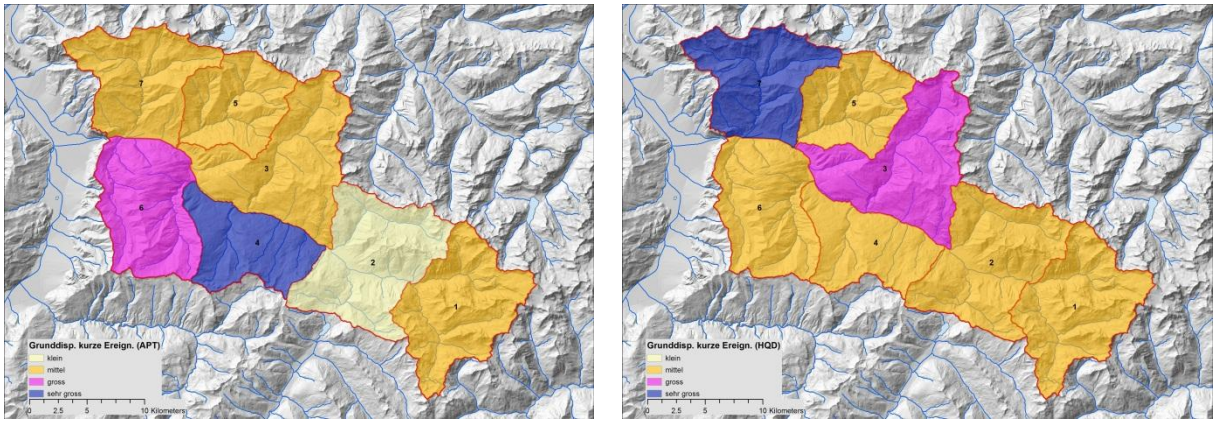


Abbildung 19: Bewertung der Grunddisposition für Abfluss und für kurze Niederschlagsereignisse für die Teileinzugsgebiete. Die Bewertung kann auf Basis der Abflussprozesstypenkarte (links) oder der Hochwasserdispositionskarte (rechts) erfolgen. Quelle: Mani (2012).

Variable Disposition Abflussbildung

Das Verfahren für die Beurteilung der variablen Disposition der Abflussbildung muss eine tägliche Nachführung sicherstellen, damit jeden Tag eine Beurteilung der aktuellen Disposition (Kombination von Grunddisposition und variabler Disposition) vorgenommen werden kann. Die Beurteilung der variablen Disposition umfasst die Beurteilung des Bodenspeichers, die Beurteilung des Schneespeichers und die Beurteilung der Infiltration (Bodenfrost, evtl. starke Austrocknung der Böden).

Für die Beurteilung des Zustandes des **Bodenwasserspeichers** bestehen verschiedene Möglichkeiten. Die geringsten Anforderungen bezüglich Datenverfügbarkeit stellt die Beurteilung anhand des Vorregenindexes, der aus abgeminderten Niederschlagssummen berechnet wird. Eine weitere Möglichkeit zur Beurteilung des aktuellen Füllungsgrades der Bodenwasserspeicher sind die Messungen mittels Bodenfeuchtesensoren (siehe Kap. 3.1.4). Dabei kommen entweder Punktmessungen vor Ort oder Fernerkundungsdaten infrage. Punktdaten sind aufgrund der Heterogenität der Bodeneigenschaften in alpinen Gebieten jedoch wenig repräsentativ. Messungen in grosser Zahl, wie sie notwendig wären, sind sehr aufwändig und können deshalb kaum in Betracht gezogen werden. Zudem gibt es noch keine Vorstellungen für eine ideale Dichte eines Bodenfeuchte-Messnetzes. Eine zusätzliche Möglichkeit wäre der Einsatz von Fernerkundungsdaten. Wie aber bereits in Kap. 3.1.4 aufgezeigt, ist derzeit die operationelle Erstellung einer täglichen Karte der Bodenfeuchte auf der Basis von Satellitendaten noch nicht realistisch. Die Ansätze der Modellierung der Bodenfeuchte mit dem SNOWPACK Modell sind wie in Kap. 3.2.3 vielversprechend. Es ist noch zu untersuchen, inwieweit ein **Netzwerk aus einigen repräsentativen Bodenfeuchtemessstationen in Kombination mit einigen virtuellen Messstationen** (Modellierung der Bodenfeuchte) eine genügende Informationsdichte bei beschränktem Mitteleinsatz liefern würde.

Falls für ein grösseres Einzugsgebiet ein Niederschlag-Abfluss-Modell mit flächendifferenzierten Bodenspeichern eingesetzt wird, besteht die Möglichkeit, den Speicherzustand aus dem Hochwasserprognosemodell als einen Baustein für die Dispositionsbewertung zu verwenden. Für das Einzugsgebiet der Landquart wurde der Abfluss in der Periode 1983-2009 mit dem hydrologischen Modell PRE-

VAH (Viviroli et al. 2007) modelliert. In diesem Modell wird der Niederschlag über mehrere Bodenspeicher (upper zone runoff storage, lower zone runoff storage) in Abfluss umgewandelt. Aus dieser hydrologischen Modellierung über die gesamte Zeitreihe standen die mittleren täglichen Speicherzustände zur Verfügung. Diese Daten wurden statistisch ausgewertet, für jedes Beurteilungsgebiet wurde die Verteilung (Median und Quantile) der mittleren, minimalen und maximalen Speicherzustände je Monat abgeleitet. Beim Weiterbetrieb des Modells ist es nun möglich, den aktuellen Speicherfüllungsgrad des Modells für die Bewertung der Disposition in den Beurteilungsgebieten zu verwenden.

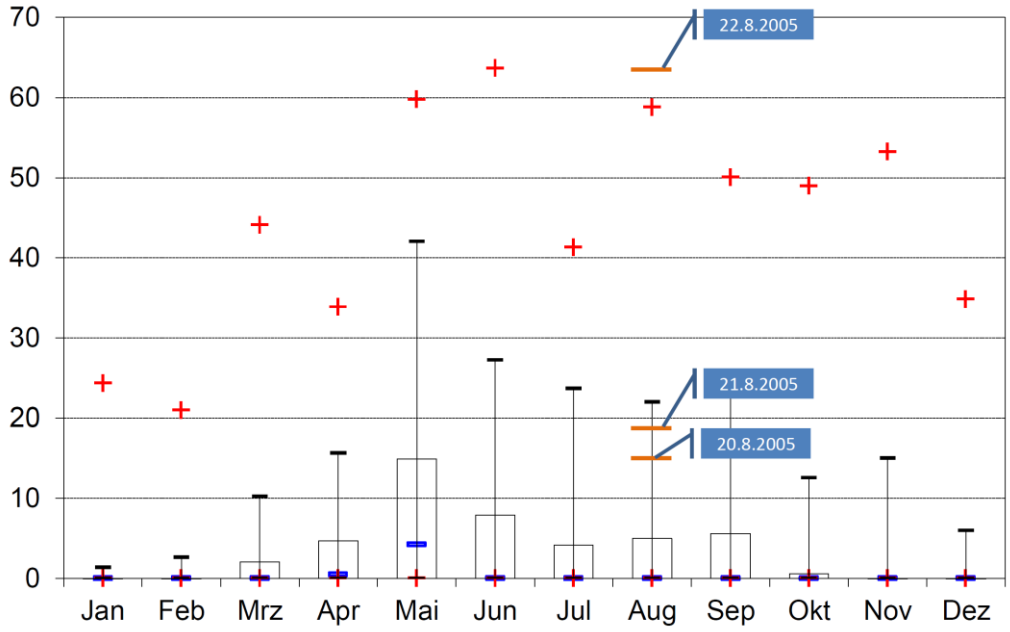


Abbildung 20: Zustand des Bodenwasserspeichers in einem Teileinzugsgebiet im Prättigau. Vergleich der Tageswerte vom 20.08.2005 bis 22.08.2005 im Vergleich zu den monatlichen Quantilwerten der Periode 1983-2004. Auf der Ordinate sind der Speicherfüllungsgrad der oberen Schicht in Prozent dargestellt, die roten Kreuze zeigen das 10% (unten) bzw. 90% Quantil (oben) des Speicherzustandes des jeweiligen Monats. Die drei waagrechten Striche zeigen den Verlauf des Speicherfüllungsgrades am Beispiel des Hochwasserereignisses im August 2005. Quelle: Mani (2012).

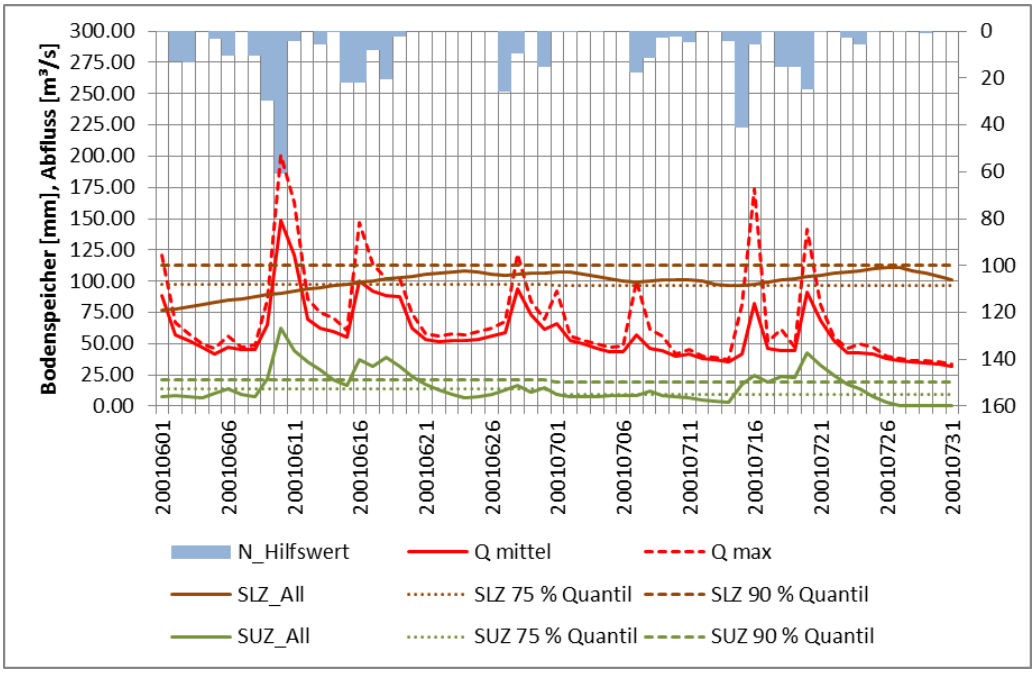


Abbildung 21: Niederschlag, Abfluss und Speicherentwicklung in den Monaten Juni und Juli 2001. SUZ… Speicherfüllungsgrad in der oberen Zone, SLZ…Speicherfüllungsgrad in der unteren Zone. Die Abbildung zeigt, dass die Speicherzustände in der betrachteten Periode immer im oberen Bereich lagen, ein Niederschlagsereignis führte immer zu einem markanten Anstieg des Abflusses. Quelle: Mani (2012).

Neben dem Niederschlag spielt, wie eingangs erwähnt, der **Schnee** für den Bodenwasserhaushalt und damit für die variable Disposition eine wesentliche Rolle. Für das Hochwassergeschehen sind vor allem Situationen relevant, bei denen grosse Teile des Einzugsgebietes mit Schnee bedeckt sind und das Schneewasseräquivalent genügend gross ist, um über mehrere Tage grosse Schmelzwasserzuflüsse zu erzeugen. Die in Kap. 3.1.3 beschriebenen Verfahren zur Erarbeitung von Schneewasseräquivalentkarten (Jonas 2010, Magnusson 2011) bilden eine gute Grundlage für die Bewertung der aktuellen Disposition Abflussbildung.

Aktuelle Disposition Abflussbildung

Für die Beurteilung der aktuellen Disposition werden die Grunddisposition und die variable Disposition miteinander kombiniert. Um auch bei diesem Schritt die Unschärfe der Inputdaten zu berücksichtigen, werden die beiden Dispositionen mit Hilfe von Fuzzy-Bewertungsregeln kombiniert. Die aktuelle Disposition wird anschliessend in 3 Warnstufen umgesetzt.

Eichung und Validierung

Ausgehend von Niederschlagsereignissen wird geprüft, ob sich die Abflussreaktion mit Hilfe der Speicherzustände (Disposition) vor dem Ereignis erklären lässt. Dazu wurden insgesamt 58 Ereignisse ausgeschieden. Diese decken die ganze Spannweite von lokalen zu grossräumigen Ereignissen und alle Jahreszeiten ab. Erste Analysen von Ereignissen sind ermutigend. So sind Ereignisse zu finden, bei

denen relativ geringe Niederschläge wegen der hohen Bodensättigung zu einem Hochwasser geführt haben. Andererseits gibt es Ereignisse, wo höhere Niederschläge wegen geringer Sättigung der Bodenwasserspeicher nur zu einer geringen Abflussreaktion geführt haben. Für die Festlegung der definitiven Schwellenwerte bedarf es noch weiterer Überprüfungen.

Eine detaillierte Beschreibung der Ergebnisse dieses Arbeitspaketes findet sich in den Projektberichten "IRKIS: Modellentwicklung variable Disposition. Methodenbericht." (Mani 2011), "Frühwarnsystem auf Basis Dispositionsbeurteilung. Umsetzungskonzept für das Pilotgebiet Prättigau" (Mani 2012), "Elaborazione di una carta dei suoli della Valle Venosta" (Busetto 2012).

5.3 Anpassung der Hochwasserprognosemodelle

Im Rahmen von IRKIS wurden die bestehenden Hochwasserprognosemodelle weiterentwickelt bzw. deren Einsatz in Hinblick auf einen pre-operationellen Betrieb evaluiert. In Südtirol wurde das derzeit das für das gesamte Einzugsgebiet der Etsch operationell im Einsatz stehende Hochwasserprognosemodell ARFFS an die Fragestellungen von IRKIS angepasst. In Graubünden wurde das Modell Alpine3D für einen Einsatz in den kleinen alpinen Einzugsgebieten in Davos evaluiert.

Hochwasserprognosemodell ARFFS in Südtirol

Das in Südtirol im Einsatz stehende Hochwasserprognosemodell ARFFS (Adige River Flood Forecasting System, Università degli Studi di Padova, Provincia Autonoma di Bolzano 2006) wurde dahingehend erweitert, dass es einerseits die neu im Rahmen von IRKIS entstandenen Informationsebenen wie die Schneedeckenverteilungskarte für die Eichung des Schnee-Moduls berücksichtigen und andererseits die für das Dispositionsmodell notwendigen Parameter zur Verfügung stellen kann. ARFFS kann nun die mittels Fernerkundungsverfahren erstellten Schneeverteilungskarten der EURAC als Randbedingung für das interne Schneespeichermodell berücksichtigen. Das Modell ARFFS kann nun auch die für die Abflussprognose verwendeten Speicherzustände als Parameter ausgeben. Diese können anschliessend für die Beschreibung des Speicherfüllungsgrades im Dispositionsmodell verwendet werden. Weiters wurde das Modell für eine Frühwarnung vor Trockenheit angepasst. Das Modell erlaubt jetzt, ausgehend von den aktuell herrschenden Bedingungen und der Vorgeschichte die Auswirkungen einer längeren Trockenperiode mit einer Wetterentwicklung wie im Sommer 2003 auf die Gebietsabflüsse zu simulieren. Dies stellt eine wertvolle Grundlage für die Frühwarnung vor Dürreperioden dar. Für die Abflussprognose bei Niederschlagsereignissen verwendet ARFFS die Prognosedaten von MeteoSchweiz (COSMO LEPS).

Prognosemodell Alpine3D als Grundlage für das Frühwarnsystem Unwetter Davos

In einem Pilotprojekt wurde Alpine3D (Lehning et al. 2006; Bavay et al. 2009) quasi-operationell für die Landschaft Davos aufgesetzt. Eine Hauptarbeit war die Erstellung einer direkten Schnittstelle mit COSMO2, dem meteorologischen Vorhersagemodell der MeteoSchweiz, das mit einer Auflösung von 2 km arbeitet. Die Schnittstelle greift direkt auf den Modelloutput im Hochleistungsrechenzentrum Manno zu. Das bedeutete zwar einen hohen Entwicklungsaufwand, hat aber den Vorteil, dass Anpassungen z.B. bei einer möglichen Aufnahme eines operationellen Betriebes einfach und schnell durchzuführen sind. Ein denkbares Szenario ist, dass z.B. ein operationeller Betrieb von SNOWPACK an den IMIS Stationen im Vorhersagemodus angestrebt wird. Da könnte dann dieselbe Schnittstelle zum Einsatz kommen. Auch eine Weiterführung des Betriebs von Alpine3D für die Landschaft Davos oder ein anderes Einzugsgebiet von vergleichbarer Grösse ist denkbar. Abbildung 22 zeigt eine schematische Übersicht über die Modellmodule Schneedecke, Boden, Vegetation, Strahlung, Schneeverfrachtung und Abflussgenerierung. Das aufwändige Schneeverfrachtungsmodell kam im Projekt IRKIS jedoch nicht zum Einsatz.

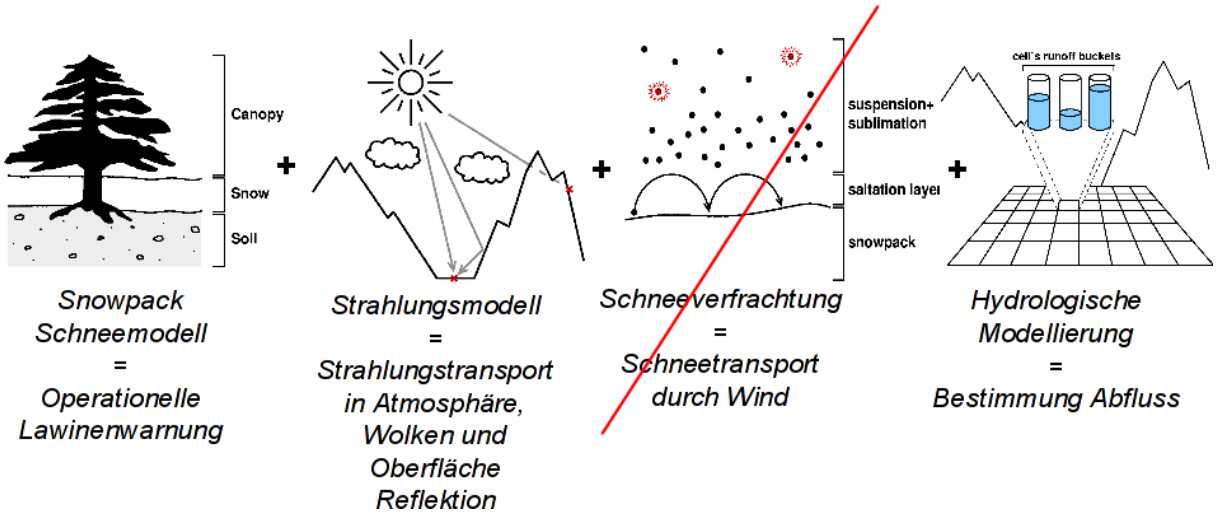


Abbildung 22: Schematische Übersicht über die Modellmodule Schneedecke, Boden, Vegetation, Strahlung, Schneeverfrachtung und Abflussgenerierung. Quelle: Wever & Lehning (2011).

Das Kernstück des Modells besteht in einer hochaufgelösten, räumlich verteilten Simulation der Dynamik von Schneedecke, Boden und Vegetation mit dem Schneedeckenmodell SNOWPACK (Lehning et al. 1999; Lehning & Fierz 2008). Das Modell beschreibt den Schnee- und Bodenwasserspeicher mit einer räumlichen Auflösung von 100 m. Dabei wird die Schneedecke je nach Komplexität des Schichtaufbaus durch bis zu 100 Schichten dargestellt. Das garantiert nicht nur eine genaue Simulation des Massen- und Energiehaushalts, sondern kann auch als Basis für die Einschätzung der Schneedeckenstabilität und Lawinengefahr genutzt werden (Schirmer et al. 2009). Insbesondere eine Analyse des Flüssigwassergehaltes in der Schneedecke inklusive der Information über eine erste Durchfeuchtung hat das Potential, sich als nützliche Information zur Beurteilung von grossen Nassschneelawinen zu erweisen. Abbildung 23 zeigt den Vergleich von gemessener und simulierter Schneehöhe für zwei

Referenzstationen in der Landschaft Davos. Die Graphik zeigt, dass Aufbau und Abschmelzen der Schneedecke in verschieden Wintern gut abgebildet werden.

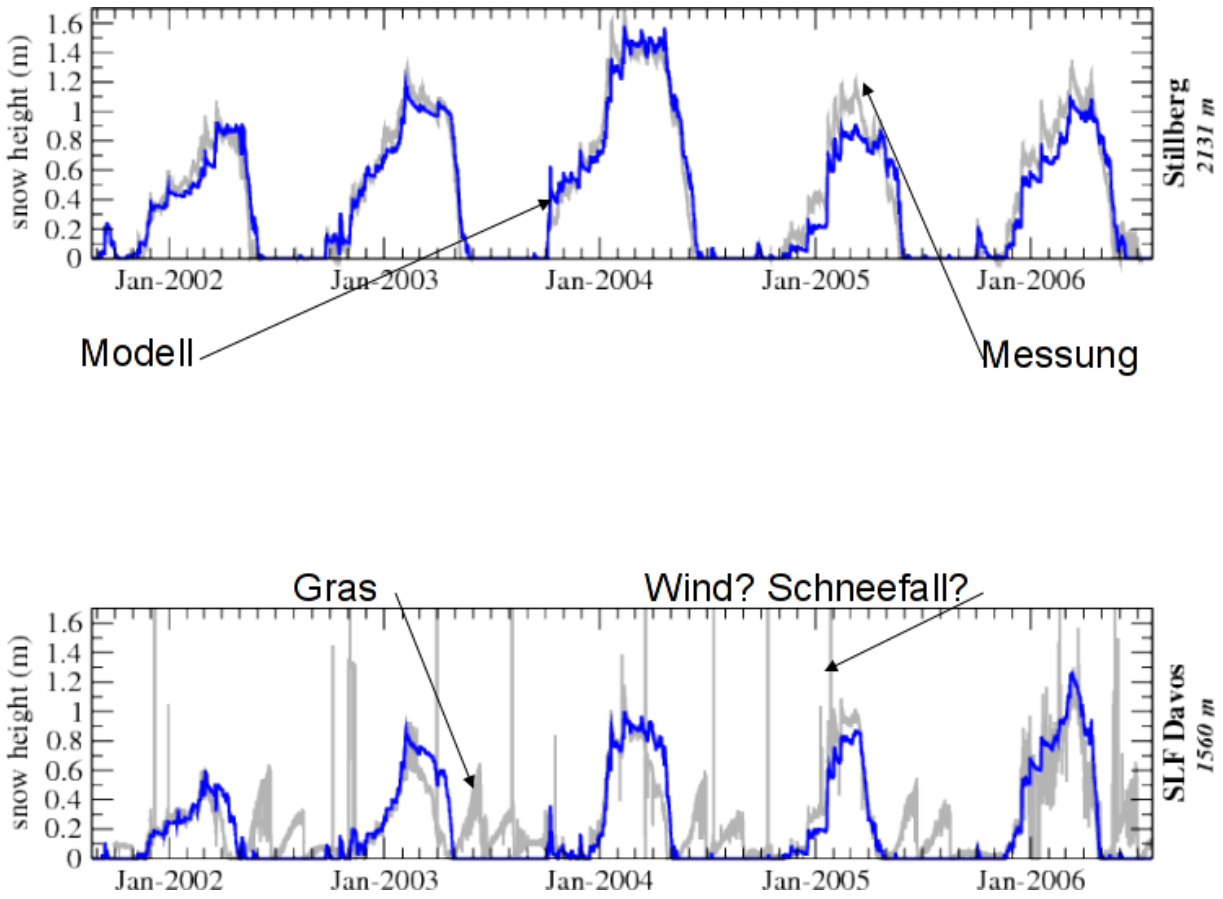


Abbildung 23: Vergleich zwischen gemessener und simulierter Schneehöhe für zwei Referenzstationen in der Landschaft Davos.

Die Schneebedeckung zu einem beliebigen Zeitpunkt kann nun über GIN (Abb. 24) abgerufen werden. Abb. 25 zeigt ein Beispiel der Schneebedeckung und Schneehöhe für den Januar 2012. Während man die Schneebedeckung gut graphisch darstellen kann, ist eine operationelle Darstellung der Schneehöhe mit einer fixen Farbskala (zur Vergleichbarkeit) schwieriger. Grundsätzlich gilt, dass die räumlichen Verteilungen von Schneehöhe und Schneewasseräquivalent sehr stark korreliert sind, weil die über die Tiefe gemittelte Dichte räumlich nicht sehr variabel ist.

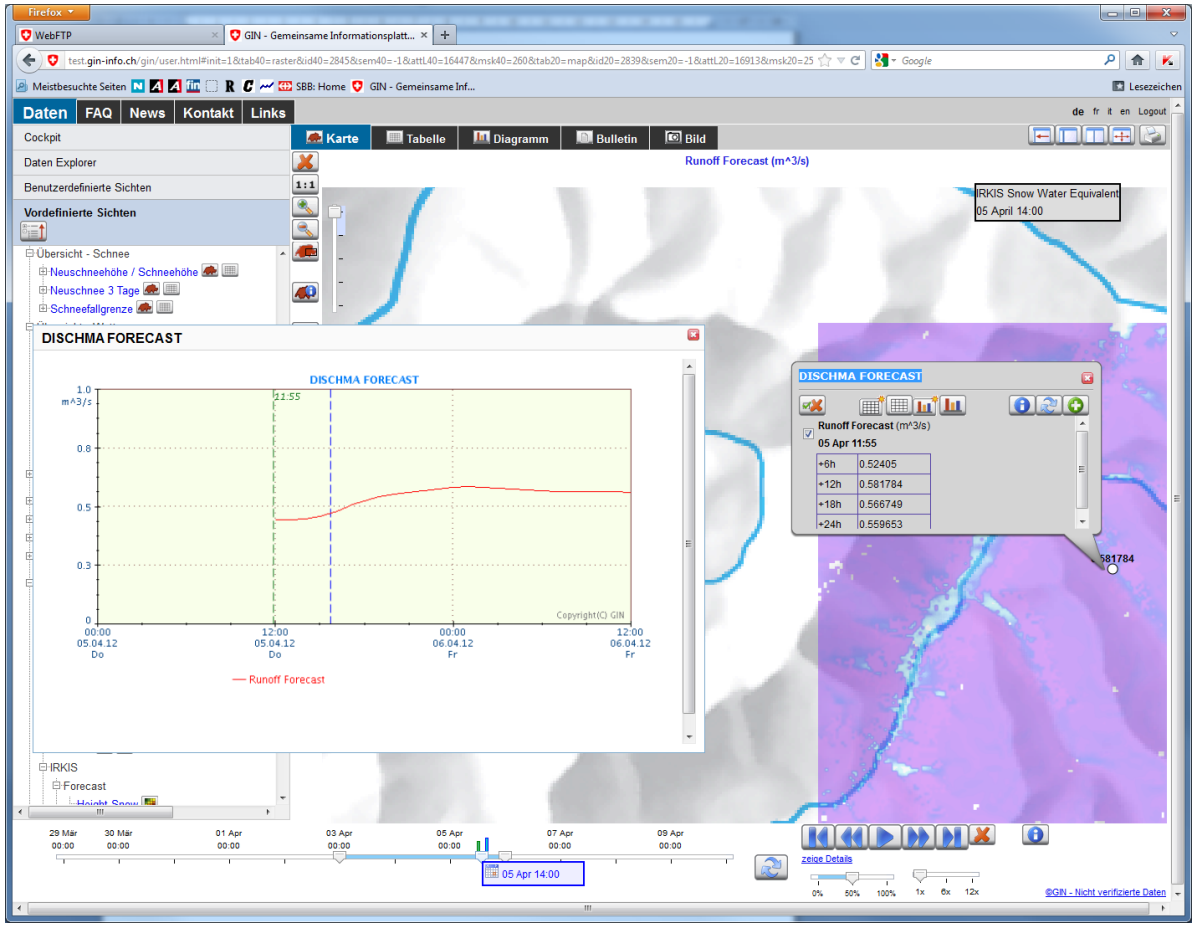


Abbildung 24: Die in GIN eingebaute Testversion des Frühwarnsystems Unwetter Davos.

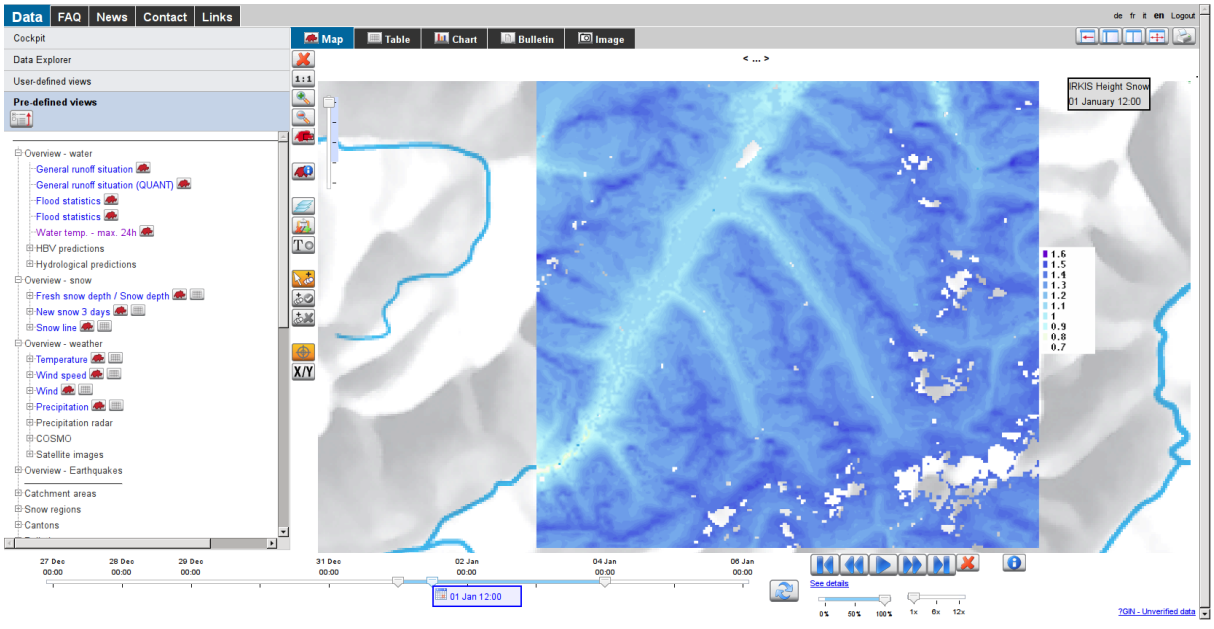
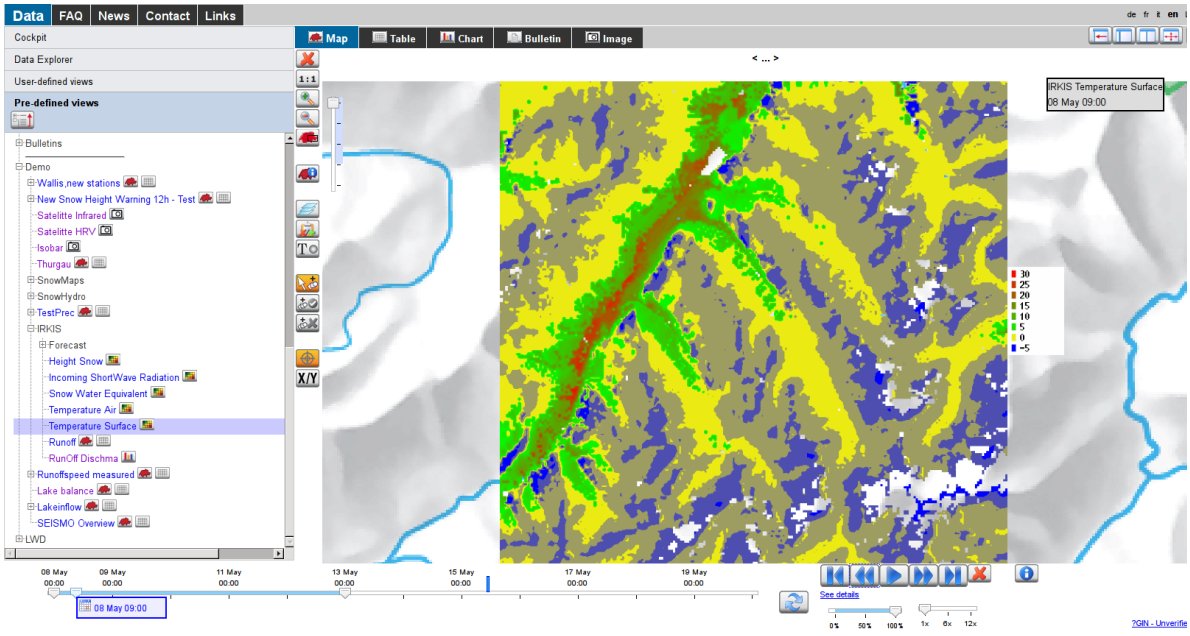


Abbildung 25: Beispiel für die Schneebedeckung und Schneehöhe für den Januar 2012.

Im Prinzip können jetzt verschiedene Parameter von Schnee und Boden räumlich verteilt dargestellt werden. Zum Beispiel könnte sich die Darstellung des tiefenintegrierten Flüssigwassergehaltes (oder dessen Änderung) für die Einschätzung der Nassschneelawinensituation eignen. Ein sich schnell ändernder Parameter, für den eine räumlich aufgelöste Darstellung Sinn macht, ist die Oberflächentemperatur. In Abb. 26 wird ein Beispiel gezeigt, in dem ein deutlicher Höhengradient der Oberflächentemperatur überlagert wird von Variationen, die durch Hangneigung und Exposition bedingt sind.

a)



b)

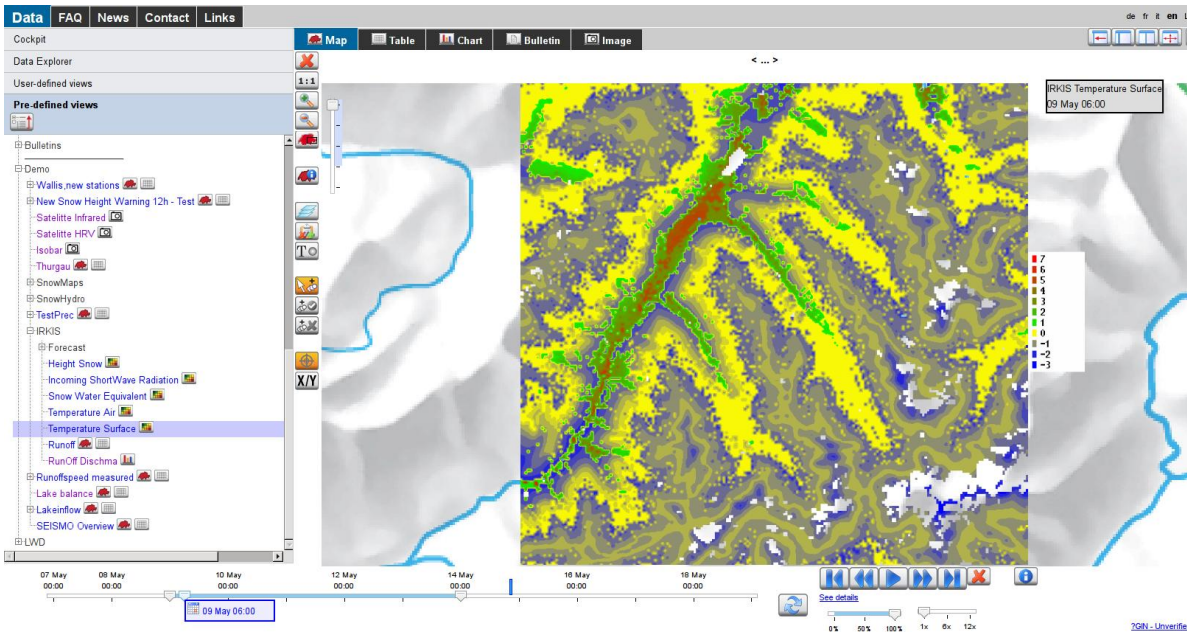


Abbildung 26: Beispiel für die Oberflächentemperatur am 8. (a) und 9. Mai 2012 (b).

Die unmittelbarste Anwendung ist aber die Vorhersage der Abflussmengen an den Pegeln Dischmabach, Flüelabach, Albertibach und Kriegsmatten/Frauenkirch. Abb. 27 zeigt als Beispiel den Vergleich zwischen gemessenem und modelliertem Abfluss für den Pegel Dischma. Der Pegel Dischma ist der einzige, an dem so ein Vergleich Sinn macht, weil im Oberlauf keine Wasserumleitungen stattfinden. Die Abbildung zeigt deutlich, dass die Speicher des Abflussmodells noch nicht richtig eingestellt sind. Insbesondere ist der Basisabfluss noch zu gering und die Reaktion auf anfallendes Schmelzwasser wird noch zu stark verzögert. Dass dies ein Speicherkalibrierungsproblem ist, wird aus Abbildung 28 deutlich: Zu Beginn der Schmelzperiode wird bereits richtig Schmelzwasser durch SNOWPACK am Übergang zu den Abflussspeichern erzeugt (Abb. 28, oben), aber die Erhöhung des Basisabflusses ist nicht stark genug. Laufende Anstrengungen richten sich deshalb auf eine bessere Einstellung der Speicherkonstanten.

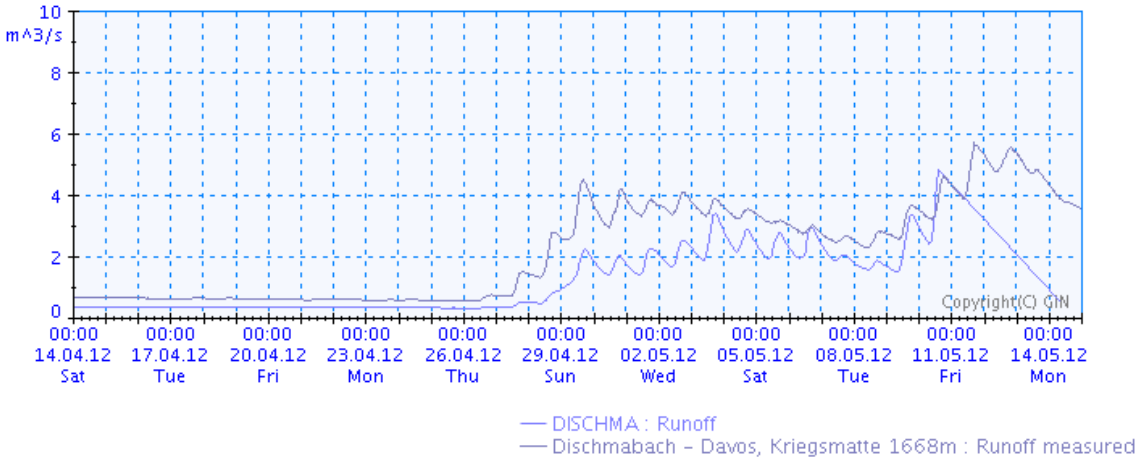


Abbildung 27: Vergleich zwischen gemessenem und modelliertem Abfluss für den Pegel Dischma, April-Mai 2012.

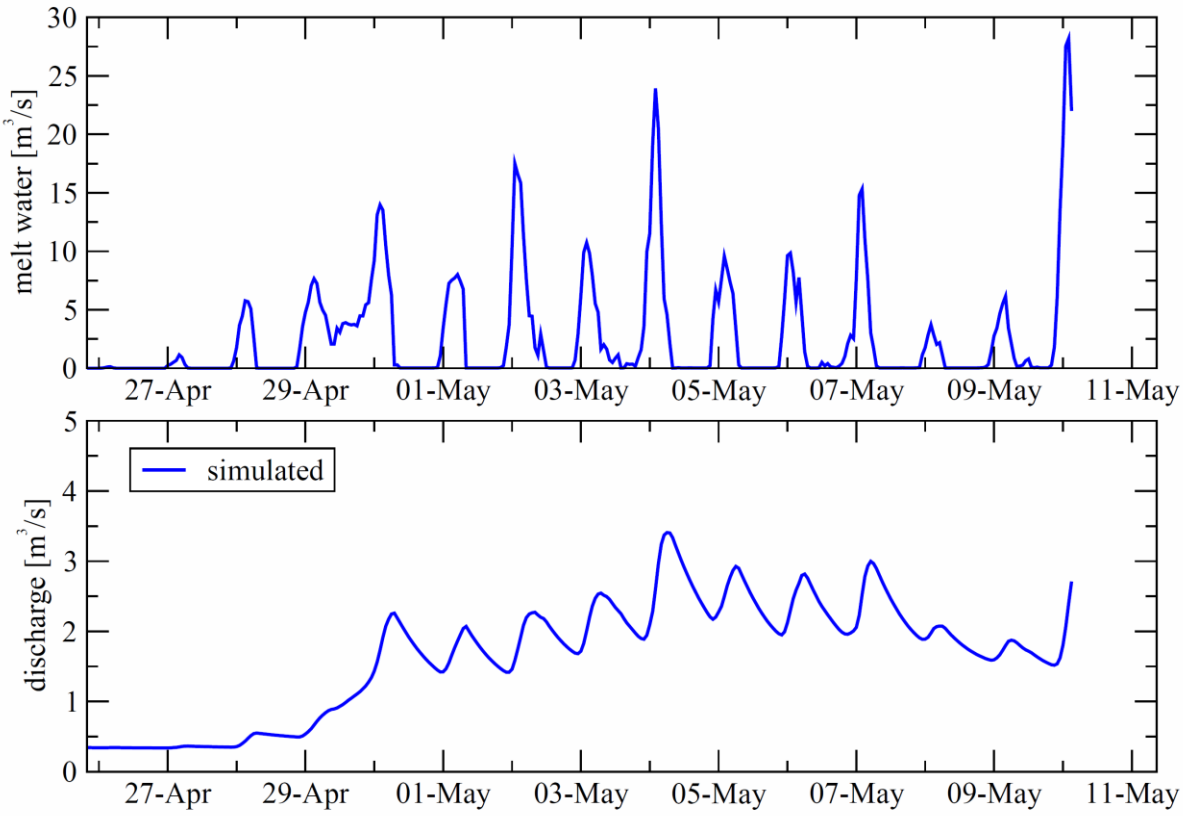


Abbildung 28: Schneeschmelze und modellierter Abfluss für den Pegel Dischma, Davos, April-Mai 2012.

5.4 Entscheidungshilfe für die Früherkennung von extremer Trockenheit

Die oben beschriebenen Erweiterungen der Messnetze, Monitoringsysteme und Hochwasserprognosemodelle können nicht nur für die Frühwarnung vor Hochwasser eingesetzt, sondern auch für andere Zwecke verwendet werden. Weitere wichtige Einsatzmöglichkeiten für die Verwendung der im Rahmen von IRKIS erarbeiteten Grundlagen sind die Beurteilung der Waldbrandgefahr und die Beurteilung von Trockenheit und Dürre. Die Verwendung der IRKIS-Produkte für die Dürreprognosen war ein weiterer Aspekt des Projektes IRKIS. Insbesondere die aufgrund des Klimawandels zu erwartende Zunahme von Hitzewellen und Trockenheitsperioden erfordert die Optimierung der Instrumente zur Bewältigung dieser Ereignisse. Ähnlich wie bei der Hochwasserfrühwarnung kann auch eine wirksame Frühwarnung vor Trockenperioden und eine frühzeitige Abschätzung der möglichen Folgen den potenziellen Schaden abmildern.

Bei Trockenheit und Dürre muss zwischen verschiedenen Stufen des Ereignisses unterschieden werden. Eine meteorologische Trockenheit entsteht bei längerem Ausbleiben der Niederschläge. Erst wenn sich dieser Mangel an Niederschlag nach einer gewissen Zeit auf die Abflüssen in den Gewässern auswirkt, spricht man von hydrologischer Trockenheit. Sobald sich der Niederschlagsmangel und/oder der geringe bzw. fehlende Abfluss in den Gewässern auf die Landwirtschaft oder anderen wirtschaftlichen Aktivitäten auswirken, spricht man von sozioökonomischer Trockenheit oder Dürre. Im Rahmen von IRKIS wurden die ersten beiden Fälle berücksichtigt. Für die Beurteilung der Schwere einer Trockenheit gibt es viele Masse. Der am häufigsten für die Charakterisierung von Trockenphasen verwendete Indikator ist der SPI-Index (Standard Precipitation Index). Dieser bildet die Niederschlagssumme der letzten drei Monate ab und vergleicht den Zeitraum mit dem Durchschnitt der vergangenen Jahre. So können klassifizierten Index-Schwellenwerten Eintretenswahrscheinlichkeiten zugewiesen werden. Für diesen Indikator benötigt man nur Niederschlags-Tagesmittelwerte. Weitere Möglichkeiten zur Charakterisierung der Trockenheit sind Dezile über Niederschlagssummen über verschiedene Zeitperioden, der RDI-Indikator (Reconnaissance Drought Index, mit Berücksichtigung der Evapotranspiration) oder der PDSI-Index (Palmer Drought Severity Index, mit Berücksichtigung der Bodenfeuchte und der Wasserbilanz). Die Klassifikation der Niedrigwasserabflüsse erfolgt ebenfalls auf Basis eines statistischen Vergleichs mit den Daten der vorhergehenden Messperiode, wie z.B. der SSI-Index (Standardized Streamflow Index). Bei der Klassifikation der landwirtschaftlichen Trockenheit wird zumeist das Transpirationsdefizit berechnet und mit den Bedürfnissen der Kulturen verglichen. Das Messnetz der Autonomen Provinz Bozen Südtirol und das erweiterte ARFFS Abflussprognosemodell stellen die Grundlagen für die Klassifizierung der Trockenheit dar. Mit den Prognosemöglichkeiten für Niedrigwasserabflüsse kann das Modell auch den Grad der in den nächsten Tagen zu erwartende Niedrigwasserabflüsse klassifizieren. Im Rahmen von IRKIS wurde auch das Verfahren für die Berechnung der Extremwerte aus den Datenreihen der Südtiroler Landesverwaltung optimiert, dafür wurde das Modell EVA+ (Extreme Value Analysis Enhanced) verwendet. Dies erleichtert die Ableitung von Extremwertstatistiken von den Datenreihen.

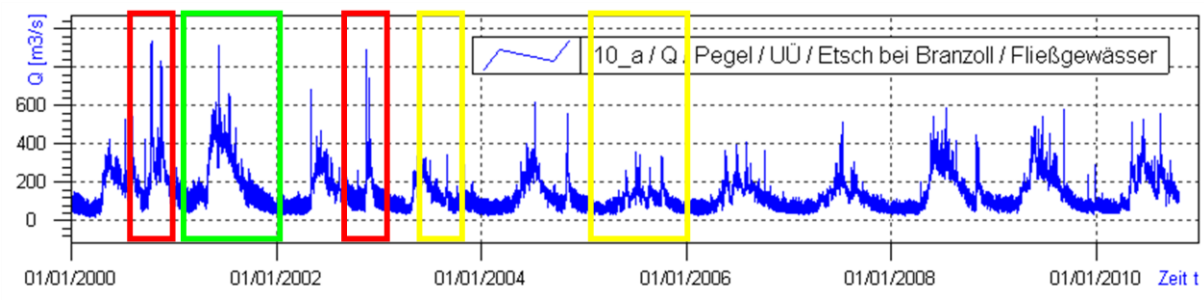


Abbildung 29: Beispiel für die Klassifizierung von Trockenperioden an der Datenreihe des Abflusses an der Etsch bei Branzoll.

Eine detaillierte Beschreibung der Ergebnisse findet sich im Projektbericht "Zusammenfassender Bericht der Literaturstudie zu Frühwarnsystemen für Trockenheit und Dürre" (Zischg & Riedi 2011).

6 Frühwarnung und Notfallplanung auf Gemeindeebene

Auch die bestens aufbereitete Information von Frühwarnsystemen ist nutzlos, wenn sie nicht vor Ort im Risikomanagement verwendet wird. Die Handhabung und die Interpretation der meist sehr komplexen Modelle und Entscheidungsunterstützungssysteme muss so aufgebaut werden, dass sie von den Führungsstäben und Einsatzkräften angewandt werden können. Ein Ziel des Projektes IRKIS war deshalb die vertikale Integration des Frühwarnsystems von der Entwicklungsstufe und der regionalen Ebene bis hin zur lokalen Ebene, auf der die Einsätze im Ereignisfall stattfinden.

In **Südtirol** wurde für zwei Gefahrensituationen ein Interventionsplan erstellt. In einem Fall handelt es sich um Vorschläge für eine Optimierung des Entscheides für die Sperrung der Suldenstrasse in Gomagoi, Gemeinde Stilfs und der Sprengung der Gurgllawine (Stoffel et al. 2010). Im zweiten Fall handelte es sich um eine Interventionsmassnahme für ein gefährdetes Gebiet in Laag, Gemeinde Neumarkt (Hübl & Scheidl 2010). Während bei ersterem das Monitoring der Schneedeckenentwicklung und die Frühwarnung eine grosse Rolle spielen und die im Rahmen von IRKIS entwickelten Verfahren die Entscheidungsfindung verbessern können, spielten in letzterem Fall fix installierte Objektschutzmassnahmen eine grössere Rolle.

Der Kanton **Graubünden** startete ein Pilotprojekt, bei dem ein Frühwarnsystem auf lokaler Ebene entwickelt, getestet und evaluiert wurde. Zusammen mit der Gemeinde Davos und dem SLF wurden die am SLF im Rahmen von IRKIS vorangetriebenen wissenschaftlichen Entwicklungen in die Praxis umgesetzt. Vor einer geplanten operationellen Umsetzung wurden die Verfahren auf ihre Anwendbarkeit und ihren Mehrwert für die Gefahrenvorsorge auf Gemeindeebene evaluiert. Für die Gemeinde Davos wurde das Modell Alpine3D dahingehend angepasst, dass die Abflüsse am Flüelabach, Dischmabach, Schiabach und Albertibach modelliert und vorhergesagt werden können. Diese Prognosen wurden als Testversion in die Gemeinsame Informationsplattform Naturgefahren GIN implementiert. Da in Davos gerade die Gefahrenkarte Wasser fertiggestellt wurde, konnten die Ergebnisse dieser Gefahrenbeurteilung in eine Interventionsplanung eingearbeitet werden. Für alle im Rahmen der Gefahrenbeurteilung erkannten Schwachstellen wurden Objektblätter mit Angaben für die Intervention erarbeitet (Herzog 2011, siehe Abb. 30).

Für die wichtigsten Schwachstellen wurden die Durchflusskapazitäten der Gerinne ermittelt und in die Objektblätter eingetragen. Die vom Hochwasserprognosemodell Alpine3D vorhergesagten Abflüsse können somit diesen Grenzwerten je Gerinneabschnitt gegenübergestellt werden. Bei vorsichtiger Interpretation der Hochwasserprognosen kann bereits vor einem Ereignis abgeschätzt werden, ob es in bestimmten Bereichen des Gemeindegebietes zu Ausuferungen kommen kann. Gemeinsam mit der Gemeinde Davos wurden die erkannten Schwachstellen begangen und diskutiert, ob es für eine Lagebeurteilung noch zusätzliche Messungen oder Beobachtungen vor Ort benötigt. Es wurden Beobachterposten definiert und der Ablauf für die Beobachter im Ereignisfall in den Objektblättern beschrieben.

Gemeinde DAVOS

INTERVENTIONSPLANUNG
Objektblatt

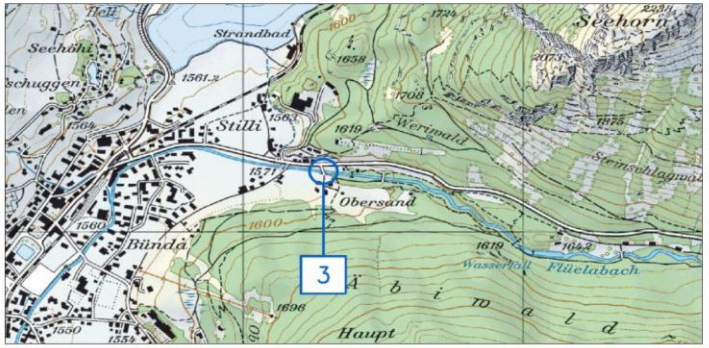
Herzog Ingenieure AG
Wasserbau Tiefbau Grundbau

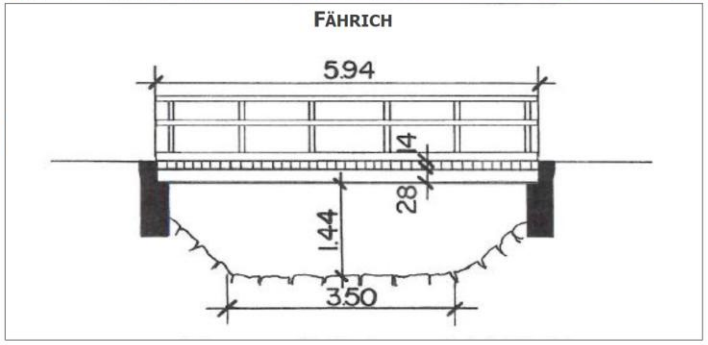
Beobachtungspunkt	**3 Flüelabach, Stilli**
Art	Brücken Bedraweg und Fährich
Zufahrt	Von rechts über Flüelastrasse.

Prozesse		**Bemerkungen**
Verklausung	X	Bei Holztrieb wahrscheinlich
Holztrieb	X	Holzrechen im Sammler vorhanden, Fallholz aus Zwischenstrecke möglich.
Geschiebetrieb	x	Erst bei langandauernden Ereignissen, wenn der Sammler überlastet ist. Gefälle nimmt auf diesem Abschnitt ab, was zu Geschiebeablagerungen führen kann.
Kapazitäts-überschreitung	X	Durchflusskapazität 15 m^3/s mit Freibord 0.5 m, 30 m^3/s bordvoll.

Beobachtung		**Bemerkungen**	**Massnahmen**
Schwemmholz	X	Einzelne Stöcke oder Stämme genügen für eine Teilverklausung.	Bagger aufbieten, Verklausungen entfernen.
Geschiebetrieb	-		
Abflusshöhe	X	Freibord kleiner als 0.5 m kritisch	Brücke sperren

Gefährdetes Gebiet	**Massnahmen**
Rechte Gewässerseite von Baslerstr. bis RhB-Damm	Information SLF und Gebäude untere Flüelastrasse rechts
Quartier Seehornstrasse / Museumstrasse	Garagen leeren, Information
Quartier am Bedraweg	Tiefgarage Bedraweg 2 absperren oder leeren, Gebäude Bedraweg 1 bis 6 informieren.





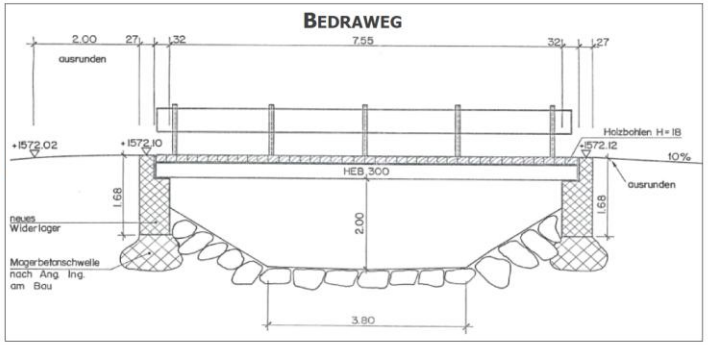


Abbildung 30: Beispiel für ein Objektblatt der Interventionsplanung Davos. Quelle: Herzog (2011).

Nach der Fertigstellung der ersten Testversion des Frühwarnsystems Unwetter Davos im Spätwinter 2011/2012 und Frühjahr 2012 hat die Gemeinde Davos das System aus Anwendersicht getestet und evaluiert. Diese Evaluation bestätigte wieder einmal die Schwierigkeiten in der Frühwarnung vor extremen Niederschlagsereignissen im kleinräumigen alpinen Gelände. Im Fall von starken und kleinräumigen Gewitterniederschlägen eignen sich die Abflussmessungen und die Abflussprognosen nur bedingt für die Interventionsplanung. Die Vorbereitungszeit für Interventionsmassnahmen ist in kleinen Einzugsgebieten zu gering. Deshalb soll die Warnung vor den Folgen von kleinräumigen Starkregenereignissen in kleinen Einzugsgebieten eher auf Basis der Niederschlagsmessung erfolgen und nicht aufgrund einer Abflussprognose. Das bedingt die Installation von einfachen Niederschlagsmessstationen in den wichtigsten Einzugsgebieten. Für die laufende Einsatzplanung im Falle von Hochwasserereignissen aufgrund von Dauerregen und Schneeschmelze hingegen weisen die entwickelten Methoden ein Potenzial auf. Die Beschreibung der wichtigsten Systemgrössen der Einzugsgebiete wie Bodenfeuchte und Schneedecke stellen wichtige Informationsgrundlagen für die Frühwarnung dar.

Am Beispiel des Pilotprojektes in der Gemeinde Davos zeigte sich auch, dass aufgrund der guten Datenlage und relativ langen Messreihen einfachere Verfahren als das hier aufgezeigte auch genügen würden. Mit einfachen Niederschlags-Abfluss-Modellen könnten die wichtigsten Schwellenwerte für kritische Niederschläge ermittelt und in die Interventionsplanung als Hinweise übernommen werden. Und diese könnte man mit den Schwachstellen in Verbindung setzen. Diese vereinfachte Vorgehensweise ist aber nur möglich, wenn es ausreichend lange Messreihen gibt, aus denen man zuverlässige Schwellenwerte für den Niederschlag ableiten kann.

Die Evaluation zeigte ausserdem die Wichtigkeit der Anpassung der Frühwarnung an die Einsatzplanung. Die Wahl der Methode für die Frühwarnung muss an die bestehende Interventionsplanung angepasst sein, bzw. die Interventionsplanung muss an das Frühwarnsystem angepasst werden. Die Koordination zwischen diesen beiden Instrumenten ist unabdingbar für die Verbesserung des Risikomanagements.

Eine detaillierte Beschreibung der Ergebnisse dieses Arbeitspaketes findet sich in den Projektberichten "Evaluation des Frühwarnsystems Unwetter Davos aus der Sicht des Praktikers" (Herzog 2012), „Interventionskarte Laag (Gemeinde Neumarkt) im Rahmen des Interreg Italien-Schweiz Projektes IRKIS“ (Hübl & Scheidl 2010) und „Interventionsplan (IRKIS) Gurgllawine, Gomagoi - Gemeinde Stilfs, Analyse des Lawinenabganges vom 9. Februar 2009 und Vorschläge“ (Stoffel et al. 2010).

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Während der Projektumsetzung zeigte sich immer wieder, dass die Projektziele sehr ambitiös formuliert waren. Dank der engen Zusammenarbeit zwischen Verwaltung, Wissenschaft und Praxis konnten die Projektziele trotzdem erreicht werden. Diese notwendige enge Zusammenarbeit war für alle Beteiligte eine Herausforderung und stellte die Basis für die im Rahmen des Projektes IRKIS erreichten Entwicklungen und Erfahrungen dar. Aufgrund der regen Diskussionen in den Arbeitsgruppen des Projektes wurden viele neue Entwicklungen angestossen.

Die Analyse der Messnetze zeigte, dass in beiden Regionen ein dichtes Messnetz für das Monitoring der Umweltbedingungen vorhanden ist. Die Analyse zeigte aber auch auf, dass an einigen Stellen noch ein Verdichtungsbedarf vorhanden ist. Handlungsbedarf wurde vor allem in Bezug zum Monitoring der Bodenfeuchte erkannt. Das Projekt IRKIS hat dazu beigetragen, dass die verschiedenen Verfahren für die Beobachtung dieses Umweltparameters getestet, evaluiert und weiterentwickelt werden konnten. Die Erfahrungen haben gezeigt, welche Vor- und Nachteile die verschiedene Verfahren wie die Modellierung der Bodenfeuchte, die Messung vor Ort oder die Messung mittels Fernerkundungsverfahren haben können. Je nach Situation und Fragestellung kann aufgrund dieser Erfahrungen die geeignete Methode ausgewählt werden. Das Projekt hat aber auch gezeigt, dass die Kombination von mehreren Methoden sehr interessant sein kann, indem die Vorteile der einzelnen Verfahren kombiniert werden.

Im Rahmen des Projektes konnte ausserdem eine für Südtirol wesentliche Informationslücke geschlossen werden, nämlich die Information zum in der Schneedecke vorhandenen Wasseräquivalent. Dank einer Übertragung der in der Schweiz angewandten Verfahren zur Erstellung von Schneewasseräquivalentkarten nach Südtirol konnte dort viel Entwicklungsarbeit eingespart werden. Diese Karten stellen eine wertvolle Entscheidungsgrundlage, sowohl für die Hochwasservorhersage als auch für die Vorhersage von Trockenperioden dar.

Die Dichte an Messstationen und der Umfang der Daten erfordert zunehmend Verfahren zur Aggregation der Daten in aussagekräftige Interpretationshilfen und flächendeckende Beschreibungen von Systemzuständen. Im Rahmen des Projektes wurde versucht, den Dispositionsansatz von Naturgefahren dahingehend zu erweitern, dass dieser eine Grundlage für die Beurteilung des täglich sich ändernden Zustandes der Gebirgseinzugsgebiete darstellen kann. Von beiden Projektpartnern gemeinsam wurde ein Verfahren entwickelt, das auf Basis der Daten zu Niederschlag, Abfluss, Schnee, Temperatur etc. die Beurteilung der variablen Disposition für erhöhten Gebietsabfluss ermöglicht.

Der Dispositionsansatz soll grundsätzlich den Naturgefahrenverantwortlichen helfen, unabhängig von der Meteoprognose die aktuelle Situation zu bewerten und diese räumlich zu differenzieren. Idealerweise ist der Dispositionsansatz an die Einleitung der Beobachtungsphase vor Ort geknüpft bzw. an die Vorbereitungsphasen der Interventionspläne angelehnt.

Am Beispiel der Gemeinde Davos wurde versucht, ein Frühwarnsystem für den lokalen Einsatz im Falle von Hochwasserereignissen zu entwickeln. Im Rahmen dieses Pilotversuches wurden Abflussprognosen für die Seitenbäche sowie hochaufgelöste Daten zur Schneedecke und zur Bodenfeuchtig-

keit erstellt und versuchsweise für die Naturgefahrenverantwortlichen der Gemeinde Davos aufbereitet und zur Verfügung gestellt. Gemeinsam mit diesen Behörden wurde das Potenzial einer Anwendung dieses Verfahrens in anderen Einzugsgebieten diskutiert und evaluiert. Es zeigte sich, dass aufgrund der kleinräumigen Lage und der damit verbundenen kurzen Vorwarnzeiten die Installation von einfachen Regenmessstationen im Oberlauf der Seitenbäche auch zielführend wäre. Die im Rahmen von IRKIS durchgeführten Pilotversuche zeigten aber ein grosses Potenzial für Abflussprognosen für Hochwasserereignisse aufgrund der Schneeschmelze auf. Der Test zeigte auch, dass Frühwarnsysteme auf der lokalen Ebene nur inwert gesetzt werden können, wenn die lokalen Verantwortlichen und Einsatzkräfte diese Instrumente bedienen oder interpretieren können.

In Südtirol wurde das bestehende Hochwasserprognosemodell dahingehend angepasst, dass es einerseits die neu im Rahmen von IRKIS entstandenen Informationsebenen wie die Schneedeckenverteilungskarte für die Eichung des Schnee-Moduls berücksichtigen und andererseits die für das Dispositionsmodell notwendigen Parameter zur Verfügung stellen kann. Es wurde weiters die Prognose Abflüsse in Trockenperioden verbessert.

Bei der Umsetzung der in IRKIS aufgezeigten Möglichkeiten und Verfahren muss immer beachtet werden, dass bei der Auswahl der Methoden und Instrumente für das Monitoring, für die Frühwarnung und für die Aufbereitung von unwetterrelevanter Information auf die Bedürfnisse der lokalen Einsatzkräfte und die vorherrschenden naturräumlichen Rahmenbedingungen berücksichtigt werden müssen. Wichtig ist ausserdem die Gewährleistung der vertikalen Integration zwischen der (groben) Grundversorgung des Bundes (GIN, Vorhersagen), der kantonalen sowie der lokalen Entscheidungsebene (Interventionsebene). Nur mit einer stringenten Abstimmung kann auch eine Schnittstelle zur Interventionsplanung geschaffen werden.

Das Projekt IRKIS hat aufgezeigt, mit welchen Methoden und Verfahren die Frühwarnung in alpinen Einzugsgebieten verbessert werden kann. In den nächsten Jahren wird weiter am Ausbau des Messnetzes für die Bodenfeuchte, an der Anwendung und Umsetzung des Dispositionsansatzes und an der Verbindung zwischen Frühwarnsystemen und Interventionsplänen gearbeitet werden.

8 Projektberichte

Borga, M. (2010): HYDRORADAR - Sviluppo di procedure di analisi ed elaborazioni di osservazioni da radar meteorologico per la stima di precipitazione al suolo e previsione di piena e di colata detritica. Rapporto scientifico n. 1. Padova.

Borga, M. (2011): HYDRORADAR - Sviluppo di procedure di analisi ed elaborazioni di osservazioni da radar meteorologico per la stima di precipitazione al suolo e previsione di piena e di colata detritica. Rapporto scientifico n. 2. Padova

Busetto, D. (2010): Recherche und Sammlung der vorhandenen Daten bezüglich Bodentypen in Südtirol. Projektbericht Interreg Italien-Schweiz "IRKIS-Interregionales Frühwarn- und Kriseninformationssystem. Bozen.

Busetto, D. (2011): Elaborazione di una carta dei suoli della Valle Venosta. Erstellung einer Bodenkarte im Einzugsgebiet Vinschgau. Projektbericht Interreg Italien-Schweiz "IRKIS-Interregionales Frühwarn- und Kriseninformationssystem. Bozen.

Busetto, D. (2012): Bericht über die recherchierten Daten und Ergebnisse der Bodenfeuchtemessungen. Relazione sui dati raccolti e risultati delle misure di umidità del suolo. Projektbericht Interreg Italien-Schweiz "IRKIS-Interregionales Frühwarn- und Kriseninformationssystem. Bozen.

Dall'Amico, M. (2010): Elaborato tecnico sui metodi di spazializzazione della neve e proposta di un algoritmo per la Provincia di Bolzano nell'ambito del progetto IRKIS. Mountain-eering rapporto di progetto. Bolzano.

Dobmann, J. (2009): Hochwasserabschätzung in kleinen Einzugsgebieten der Schweiz. Interpretations- und Praxishilfe, Dissertation. Univ. Bern.

Herzog, B. (2011): Interventionsplanung Davos. Objektblätter zu den Schwachstellen. Herzog Ingenieure AG Projektbericht Interreg Italien-Schweiz "IRKIS-Interregionales Frühwarn- und Kriseninformationssystem. Davos.

Herzog, B. (2012): Evaluation des Frühwarnsystems Unwetter Davos aus der Sicht des Praktikers. Herzog Ingenieure AG Projektbericht Interreg Italien-Schweiz "IRKIS-Interregionales Frühwarn- und Kriseninformationssystem. Davos.

Hübl, J.; Scheidl, C. (2010): Interventionskarte Laag (Gemeinde Neumarkt) im Rahmen des Interreg Italien.Schweiz Projektes 7059790 – IRKIS. BOKU Projektbericht Interreg Italien-Schweiz "IRKIS-Interregionales Frühwarn- und Kriseninformationssystem. Wien.

Jonas, T. (2010): Technischer Bericht zur Vorgehensweise zur periodischen Ermittlung der aktuellen Schneeverteilung in der Region Bozen im Rahmen des Interreg Projekts IRKIS. SLF Projektbericht Interreg Italien-Schweiz "IRKIS-Interregionales Frühwarn- und Kriseninformationssystem. Davos.

Magnusson, J. (2011): Technischer Bericht zur Berechnung der Schneewasseräquivalentkarten für den Winter 2010/11 für Südtirol. SLF Projektbericht Interreg Italien-Schweiz "IRKIS-Interregionales Frühwarn- und Kriseninformationssystem. Davos.

Mani, P. (2011): IRKIS: Modellentwicklung variable Disposition. Methodenbericht. geo7 AG Projektbericht Interreg Italien-Schweiz "IRKIS-Interregionales Frühwarn- und Kriseninformationssystem. Bern, Bozen.

Mani, P. (2012): Frühwarnsystem auf Basis Dispositionsbeurteilung. Umsetzungskonzept für das Pilotgebiet Prättigau. geo7 AG Projektbericht Interreg Italien-Schweiz "IRKIS-Interregionales Frühwarn- und Kriseninformationssystem. Bern, Chur.

Marty, C.; Henzen, A. (2011): Übersicht über die meteorologischen und hydrometrischen Messnetze in Graubünden. Davos, Chur.

Naef, F., Margreth, M., Schmocker-Fackel, P., Scherrer, S. (2007): Automatisch hergeleitete Abflussprozesskarten – ein neues Werkzeug zur Abschätzung von Hochwasserabflüsse. Wasser Energie Luft 3, 267-303.

Pasolli, L.; Katarzyna, E.L.; Notarnicola, C.; Zebisch, M. (2011): Soil Moisture Retrieval over South Tyrol: methodologies and results - Estimation Approaches and Methodologies, Results over South Tyrol test site. EURAC Projektbericht Interreg Italien-Schweiz "IRKIS-Interregionales Frühwarn- und Kriseninformationssystem. Bozen.

Stoffel, L.; Margreth, S.; Rhyner, J. (2010): Interventionsplan (IRKIS) Gurgllawine, Gomagoi - Gemeinde Stilfs (Ita). Analyse des Lawinenabganges vom 9. Februar 2009 und Vorschläge. SLF Projektbericht Interreg Italien-Schweiz "IRKIS-Interregionales Frühwarn- und Kriseninformationssystem. Davos.

Vignoli, G. (2010): Consulenza Idrografica: analisi dati di livello e portata per la verifica e la eventuale realizzazione di scale di deflusso per fiumi e torrenti del territorio altoatesino. CISMA Rapporto di progetto "IRKIS – Sistema Informativo Interregionale per le crisi idrologiche ed idriche". Id. progetto: 7059790 – Programma : Interreg IVA Italia-Svizzera. Bolzano.

Wever, T.; Lehning, M. (2011a): Zwischenbericht IRKIS September 2011. Regionalmodul DAVOS und Validierung. SLF Projektbericht Interreg Italien-Schweiz "IRKIS-Interregionales Frühwarn- und Kriseninformationssystem. Davos.

Wever, T.; Lehning, M. (2011b): Zwischenbericht IRKIS September 2011. Vorbereitung des SNOWPACK Modells für Einschätzung des Bodenwasserspeichers / der Bodenfeuchte an den IMIS Stationen im Kanton GR. SLF Projektbericht Interreg Italien-Schweiz "IRKIS-Interregionales Frühwarn- und Kriseninformationssystem. Davos.

Willi, C.; Schulze, T. (2010): Gefahren- und Risikoanalyse Südtirol - Schlussbericht. Ernst Basler & Partner AG Projektbericht Interreg Italien-Schweiz "IRKIS-Interregionales Frühwarn- und Kriseninformationssystem. Zürich, Bozen.

Zischg, A. (2010): Diskussionsgrundlage für die Entwicklung des „Ampelsystems“ im Rahmen des Interreg Italien-Schweiz Projektes „IRKIS – Interregionales Kriseninformationssystem“. Arbeitspaket 3 „Entscheidungsgrundlagen für Frühwarnung und Intervention“. Bozen, Chur.

Zischg, A.; Geier, G.; Nadalet, R.; Dinale, R.; Laimer, M.; Gheser, F.; Berger, E. (2010): Zusammenfassender Bericht zur Analyse und Bewertung der bestehenden Messnetze. Projektbericht Interreg Italien-Schweiz "IRKIS-Interregionales Frühwarn- und Kriseninformationssystem. Bozen.

Zischg, A.; Wilhelm, C.; Mani, P.; Nadalet, R.; Rhyner, J.; Lehning, M.; Romang, H. (2010): Ampelsystem zur Früherkennung von Unwettersituationen. Ergebnisse des Projektworkshops vom 25.10.2010 in Chur. Projektbericht Interreg Italien-Schweiz "IRKIS-Interregionales Frühwarn- und Kriseninformationssystem. Chur.

9 Weitere Literatur

Bavay, M.; Lehning M.; Jonas, T.; Löwe, H. (2009): Simulations of future snow cover and discharge in Alpine headwater catchments, *Hydrol. Processes,* 22, DOI: 10.1002/hyp.7195.

Egli, L.; Jonas, T.; Meister, R. (2009): Comparison of different automatic methods for estimating snow water equivalent; Cold Regions Science and Technology, 57, 107-115.

Hirashima, H.; Yamaguchi, S.; Sato, A.; Lehning, M. (2010): Numerical modeling of liquid water movement through layered snow based on new measurements of the water retention curve, *Cold Reg. Sci. Technol.* (2010), 64/2, 94-103, doi: 10.1016/j.coldregions.2010.09.003.

Jonas, T.; Marty, C.; Magnusson, J. (2009): Estimating the snow water equivalent from snow depth measurements in the Swiss Alps; 2009; Journal of Hydrology, 378, 161-167.

Lehning, M.; Bartelt, P.; Brown, R.L.; Russi, T.; Stöckli, U.; Zimmerli, M. (1999): Snowpack Model Calculations for Avalanche Warning based upon a new Network of Weather and Snow Stations, Cold Reg. Sci. Technol., 30, 145-157.

Lehning, M.; Völksch, I.; Gustafsson, D.; Nguyen, T.A.; Stähli, M.; Zappa, M. (2006): ALPINE3D: A detailed model of mountain surface processes and its application to snow hydrology, *Hydrol. Processes,* 20, 2111-2128.

Lehning, M.; Fierz, C. (2008): Assessment of snow transport in avalanche terrain, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 51, 240-252, DOI: 10.1016/j.coldregions.2007.05.012.

Schirmer, M.; Lehning, M.; Schweizer, J. (2009): Statistical forecasting of avalanche danger using simulated snow cover data, *J. Glaciol.*, 55/193, 761-768.

Sturm, M.; Taras, B.; Liston, G.; Derksen, C.; Jonas, T.; Lea, J. (2010): Estimating regional and global snow water resources using depth data and climate classes of snow; Journal of Hydrometrology, early online view.

Università degli Studi di Padova, Provincia Autonoma di Bolzano (2006): ARFFS Adige River Flood Forecasting System. Manuale Tecnico. Padova, Bolzano.

Viviroli, D.; Gurtz, J.; Zappa, M. (2007): The Hydrological Modelling System PREVAH. Geographica Bernensia P40. Bern: Institute of Geography, University of Bern.

Viviroli D., Gurtz J., Zappa M., Weingartner R. (2009): An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing tools. Environmental Modelling & Software 24:1209–1222.

Zimmermann, M.; Mani, P.; Gamma, P. (1997): Murganggefahr und Klimaänderung - ein GIS-basierter Ansatz. vdf Hochschulverlag an der ETH, Zürich.

10 Danksagung

Der Bericht basiert auf den Beiträgen von folgenden Personen. Herausgeber und Redaktion bedanken sich herzlich für diese Beiträge:

Projektleitung und Projektmanagement:
Hanspeter Staffler (Autonome Provinz Bozen Südtirol)
Christian Wilhelm (Kanton Graubünden)
Rudi Nadalet (Autonome Provinz Bozen Südtirol)
Margit Laimer (Autonome Provinz Bozen Südtirol)
Andreas Zischg (Abenis Alpinexpert GmbH/Abenis AG)

Beteiligte der Projektpartner:
Elisabeth Berger (Autonome Provinz Bozen Südtirol)
Roberto Dinale (Autonome Provinz Bozen Südtirol)
Kurt Eberle (Gemeinde Davos)
André Fehr (Gemeinde Davos)
Günther Geier (Autonome Provinz Bozen Südtirol)
Fabio Gheser (Autonome Provinz Bozen Südtirol)
Irene Hell (Autonome Provinz Bozen Südtirol)
Hanspeter Hefti (Gemeinde Davos)
Reto Hefti (Kanton Graubünden)
Andreas Huwiler (Kanton Graubünden)
Gian Claudio Leeger (Kanton Graubünden)
Urban Maissen (Kanton Graubünden)
Curdin Mengelt (Kanton Graubünden)
Sonya Oberdorfer (Autonome Provinz Bozen Südtirol)
Magnus Rageth (Kanton Graubünden)
Susanne Rizzolli (Autonome Provinz Bozen Südtirol)
Markus Stadler (Kanton Graubünden)
Edi Taverna (Kanton Graubünden)
Mauro Tollardo (Autonome Provinz Bozen Südtirol)
Matteo Vischi (Autonome Provinz Bozen Südtirol)

Beteiligte Auftragnehmer:
Mathias Bavay (SLF)
Martin Bettler (Herzog Ingenieure)
Marco Borga (Universität Padovva)
Daniela Busetto (Technisches Büro Busetto)
Matteo Dall'Amico (Mountain-eering srl)
Nicholas Dawes (SLF)

Judith Dobmann (geo7 AG)
Charles Fierz (SLF)
Andrè Henzen (SLF)
Beatrice Herzog (Herzog Ingenieure)
Tobias Jonas (SLF)
Michael Lehning (SLF)
Katarzyna Ewa Lewinska (EURAC)
Jan Magnusson (SLF)
Christoph Marty (SLF)
Peter Mani (geo7 AG)
Claudia Notarnicola (EURAC)
Luca Pasolli (EURAC)
Jakob Rhyner (SLF)
Hans Romang (MeteoSchweiz)
Tillmann Schulze (Ernst Basler & Partner AG)
Jürg Schweizer (SLF)
Gianluca Vignoli
Nander Wever (SLF)
Christian Willi (Ernst Basler & Partner AG)

Beteiligte (Teilnahme an Workshops, Review, Evaluation und Bewertung, sonstige Beiträge):
Alex Badoux (WSL)
Gian Reto Bezzola (BAFU)
Walter Castelberg (Kanton Graubünden)
Eva Frick (tur GmbH)
Christoph Graf (WSL)
Estelle Grueter (MeteoSchweiz)
Christian Haeberli (MeteoSchweiz)
Carsten Jasper (BAFU)
Bernhard Krummenacher (Geotest AG)
Christophe Lienert (ETHZ)
Michael Margreth (Soilcom GmbH)
Anton Obwex (Autonome Provinz Bozen Südtirol)
Harald Pircher (Autonome Provinz Bozen Südtirol)
Hans Romang (Meteoschweiz)
Marcel Roth (Kanton Graubünden)
Simon Scherrer (Scherrer Hydrologie)
Catherine Stocker (MeteoSchweiz)
Stephan Wohlwendt (Fürstentum Liechtenstein)
Benno Zarn (Hunziker, Zarn & Partner AG)
Massimiliano Zappa (WSL)

Notizen