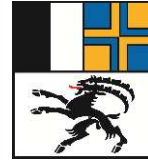


Autonome Provinz Bozen
Abteilung
Brand- und Zivilschutz



Kanton Graubünden
Amt für Wald

IRKIS: Modellentwicklung variable Disposition

Methodenbericht

Impressum

Projektbearbeitung

geo7 AG, geowissenschaftliches Büro

Neufeldstrasse 5 – 9, 3012 Bern
Tel. +41 (0)31 300 44 33

P. Mani, lic. phil. nat.

Änderungskontrolle

Version	Datum	Name / Stelle	Bemerkungen
0.1	04.10.2010	P. Mani	Erstellt
0.9	30.12.2010	P. Mani	Bericht Vernehmlassung
1.0	06.01.2011	P. Mani	Definitiv

Anmerkungen zum Dokument

Erstellt mit Microsoft Office Word, Version 2007

Dateiname \\srvbiblio\all\projekte\2010\994_irkis01\bericht\be994_02a_ma methodenbericht.docx

Dateigrösse 9575 KBytes

Inhaltsverzeichnis

- 1 Ausgangslage 1**
- 2 Problemstellung und Zielsetzung 2**
- 3 Literatur-Recherche..... 3**
 - 3.1 Vorhersage- und Warnsysteme 3
 - 3.2 Methoden und Parameter 5
 - 3.3 Schwellenwerte 7
 - 3.4 Messsysteme 8
 - 3.5 Schlussfolgerungen 10
- 4 Konzeptionelles Modell..... 11**
 - 4.1 Anforderungen an das Vorhersagesystem 11
 - 4.2 Lösungsansatz 11
 - 4.3 Dispositionsmodell 11
 - 4.4 Massgebende Prozesse 12
 - 4.4.1 Abflussbildung 13
 - 4.4.2 Feststoffhaushalt 14
 - 4.5 Beurteilungsmodell..... 14
 - 4.5.1 Abflussbildung 14
 - 4.5.2 Feststoffhaushalt 20
 - 4.6 Aggregationsmethodik..... 22
 - 4.7 Räumliche Gliederung 23
- 5 Hinweise für die Umsetzung 25**
 - 5.1 Technische Lösungsansätze..... 25
 - 5.2 Möglichkeiten und Grenzen 25
 - 5.3 Inputs aus Expertenworkshop 25
 - 5.4 Nächste Schritte 26

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Radar-Niederschlag vom 6. Juni 2008 im Napfgebiet (Emmental)	2
Abbildung 2	Abflussprognose für den Pegel Schwaibach/Kinzig (Baden-Württemberg).....	3
Abbildung 3	Hochwasserwarnung Rheinland-Pfalz für Einzugsgebiete kleiner als 200 km ²	4
Abbildung 4	Flash Flood Guidance für den 3-Stunden Niederschlag für Colorado.....	6
Abbildung 5	Untergrenze der Radarsichtbarkeit in der Schweiz in m ü.M. (Quelle: MeteoSchweiz).....	9
Abbildung 6	Dispositionsmodell	12
Abbildung 7	Abflussprozesstypenkarte für das Emme-Einzugsgebiet (nach Naef & al. 2008)	15
Abbildung 8	Hochwasserdispositionskarte Emmental, aggregiert auf Einzugsgebiete (Flächen) und Basisgebiete (Piecharts) (nach Dobmann 2009)	16
Abbildung 9	Vorregenindex Teileinzugsgebiet Emme für 3 und 5 Tage (Abminderung: $0.9^{\text{Anz. Tage}}$).....	17
Abbildung 10	Bewertung variable Disposition für ein Teileinzugsgebiet der Emme anhand des Modell-Bodenwassergehaltes.....	18
Abbildung 11	Überblick Beurteilung aktuelle Disposition Abflussbildung	19
Abbildung 12	Jährliche Tiefe der Auftauschicht für verschiedene Permafrost-Messstellen (Noetzli & Vonder Muehll 2010)	21
Abbildung 13	Übersicht Bewertungsverfahren aktuelle Disposition Feststoffhaushalt.....	22
Abbildung 14	„Scharfe“ (links) und Fuzzy-Klassifikation (rechts) des Permafrost-Indexes (geo7 2010).....	23
Abbildung 15	Basisgebiete Kanton Graubünden (Quelle: HADES).....	24
Abbildung 16	Gebietsgliederung Südtirol	24
Abbildung 17	Beispiel Warnstufenkarte für das Emmental (fiktiv).....	26

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Charakterisierung Abflussprozesstypen nach Naef & al (2008).....	15
-----------	--	----

Glossar

BAFU	Bundesamt für Umwelt
IFKIS	Interkantonales Frühwarnungs- und Kriseninformationssystem
GIN	Gemeinsame Informationsplattform Naturgefahren

1 Ausgangslage

Verschiedene Ereignisse in den vergangenen Jahren haben gezeigt, dass nicht nur mit Verbauungsmaßnahmen, sondern auch mit organisatorischen Massnahmen die Auswirkungen von Hochwasserereignissen deutlich reduziert werden können. Grundvoraussetzung für solche organisatorischen Massnahmen ist, dass genügend Zeit zur Verfügung steht, um sie vorbereiten zu können. Dies erfordert Frühwarnsysteme, mit denen sich möglichst zuverlässig zu erwartende Gefahrensituationen erkennen lassen.

Basierend auf der Ursachenanalyse, die in der Schweiz zu den Hochwasserereignissen 2005 durchgeführt wurde (vgl. Bezzola & Hegg 2008), beauftragte der Bundesrat die zuständigen Stellen, die Warnung vor Naturgefahren besser aufeinander abzustimmen und zu optimieren (OWARNA). Ein Resultat aus diesen Bestrebungen ist die Gemeinsame Informationsplattform Naturgefahren GIN. Auf dieser Plattform sollen zukünftig alle für die Warnung vor Naturereignissen notwendigen Informationen zur Verfügung gestellt werden können.

In verschiedenen Kantonen sind ebenfalls Bestrebungen zum Aufbau von Frühwarnsystemen im Gange, so auch im Kanton Bern. In mehreren Regionen werden in Pilotprojekten an die lokalen Gegebenheiten angepasste Systeme aufgebaut (Projekt WARN). Im Emmental, einem voralpinen Gebiet, wird geprüft, wieweit mit einem an die Lawinenwarnung angelehnten Gefahrenstufen-Modell die Disposition für Wildbachprozesse und Hangmuren täglich beurteilt werden kann. *geo7* ist massgeblich an der Entwicklung dieses Systems beteiligt.

In der Provinz Südtirol Bozen beobachtet das Hydrographische Amt laufend die hydro-meteorologische Situation. Im Ereignisfall tritt das Funktionszentrum Zivilschutz und die Technische Einsatzleitung Wildbach in der Hochwasserzentrale in Aktion und koordiniert die notwendigen Massnahmen. Die Hochwasserwarnung wird in Zusammenarbeit zwischen allen kompetenten Ämtern formuliert und an die Einsatzkräfte und an die zuständigen Stellen in den Gemeinden weitergegeben.

Um bestehende Frühwarn- und Kriseninformationssysteme zu optimieren, starteten die Autonome Provinz Bozen Südtirol und der Kanton Graubünden ein gemeinsames Projekt im Rahmen des Interreg Italien-Schweiz 2007 – 2013. Im Zusammenhang mit diesem Projekte wurde *geo7* beauftragt, einen Modellentwurf für die Bewertung der variablen Disposition für die Auslösung von Hochwasser- und Wildbachprozessen zu erarbeiten.

2 Problemstellung und Zielsetzung

Die Frühwarnung vor schadenbringenden Hochwasser- und Wildbachprozessen erfordert Kenntnisse über die zu erwartende Entwicklung in den nächsten Stunden bis Tagen. Dies umfasst Informationen zum erwarteten Ausmass eines Ereignisses und zum Zeitpunkt des Eintretens. Dabei 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, advective Wetterlagen. Für solche Gebiete existieren heute bereits verschiedene Hochwasservorhersagesysteme (vgl. Kapitel 3.1).

In Wildbach- und Wildflusseinzugsgebieten von einigen 10 bis einigen 100 km² Grösse spielen vermehrt konvektive Wetterlagen mit intensiven, teilweise sehr lokalen Niederschlägen eine entscheidende Rolle. So haben konvektive Gewitterzellen üblicherweise eine Ausdehnung von 10 bis 100 km². Wie das Beispiel in Abbildung 1 zeigt, kann eine Gewitterzelle nur ein oder zwei Einzugsgebiete betreffen. Dies stellt besondere Herausforderungen an ein Vorhersagesystem.

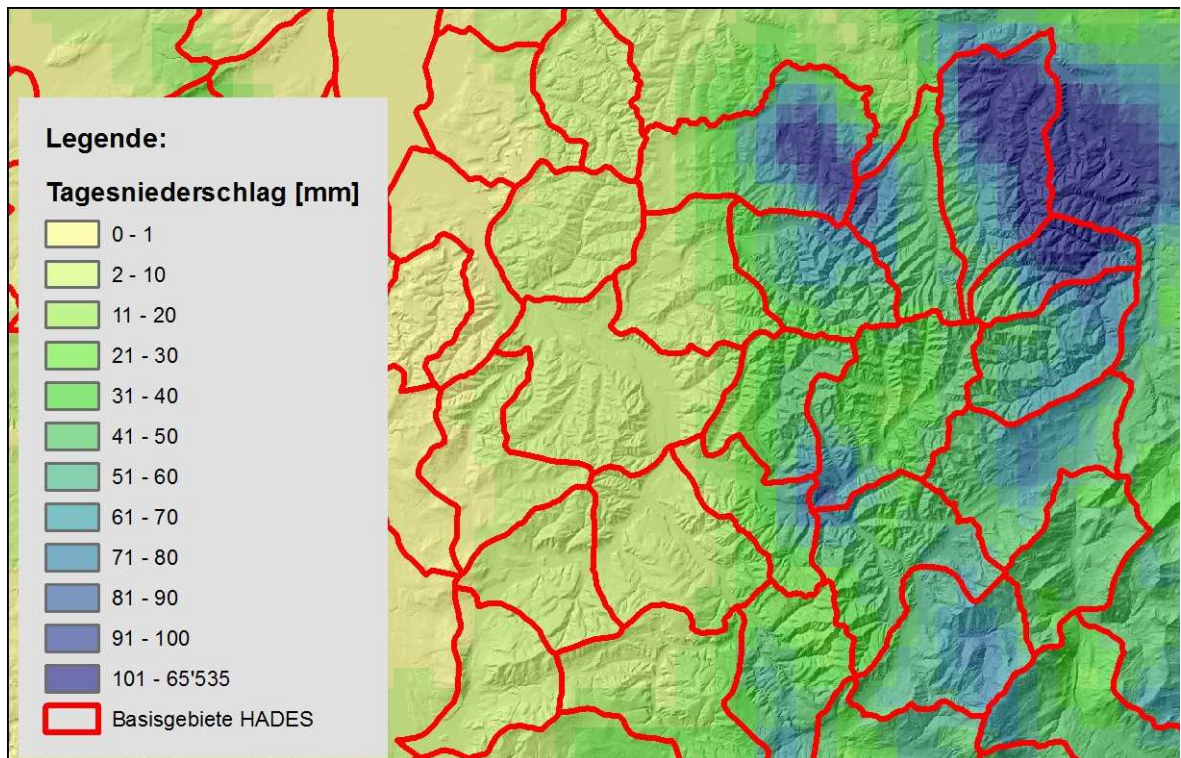


Abbildung 1 Radar-Niederschlag vom 6. Juni 2008 im Napfgebiet (Emmental)

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf der zweiten Kategorie. Dazu soll ein Vorschlag für ein Bewertungsverfahren für die aktuelle Disposition von Einzugsgebieten im Hinblick auf Hochwasser- und Wildbachprozesse erarbeitet werden. In einem Konzept soll aufgezeigt werden, wie auf der Basis von vorhandenen flächendeckenden und zeitlich aufgelösten Monitoring-Daten die Disposition klassiert werden kann. Dabei geht 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.

Im Folgenden wird ein Überblick über die Literaturlauswertung, die im Rahmen dieses Projektes zum Thema durchgeführt wurde, gegeben (Kapitel 3). In Kapitel 4.1 werden die Anforderungen an ein Vorhersagesystem für kleinere Einzugsgebiete detaillierter beschrieben. In den folgenden Kapiteln wird ein konzeptionelles Modell für die Beurteilung der Disposition für Wildbach- und Hochwasserprozesse vorgestellt.

3 Literatur-Recherche

3.1 Vorhersage- und Warnsysteme

In der Literatur existiert eine grosse Zahl von Beschreibungen von Verfahren, Modellen und Messgrößen für die Vorhersage von Hochwassersituationen. Beschreibungen von operationellen Vorhersagesystemen sind jedoch wesentlich seltener. In der Mehrzahl der Fälle handelt es sich dabei um Systeme für grössere Flusseinzugsgebiete mit Abflussmessungen, in denen der Einsatz von Niederschlag-Abfluss-Modellen möglich ist. Für solche Gebiete können Abflussprognosen erstellt werden, die den Verlauf einer Hochwasserganglinie prognostizieren. Beispiele aus der Schweiz sind das Abflussvorhersagesystem des BAFU für den Rhein (Bürgi et al., 2007) oder das Vorhersagesystem für die Rhone, das von den Kantonen Wallis und Waadt entwickelt wurde (Jordan et al., 2007). Letzteres geht über ein reines Vorhersagesystem hinaus, da es auch Komponenten für das Hochwassermanagement, v.a. im Hinblick auf den Wasserrückhalt in Speicherseen beinhaltet.

In Baden-Württemberg veröffentlicht die Hochwasservorhersagezentrale bereits seit rund 20 Jahren Abflussvorhersagen für ausgewählte Pegel (Bremicker et al. 2006) (vgl. Abbildung 2). Um eine genügende Genauigkeit zu gewährleisten, beschränken sich diese Vorhersagen in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgrösse auf einen Zeitraum von 4 (kleine Einzugsgebiete) bis maximal 24 Stunden für den Oberrhein. Seit dem Jahr 2000 werden zusätzlich zu den Vorhersagen auch Hochwasserfrühwarnungen ausgegeben, die sich auf einen Zeitraum von bis zu 7 Tagen beziehen. Diese basieren auf einem detaillierten Wasserhaushaltsmodell, das neben umfangreichen meteorologischen Mess- und Vorhersagedaten auch alle relevanten hydrologischen Prozesse kontinuierlich abbildet.

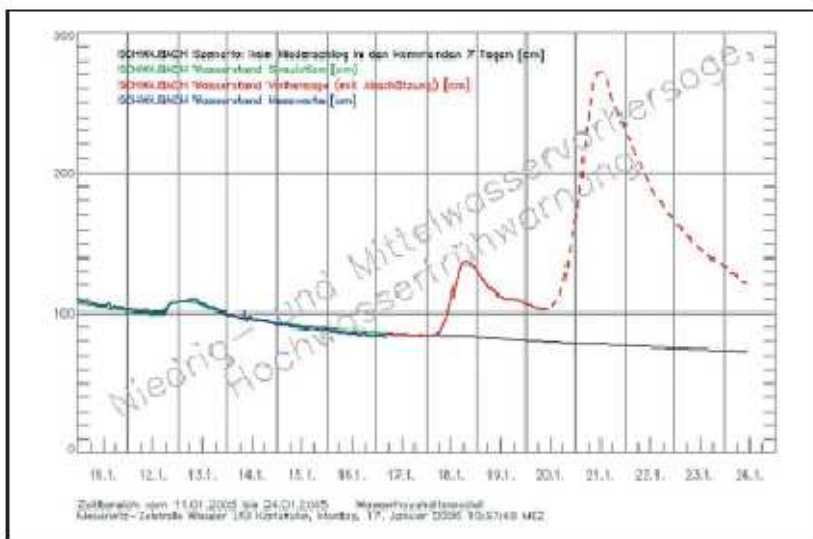


Abbildung 2 Abflussprognose für den Pegel Schwaibach/Kinzig (Baden-Württemberg) (Bremicker et al. 2006)

In Italien existiert im Piemont ein operationelles Hochwasser-Vorhersagesystem für das obere Po-Einzugsgebiet (ca. 40'000 km²) (Rabuffetti & Barbero, 2004). Warnungen werden für 24 Querprofile an den Hauptflüssen ausgegeben.

Neben diesen grossräumigen Systemen sind in letzter Zeit auch Abflussvorhersagesysteme für kleinere Einzugsgebiete beispielsweise für die Linth im Kanton Glarus (Einzugsgebiet 600 km², vgl. Romang et al. 2007) oder für die Sihl (Einzugsgebiet 336 km², vgl. Zappa et al. 2007) erstellt worden. In beiden Fällen wird ein auf dem hydrologischen Modell PREVAH (Gurtz et al. 1999) basierendes Prognosemodell eingesetzt.

Solche Systeme stehen jedoch bei der vorliegenden Studie nicht im Vordergrund, da sie für kleinere, ungemessene Einzugsgebiete nicht angewendet werden können. So weisen Rabuffetti & Barbero (2004) darauf hin, dass das Vorhersagemodell für das Piemont verbessert werden müsse, damit auch für kleinere Einzugsgebiete Aussagen gemacht werden können.

Dabei stellt sich aber die Frage, ob für kleine Einzugsgebiete Abflussprognosen in Form von Hochwasserganglinien grundsätzlich sinnvoll sind. Neben der Einschränkung, dass für kleinere Einzugsgebiete oft keine Abflussmessungen vorliegen und damit die Möglichkeit einer Modellierung entfällt, ist es vor allem die Tatsache, dass in kleineren Einzugsgebieten Hochwasser meistens durch konvektive Zellen (Gewitter) ausgelöst werden, die dies in Frage stellt. Denn eine orts- und zeitscharfe Vorhersage von Gewitterzellen wird auch mit den hochaufgelösten heute zur Verfügung stehenden Wettermodellen in absehbarer Zeit kaum möglich sein. Deshalb wurde im Rahmen des Projektes TIMIS flood (Transnational Internet Map Information System on Flooding) ein System für kleinere Einzugsgebiete entwickelt (Bremicker et al. 2006). In diesem Frühwarnsystem wird durch die kombinierte Anwendung von meteorologischen und hydrologischen Modellen eine regionsbezogene Hochwasserfrühwarnkarte erstellt (Abbildung 3).

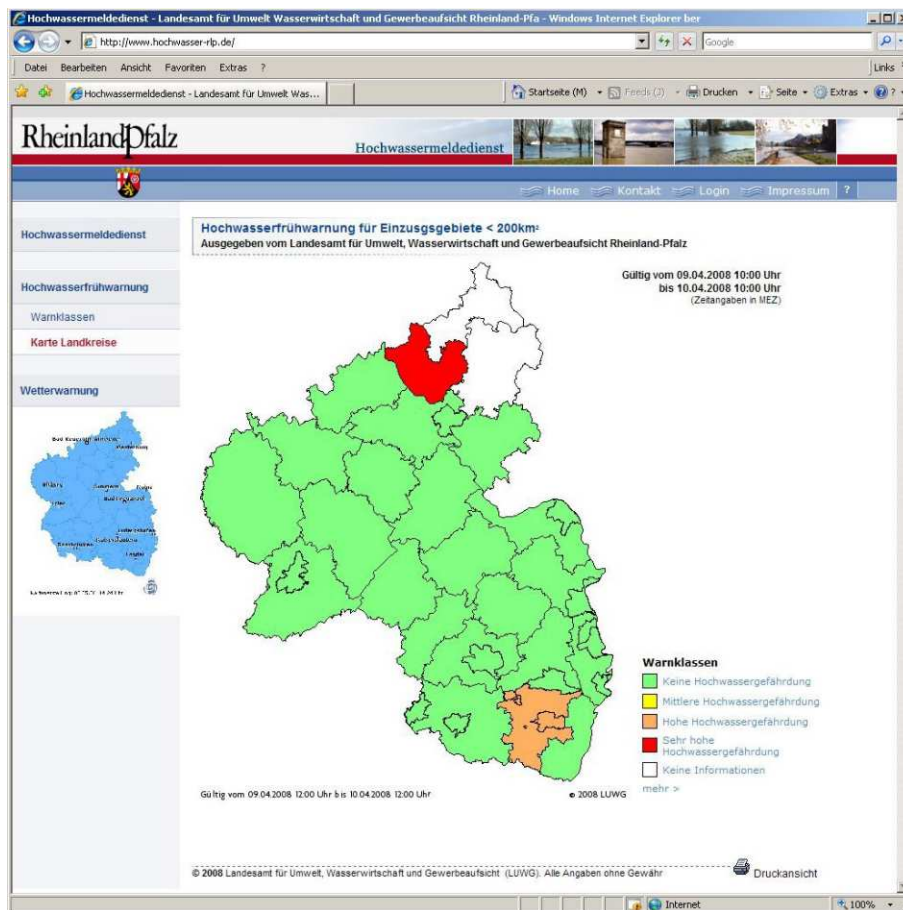


Abbildung 3 Hochwasserwarnung Rheinland-Pfalz für Einzugsgebiete kleiner als 200 km²

Diese Modelle erlauben auch Vorhersagen für Einzugsgebiete kleiner als 200 km². Die prognostizierte Hochwassergefährdung wird in vier Warnstufen eingeteilt. Dabei werden der aktuelle Zustand des Gebiets und die Abflussbereitschaft berücksichtigt. Mit diesem System wird heute die Hochwassersituation in Baden-Württemberg für die nächsten 24 und 48 Stunden beurteilt, in der Rheinland-Pfalz für die nächsten 24 Stunden.

3.2 Methoden und Parameter

Im Zusammenhang mit der Abflussvorhersage gibt es im methodischen Bereich eine Vielzahl von Entwicklungen. Sich einen vollständigen Überblick zu verschaffen, würde einen riesigen Aufwand erfordern. Im Folgenden werden einige methodische Aspekte, die für die Möglichkeiten und Grenzen in der Abflussvorhersage exemplarisch sind, beschrieben.

Ein Aspekt, an dem viel geforscht wird, ist die Übertragung von Parametersätzen für Niederschlag-Abfluss-Modelle von geeichten Einzugsgebieten auf Einzugsgebiete ohne Abflussmessung. Parajka et al. 2005 geben eine Übersicht über verschiedene Regionalisierungsmethoden und bewerten ihre Güte anhand von österreichischen Einzugsgebieten. Ein weiteres Beispiel, bei dem Parametersätze von gemessenen auf ungemessene Einzugsgebiete übertragen werden, beschreiben Viviroli et al. (2009): Sie entwickelten verschiedene Methoden für die Regionalisierung der Modellparameter und evaluierten anschliessend die Güte der Simulationen basierend auf den übertragenen Parametern. Dabei zeigte sich, dass die Übertragung der Modelle von grösseren auf kleinere Einzugsgebiete nicht nur ein Problem der Inputdaten ist, sondern auch der Prozesse, die in den grossräumigeren Modellen berücksichtigt, bzw. nicht berücksichtigt werden. Die Evaluation zeigt, dass in kleineren Einzugsgebieten (< 100 km²) die Abflüsse deutlich unterschätzt werden. Als Hauptgrund wird angegeben, dass die in kleinen Einzugsgebieten relevanten Prozesse mit den übertragenen Parametern nur ungenügend abgebildet werden.

Für kleinere Einzugsgebiete ohne Abflussmessung wurden deshalb mehrfach Verfahren geprüft, mit denen die aktuelle Abflussbereitschaft eines Einzugsgebietes beurteilt werden kann. In Kombination mit einer Niederschlagsprognose und Kenntnissen über Schwellenwerte für die Prozessauslösung können so qualitative Aussagen über das Eintreten eines Hochwasserereignisses gemacht werden. Solche Schwellenwert-Ansätze werden häufig auch bei Hangmuren und Murgängen angewandt.

Ein Instrument für die Abschätzung der Abflussbereitschaft bildet die Abflussprozessstypenkarte, in der die massgebenden Abflussbildungsprozesse flächendifferenziert dargestellt sind. (Naef et al. 2008). Mittels Beregnungsversuchen können für die verschiedenen Flächentypen die Speichervolumen und die Geschwindigkeit der Speicherentleerung abgeschätzt werden. Wie Schmocker-Fackel (2004) zeigt, kann diese Grundlage auch verwendet werden, um mit Hilfe des Modells Aqua-pro die Abflüsse in nicht gemessenen Einzugsgebieten abzuschätzen.

Ein Schwellenwert-Ansatz, der vor allem in den USA zum Einsatz kommt, ist der sogenannte "Flash Flood Guidance" (FFG) Ansatz (Geogarkakos 2006). Dieser wird vom US National Weather Service operationell für die Herausgabe von Hochwasserwarnungen eingesetzt. Der FFG ist die Regenmenge, die bei einer gegebenen Dauer unter Annahme einer gleichförmigen Verteilung in Raum und Zeit notwendig ist, um an einem definierten Querschnitt kleinere Überflutungen zu verursachen (Abbildung 4). Wenn der erwartete Niederschlag grösser ist als der FFG, wird eine Hochwasserwarnung ausgesprochen. Für die Bestimmung des FFG muss die Bodenfeuchte aufgrund des Niederschlagsgeschehens der vergangenen Tage bestimmt werden. Dazu können Verfahren wie der Vorregenindex oder auch Resultate aus hydrologischen Modellen verwendet werden.

Dieser Ansatz wurde von Norbiato et al. (2008 und 2009) auf zwei Gebiete in Italien und Frankreich angewendet, wobei er für die Berechnung des FFG ein Niederschlag-Abfluss-Modell verwendete, das mit Abflussmessungen kalibriert wurde. Für die Übertragung auf ungemessene Teileinzugsgebiete wurden zwei Ansätze geprüft, einerseits Übertragung der Modellparameter und anschliessende Simulation des Bodenfeuchtezustandes mit diesen Parametern, andererseits Übertragung der Modellparameter und des Bodenfeuchtezustandes. Erwartungsgemäss liefert die Anwendung auf kalibrierte Einzugsgebiete die besten Resultate, wobei auch die beiden andern Ansätze noch wesentlich bessere Resultate lieferten, als eine Schwellenwertermittlung ohne Berücksichtigung der Vorregensituation.

Einen andern Schwellenwertansatz schlagen Martina et al. (2006) vor. In diesem Ansatz wird für das betrachtete Einzugsgebiet mit einem stochastischen Modell eine 10000 jährige Reihe

von Stundenniederschlägen simuliert und daraus die Bodenfeuchtebedingungen berechnet. Diese werden in Bodenfeuchteklassen unterteilt. Weiter werden für jeden Monat die realisierten Bodenspeicherzustände in einem Bodenfeuchtekalender zusammengestellt. Mit Hilfe dieses Kalenders kann saisonabhängig aus dem Niederschlag der vorangegangenen Tage eine Bodenfeuchteklasse abgeleitet werden. Basierend auf der Simulation werden auch die Niederschlagschwellenwerte für die verschiedenen Bodenfeuchteklassen festgelegt. Sind diese Arbeitsschritte einmal durchgeführt, erlaubt dieses Verfahren die Beurteilung eines möglichen Ereignisses ohne die Ausführung eines Niederschlag-Abfluss-Modells.

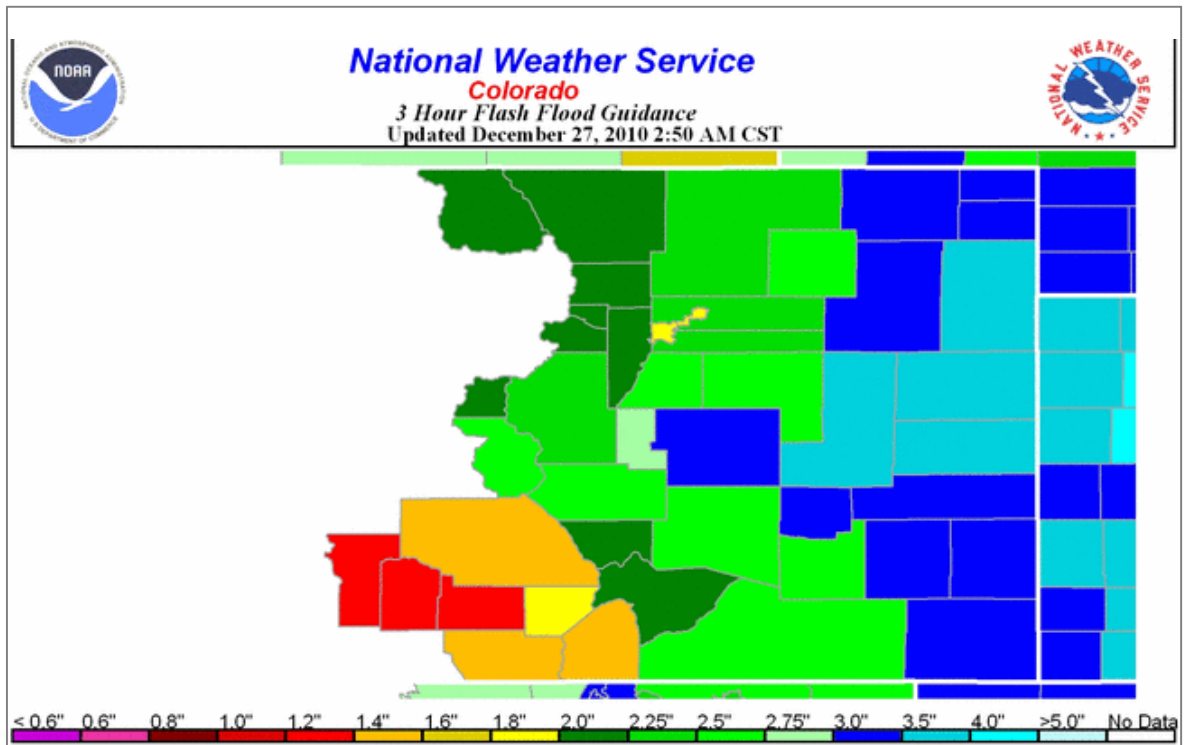


Abbildung 4 Flash Flood Guidance für den 3-Stunden Niederschlag für Colorado. In den roten Gebieten genügt ein 3-Stunden Niederschlag von 1.2", um eine Überflutung auszulösen, während in den blauen Gebieten 3" oder mehr notwendig sind.

Einen noch einfacheren Ansatz für die Ermittlung von Warnstufen schlagen Lehmann & Holzmann (2008) vor: Der Vorregenindex wird in Kombination mit einem Linearspeicher berechnet. Dieser wird mit Hilfe von Abflussmessungen kalibriert und in Warnstufen umgesetzt, basierend auf den Wiederkehrperioden 1, 5 und 30 jährliches Ereignis. Die Übertragung der Parameter und der Warnstufen von gemessenen auf ungemessene Einzugsgebiete erfolgt mittels Kriging. Für die Warnung muss hier das einfache Linearspeichermodell anhand der gemessenen Niederschläge laufend nachgeführt werden, was jedoch ohne grossen Aufwand möglich ist.

Ansätze auf der Basis des Vorregenindex oder ähnlichen Bodenfeuchteabschätzungen finden häufig auch bei Vorhersagesystemen für Rutschungen, Murgänge und Hangmuren Anwendung. Für die Abruzzen haben Brunetti et al. (2009) ein einfaches, auf Niederschlagsschwellenwerten basierendes Vorhersagesystem für Rutschungen entwickelt. Berücksichtigt werden die Niederschlagsdauer und die mittlere Niederschlagsintensität für 4 Perioden (24, 48, 72 und 96 Stunden). Ähnliche Ansätze werden auch für Murgänge (z.B. Bacchini & Zannoni 2003) und Hangmuren (z.B. Giannecchini 2006) vorgeschlagen. Bei stark durchlässigem Untergrund ist für die Vorhersage dieser Prozesse jedoch nur noch der Ereignisniederschlag massgebend, da der Niederschlag der vorhergehenden Tage rasch versickert (Floris et al. 2010). Saito et al. (2010) beschreiben ein Real Time Warnsystem für Hangmuren (und Murgänge) auf der Basis eines normalisierten Bodenwasserindex. Die Normalisierung erfolgt über den Vergleich der aktuellen Niederschlagssumme mit dem maximalen Bodenwasserindex der letzten x Jahre (hier 10). Es werden zwei Ereignistypen unterschieden, einer ausgelöst durch kurze, intensive Nieder-

schläge (10 – 40 Stunden), einer durch langandauernde Niederschläge mit eingelagerten Intensitätsspitzen (80 – 200 Stunden). Der Bodenwasserindex wird mit einem 3-Speicheransatz berechnet.

Neben dem Niederschlag bildet auch der Schnee einen wichtigen Faktor für die Bodenhydrologie. Die Schneeschmelze kann die Bodenspeicher und damit die Abflussbereitschaft eines Einzugsgebietes wesentlich beeinflussen. Kombinierte "Regen auf Schnee" Ereignisse sind vor allem in tieferen Lagen häufig Ursache von Hochwasserereignissen.

Der Schneedeckenaufbau und die Schneeschmelze sind in den gängigen Niederschlag-Abfluss-Modellen, z.B. im PREVAH (Viviroli et al. 2009) abgebildet. Fehlt ein solches Modell, stehen oft nur noch Punktmessungen der Schneehöhen und der Schneewasseräquivalente zur Verfügung. Um daraus die in einem Einzugsgebiet gespeicherte Wassermenge abzuschätzen, werden zusätzlich Informationen zur schneebedeckten Fläche benötigt. Diese werden heute meistens operationell aus Satellitenbildern hergeleitet. Foppa et al. (2007) haben ein Interpolationsverfahren entwickelt, in dem Satellitendaten mit Schneehöhenmessungen kombiniert werden, um grossräumige Schneehöhenkarten zu erstellen. Für die Berechnung der Schneewasseräquivalente aus Schneehöhendaten schlagen Tobias et al. (2009) ein Modell vor, das neben der Jahreszeit und der Schneehöhe die Höhe über Meer und die geografische Lage berücksichtigt. Einen wesentlich komplexeren Ansatz beschreiben Lehning et al. (2006): Im Modell Alpine3D wird die Schneedeckenentwicklung reliefabhängig räumlich differenziert abgebildet. Dieses Modell kann mit einem Vegetations- und Abflussmodell gekoppelt werden. Die Anwendung dieses Modells liegt jedoch heute noch eher im Forschungsbereich.

Für die Umsetzung dieser vereinfachten Ansätze in ein Modell hat sich in verschiedenen Arbeiten der Fuzzy Logic Ansatz als gut geeignet herausgestellt. Dieser Ansatz erlaubt es, Expertenwissen transparent in ein Modell einzubauen und gleichzeitig die Unsicherheiten und Unschärfen, die solchem Expertenwissen eigen sind, im Modell zu berücksichtigen. Matreata & Matreata (2006) schlagen ein Fuzzy Logic Modell für ungemessene Einzugsgebiete vor, das aus den Niederschlagswerten der Vortage einen Bodenfeuchte-Index berechnet. Dieser wird zusammen mit der vorhergesagten Niederschlagsmenge und –dauer für die Berechnung des maximalen Abflusses verwendet. Einen ähnlichen Ansatz haben Casper & al. (2007) für ein Einzugsgebiet von 7 km² im nördlichen Schwarzwald eingesetzt, wobei sie die Bodenfeuchte nicht berechneten, sondern Messungen von TDR-Sonden verwendeten.

3.3 Schwellenwerte

Beim Abfluss handelt es sich um einen kontinuierlichen Prozess, der vom Normalabfluss teilweise zwar sehr rasch, aber ohne Sprung in einen Hochwasserabfluss übergeht. Dies ist wahrscheinlich der Grund, weshalb in der Literatur keine Grenzwerte für die Hochwasserauslösung gefunden wurden. Schwellenwerte können allenfalls ausgehend von einem kritischen Gerinnequerschnitt zurückgerechnet werden.

Anders sieht es aus bei Murgängen oder flachgründigen Rutschungen: Hier handelt es sich um diskrete Ereignisse, die meistens einen klaren Anfangszeitpunkt haben. Damit ist es auch eher möglich, für diese Prozesse Schwellenwerte für die Prozessauslösung zu ermitteln. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich dabei oft um Schwellenwerte handelt, die sich auf ein Gerinne oder auf eine Region beziehen und die nicht einfach auf andere Gebiete übertragen werden dürfen.

Im Folgenden sind einige Verfahren zusammengestellt, für die ausgehend von kritischen Gerinnequerschnitten Niederschlagsschwellenwerte definiert werden. Beim Flash Flood Guidance Ansatz (vgl. Kap. 3.2) werden die Schwellenwerte anhand des aktuellen Gebietszustandes laufend (täglich) ermittelt. Dies erfordert jedoch den Einsatz eines Niederschlag-Abfluss-Modells für die tägliche Nachführung des Einzugsgebietszustandes und für die Berechnung der entsprechenden Schwellenwerte. Mit dem Verfahren von Martina et al. (2006) (vgl. Kap. 3.2) kann auf eine fortlaufende Modellierung verzichtet werden. Hier genügt es, den Niederschlag der Vortage aufzusummieren, um den Schwellenwert für die Auslösung eines Hochwassers zu ermitteln. Allerdings muss für die Berechnung dieser Schwellenwerte einmalig ein Niederschlag-Abfluss-

Modell eingesetzt werden. Dieses muss auf das Gebiet, auf das das Verfahren angewendet werden soll, geeicht sein. Einen ähnlichen Ansatz, wiederum geeicht auf ein einzelnes Einzugsgebiet, beschreiben Montesarchio et al. (2009).

Für Murgänge und flachgründige Rutschungen (Hangmuren) wurden verschiedene gerinne- oder gebietsspezifische Schwellenwerte hergeleitet. Die meisten Ansätze definieren den Schwellenwert in Abhängigkeit von Niederschlagsmenge und -dauer (Borga et al., 2007, Bacchini & Zannoni, 2003, Brunetti et al. 2010, Giannecchini 2006). Teilweise wird auch die Vorregensituation bzw. die Bodenfeuchte mitberücksichtigt. In Gebieten mit einem hochdurchlässigen Untergrund spielt diese jedoch kaum eine Rolle (Floris et al. 2010). Eine Übertragung dieser Werte auf andere Gebiete ist nicht ohne weiteres möglich.

3.4 Messsysteme

Messsysteme bilden ein zentrales Element eines Frühwarnsystems, einerseits für die Ermittlung des hydrologischen Systemzustandes, andererseits für die Abschätzung der zu erwartenden Entwicklung. Zu den verschiedenen Sensorsystemen gibt es eine Vielzahl von oft sehr technischen Publikationen. Im Folgenden werden nur einige für den Aufbau eines Frühwarnsystems zentrale Messsysteme und deren wichtigsten Aspekte behandelt.

Niederschlag

Niederschlag kann sowohl am Boden mit Pluviometern, als auch in der Atmosphäre mit Hilfe des Radars gemessen werden. Bei der Messung am Boden ist in komplexen topographischen Verhältnissen vor allem die Dichte des online verfügbaren Niederschlagsmessnetzes eine limitierende Grösse. Die Schweiz verfügt im SwissMetNet zurzeit über 72 automatische Stationen. Dies ergibt eine Dichte von einer Station auf 570 km². Vor allem bei konvektiven Wetterlagen ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine Gewitterzelle durch eine solche Station erfasst wird, relativ gering. Dies ist u.a. ein Grund, dass der Kanton Wallis plant, zusätzlich zu den 16 automatischen Stationen des SwissMetNet ungefähr 40 zusätzliche automatische Niederschlagsmessstationen zu installieren, was einer Dichte von einer Station auf knapp 100 km² entspricht. Die Stationsdichte in Südtirol liegt etwas über diesem Wert.

Das Niederschlagsradar bietet den Vorteil einer im Grundsatz flächendeckenden Niederschlagsmessung, doch sind auch hier in gebirgigen Regionen einige Einschränkungen zu berücksichtigen. Einerseits sind es Bodenechos, die entstehen, wenn der Radarstrahl den Boden trifft, andererseits sind es Abschattierungen durch das Relief, die dazu führen können, dass das Radar nur noch den obersten Teil der Atmosphäre erfasst. Abbildung 5 zeigt beispielsweise, dass im Unterengadin die Atmosphäre erst ab einer Höhe von ca. 6000 m ü.M. erfasst wird.

Die Bodenechos werden von MeteoSchweiz mittels Eliminationsalgorithmen herausgefiltert. Auch für die abgeschatteten Gebiete wurde ein Korrekturverfahren entwickelt, in dem der sichtbare Teil der Säule in der Atmosphäre auf die ganze Höhe über Grund hochgerechnet wird. Unter dem Produktnamen RAIN werden die so korrigierte Niederschlagssumme über die letzte halbe Stunde alle 5 Minuten zur Verfügung gestellt. Für die nächsten Jahre ist geplant, dass im Gebiet Graubünden ein weiterer Niederschlagsradar installiert wird. Damit sollte sich die Situation in Graubünden wesentlich verbessern.

Daneben gibt es weitere Probleme, die jedoch nicht automatisch korrigiert werden können, wie beispielsweise das Abschirmen schwächerer Niederschlagsgebiete hinter Starkniederschlagszellen oder der sogenannte Seeder-Feeder Effekt, bei dem Niederschlag aus höheren Schichten in tieferen, nicht sichtbaren Schichten verstärkt wird, wenn er beispielsweise durch eine Hochnebel-schicht fällt.

Nach wie vor bestehen Unsicherheiten bei der Quantifizierung der Niederschlagsmenge aus den Radardaten. Die vom Radar gemessenen Wassertröpfchen können teilweise über längere Zeit in der Wolke zurückgehalten werden. Hinzu kommt, dass bei starkem Wind die Regentropfen horizontal stark verfrachtet werden können, so dass die Lage der vom Radar erfassten Niederschlagszelle nicht unbedingt mit dem Ort, wo der Niederschlag auf den Boden trifft, übereinstimmen muss.

In Zukunft werden vermehrt Kombinationen von Boden- und Radarmessungen zur Verfügung stehen. So plant MeteoSchweiz für die nächsten Jahre stündlich einen räumlich hoch aufgelösten Niederschlagsdatensatz, berechnet aus Boden- und Radarmessungen zur Verfügung zu stellen.

In Südtirol gibt es einen Niederschlagsradar auf dem Gantkofel. Der Niederschlagsradar wird vom Wetterdienst des Landes Südtirols ausgewertet und analysiert. Zur Zeit besteht eine Schwachstelle in der Abdeckung im Ortlergebiet und im Oberen Vinschgau.

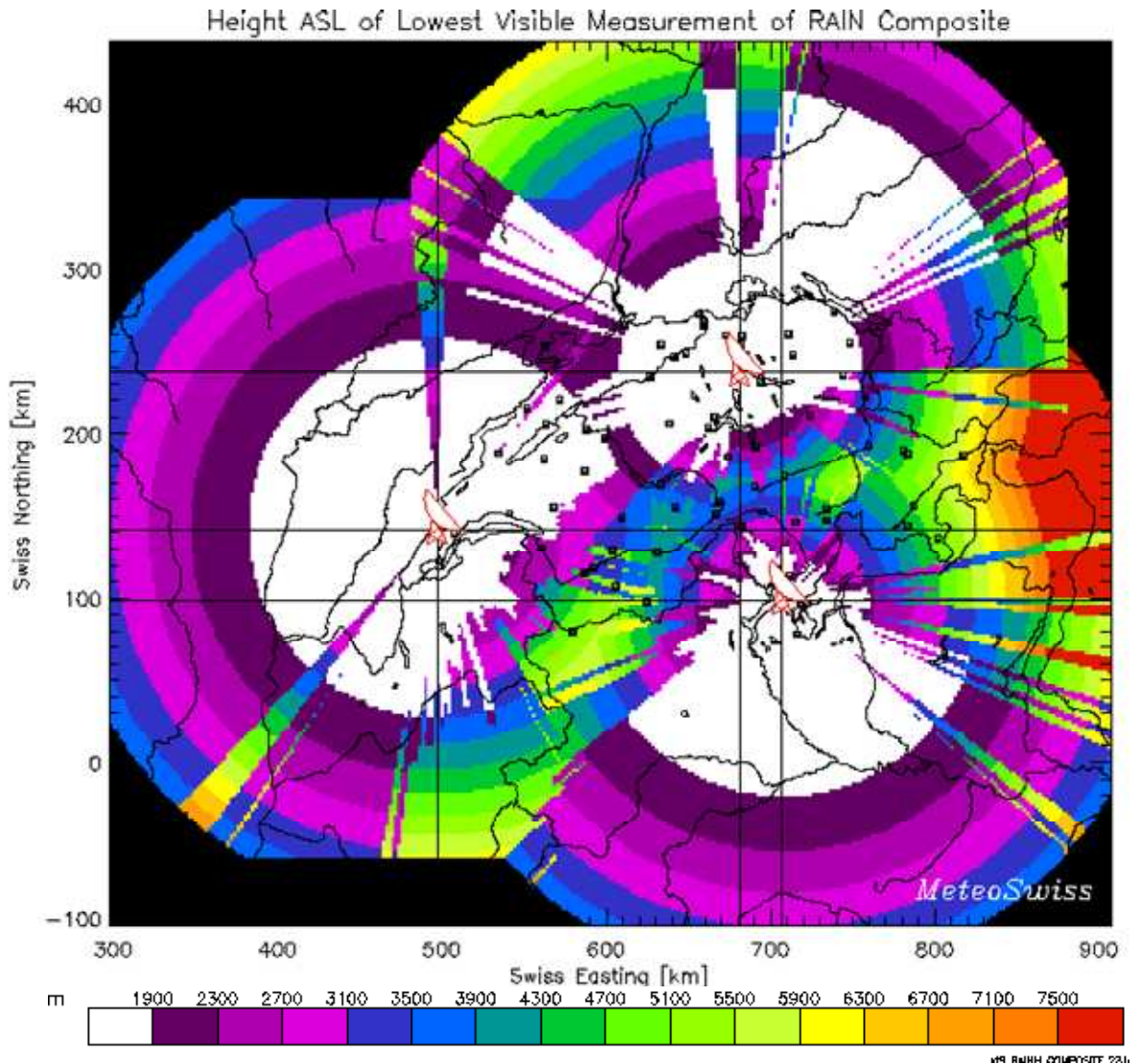


Abbildung 5 Untergrenze der Radarsichtbarkeit in der Schweiz in m ü.M. (Quelle: MeteoSchweiz)

Schneewasseräquivalent

Schneedaten stammen einerseits von Beobachtern, andererseits von automatischen Stationen in unbewohnten Gebieten. Bei den automatischen Stationen erfolgt die Schneehöhenmessung mittels Ultraschall von einem Messmast aus. Beide Quellen liefern zumindest die Schneehöhe. Bei den automatischen Stationen besteht das Risiko, dass sie bei kalten und stürmischen Witterungsbedingungen ausfallen können. Für hydrologische Fragestellungen interessiert jedoch das Schneewasseräquivalent mehr, als die Schneehöhe. Schneewasseräquivalente werden in der Schweiz an vielen Beobachterstationen in regelmässigen Abständen erhoben. Ist dies nicht der Fall, muss das Schneewasseräquivalent rechnerisch bestimmt werden. Hierzu wurde am SLF ein neues Verfahren entwickelt (vgl. Kap. 3.2).

Die Ermittlung der schneebedeckten Fläche erfolgt meistens auf der Basis von Satellitendaten. Dazu stehen heute operationelle Verfahren zur Verfügung, die eine tägliche Nachführung der schneebedeckten Fläche erlauben (vgl. Foppa et al. 2004). In Südtirol werden von der EURAC wöchentlich satellitenbasierte Karten der Schneebedeckung erstellt und dem Lawinenwarndienst zur Verfügung gestellt. Im Rahmen des Interreg-Projektes IRKIS wird das vom SLF erarbeitete Verfahren zur Bestimmung des Schneewasseräquivalentes auch in Südtirol angewandt.

In Zukunft könnte der sogenannte Snow Pack Analyser (Sommer, 2010), der u.a. am SLF getestet wird, für die Messung des Schneewasseräquivalentes in unbewohnten Gebieten zum Einsatz kommen. Zusätzlich zum Schneewasseräquivalent liefert dieser Sensor auch noch den Flüssigwasseranteil in der Schneedecke. Damit kann abgeschätzt werden, wann die Schneeschmelze abflusswirksam wird.

Bodenwassergehalt

Der Bodenwassergehalt kann direkt im Feld nach dem Time-Domain-Reflectometry-Verfahren mit Hilfe von TDR-Sonden gemessen werden. Diese Methode ist heute operationell einsetzbar und wurde in Pilotprojekten auch schon für die Hochwasserwarnung eingesetzt (Schädel 2003). Voraussetzung ist, dass die Messdaten online abgerufen werden können. Zu beachten ist, dass es sich hierbei um Punktmessungen handelt. Um ein repräsentatives Bild über die Feuchteverhältnisse in einem Einzugsgebiet zu erhalten, kann unter Umständen eine grössere Zahl solcher Messgeräte notwendig sein.

Wie beim Schnee bietet auch bei der Bodenfeuchte das Remote Sensing die Möglichkeit, flächendeckende Daten zur Bodenfeuchte zu erhalten, wobei sich die Messung auf die oberste Bodenschicht beschränkt. Zudem ist es erst in letzter Zeit möglich geworden, Daten in einer räumlichen Auflösung bereitzustellen, die der Fragestellung angepasst sind. Es ist aber nach wie vor nicht möglich, solche Daten in hoher zeitlicher Dichte (z.B. täglich), für ein Gebiet bereitzustellen. Die Berechnung von solchen hoch aufgelösten Bodenfeuchtedaten befindet sich zurzeit noch in einer experimentellen Phase (vgl. EURAC 2010). Erste Anwendungen zeigen jedoch ermutigende Resultate (Hasenauer et al. 2009). Im Rahmen von IRKIS wurden an drei Standorten Bodenfeuchtemessungen gemacht, um eine Basis zur Validierung der Fernerkundungsdaten zu erhalten. Im Weiteren werden alle vorhandenen Bodenfeuchtemessungen der landwirtschaftlichen Beratungsringe in einer Übersicht zusammengeführt und ausgewertet.

3.5 Schlussfolgerungen

Die Literaturlauswertung zeigt, dass für grosse und kleinere Flussysteme operationelle Frühwarnsysteme existieren. Diese basieren jedoch immer auf Niederschlag-Abfluss-Modellen und haben zum Ziel, für bestimmte Punkte zeitgenaue Abflussganglinien vorherzusagen. Für kleinere Einzugsgebiete ist der Einsatz solcher Systeme wenig geeignet, da wegen der grossen Unsicherheit beim Niederschlagsinput die Vorhersage einer Abflussganglinie wenig Sinn macht.

Die Frühwarnsysteme für kleinere Einzugsgebiete, die in der Literatur beschrieben werden, verzichten auf eine orts- und zeitgenaue Abflussvorhersage und geben eine Warnung für eine Region aus. Dazu wird einerseits die Abflussbereitschaft der Gebiete berücksichtigt, andererseits der Niederschlag, der aufgrund der Prognose in einer Region auftreten könnte, wobei bei konvektiven Wetterlagen eine ortsgenaue Vorhersage des Niederschlages nicht möglich ist. Dieser Lösungsansatz eignet sich grundsätzlich auch für den Aufbau eines Frühwarnsystems, basierend auf Warnstufen. Insbesondere für alpinere Gebiete, in denen neben reinen Hochwasserabflüssen auch andere Gerinneprozesse eine wesentliche Rolle spielen, genügen die beschriebenen Verfahren jedoch nicht. Hinzu kommt, dass die räumliche Heterogenität in alpinen Gebieten grösser ist als in den tiefgelegenen Gebieten.

Basierend auf den Ergebnissen der Literaturlauswertung wird deshalb im Folgenden ein konzeptionelles Modell entwickelt, das die spezifischen Bedürfnisse der vorgesehenen Einsatzgebiete in Graubünden und im Südtirol abdeckt. Dazu werden Lösungsansätze und Verfahren, die in der Literatur beschrieben werden, kombiniert und mit weiteren Lösungsansätzen zu einem Modellvorschlag zusammengebaut.

4 Konzeptionelles Modell

4.1 Anforderungen an das Vorhersagesystem

Für die Erarbeitung des Vorschlages wird von folgenden Anforderungen an ein zukünftiges Frühwarnsystem ausgegangen:

- Die relevanten Gerinneprozesse in den Gebieten Südtirol und Graubünden müssen abgedeckt sein (Hochwasserabflüsse, stark Geschiebe führende Hochwasser und Murgänge).
- Das Verfahren muss auf gemessene und ungemessene Einzugsgebiete anwendbar sein.
- Das Verfahren muss zu erwartende Ereignisse mit einer hohen Wahrscheinlichkeit detektieren können und möglichst wenig "Fehlalarme" erzeugen.
- Das Verfahren muss Aussagen für Einzugsgebiete zwischen 10 und einigen 100 km² liefern.
- Die Beurteilung muss tagesaktuell sein.
- Das System muss mit vertretbarem zeitlichen und finanziellen Aufwand betrieben werden können.

Eine Möglichkeit besteht darin, die aktuelle Abflussbereitschaft in einem Einzugsgebiet anhand von Indikatoren abzuschätzen. Auch zur Feststoffmobilisierung und zum Geschiebetransport lassen sich über einen solchen Ansatz Aussagen machen.

4.2 Lösungsansatz

Um die oben beschriebenen Anforderungen abzudecken, soll ein Frühwarnsystem entwickelt werden, das für Einzugsgebiete ab ca. 10 km² Informationen zu den folgenden zwei Punkten liefert:

- Wird das Einzugsgebiet bei einem Starkregen heute oder in den kommenden Tagen rasch oder gedämpft reagieren?
- Ist mit einem grösseren Geschiebeaufkommen zu rechnen?

Zusammengefasst geht es um die Beurteilung der Disposition in kleineren Einzugsgebieten im Hinblick auf Hochwasserabflüsse und Wildbachprozesse. Um diese Fragen zu beantworten, 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, zur Feststoffmobilisierung und zum Geschiebetransport herleiten lassen. Dies ermöglicht es, in Kombination mit der zu erwartenden Wetterentwicklung Prognosen zu möglichen 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 Dispositionen zu treffen.

4.3 Dispositionsmodell

Bei der Beurteilung der Gefahrensituation im zeitlichen Verlauf kann vom Dispositionskonzept ausgegangen werden (Abbildung 6). 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 Per-

mafrostuntergrenze für viele betroffene Gebiete eine Erhöhung der Grunddisposition gegenüber Erosion und Massenbewegungen.

Die variable Disposition wird bestimmt durch innerhalb eines gegebenen Systemzustandes zeitlich variable, z.T. durch die Jahreszeit und Tageszeit gesteuerte Größen wie meteorologische Situation, 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.

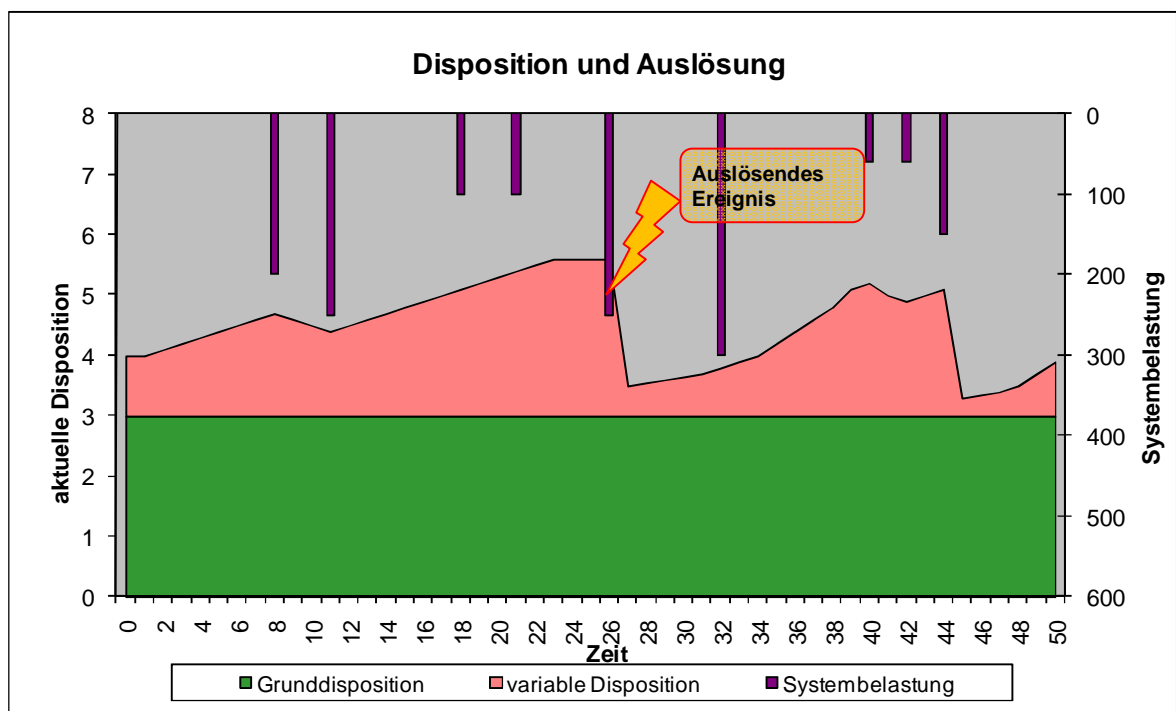


Abbildung 6 Dispositionsmodell

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

4.4 Massgebende Prozesse

Alpine Einzugsgebiete können in drei prozessbezogene Typen unterteilt werden:

- Wildbäche: In diesen steilen, eher kleineren Einzugsgebieten (bis ca. 20 km²) sind Murgänge und geschiebeführende Hochwasser die massgebenden Prozesse.
- Wildflüsse: Diese weisen ein weniger steiles Relief auf und die Einzugsgebietsgröße reicht bis ca. 100 km². In diesen Einzugsgebieten sind Hochwasserabflüsse mit wenig Geschiebeanteil der wesentliche Prozess. Bei länger andauernden Ereignissen kann jedoch Geschiebetransport in grossem Umfang auftreten.

- Talflüsse: In grösseren, noch flacheren Flusseinzugsgebieten ist der Einfluss des Geschiebes nur noch von untergeordneter Bedeutung. Hochwasserabflüsse sind der wesentliche Prozess.

In den folgenden Abschnitten werden nun die Gebietseigenschaften und Prozesse, die die Grunddisposition und die variable Disposition beeinflussen, detaillierter beschrieben. Zusätzlich wird gezeigt, mit welchen Messgrössen oder Indikatoren die Dispositionen bewertet werden können.

4.4.1 Abflussbildung

Bei der Abflussbildung können Gebietseigenschaften, die die Grunddisposition bestimmen und Einflussgrössen, die die variable Disposition über die Zeit verändern, unterschieden werden.

Die zentrale Grösse für die Bestimmung der Grunddisposition sind die Abflussbildungsprozesse im Hang. Zur Abflussbildung im Hang, d.h. für die Transformation des Niederschlags in den Abfluss können verschiedene Teilprozesse beitragen. Naef & al. (2008) unterscheiden folgende relevante Abflussprozesse:

- Hortonscher Oberflächenabfluss: Dieser tritt auf, wenn die Infiltrationskapazität stark eingeschränkt ist, so dass ein grosser Teil des gefallenen Niederschlags unmittelbar oberflächlich oder oberflächennah abfließt.
- Sättigungsoberflächenabfluss: Wenn Infiltration in den Oberboden möglich ist, der Bodenspeicher aber aufgrund eines hohen Grundwasserspiegels oder generell geringer Speicherkapazität überschritten wird, fliesst das Wasser oberflächlich ab.
- Laterale unterirdische Entwässerung: Kann das Wasser bis in den Unterboden einsickern, kann sich an geneigten Standorten unter der Voraussetzung, dass eine Stauschicht vorhanden ist und eine laterale Wasserwegigkeit besteht, ein unterirdischer lateraler Abfluss ausbilden. Dieser kann unter Umständen stark zur Abflussbildung beitragen.
- Tiefensickerung: Ist sowohl der Boden als auch das Festgestein im Untergrund durchlässig oder weist der Boden eine sehr grosse Speicherefähigkeit auf, kann die ganze Niederschlagsmenge im Boden und im Untergrund gespeichert werden. In diesem Fall kommt es zu keinem Abfluss.

Diese Zusammenstellung zeigt, dass die Bodeneigenschaften und der geologische Untergrund die Abflussbildung wesentlich beeinflussen. Diese Parameter beeinflussen neben der Vegetation (Evapotranspiration) auch die Geschwindigkeit, mit der sich der Bodenspeicher nach einem Niederschlagsereignis wieder entleert.

Im Zusammenhang mit ausserordentlichen Niederschlagsereignissen ist die Frage relevant, ob in einem Einzugsgebiet Schwellenprozesse eine Rolle spielen können. Verschiedene Beispiele aus der Schweiz anlässlich des Hochwasserereignisses vom August 2005 zeigen, dass solche Prozesse beim Überschreiten der Schwelle zu einer stark überproportionalen Abflussreaktion führen können. Eine solche Reaktion ist beispielsweise möglich, wenn ein grosser Karstspeicher, der normalerweise stark dämpft, überläuft.

Die variable Disposition wird hauptsächlich durch den Zustand der Bodenspeicher bestimmt. Sind diese gefüllt, ist im Falle eines Starkniederschlags eine rasche und starke Abflussreaktion zu erwarten. Besteht jedoch noch eine grosse Speicherkapazität, kann von einer verzögerten Reaktion ausgegangen werden. Der aktuelle Speicherzustand wird beeinflusst durch das Niederschlagsgeschehen der vergangenen Stunden und Tage und allenfalls auch durch die Schneeschmelze. Welche Zeitdauer betrachtet werden muss, hängt von der Geschwindigkeit ab, mit der sich die Speicher entleeren. Vor allem im Sommer kann dieser Prozess auch stark durch die Vegetation beeinflusst werden.

4.4.2 Feststoffhaushalt

Der Feststoffhaushalt in einem Einzugsgebiet wird sehr stark von den Gebietseigenschaften geprägt. Bei der Grunddisposition können folgende Teilaspekte unterschieden werden:

- Art der Geschiebequellen: Hier werden Jungschutt- und Altschuttquellen unterschieden. Während Altschutt unter einem anderen Klimaregime abgelagert wurde (z.B. eiszeitliche glaziale und glazifluviale Schotter) und oft in fast unbeschränkter Menge zur Verfügung steht, muss Jungschutt durch Verwitterungsprozesse laufend aufbereitet werden. In Jungschuttgebieten spielen deshalb die geologischen Eigenschaften eine wesentliche Rolle. Sie steuern die Verwitterbarkeit des Gesteins und damit die Schuttmenge, die neu gebildet werden kann.
- Relevante Prozesse für die Feststoffmobilisierung im Hang: Die Feststoffverlagerung im Hang kann auf verschiedene Arten erfolgen. Sturz, Lawinen, Hangmuren und flächenhafte Erosion sind die wichtigsten Prozesse. Während bei der flächenhaften Erosion und bei den Lawinen der Materialeintrag eher beschränkt ist, können Sturzprozesse und vor allem Hangmuren in kurzer Zeit grosse Materialmengen ins Gerinne transportieren.
- Relevante Prozesse für die Geschiebeverlagerung im Gerinne: Hier sind geschiebeführende Hochwasser und Murgänge zu unterscheiden. Letztere können sehr grosse Materialmengen über weite Strecken verlagern und entlang ihrer Fliessstrecke auch sehr viel Material mobilisieren.

Für die variable Disposition ist vor allem die aktuelle Verfügbarkeit von Lockermaterial im Gerinnebereich von Bedeutung. In Gebieten mit Altschuttherden wird diese durch die Stabilität der Lockermaterialvorkommen und den Verbauungsgrad beeinflusst. Die Stabilität der Lockermaterialdepots wird durch die Lage des Hangwasserspiegels beeinflusst. In hohen Lagen ist der Zustand des Permafrosts ein wichtiger Einflussfaktor. In Jungschuttgebieten ist relevant, ob in den letzten Jahren das Gerinne durch ein Ereignis weitgehend ausgeräumt wurde, oder ob sich über Jahrzehnte Material angesammelt hat.

4.5 Beurteilungsmodell

Im Folgenden werden für die verschiedenen relevanten Prozesse die Parameter und Indikatoren beschrieben, die für die Bewertung der Grunddisposition und der variablen Disposition verwendet werden können. Dabei wird auch darauf eingegangen, ob diese aus bereits bestehenden Grundlagendaten abgeleitet werden können, oder ob diese neu aufbereitet werden müssen.

4.5.1 Abflussbildung

Grunddisposition

Für die Bewertung der Grunddisposition 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, zumindest in der Schweiz, häufig grob und räumlich nur wenig differenziert vorliegen.

Für die Schweiz wurde von Naef & al. (2008) ein Verfahren entwickelt, das auf der Basis bestehender Raumdaten räumlich differenziert die relevanten Abflussprozesstypen ermittelt (Tabelle 1 und Abbildung 7). 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. Nach Auskunft der Autoren müsste die Karte aber noch nachbearbeitet und verfeinert werden, da die Bodeneignungskarte der Schweiz (EJPD et al. 1980), die als Input verwendet wird, im alpinen Gebiet nur wenig differenziert ist. Für die Provinz Südtirol-Bozen liesse sich eine ähnliche Karte mit den vorhandenen Daten wahrscheinlich auch erarbeiten.

Tabelle 1 Charakterisierung Abflussprozessstypen nach Naef & al (2008)

Speicherklasse	Speichervermögen [mm]	Abflussprozesse mit Intensität	Abflussbereitschaft
1	0 – 40	SOF1, D1, HOF	rasch
2	40 – 100	SOF2, D2, SSF1	leicht verzögert
		SSF2	verzögert
3	100 – 200	SOF3, SSF3, D3	stark verzögert
4	> 200	DP	sehr stark verzögert

Legende:	HOF: Hortonscher Oberflächenabfluss
	SOF: Sättigungsoberflächenabfluss
	SSF: Laterale unterirdische Entwässerung
	D: Drainagen (künstlich angelegt)
	DP: Tiefsickerung

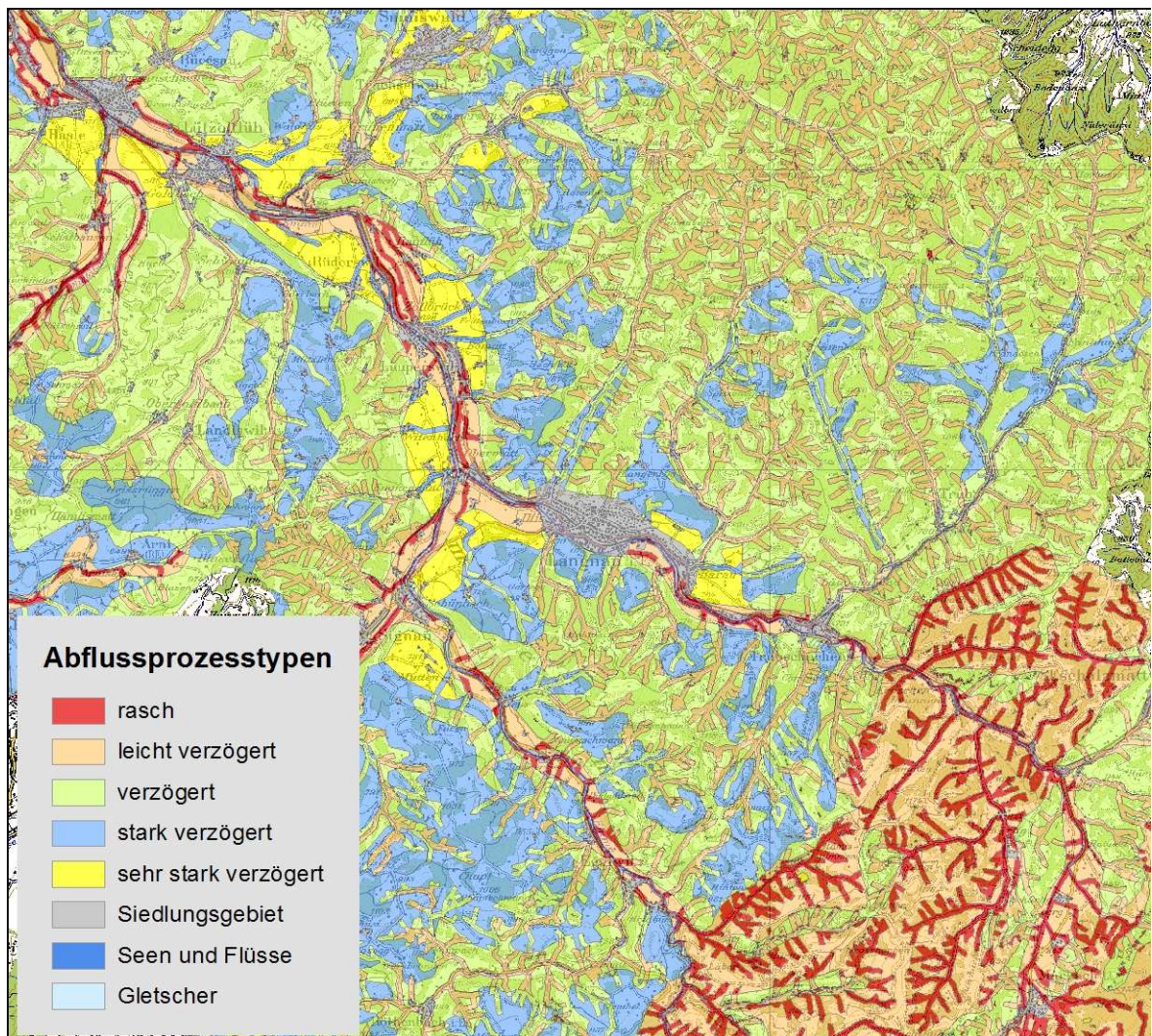


Abbildung 7 Abflussprozessstypenkarte für das Emme-Einzugsgebiet (nach Naef & al. 2008)

Ein ähnliches Verfahren wurde von Dobmann (2009) entwickelt. Aus hydrologisch bewerteten und in einem GIS kombinierten Raumdaten wurde eine Karte der Hochwasserdisposition (HQ-Disp) berechnet. Diese Karte lässt Aussagen unter anderem zu folgenden Aspekten zu:

- Pro Stufe der HQ-Disp lässt sich ein Wertebereich an Abflusskoeffizienten nach Rickli und Forster (1997) zuweisen
- Pro Stufe der HQ-Disp können dominante Abflussprozesse zugeordnet werden
- Aggregiert auf Einzugsgebiete lässt sich die Grunddisposition Abfluss abschätzen (Abbildung 8)

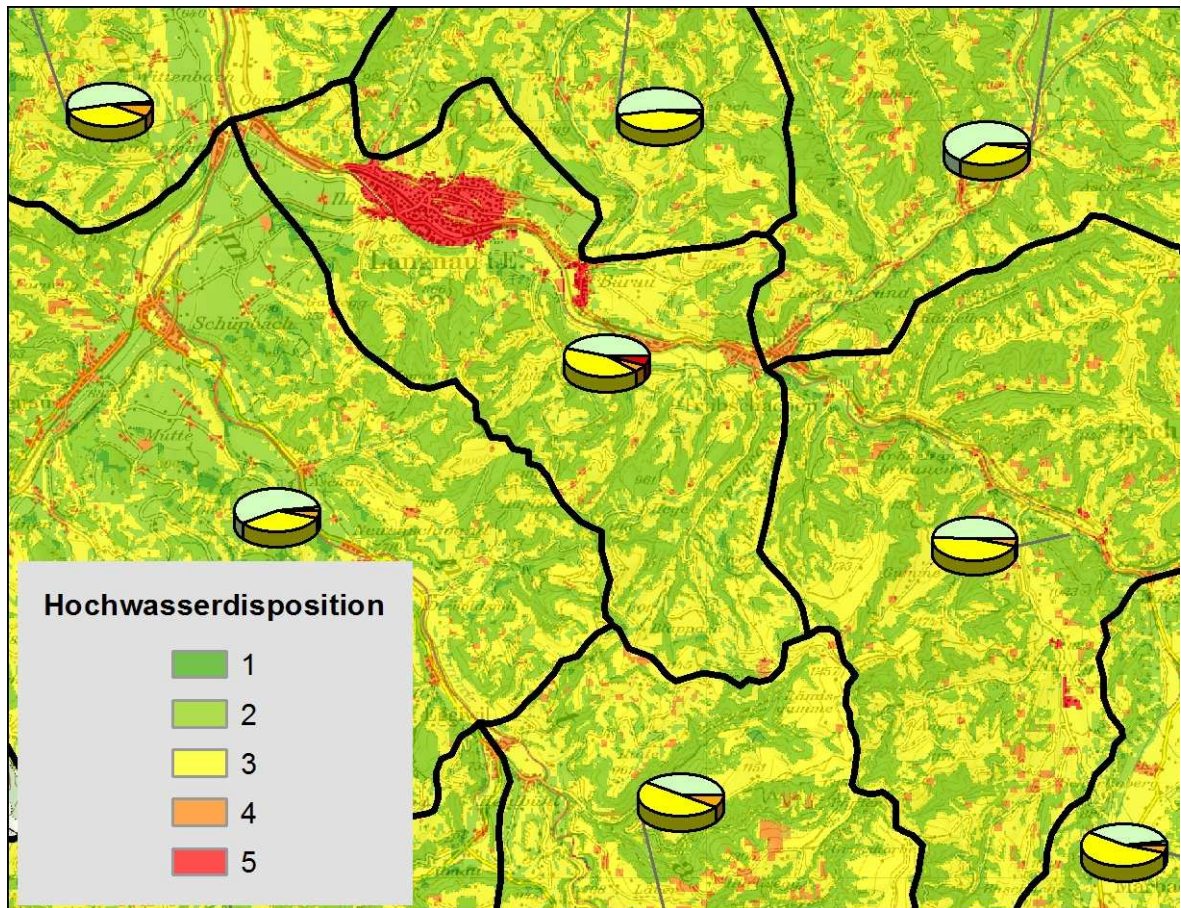


Abbildung 8 Hochwasserdispositionsmappe Emmental, aggregiert auf Einzugsgebiete (Flächen) und Basisgebiete (Piecharts) (nach Dobmann 2009)

Durch Aggregation der flächendifferenzierten Abflussprozessstypen bzw. Dispositionstypen auf Einzugsgebietsstufe, lässt sich auf der Basis beider Grundlagen die Grunddisposition beurteilen. Ausgehend von beiden Grundlagen lässt sich auch beurteilen, ob in einem Einzugsgebiet grosse Speicher vorkommen, die Schwellenprozesse auslösen könnten.

Variable Disposition

Das Verfahren für die Beurteilung der variablen Disposition 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 folgende Punkte:

- Beurteilung Bodenspeicher
- Beurteilung Schneespeicher
- Beurteilung Infiltration (Bodenfrost, evtl. starke Austrocknung der Böden)

Für die Beurteilung der Bodenspeicher bestehen verschiedene Möglichkeiten. Die geringsten Anforderungen bezüglich Datenverfügbarkeit stellt die Beurteilung anhand des Vorregenindex. Grundlage dazu bilden die Daten des Niederschlagsradars, aus denen für jedes Einzugsgebiet der Tagesniederschlag berechnet wird. Die Tagesniederschläge werden für eine bestimmte Anzahl Tage zurück aufsummiert, wobei weiter zurück liegende Niederschläge weniger gewichtet werden als der Niederschlag des Vortages. In Abbildung 9 ist ein Beispiel aus dem Sommer 2005 für ein Teileinzugsgebiet der Emme dargestellt. Die Anzahl Tage, die in die Berechnung einfließen und der Abminderungsfaktor müssen aufgrund der Einzugsgebietseigenschaften festgelegt werden (Grunddisposition). Wo möglich, sollte eine Kalibrierung anhand von Messwerten vorgenommen werden.

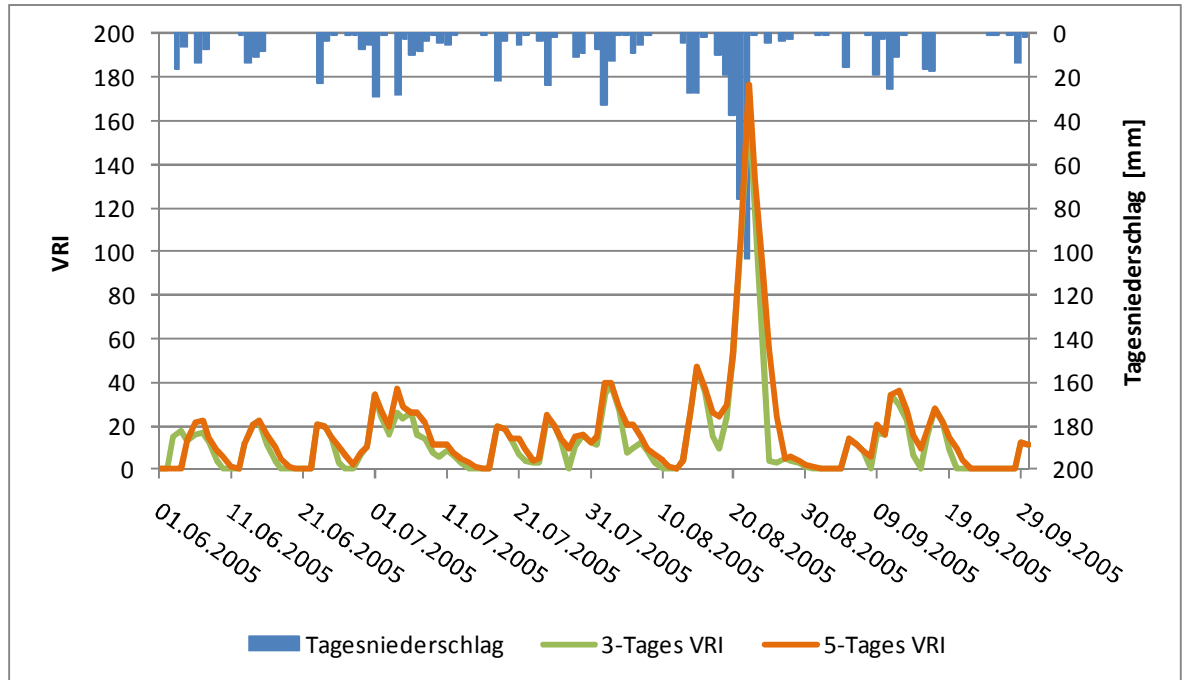


Abbildung 9 Vorregenindex Teileinzugsgebiet Emme für 3 und 5 Tage (Abminderung: $0.9^{\text{Anz. Tage}}$)

Falls für ein grösseres Einzugsgebiet ein Niederschlag-Abfluss-Modell mit flächendifferenzierten Bodenspeichern eingesetzt wird, besteht die Möglichkeit, in Anlehnung an den Ansatz von Martina et al. (2006) der Speicherzustand für Teileinzugsgebiete auszuwerten. Ein solches Verfahren wird von *geo7* im Rahmen der Entwicklung des Frühwarnsystems Emmental evaluiert. Für das Emme-Einzugsgebiet wird ein Niederschlag-Abfluss-Modell auf der Basis des WaSim-Modells (Schulla & Jasper 2007) aufgebaut. In diesem räumlich verteilten Modell wird für jede Rasterzelle von 500 x 500 Meter der Bodenwasserhaushalt simuliert. Daraus lässt sich der Bodenspeicherzustand für ein Teileinzugsgebiet ableiten. Mit dem Modell werden täglich, in kritischen Situationen mehrmals täglich Abflussprognosen für die Emme als Ganzes berechnet. Dazu muss das Modell anhand von Messwerten auf den aktuellen Stand nachgeführt werden. Dieser Stand kann für die Bewertung der variablen Disposition verwendet werden. Da bei dieser kleinräumigen Betrachtung nicht unbedingt davon ausgegangen werden kann, dass die absoluten Werte des Bodenwassergehaltes richtig sind, wird der aktuelle Stand mit den Speicherzuständen, die im Modell für dieses Gebiet über eine möglichst lange Zeit simuliert wurden, verglichen. Dabei müssen auch die saisonalen Unterschiede in der Speicherfüllung berücksichtigt werden. Abbildung 10 zeigt oben den Verlauf der Bodenspeicherfüllung während des Sommers 2005. Werden nun die Werte für das Teileinzugsgebiet 3 mit den in der Periode 1997 – 2008 realisierten Werten verglichen, so zeigt sich, dass am 14.8. die Speicherfüllung etwas unter dem Mittelwert für den August lag. Am 20.8. lag die Speicherfüllung schon deutlich über dem 75 % Quantil und am 22.8. wurde der höchste Wert der Simulationsperiode realisiert.

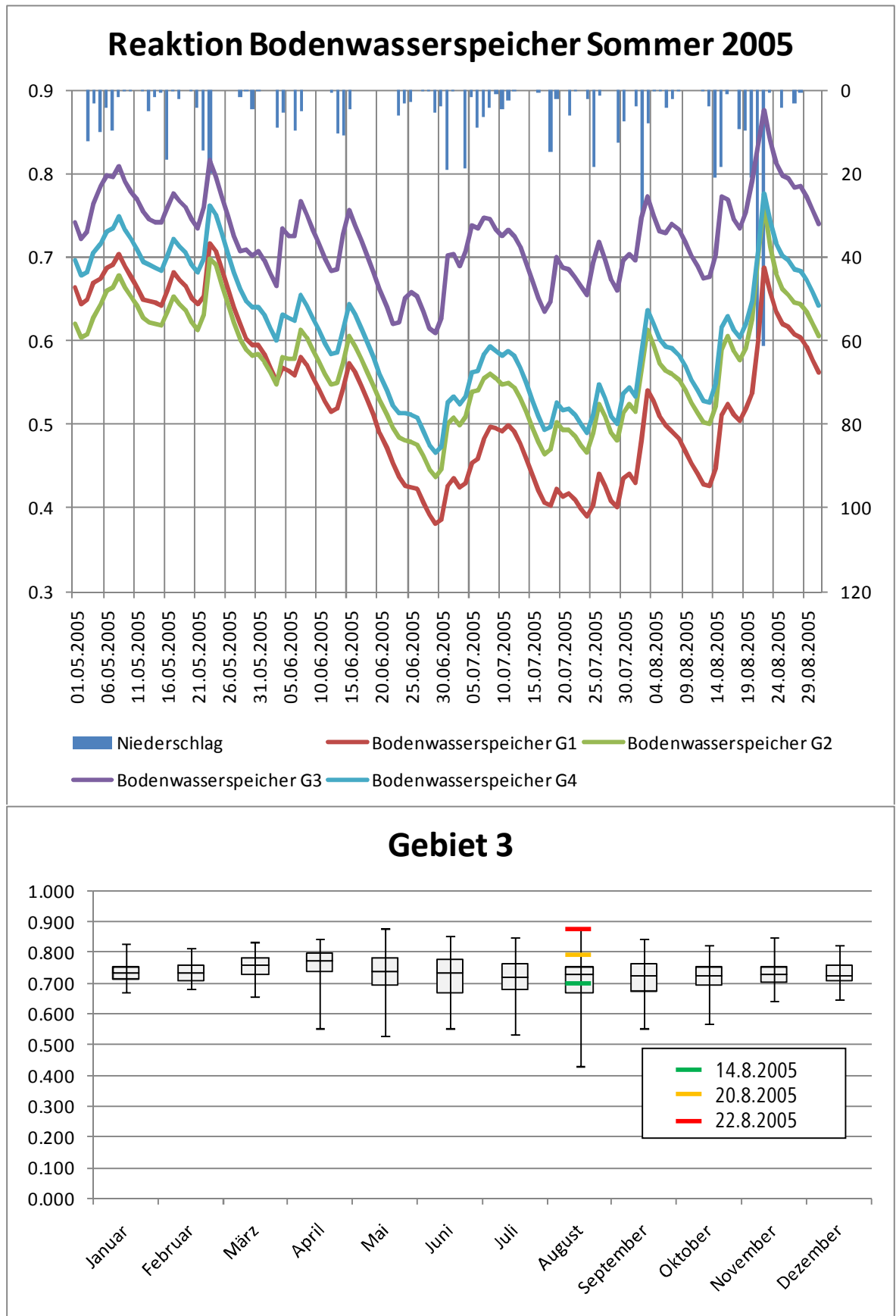


Abbildung 10 Bewertung variable Disposition für ein Teileinzugsgebiet der Emme anhand des Modell-Bodenwassergehaltes

Nach diesem Verfahren ist es möglich, für Gebiete, in denen Niederschlag-Abfluss-Modelle betrieben werden, auch für kleinere Einzugsgebiete Warnstufen herzuleiten. Allerdings ist auch hier für die Festlegung der Warnstufen eine Kalibrierung anhand von konkreten gemessenen Ereignissen notwendig.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Verwendung von Messwerten zur Bodenfeuchte. Dabei kann es sich entweder um Punktmessungen vor Ort handeln, z.B. mittels TDR-Sonden, oder aber um Fernerkundungsdaten. Punktdaten sind aufgrund der Heterogenität der Bodeneigenschaften in alpinen Gebieten jedoch wenig repräsentativ. Messungen in grosser Zahl, wie sie notwendig wären, sind aber sehr aufwändig und können deshalb kaum in Betracht gezogen werden. Damit bleibt noch der Einsatz von Fernerkundungsdaten. Eine operationelle, tägliche Bodenwasserkarte auf der Basis von Satellitendaten ist jedoch zurzeit noch nicht realistisch. In einigen Jahren könnten sie aber einen bedeutenden Beitrag zur Hochwasser-Frühwarnung leisten.

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 schneebedeckte Fläche kann auf der Basis von Fernerkundungsdaten ermittelt werden. Wegen der relativ groben Auflösung der NOAA AVHRR Daten (1 x 1 km²) ist es von Vorteil, wenn das Verfahren angewendet wird, welches den Schneeflächenanteil innerhalb eines Pixels abschätzt (Foppa et al. 2004). Um Probleme im Schneegrenzbereich zu reduzieren, ist zudem der Einbezug von Stationsdaten angezeigt (Foppa et al. 2007). Für die Schweiz wird dieses Produkt durch das SLF operationell zur Verfügung gestellt. Für die Zukunft plant das SLF weiter, eine Schneewasseräquivalentkarte in kurzen Zeitintervallen für die Schweiz zu berechnen. Hierbei besteht die Möglichkeit, für regionale Fragestellungen speziell kalibrierte Berechnungsalgorithmen einzusetzen. Um die Güte dieser Berechnungen sicherzustellen, sind aber regelmässige Feldmessungen des Schneewasseräquivalents weiterhin wichtig.

Die Abschätzung des Schmelzwasserpotenzials für die nächsten Tage kann in Gebieten, für die kein hydrologisches Modell betrieben wird, mit einem erweiterten Tag-Grad-Verfahren erfolgen, wie es beispielsweise im Thunersee-Einzugsgebiet (Mani 2000) angewendet wurde.

Aktuelle Disposition

Für die Beurteilung der aktuellen Disposition werden die Grunddisposition und die variable Disposition miteinander kombiniert (Abbildung 11). Ansätze für die Parameterkombination werden in Kapitel 4.6 beschrieben. Die aktuelle Disposition wird anschliessend in Warnstufen umgesetzt.

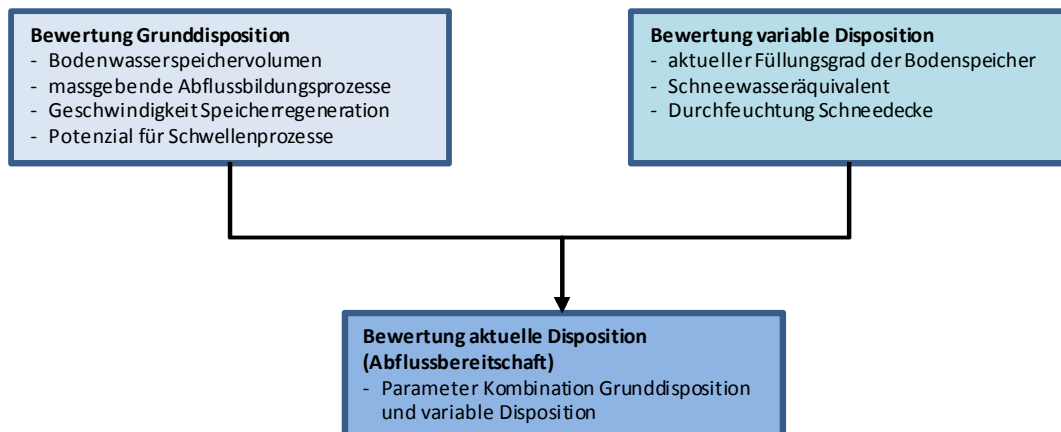


Abbildung 11 Überblick Beurteilung aktuelle Disposition Abflussbildung

4.5.2 Feststoffhaushalt

Grunddisposition

Bei der Beurteilung der Grunddisposition Feststoffhaushalt geht es darum, die Eigenschaften, die das Geschiebepotenzial langfristig steuern, zu bewerten. Dabei gilt es als Erstes zu unterscheiden, ob der Geschiebehaushalt in einem Gebiet hauptsächlich durch Altschuttvorkommen oder durch die Jungschuttproduktion geprägt ist. Verlaufen Gerinne in Altschuttvorkommen (hauptsächlich eiszeitliche Moränen und glazifluviale Schotter), stellen diese oft ein riesiges Geschiebepotenzial dar, insbesondere wenn sie nicht durch Gerinneverbauungen vor Erosion geschützt sind. Doch auch in verbauten Strecken können grosse Geschiebemengen mobilisiert werden, wenn die Dimensionierungsgrösse der Verbauungen überschritten wird. Erosionsherde im Altschutt haben die Eigenschaft, dass nach einem Ereignis oft eine Labilisierung eintritt, die dazu führt, dass bei einer weiteren Systembelastung kurz nach dem Ereignis (Monate bis einige Jahre) eine noch verstärkte Materialmobilisierung auftreten kann. Sehr grosse Materialeinträge sind zu erwarten, wenn die Altschuttmassen Teil einer aktiven Rutschung sind. Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor ist der Permafrost. In hohen Lagen existieren grosse Altschuttdepots unter Permafrost, beispielsweise Bastionsmoränen oder Schutthalden. Mit dem Auftauen des Permafrostes wird deren Stabilität reduziert, wodurch grosse Materialmengen mobilisiert werden können.

Die wichtigste Grundlage für die Beurteilung von Altschuttherden bildet eine gute digitale geologische Karte. Zusätzlich werden Informationen zum Verbaungsgrad und dem Zustand der Verbauungen benötigt. Permafrost-Hinweiskarten existieren sowohl für die Schweiz (BAFU 2005) als auch für das Südtirol in digitaler Form.

Folgende Schritte sind für die Bewertung der Altschuttherde vorzunehmen:

- Ausscheidung Altschuttkörper
- Ausscheidung Erosionsstrecken in Altschuttkörpern
- Ausscheidung Rutschkörper in Altschuttkörpern und Bewertung der Aktivität
- Ausscheidung von Altschuttherden im Permafrost
- Beurteilung Verbaungsgrad und Verbaungszustand der Erosionsstrecken im Altschutt
- Kombination und Bewertung der Parameter

Die Beurteilung des Feststoffhaushaltes für Jungschuttgebiete umfasst einerseits die Beurteilung der Lockermaterialproduktion, andererseits die Beurteilung der Prozesse, die das Material in die Gerinne verlagern. Die Lockermaterialproduktion durch Verwitterung bestimmt, wie viel Material theoretisch in einem Zeitraum in die Gerinne gelangen kann und damit, wie rasch das Geschiebepotenzial nach einem Ereignis wieder aufgefüllt ist. Die geschiebeliefernden Prozesse bestimmen, ob das Verwitterungsmaterial überhaupt in ein Gerinne gelangen kann oder ob es auf Reliefverflachungen liegen bleibt.

Beide Aspekte sind durch die Geschiebepotenzialmodellierungen für das Projekt SilvaProtect-CH bzw. für die Gefahrenhinweiskarte Murgang und Übersarung für die Provinz Südtirol – Bozen abgedeckt. Für die Bewertung der Grunddisposition kann die gewichtete geschieberelevante Fläche verwendet werden, wobei diese mit der Einzugsgebietsgrösse gewichtet werden muss, um einen Vergleich über verschiedene Gebiete zu ermöglichen.

Eine besondere Stellung nehmen in Jungschuttgebieten Flächen ein, in denen Hangmuren anreissen können. Hangmuren können in einem Ereignis gleichzeitig mit den Gerinneprozessen ablaufen. Die Ereignisse im August 2005 haben gezeigt, dass Hangmuren in einem Ereignis das Geschiebepotenzial wesentlich vergrössern können. In der Schweiz wurde im Rahmen des Projekts SilvaProtect-CH eine Ausscheidung von Hangmurenanriss- und Auslaufgebieten vorgenommen, die für eine solche Beurteilung verwendet werden können. In Südtirol gibt es mitt-

lerweile ebenfalls eine Gefahrenhinweiskarte für flachgründige Rutschungen, die für eine Beurteilung verwendet werden kann.

Die Bewertung von Jungschuttgebieten umfasst somit folgende Punkte:

- Bewertung gewichtete geschieberelevante Fläche
- Bewertung der Hangmuren-Anrissgebiete, aus denen Material in die Gerinne gelangen kann

Im Rahmen der Beurteilung der Grunddisposition ist weiter zu klären, ob in einem Gerinne Murgänge auftreten können, oder ob nur mit geschiefeführenden Hochwasserereignissen zu rechnen ist. Diese Beurteilung ist wichtig für die Abschätzung der Geschiebemenge, die in einem Ereignis verlagert werden kann. Sie kann auf der Basis der Gefahrenhinweiskarte aus dem Projekt SilvaProtect-CH oder der Gefahrenhinweiskarte Murgang und Übersarung für die Provinz Südtirol – Bozen erfolgen.

Variable Disposition

Bei der Beurteilung der variablen Disposition Feststoffhaushalt muss die aktuelle Materialverfügbarkeit bzw. die Mobilisierbarkeit des Lockermaterials beurteilt werden. Die Stabilität und damit die Erodierbarkeit von Altschuttgebieten wird durch den Bodenwassergehalt beeinflusst. Eine hohe Wassersättigung des Lockermaterials reduziert die Stabilität und erhöht damit die Erosionsanfälligkeit. Für die Beurteilung des Bodenwassergehaltes können die gleichen Verfahren, wie sie bei der Abflussbildung beschrieben wurden (vgl. Kapitel 4.5.1), eingesetzt werden, wobei beim Vorregenindex eher längere Zeitperioden betrachtet werden müssen, insbesondere im Hinblick auf tiefgründige Rutschungen in Altschuttkörpern.

Beim Permafrost wird die variable Disposition hauptsächlich durch die Temperatur beeinflusst. Hohe Temperaturen lassen das Eis schmelzen, was einerseits zu einer hohen Wassersättigung des Lockermaterials führt, andererseits wird durch die Zunahme der aufgetauten Schicht (Active Layer) die Mächtigkeit des mobilisierbaren Lockermaterials saisonal teilweise um mehrere Meter erhöht (Abbildung 12).

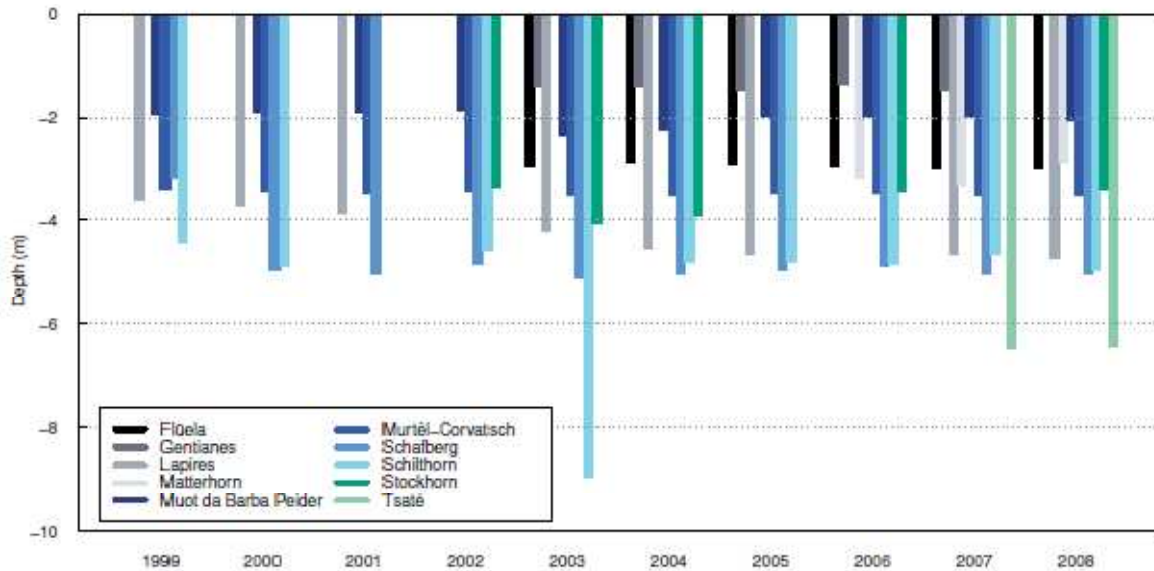


Abbildung 12 Jährliche Tiefe der Auftauschtiefe für verschiedene Permafrost-Messstellen (Noetzli & Vonder Muehl 2010)

Der saisonale Auf- und Abbau des Eises im Active Layer ist von verschiedenen Einflussfaktoren abhängig (Schneebedeckung im Herbst, Mächtigkeit der Schneedecke, Schneeschmelze im Frühling, Sommertemperaturen und –niederschläge). Für die Dispositionsbewertung wird jedoch nur ein einfaches Bewertungsmodell vorgeschlagen. Als Indikator für die Mächtigkeit der Auftauschtiefe sollen die Temperatursummen für verschiedene Höhenstufen während des

Sommers aufsummiert werden. Dazu können die Daten von automatischen Meteostationen in Graubünden und im Südtirol verwendet werden. Die Temperaturgradienten können aus dem Vergleich von Tal- und Bergstationen berechnet werden.

In Jungschuttgebieten wird die aktuelle Disposition hauptsächlich durch den Füllungsgrad der Geschiebedepots in den Gerinnen bestimmt. Unmittelbar nach grösseren Ereignissen sind diese häufig stark reduziert oder sogar weitgehend leer. Im Verlaufe der Zeit baut sich jedoch durch die Geschiebelieferung aus den Hängen ein neues Geschiebepotenzial auf. Für diesen Aspekt ist eine automatische Bewertung, z.B. über Geschiebelieferungsraten, schwierig zu bewerkstelligen und wäre sicher mit einer grossen Unsicherheit behaftet. Daher ist die Bewertung der variablen Disposition in Jungschuttgebieten sinnvollerweise auf der Basis von periodischen Gerinnebegehungen aufzubauen.

Wie bei der Grunddisposition sind auch bei der variablen Disposition die Hangmuren separat zu beurteilen, sofern sie bei der Bewertung der Grunddisposition als massgebender Geschiebelieferant beurteilt wurden. Dabei geht es darum, die Auslösebereitschaft von Hangmuren aufgrund des Bodenwassergehalts abzuschätzen. Hierzu können wiederum die Auswertungen für die Abflussbildung (vgl. Kapitel 4.5.1) beigezogen werden, wobei hier, im Gegensatz zu den tiefgründigen Rutschungen, der gleiche Auswertungszeitraum verwendet werden kann.

Aktuelle Disposition

Für die Bewertung der aktuellen Disposition Feststoffhaushalt wird die Grunddisposition mit der variablen Disposition kombiniert. Dabei ist jedoch vor der Gesamtbewertung ein differenziertes Vorgehen, in Abhängigkeit der Art der Geschiebeherde, notwendig. In Abbildung 13 ist das Verfahren im Überblick dargestellt.

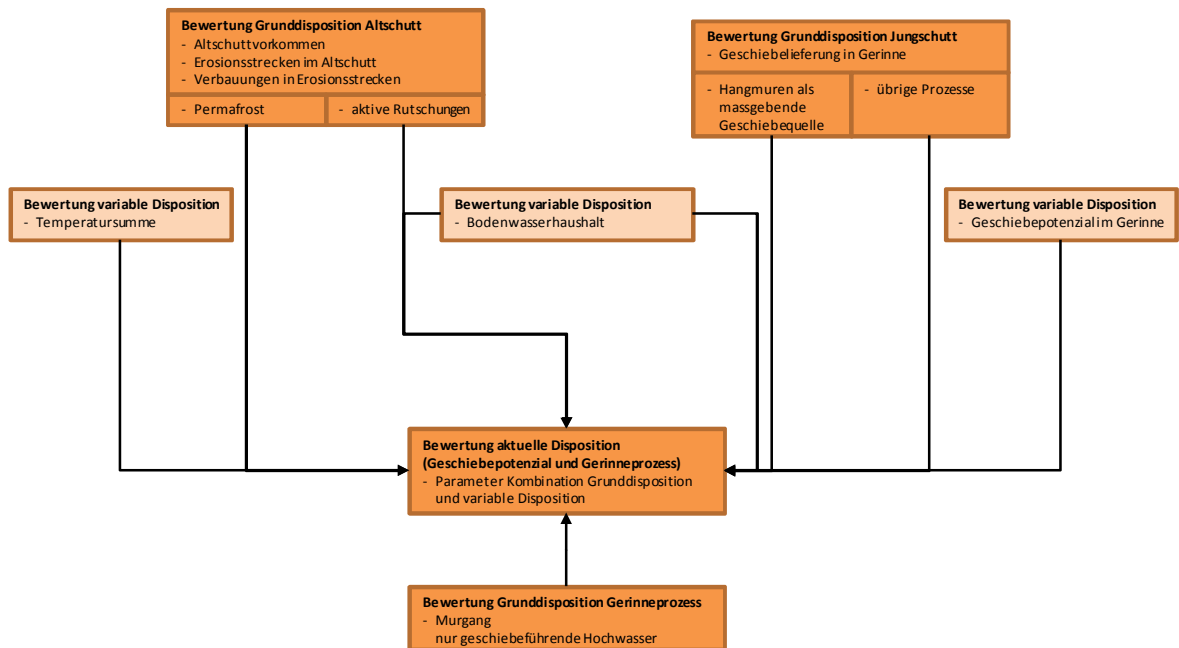


Abbildung 13 Übersicht Bewertungsverfahren aktuelle Disposition Feststoffhaushalt

4.6 Aggregationsmethodik

Für die Bewertung der Disposition müssen verschiedene Parameter und Indikatoren kombiniert werden. Dabei stellen sich zwei Probleme:

- Wie können die Bewertungen der Dispositionen und der Warnstufen geeicht werden?
- Wie kann die Unschärfe, der für die Bewertungen verwendeten Daten, im Verfahren berücksichtigt werden?

Für die Eichung müssen als Erstes Ereignisse gesucht werden, die sich für die Ermittlung von Schwellenwerten eignen. Dazu müssen die Gebiete bezüglich der Grösse und der Prozesse denen entsprechen, die mit dem zu entwickelnden Verfahren beurteilt werden sollen. Ausserdem müssen für diese Gebiete auch die Daten vorliegen, um einerseits die aktuelle Disposition, andererseits die Systembelastung beurteilen zu können. Aus diesen Daten kann eine Hypothese für Schwellenwerte hergeleitet werden. Diese gilt es anschliessend anhand von "Nicht-Ereignissen" zu prüfen. Das bedeutet, dass geprüft werden muss, wie oft mit den ermittelten Schwellenwerten für die aktuelle Disposition und der Systembelastung ein "Fehlalarm" erzeugt worden wäre. Anschliessend sind die Schwellenwerte so zu optimieren, dass mit den ermittelten Dispositionen und den Systembelastungen möglichst alle Ereignisse erfasst werden können und die Anzahl der "Fehlalarme" minimiert wird. Wie die Herleitung der Warnstufen für den Thunersee gezeigt hat, darf der Aufwand für diesen Arbeitsschritt nicht unterschätzt werden (Mani et al. 2008). Angesichts der Kosten und der mangelnden Akzeptanz, die durch zu viele Fehlalarme ausgelöst werden, lohnt es sich, hier einen gewissen Aufwand zu betreiben.

Bei der Festlegung der Grenzen, beispielsweise bei den Flächenanteilen einer bestimmten Ausprägung, sollte wenn möglich die Genauigkeit der Inputdaten berücksichtigt werden. So ist beispielsweise bekannt, dass die digitale Geotechnische Karte der Schweiz räumlich recht ungenau ist. Daher ist es nicht unproblematisch, Schwellenwerte als scharfe Grenzen zu definieren. In solchen Situationen bietet der Einsatz von Fuzzy Logic (Cox 1999) wesentliche Vorteile, indem anstelle von scharfen Grenzen mit Übergangsbereichen gearbeitet wird. Dieser Ansatz kommt häufig bei Expertensystemen zum Einsatz. Zischg et al. (2005) beschreiben ein solches System für die Beurteilung der Gefahr von Nassschneelawinen. Das Verfahren kommt in einem BAFU-Projekt für die Bewertung der Sensitivität von Naturgefahrenprozessen im Hinblick auf die Klimaänderung zum Einsatz (geo7 2010). Abbildung 14 zeigt den Unterschied zwischen einer "scharfen" und einer Fuzzy-Klassifikation. Die Unschärfe in den einzelnen Parametern wird auch in der Aggregation der Parameter mitberücksichtigt. Auf Fuzzy Logic basierende Entscheidungssysteme können heute mit Hilfe von Software Tools effizient umgesetzt werden. Damit bietet Fuzzy Logic eine der Fragestellung angepasste Aggregationsmethodik, die bei der Realisation zumindest eingehender geprüft werden sollte.

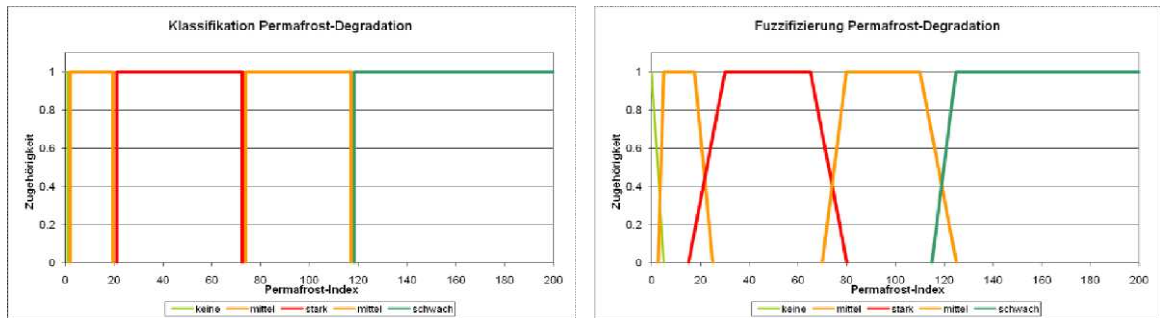


Abbildung 14 „Scharfe“ (links) und Fuzzy-Klassifikation (rechts) des Permafrost-Indexes (geo7 2010)

4.7 Räumliche Gliederung

Wie eingangs erwähnt, soll das Verfahren nicht orts- und zeitgenaue Warnungen ausgeben, sondern Warnstufen für Gebiete auf der Basis der aktuellen Disposition. In diesem Zusammenhang muss festgelegt werden, wie fein die räumliche Auflösung für die Ausgabe von Warnstufen sein soll. Dabei spielt einerseits die räumliche Ausdehnung der Wetterphänomene, die noch unterschieden werden soll, andererseits die Genauigkeit der Daten eine entscheidende Rolle. Radardaten sind ein wichtiger Input. Gemäss MeteoSchweiz erfordern Aussagen aufgrund der Radardaten mindestens eine Grösse von 3 x 3 Zellen (9 km²). Damit bieten in der Schweiz die Basisgebiete aus dem hydrologischen Atlas (HADES) eine sinnvolle Raumgliederung (Abbildung 15). Die Grösse dieser Gebiete liegt zwischen 20 und 100 km².

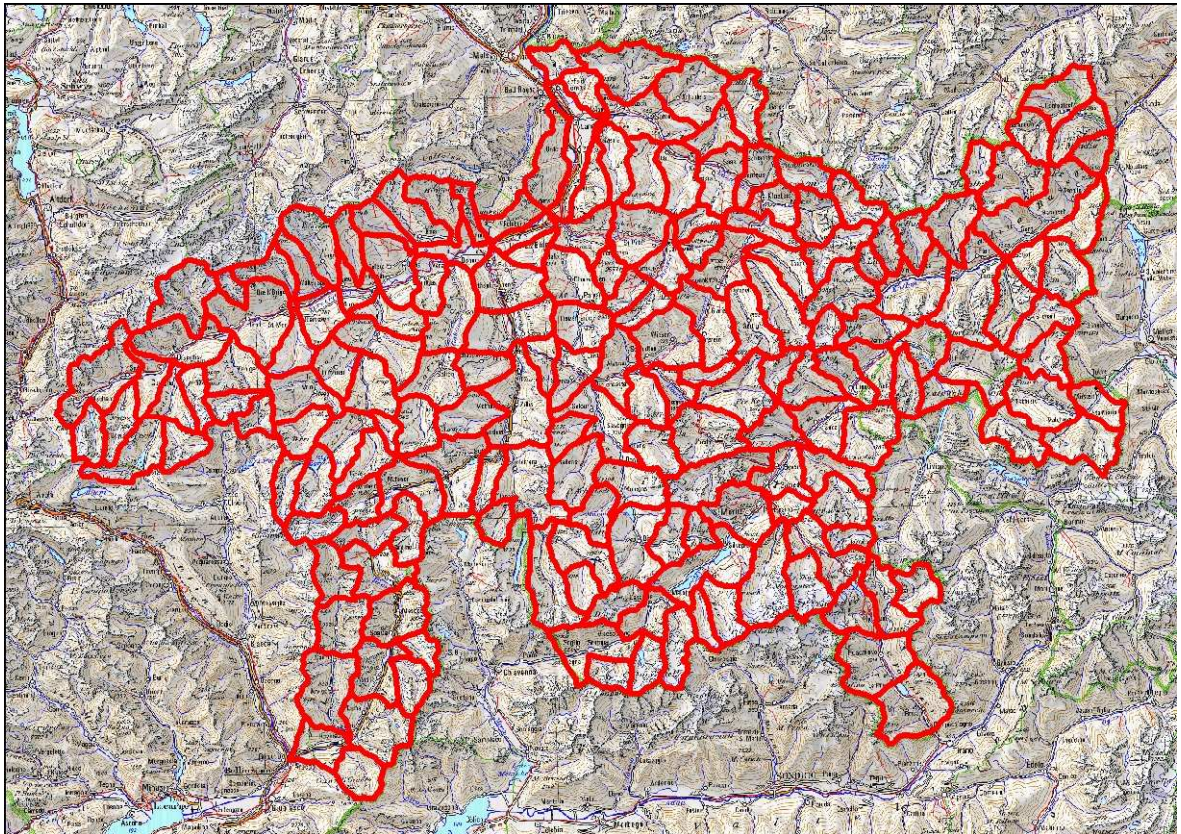
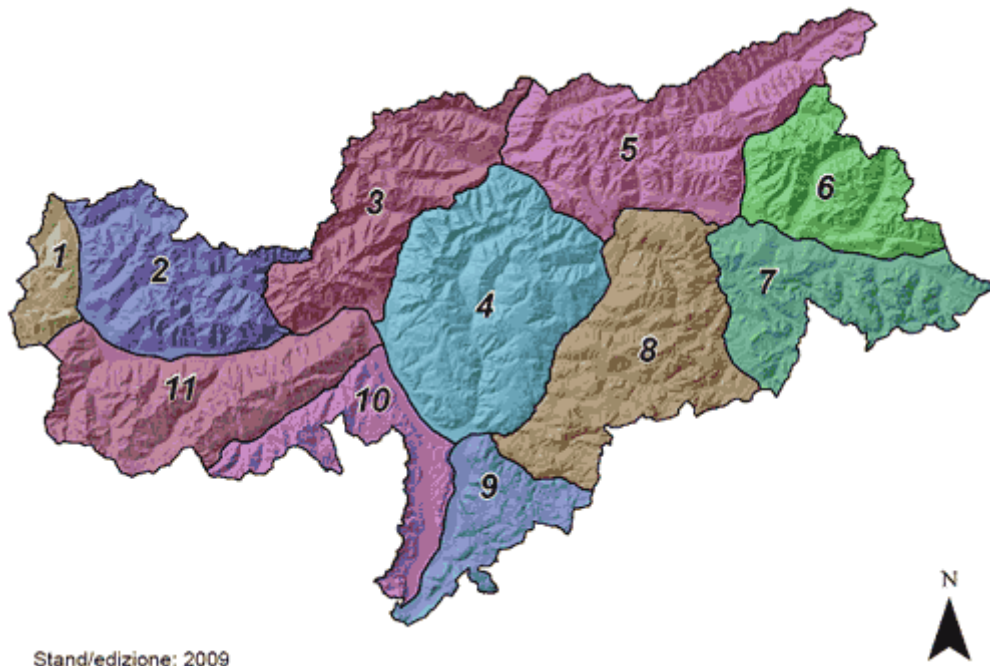


Abbildung 15 Basisgebiete Kanton Graubünden (Quelle: HADES)

Das Gebiet der Autonomen Provinz Bozen wurde auf der Grundlage der „Suddivisione Orografica Internazionale Unificata del Sistema Alpino – Atlante orografico delle Alpi.SOISA“ in 11 klimatisch und hydrologisch möglichst einheitliche geografische Zonen unterteilt. Auf diese Einteilung nimmt sowohl der Wetterdienst als auch der Lawinenwarndienst Bezug. Eine feinere Unterteilung der Einzugsgebiete gibt es im Moment nicht.



Stand/edizione: 2009

Abbildung 16 Gebietsgliederung Südtirol

5 Hinweise für die Umsetzung

5.1 Technische Lösungsansätze

In der Schweiz werden heute auf der Gemeinsamen Informationsplattform Naturgefahren (GIN) bereits eine Vielzahl für die Unwetterwarnung relevante Datensätze zur Verfügung gestellt. Ausserdem bietet die Plattform die Möglichkeit, sogenannte Regionalmodule für bestimmte Gebiete mit spezifischen Fragestellungen zu realisieren. Voraussetzung ist, dass dabei die Darstellungsmöglichkeiten von GIN verwendet werden. Warnstufenkarten, wie sie in diesem Projekt vorgesehen sind, werden demnächst auf GIN zur Verfügung stehen (Abbildung 17). Damit könnte ein Warnsystem für den Kanton Graubünden grundsätzlich auf GIN realisiert werden. Dies macht umso mehr Sinn, als verschiedene Grundlagendaten, die insbesondere für die Berechnung der variablen Disposition benötigt werden, heute bereits auf GIN verfügbar sind. Weiter besteht auch die Möglichkeit, hydrologische Modelle beim BAFU berechnen zu lassen und so von der redundanten Infrastruktur, die auch in Krisensituationen einen Betrieb rund um die Uhr sicherstellen soll, zu profitieren.

Im Südtirol existiert zurzeit keine entsprechende Plattform. Eine Möglichkeit wäre, bei der Abteilung Brand- und Zivilschutz, bei der heute schon der Wetterdienst und das hydrographische Amt angesiedelt sind, eine analoge Infrastruktur aufzubauen. Dabei ist zu prüfen, ob allenfalls das GIN-Framework übernommen werden kann. Dadurch könnten wahrscheinlich Entwicklungskosten in grösserem Umfang eingespart werden.

5.2 Möglichkeiten und Grenzen

Wie die Literaturübersicht gezeigt hat, gibt es eine Vielzahl von Analysen zu einzelnen Gerinnen oder Ereignissen, aber relativ wenige verallgemeinernde Arbeiten. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass mit dem in diesem Bericht vorgeschlagenen Verfahren ein Warnsystem auf der Basis der aktuellen Disposition aufgebaut werden kann, dass aber für die Festlegung der Warnstufen während einiger Zeit ein Monitoringbetrieb notwendig ist, in dem Ereignisse und kritische Situationen analysiert werden, um wenn nötig aufgrund neuer Erkenntnisse die Bewertungsverfahren anzupassen und nachzueichen.

5.3 Inputs aus Expertenworkshop

Die im vorliegenden Bericht beschriebene Methodik wurde am 25. Oktober 2010 an einem Expertenworkshop in Chur diskutiert. Die Ergebnisse sind in einer Aktennotiz zusammengefasst (Abenis, 2010). Die vorgeschlagene Methodik wurde von den Experten als zielführend bewertet. Zentrale Diskussionspunkte waren die räumliche Auflösung von Warnregionen und die Definition der Zielgruppen, für die ein solches Frühwarnsystem aufgebaut werden soll. Bei der räumlichen Auflösung wurde darauf hingewiesen, dass diese hauptsächlich durch die Meteoroprosen vorgegeben ist. Diese wirkt sich vor allem auf die prognostizierte Systembelastung aus. Hier kann das Nowcasting dazu beitragen, die räumliche Auflösung während des Ereignisablaufs zu verbessern. Bei den Zielgruppen ist zwischen den Fachpersonen auf Stufe Kanton bzw. Provinz und den Beratern auf Stufe Gemeinde zu unterscheiden. Während den Fachpersonen auf den übergeordneten Stufen mehr Interpretationsspielraum gewährt werden kann, sollten den Beratern auf Stufe Gemeinde möglichst klare Informationen zur aktuellen Disposition zur Verfügung gestellt werden. Wichtig ist auf beiden Stufen ein Erläuterungstext, der, wie beim Lawinenbulletin, die aktuelle Situation und die zu erwartende Entwicklung eingehender erläutert.

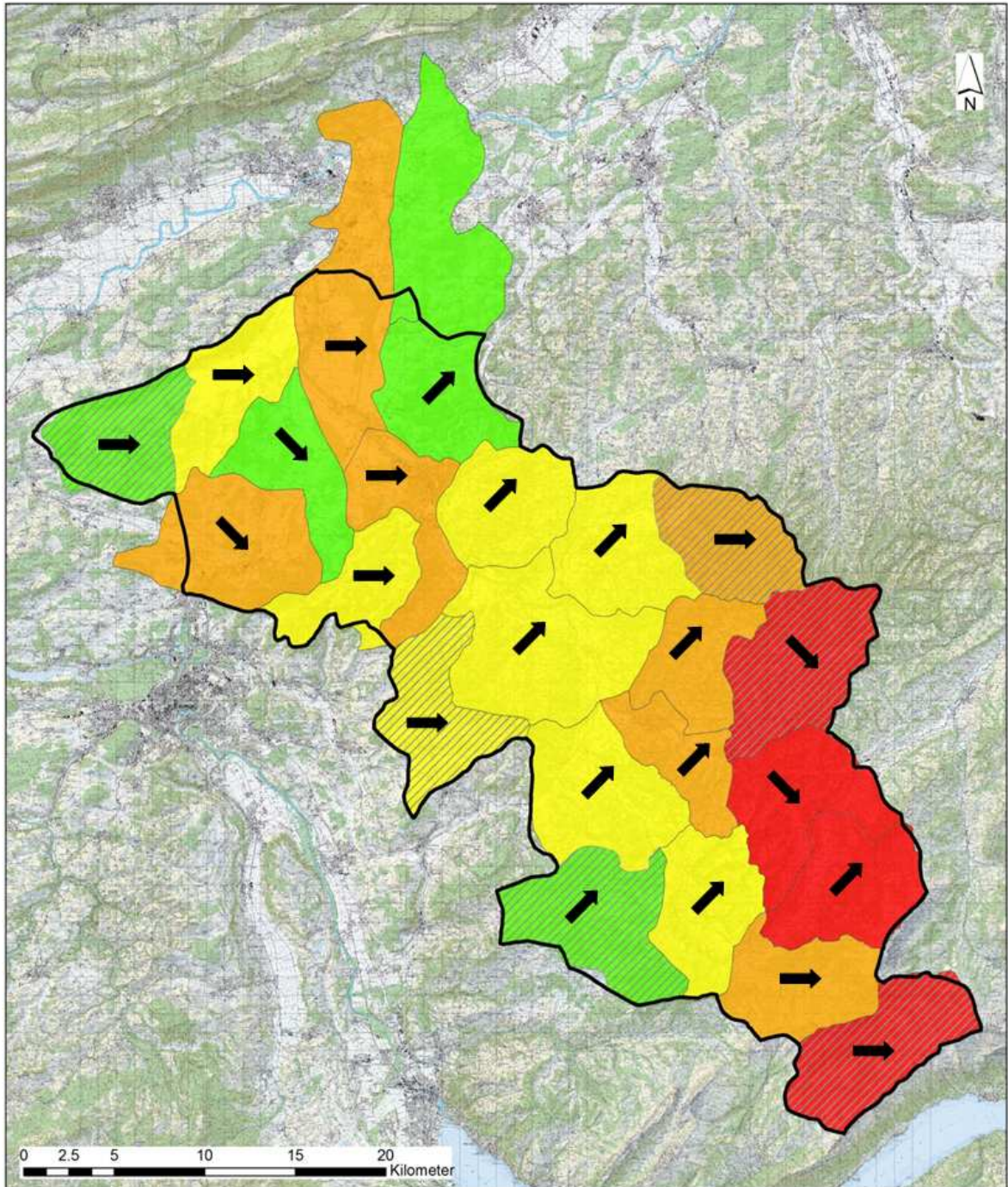


Abbildung 17 Beispiel Warnstufenkarte für das Emmental (fiktiv).
 Flächenfarben: Warnstufen,
 Schraffur: Potenzial zu Schwellenprozessen
 Pfeile: erwartete Entwicklung

5.4 Nächste Schritte

Als nächster Schritt sollte auf der Basis des vorliegenden Berichts ein Umsetzungskonzept ausgearbeitet werden, in dem die Inputdaten für die verschiedenen Bewertungsschritte festgelegt und die Bewertungsverfahren definiert werden. Dazu gehört auch eine Auswertung von abgelaufenen Ereignissen für die Festlegung von Schwellenwerten und die Analyse von Zeitreihen für die Überprüfung dieser Schwellenwerte.

Anschliessend ist ein technisches Konzept auszuarbeiten, in dem aufgezeigt wird, auf welcher Plattform mit welchen Mitteln ein solches Warnsystem realisiert werden kann.

Zu prüfen ist, ob für ein kleineres Gebiet parallel zu den oben beschriebenen Schritten ein Pilotprojekt realisiert werden kann. Aus den praktischen Erfahrungen eines solchen Projektes könnten wertvolle Erkenntnisse für die Umsetzung des Verfahrens für das ganze Gebiet gewonnen werden.

Bern, 6. Januar 2011

geo7 AG

Peter Mani
Geschäftsführer

Literaturverzeichnis

- Abenis, 2010: Ampelsystem zur Früherkennung von Unwettersituationen. Ergebnisse des Projektworkshops vom 25.10.2010 in Chur. Internes Papier.
- Anquetin S., Ducrocq V., Braud I., Creutin J-D., 2009: Hydrometeorological modeling for flash flood areas: the case of the 2002 Gard event in France. *J Flood Risk Management* 2: 101-110.
- Bacchini M., Zannoni A., 2003: Relations between rainfall and triggering of debris-flow: case study of Cancia (Dolomites, Northeastern Italy). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 3: 71-79.
- BAFU 2005: Hinweiskarte zur potenziellen Permafrostverbreitung in der Schweiz. [<http://www.bafu.admin.ch/naturgefahren/06140/06149/index.html?lang=de>, 23.12.2010]
- Berthet L., Andréassian V., Perrin C., Javelle P., 2009: How crucial is it to account for the antecedent moisture conditions in flood forecasting? Comparison of event-based and continuous approaches on 178 catchments. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13, 819-831.
- Bezzola G.R., Hegg C. (Ed.) 2008: Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahregrundlagen. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0825: 429 S.
- Borga M., Boscolo P., Zanon F., Sangati M., 2007: Hydrometeorological Analysis of the 29 August 2003 Flash Flood in the Eastern Italian Alps. *Journal of Hydrometeorology*, Volum 8: 1049-1067.
- Bremicker M., Homagk P., Ludwig K., 2006: Hochwasserfrühwarnung und Hochwasservorhersage in Baden-Württemberg. *Wasserwirtschaft* 7-8: 46-50.
- Brunetti M.T., Peruccacci S., Rossi M., Guzzetti F., Reichenbach P., Ardizzone F., Cardinali M., Mondini A., Salvati P., Tonelli G., Valigi D. & Luciani S., 2009: A prototype system to forecast rainfall induced landslides in Italy. *Proceedings of the 1st Italian Workshop on Landslides*, Picarelli L., Tommasi P., Urciuoli G. & Versace P. (eds.) *Rainfall-Induced Landslides: mechanisms, monitoring techniques and nowcasting models for early warning systems*. Naples, 8-10 June 2009, Vol. 1, 157-161.
- Brunetti M.T., Peruccacci S., Rossi M., Luciani S., Valigi D. Guzzetti F., 2010: Rainfall thresholds for the possible occurrence of landslides in Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, 447-458.
- Bürgi T., Sigrist B., Streit D., 2007: Hydrologische Produkte des Bundesamtes für Umwelt – BAFU – bei Hochwasser. *Forum für Wissen* 2007: 69-73.
- Casper M., Gemmar P., Gronz O., Johst M., Stüber M., 2007: Fuzzy logic-based rainfall-runoff modeling using soil moisture measurements to represent system state. *Hydrol. Sci. J.*, 52(3), 478-490.
- Cox E. 1999: *The fuzzy Systems Handbook. A Practitioner's Guide to Building, Using, and Maintaining Fuzzy Systems*. 2nd Edition. AP Professional San Diego.
- Dobmann J., 2009: Hochwasserabschätzung in kleinen Einzugsgebieten der Schweiz. Interpretations- und Praxishilfe. Inauguraldissertation am Geographischen Institut der Universität Bern.
- EJPD - Bundesamt für Raumplanung, EVD - Bundesamt für Landwirtschaft, EDI- Bundesamt für Forstwesen, 1980: Bodeneignungskarte der Schweiz. Grundlagen für die Raumplanung. Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale, Bern.
- EURAC research, 2010: State of the Art of Soil Moisture Retrieval. Estimation Approaches and Methodologies (internes Papier).

- Floris M., D'Alpaos A., Squarzoni C., Genevois R., Marani M., 2010: Recent changes in rainfall characteristics and their influence on thresholds for debris flow triggering in the Dolomitic area of Cortina d'Ampezzo, north-eastern Italian Alps. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 10:571-580.
- Foppa N., Stoffel A., Meister R., 2007: Synergy of in site and space borne observation for snow depth mapping in the Swiss Alps. In: *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 9, S. 294-310.
- Foppa N., Wunderle S., Hauser A., Oesch D., Kuchen F., 2004: Operational sub-pixel snow mapping over the Alps with NOAA-AVHRR data. *Ann. Glaciol.* 38, 245-252.
- geo7, 2010: Klimasensitivität Naturgefahren. Beurteilung auf der Basis der SilvaProtect-CH Daten, Bericht Phase 2. Interner Bericht zuhanden des Bundesamtes für Umwelt BAFU.
- Georgakakos K.P. 2006: Analytical results for operational flash flood guidance. *Journal of Hydrology*, 317: 81-103.
- Gianneccchini R., 2006: Relationship between rainfall and shallow landslides in the southern Apuan Alps (Italy). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 6: 357-364.
- Gianneccchini R., 2006: Relationship between rainfall and shallow landslides in the southern Apuan Alps (Italy). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 6: 357-364.
- Gurtz J., Baltensweiler A., Lang H., 1999: Spatially distributed hydrotope-based modelling of evapotranspiration and runoff in mountainous basins. *Hydrological Processes* 13: 2751-2768.
- Hasenauer S., Komma J., Parajka J., Wagner W., Blöschl G., 2009: Bodenfeuchtedaten aus Fernerkundung für hydrologische Anwendungen. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, Volume 61, Numbers 7-8, 117-123.
- Jordan F., Boillat J.-L., Hernandez J.G., Dubois J., Schleiss A.J., 2007: Aide à la décision en situation de crue: le cas du Rhône en Valais. *Forum für Wissen* 2007: 79-83.
- Lehmann T., Holzmann H., 2008: Flood warning level forecasting for ungauged catchments by means of a combined API storage concept. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 4. doi: 10.1088/1755-1307/4/1/012047.
- Lehning M., Völsch 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.
- Mani P., 2000: Schneeschmelz- und Abflussprognose für das Berner Oberland im Frühling 1999. *Wasser, Energie, Luft*, 92. Jg, Heft 3/4.
- Mani P., Schmocker P., Bollaert E., Andres M., 2008: Ein Frühwarnsystem für den Thunersee. Hydro-meteorologische Indikatoren für den Betrieb des Entlastungstollens in Thun. *Interpraevent 2008 – Conference Proceedings*, Vol. 1: 177-186.
- Manus C., Anquetin S., Braud I., Vandervaere J.-P., Creutin J.-D., Viallet P., Gaume E., 2009: A modeling approach to assess the hydrological response of small Mediterranean catchments to the variability of soil characteristics in a context of extreme events. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13: 79-97.
- Martina M.L.V., Todini E., Libralon A., 2006: A Bayesian decision approach to rainfall thresholds based flood warning. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 10:413-426.
- Matreata S., Matreata M., 2007: Application of Fuzzy Logic Systems for the elaboration of an operational hydrological warning system in ungauged basins. In: Pfister L., Hoffmann L., (Eds): Uncertainties in the "monitoring-conceptualisation-modelling" sequence of catchment research. *Proceedings 11th Conference of the Euromediterranean Network of Experimental and Representative Basins (ERB)*, Luxembourg, 20-22 September 2006. IHP-VI, Technical Documents in Hydrology, No. 81, UNESCO, Paris.

- Montesarchio V., Lombardo F., Napolitano F., 2009: Rainfall thresholds and flood warning: an operative case study. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 9: 135-144.
- Naef F., Margreth M., Schmocker-Fackel P., Kienzler P., Scherrer S., 2008: Die Häufung der Hochwasser der letzten Jahre. Ereignisanalyse des Hochwassers vom August 2005. Bericht zur Beschreibung des Vorgehens und der angewendeten Methoden zuhanden des Bundesamtes für Umwelt (BAFU).
- Naef F., Margreth M., Schmocker-Fackel P., Kienzler P., Scherrer S., 2008: Die Häufung der Hochwasser der letzten Jahre. Ereignisanalyse des Hochwassers vom August 2005. Bericht zur Beschreibung des Vorgehens und der angewendeten Methoden zuhanden des Bundesamtes für Umwelt (BafU).
- Noetzi J., Vonder Muehll D. (eds.) 2010: Permafrost in Switzerland 2006/2007 and 2007/2008., Glaciological Report Permafrost No. 8/9. Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences.
- Norbiato D., Borga M., Degli Esposti S., Gaume E., Anquetin S., 2008: Flash flood warning based on rainfall thresholds and soil moisture conditions: An assessment for gauged and ungauged basins. *J. Hydrol.* 362: 274-290.
- Norbiato D., Borga M., Dinale R., 2009: Flash flood warning in ungauged basins by use of the flash flood guidance and model-based runoff thresholds. *Meteorol. App.* 16: 65-75.
- Parajka J., Merz R., Blöschl G., 2005: A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9, 157–171.
- Rabuffetti D. und Barbero S., 2004: The Piemonte Region Meteorological Alert Procedure and the Real Time Flood Forecasting System. Associated Programme on Flood Management. WMO, www.apfm.info/case_studies.htm#europe (Besucht: 18.10.2010).
- Rabuffetti D., Ravazzani G., Barbero S., Mancini M., 2009: Operational flood-forecasting in the Piemonte region – development and verification of a fully distributed physically-oriented hydrological model. *Adv. Geosci.*, 17: 111-117.
- Rickli Ch., Forster F. (1997): Einfluss verschiedener Standorteigenschaften auf die Schätzung von Hochwasserabflüssen in kleinen Einzugsgebieten. In: *Schweiz. Zeitschrift für Forstwesen*, 148. Jg., Nr. 5: 367-385. Illnau.
- Romang H., Zappa M., Hegg Chr., Rhyner J., 2007: IFKIS-Hydro. *Forum für Wissen 2007*: 75-78.d
- Saito H., Nakayama D., Matsuyama H., 2010: Two Types of Rainfall Conditions Associated with Shallow Landslide Initiation in Japan as Revealed by Soil Water Index. *SOLA*, 2010, Vol. 6, 057-060, doi: 10.2151/sola.2010-015.
- Schädel W., 2003: Bodenfeuchtemessung und Bodenfeuchteregionalisierung zur Verbesserung der Hochwasserwarnung in kleinen und mittleren Einzugsgebieten. Soil Moisture Group der Universität Karlsruhe und des Forschungszentrums Karlsruhe. Kolloquium mit Workshop "Innovative Feuchtemessung in Forschung und Praxis", Karlsruhe, 3.-4. Juli 2003.
- Schmocker-Fackel P., 2004: A Method to Delineate Runoff Processes in a Catchment and its Implications for Runoff Simulations.
- Schulla J. Jasper K., 2007: Model description WaSiM-ETH [verfügbarer Download unter: http://www.wasim.ch/wasim/products/wasim_description.htm]
- Sommer Mess-Systemtechnik, 2010: Snow Pack Analyser (SPA) zur Bestimmung des Schneewasseräquivalents und des Schneewasseranteils.
- Tobias J., Marty, Chr., Magnusson, J., 2009: Estimating the snow water equivalent from snow depth measurements in the Swiss Alps; 2009; *J. Hydrol.*, 378, 161-167.

- Vivirol D., Mittelbach H., Gurtz J., Weingartner R., 2009: Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland - Part II: Parameter regionalisation and flood estimation results. *J. Hydrol.* 337: 208-225.
- Vivioli D., Zappa M., Gurtz J., Weingartner R., 2009: An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. *Environmental Modelling & Software* 24 (10), 1209-1222.
- Zappa M., Jaun S., Badoux A., Schwanbeck J., Addor N., Liechti K., Roeser I., Walser A., Vivioli D., Vogt S., Gerber M., Trösch J., Weingartner R., Oplatka M., Bezzola GR., Rhyner J., 2010: IFKIS-Hydro Sihl: Ein operationelles Hochwasservorhersagesystem für die Stadt Zürich und das Sihltal. *Wasser, Energie, Luft*, Heft 3/2010: S. 238-248.
- Zappa M., Vogt S., 2007: Hochwasser-Vorhersagesysteme der neusten Generation im Praxis-Test. *Forum für Wissen* 2007: 25-31.
- Zischg A., Fuchs S., Keiler M., Meissl G., 2005: Modelling the system behavior of wet snow avalanches using an expert system approach for risk management on high alpine traffic roads. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 5: 821-832.