

**Kanton Graubünden**  
Amt für Raumentwicklung  
Amt für Natur und Umwelt  
Amt für Wald

**Teilprojekt Kanton Graubünden im Rahmen des Interreg  
IIIB Projektes Catch Risk**

## **GIS-basierte Modellierung von Rutschungen und Hangmuren**

Projektleitung seitens der kantonalen Fachstellen:

Gian-Franco Tognina (ANU)

Dr. Christian Wilhelm (AfW)

Christoph Zindel (ARE)



Davos Dorf, Oktober 2006

Autoren:

Daniel Tobler

Dr. Bernhard Krummenacher

Werner Rohr

## Inhaltsverzeichnis

Seite

|  |    |
|--|----|
| 1. Einleitung, Problemstellung   | 4  |
| 2. Zielsetzungen   | 4  |
| 3. Untersuchungsperimeter  | 5  |
| 4. Vorgehen, Partner, erwartete Resultate und ausgeführte Untersuchungen   | 7  |
| 4.1 Geplantes Vorgehen und Partner   | 7  |
| 4.2 Zu erwartende Resultate  | 9  |
| 4.3 Ausgeführte Untersuchungen   | 10 |
| 5. Unterlagen und verwendete Literatur   | 11 |
| 6. Arbeitsschritte Etappe 1  | 12 |
| 6.1 Daten  | 12 |
| 6.2 Modellansatz   | 13 |
| 6.3 Modellierungen   | 15 |
| 6.4 Workshop 2.4.2004  | 19 |
| 7. Arbeitsschritte Etappe 2 (Detailstudie)   | 22 |
| 7.1 Datenerhebung  | 22 |
| 7.2 Datenanalyse und Bewertung   | 24 |
| 7.3 Modellierungen   | 31 |
| 7.4 Niederschlag   | 32 |
| 8. Resultate und Bewertung   | 38 |
| 9. Antworten auf die Zielsetzungen   | 42 |
| 9.1 Zielsetzung 1: Der Kanton GR kennt die wesentlichen Grundlagen die für solche Modellrechnungen erforderlich sind und weiss welche Grundlagen er prioritär erarbeiten und in digitaler Form bereitstellen muss. | 42 |
| 9.2 Zielsetzung 2: Der Kanton kann die Erkenntnisse nutzen und bei der Erstellung der Gefahrenkarten ‚Rutschung‘ Prioritäten setzen.   | 43 |
| 9.3 Zielsetzung 3: Der Kanton kann zukünftig Warnungen zu Starkniederschlägen im untersuchten Perimeter in praktikable ‚Gefahrenstufen‘ für Rutschungen umsetzen.  | 43 |
| 10. Empfehlungen und weiteres Vorgehen   | 45 |

## **Anhang**

|  | <b>Nr.</b> |
|--|------------|
| Übersicht der vorhandenen digitalen Grundlagendaten                                    | 1          |
| Darstellung der verwendeten digitalen Datensätzen von GEOSTAT (Auswahl)                | 2          |
| Darstellung der verwendeten digitalen Datensätze aus dem kantonalen Archiv (Auswahl)   | 3          |
| Ausschnitt der Hydrogeologischen Karte Panixerpass 1:100'000                           | 4          |
| Struktur des Modells SLIDISP   | 5          |
| Ausschnitt der geologischen Detailkartierung von T. Lardelli 1:10'000                  | 6          |
| Ausschnitt der Kartierung der Strassenentwässerung 1:10'000                            | 7          |
| Beispiel eines Aufnahmeprotokolls der Bodenkartierung                                  | 8          |
| Darstellung der Niederschlagsdaten (12h, 24h und 3d Summen)                            | 9          |
| Dispositionskarte Surselva (Etappe 1) 1:50'000   | 10         |
| Dispositionskarte Hinterrhein (Etappe 1) 1:50'000                                      | 11         |
| Bodenkarte mit Lokalisationen der Beprobungen und hydrologischen Gegebenheiten 1:5'000 | 12         |
| Legende zur Bodenkarte Schlans   | 13         |
| Resultatkarte: Dispositionsflächen für Anrisse von Hangmuren, Gebiet Schlans 1:10'000  | 14         |
| Resultatkarte: Dispositionsflächen für Anrisse von Hangmuren, Gebiet Trun 1:10'000     | 15         |
| Poster (Format A0) zum Projektabschluss in Udine 28.6.05 (verkleinert auf A4)          | 16         |
| Poster (Format A0) zum Projektteil Bodenkartierung (verkleinert auf A4)                | 17         |

## 1. Einleitung, Problemstellung

Der Kanton Graubünden (vertreten durch das Amt für Raumentwicklung ARE, das Amt für Wald AfW und das Amt für Natur und Umwelt ANU) beteiligten sich beim Projekt Catch Risk (2002 – 2005) im Rahmen des Interreg IIIB Alpine Space Programmes unter dem Titel „mitigation of hydrogeological risk in Alpine catchments“. Das Teilprojekt GR ist im Workpackage 2<sup>1</sup> „Rutschungsphänomene innerhalb der Einzugsgebiete“ des Projektpartners SUPSI (Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana, Lugano) angesiedelt.

Der Kanton Graubünden beabsichtigte das Unwetter vom November 2002 als Fallstudie näher zu untersuchen. Dazu wurde die GEOTEST AG zur Ausarbeitung eines Konzeptes und Projektteils für die Bearbeitung und Beantwortung der folgenden beiden Hauptfragen beauftragt:

1. Wo waren die Rutschungen zu erwarten (Modellrechnungen)?
2. Gibt es Differenzen zu den tatsächlich aufgetretenen Rutschungen und wie sind sie begründbar?

Die Auftragsvergabe erfolgte am 3. Juni 2003. Im Detailkonzept wurden die Zielsetzungen konkretisiert sowie die erforderlichen Arbeitsschritte und die Untersuchungsperimeter definiert.

## 2. Zielsetzungen

### Zielsetzungen generell:

- Der Kanton GR kennt die wesentlichen Grundlagen (z.B. geolog. Karten usw.) und die erforderlichen Parameter, die für Modellierungen zur Ausscheidung von potentiellen Anrissgebieten für Hangmuren, erforderlich sind.
- Der Kanton weiss welche Grundlagen er prioritär erarbeiten und in digitaler Form bereitstellen muss.
- Der Kanton kann die Erkenntnisse nutzen und bei der Erstellung der Gefahrenkarten Rutschung und Hangmuren Prioritäten setzen.
- Der Kanton kann zukünftig Warnungen zu Starkniederschlägen im untersuchten Perimeter in praktikable „Gefahrenstufen“ für Rutschungen und Hangmuren umsetzen.

---

<sup>1</sup>

WP 1: Hydrogeologische Prozesse in den Einzugsgebieten  
**WP 2: Rutschungsphänomene innerhalb der Einzugsgebiete**  
WP 3: Hochwasserrisiko und Muren auf Schwemmkegeln  
WP 4: Überschwemmungszonen  
WP 5: Austausch und Publikation der Ergebnisse

Informationen auf Internet [www.catchrisk.org](http://www.catchrisk.org)

### 3. Untersuchungssperimeter

Anhand der bestehenden Grundlagen aus den Analysen der Unwetter vom November 2002 in der Surselva und im Gebiet Hinterrhein wurden zwei Untersuchungssperimeter bestimmt. Im Perimeter Surselva traten beim Unwetter im November 2002 die grössten Schäden auf, in Hinterrhein wurden die grössten Niederschlagsmengen gemessen. Aufgrund der z.T. sehr heterogenen Grundlagendaten wurden zwei Bearbeitungsstufen mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad festgelegt (vgl. Kap. 4).

In einer ersten Etappe wurden zwei Perimeter für die Übersichtsuntersuchung im Massstab 1:50'000 festgelegt. Sie umfassen einerseits die nördliche Talseite der Surselva im Gebiet zwischen Sumvitg und Brigels (Abbildung 1) und andererseits das Gebiet Hinterrhein zwischen Nufenen und Hinterrhein (Abbildung 2).

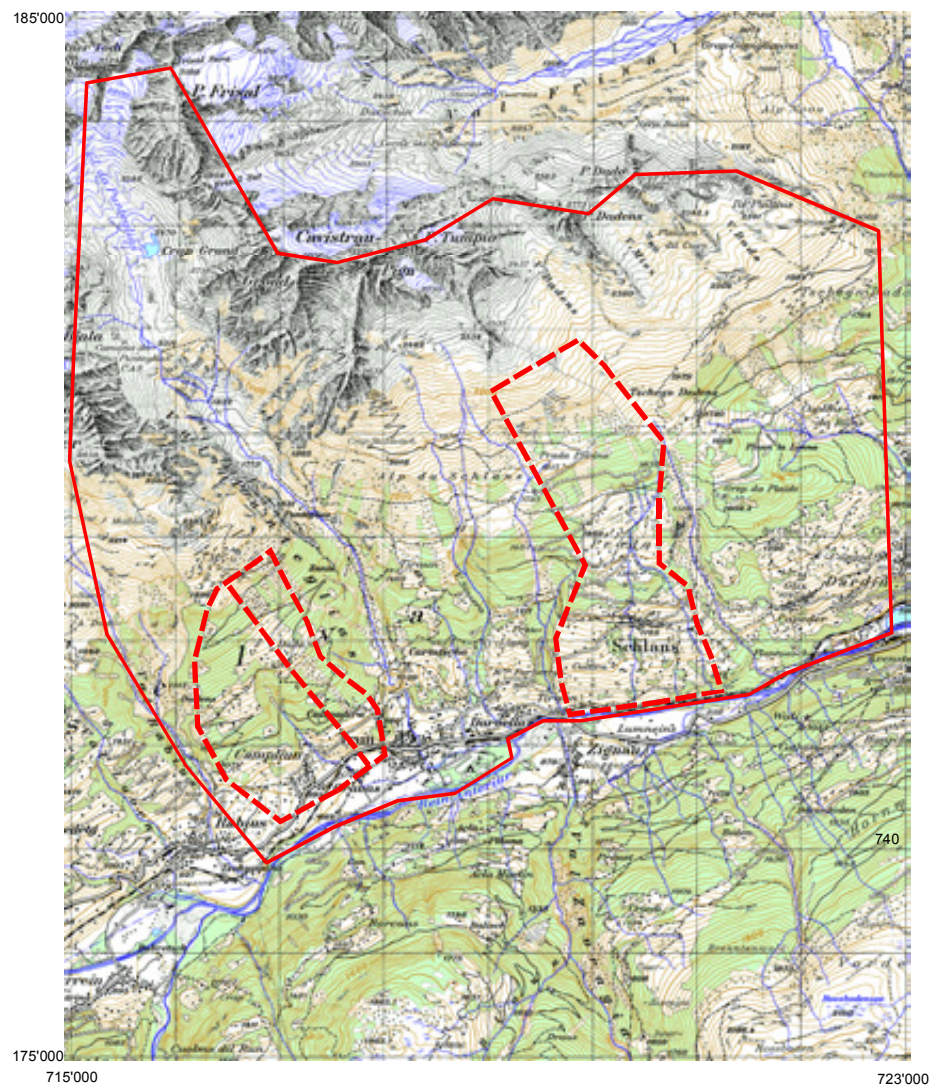


Abbildung 1:  
Untersuchungssperimeter Surselva: Die ausgezogene Umrandung zeigt den Perimeter für die Übersichtsanalysen (1:50'000), die gestrichelte Umrandung zeigt die Detailperimeter die auf der Massstabsebene 1:10'000 bearbeitet wurden (Darstellung unmassstäblich).



Die Detailuntersuchungen in Etappe 2 erfolgten im Massstab 1:10'000 innerhalb des Projektperimeters in den zwei Gebieten Trun (Val Campliun, Val Quader/Caltgadira) und Schlans. Aufgrund fehlender Daten zur Geologie und zum Boden konnte im Gebiet Hinterrhein / Nufenen keine Detailuntersuchung durchgeführt werden.

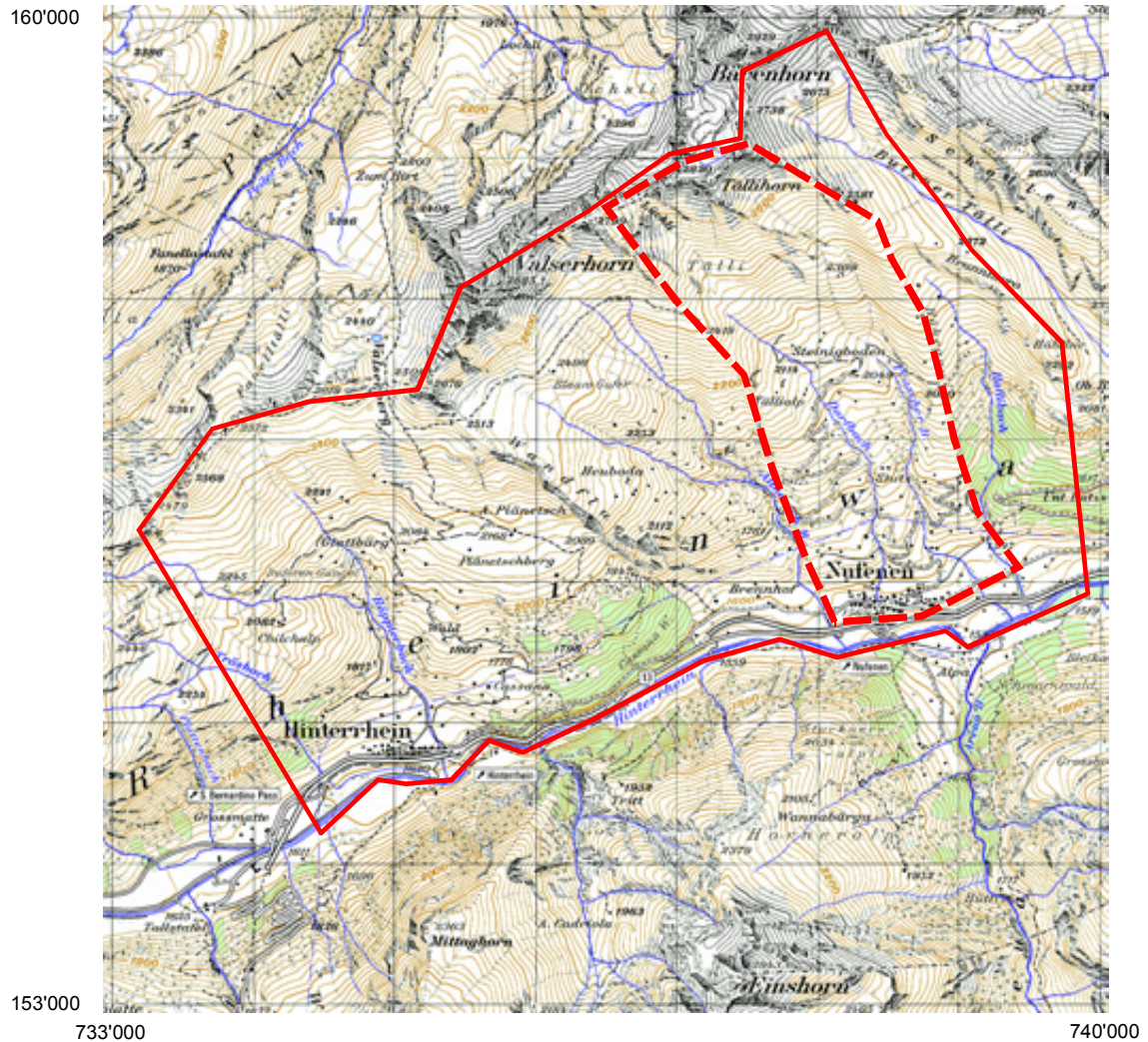


Abbildung 2:  
Untersuchungsperimeter Hinterrhein/Nufenen: Die ausgezogene Umrandung zeigt den Perimeter für die Übersichtsanalysen (1:50'000), die gestrichelte Umrandung zeigt den geplanten Detailperimeter, der jedoch nicht bearbeitet wurde (Darstellung unmassstäblich).

## 4. Vorgehen, Partner, erwartete Resultate und ausgeführte Untersuchungen

### 4.1 Geplantes Vorgehen und Partner

Das Teilprojekt Graubünden wurde, wie bereits erwähnt, in zwei Etappen erarbeitet. Die Arbeiten in Etappe 1 erfolgten in den beiden Übersichtsperimetern Surselva und Hinterrhein. Die Resultatdarstellung und Interpretation dieser Etappe 1 erfolgt auf der Massstabsebene 1:50'000. Die Arbeiten in Etappe 2 erfolgen in den zwei Detailperimetern der Surselva (Schlans und Trun) mit Massstab 1:10'000.

Für die Bereitstellung der Grundlagen und Analyseschritte zur Erstellung der Dispositionskarte sind in den verschiedenen Disziplinen der Meteorologie, Geologie, Bodenkunde, Landwirtschaft, Forstwesen usw. spezifische Sach- und Ortskenntnisse erforderlich. Die anstehenden Arbeiten wurden demzufolge auf verschiedene Spezialisten aufgeteilt. Die einbezogenen Partner sind in Tabelle 1 aufgelistet.

*Tabelle 1: Beteiligte Partner und ihre Funktionen*

| Partner             | Spezialgebiet                      | Funktion   |
|---------------------|------------------------------------|--|
| GEOTEST AG, Davos   | Geologie, Geoinformatik, Pedologie | Koordination, Modellierung und Bodenaufnahmen              |
| TERGESO AG, Sargans | Hydrologie und Meteorologie        | Aufbereitung und Bereitstellung der Niederschlagsdaten     |
| tur gmbh, Davos     | Murgang, Ereigniskataster          | Aufbereitung Ereigniskataster                              |
| E. Brähm, Scharans  | Pedologie                          | Beratung bei pedologischen und landwirtschaftlichen Fragen |
| Amt für Wald, Chur  | Wald und Naturgefahren             | Erfassung von Strassenabschlägen, Ereigniskataster         |

In den nachfolgenden tabellarischen Zusammenstellungen (Tabelle 2) sind die Arbeiten in Etappe 1 und Etappe 2 (Tabelle 3) aufgeteilt. In Etappe 1 lag der Schwerpunkt einerseits in der Akquisition und Aufbereitung der vorhandenen digitalen Daten und andererseits wurden auf der Basis dieser vorhandenen Daten grobe Modellrechnungen (SLIDISP) und GIS-Analysen durchgeführt. In Etappe 2 lag das Hauptgewicht auf der Erfassung von genaueren Grundlegendaten und der Detailmodellierung.

Wie anlässlich der Projekt-Startsitzungen vom 8. Mai und 21. Juli 2003 festgelegt, wurden der GEOTEST AG die Projektkoordination und die fachlichen Arbeiten im Bereich der Modellierungen übertragen.

Tabelle 2:

Vorgesehene Arbeiten in Etappe 1 mit Einteilung der beteiligten Partnern (gelb markierte Bereiche)

| Vorgesehene Arbeiten  | Spezialist Geologie | Spezialist Landwirtschaft und Boden | Spezialist Meteorologie | Spezialist Forstwirtschaft |
|---|---------------------|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------|
| <b>Aufarbeitung der Meteodaten Unwetter 2002 und hydrol. Atlas der Schweiz für den Untersuchungsperimeter:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- detaillierter Niederschlagsverlauf im Perimeter aufzeigen und digitalisieren</li> <li>- genauere zeitliche Verteilung der täglichen Niederschlagssummen aufzeigen und digitalisieren</li> <li>- Extreme Punktregen aus dem hydrol. Atlas (Blatt 2.4) korrigieren, exakter darstellen und digitalisieren</li> </ul> Mittlere, jährliche, korrigierte Niederschlagshöhen aus dem hydrol. Atlas (Blatt 2.2) korrigieren, exakter darstellen und digitalisieren   |                     |                                     |                         |                            |
| <b>Bereitstellung der Modellierungsparameter Geologie, Bodenbedeckung, Bodennutzung aus den Grundlagen</b><br>Geologie / Hydrogeologie <ul style="list-style-type: none"> <li>- Aufarbeitung der hydrogeologischen Karte der CH (Blatt Panixerpass).</li> <li>- Aufarbeitung der digitalen Daten der vereinfachten geotechnischen Karte der Schweiz aus Arealstatistik.</li> <li>- Auswertung bestehender geol./hydrogeol. Gutachten.</li> </ul> Forstwirtschaft / Landwirtschaft <ul style="list-style-type: none"> <li>- Aufarbeitung der digitalen Daten der Bodenbedeckung des Kt. Graubünden aus Dateninventar der kant. Verwaltung.</li> <li>- Aufarbeitung der digitalen Daten der Waldbedeckung des Kt. Graubünden aus Dateninventar der kant. Verwaltung.</li> <li>- ev. Aufarbeitung der digitalen Daten der Fruchtfolgeflächen des Kt. Graubünden aus Dateninventar der kant. Verwaltung.</li> </ul> |                     |                                     |                         |                            |
| <b>Erstellung der Dispositionskarte für Rutschungen und Hangmuren 1:50'000</b>  |                     |                                     |                         |                            |
| Diskussion anlässlich eines <b>Workshops (2.4.2004)</b>   |                     |                                     |                         |                            |

Aufgrund des Workshops vom 2. April 2004, wurden die Arbeiten in Etappe 2 konkret definiert. An der eigentlichen Zielsetzung und den Problemstellungen wurde jedoch festgehalten. Um in den Detailperimetern eine Aussage auf der Massstabsebene 1:10'000 machen zu können, mussten zusätzliche Aufnahmen und Ergänzungen an Grundlagendaten durchgeführt werden. Tabelle 3 zeigt die einzelnen Arbeitsschritte im angepassten Arbeitsprogramm.



Tabelle 3: Arbeiten in Etappe 2 mit Einteilung der beteiligten Partnern (gelb markierte Bereiche)

| Vorgesehene Arbeiten  | Spezialist Geologie | Spezialist Landwirtschaft und Boden | Spezialist Murgang | Spezialist Forstwirt. |
|---|---------------------|-------------------------------------|--------------------|-----------------------|
| Aufarbeitung und Ergänzung des Ereigniskatasters; Erstellung einer Hangneigungsanalyse der Ereignisse 2002 in den Detailperimetern.             |                     |                                     |                    |                       |
| Erstellen einer detaillierten geologischen Karte in den Detailperimetern unter Einbezug der vorhandenen Grundlagen.                             |                     |                                     |                    |                       |
| Bodenkundliche Aufnahmen (visuelle Geländeanalyse, Bodenprofil, Handbohrungen) und Melioration in Detailperimetern erfassen und digitalisieren. |                     |                                     |                    |                       |
| Erschliessungsstrassen mit Meteorwasserführung in Detailperimetern erfassen und digitalisieren.   |                     |                                     |                    |                       |
| Erstellen von Dispositionskarten für Rutschungen und Hangmuren 1:10'000.  |                     |                                     |                    |                       |
| Diskussion mit Auftraggeber und Partnern anhand eines 2. Workshops am 11.2.2005 und einer CatchRisk - Schlusspräsentation in Udine.             |                     |                                     |                    |                       |
| Berichterstattung mit Diskussion der Übertragbarkeit der Resultate auf andere Gebiete und Hinweise für die Frühwarnung vor Hangmuren.           |                     |                                     |                    |                       |

## 4.2 Zu erwartende Resultate

- Dispositionskarte 1:10'000 mit der Darstellung aller potentiellen Anrissflächen von Rutschungen und Hangmuren im entsprechenden Perimeter (Beantwortung der Frage: Wo sind bei extremen Niederschlägen (analog dem Ereignis Nov. 2002) Rutschungen zu erwarten?).
- Die Dispositionskarten werden mit den effektiv erfolgten Rutschungen und Hangmuren verglichen und die Differenzen werden analysiert und begründet. Ebenfalls wird die Tauglichkeit des erarbeiteten Dispositionsmodells bewertet.
- Aufgrund der Erkenntnisse aus den Resultaten der Arbeiten in Etappe 1 und den Vergleichen der Dispositionskarte mit den effektiven Ereignissen, werden unter Einbezug der lokalen Gegebenheiten der Raumnutzung einerseits und der naturräumlichen Gegebenheiten (kleinräumig, Massstabebene 1:10'000) andererseits, die Einflüsse der verschiedenen Parameter (u.a. Bodenbedeckung) abgeschätzt und beschrieben.

Falls möglich sollte für exemplarische Beispiele versucht werden, Bewirtschaftungsempfehlungen abzuleiten.

### 4.3 Ausgeführte Untersuchungen

- Grundlagenbeschaffung und Beurteilung der Datengüte.
- Modellierung mit SLIDISP (Aufarbeiten der Daten, Klassierung und Modellierung).
- Erstellen der Einflussfaktorenmatrix, Bestimmung von Förder- und Hemmfaktoren.
- GIS-Modellierung der Förder- und Hemmfaktoren und Erstellung einer Dispositionskarte (Kombination der GIS-Modellresultate mit Resultat SLIDISP) für die Gebiete Surselva und Hinterrhein.
- Analyse und Bewertung der Resultate – Workshop.
- Erweiterung des Ereigniskatasters und Hangneigungsanalyse der Anrissbereiche vorhandener Spontanrutschungen, ausgeführt durch Büro tur.
- Begehung des Untersuchungsgebietes in der Surselva mit BWG (H. Raetzo) und Dr. T. Lardelli. Erstellung einer flächendeckenden, digitalen, geologischen Karte und einer Karte mit Angaben über Lockergesteinsmächtigkeit (in 2 groben Stufen) für die Detailperimeter in der Surselva von Dr. T. Lardelli (Auftraggeber BWG).
- Begehung des Untersuchungsgebietes Hinterrhein mit Frau E. Brähm zur Diskussion des Einflusses von Boden, Vegetation und Bewirtschaftung auf die Bildung von Hangmuren.
- Kartierung und Digitalisierung der Strassenabschläge in den Detailperimetern durch Ch. Willi, Amt für Wald Chur.
- Bodenkartierung zur Bestimmung der wichtigen pedologischen Kenngrößen durch W. Rohr, GEOTEST AG.
- Auswertung des Ereigniskatasters, der Geologie, der Strassenentwässerung und der Bodenkartierung.
- Aufbereitung der Daten für GIS-Modellierung und Modellierung SLIDISP
- Analyse der Niederschlagsdaten.
- Diverse Sitzungen und Besprechungen mit dem Auftraggeber.
- Mitarbeit bei der Erstellung von Projektpostern für Konferenzen.
- Präsentationen der ausgeführten Arbeiten an Tagungen in:
  - Turin
  - Bozen
  - Berchtesgaden
- Erstellung von 2 Postern zum Projekt
- Schlussveranstaltung in Udine (28./29. Juni 2005)
- Schlussbericht, G0603.2

## 5. Unterlagen und verwendete Literatur

- Hydrogeologische Karte der Schweiz 1:100'000, Blatt 38, Panixerpass.
- Bestehende geologische- und hydrogeologische Gutachten im Projektperimeter.
- Ereignisdokumentation zu den Unwettern im November 2002 in der Surselva.
- Ereigniskataster.
- Analysen zur Meteosituation bei den Unwettern im November 2002 in der Surselva und im Hinterrhein.
- Diverse Datensätze zur Raumnutzung und Bodenbedeckung im Untersuchungsperimeter.
- Berichte Sachseln, WSL, u.a. „Oberflächennahe Rutschungen, ausgelöst durch die Unwetter vom 16.7.02 im Napfgebiet und 31.8.02 im Gebiet Appenzell.
- Dispositionsmodell SLIDISP (Modellbeschreibung 6.2.1).
- Bodenkundliche Kartieranleitung der geologischen Landesämter und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe der Bundesrepublik Deutschland, 4. Auflage, Hannover 1994.
- Werlen S., 2004, Einflussfaktoren von Lockergesteinsrutschungen, Diplomarbeit Geographisches Institut, Universität Bern, 100 S.
- Krauer, B., 2004, Analyse rutschungsrelevanter Standortparameter in ausgewählten Einzugsgebieten der Surselva, Diplomarbeit Departement Umweltwissenschaften, ETH Zürich, 116 S.
- Weber, F., 1924, Geologische Karte des Tödi-Vorderrheintal-Gebietes 1:50'000.
- Bodenkartierung Surselva, Perimeter CatchRisk, GEOTEST Bericht Nr. G0412.
- HADES: Hydrologischer Atlas der Schweiz.

## 6. Arbeitsschritte Etappe 1

### 6.1 Daten

#### 6.1.1 Datenakquisition

Für die Arbeiten in Etappe 1 wurden die für die Problemstellung relevanten, digital verfügbaren Daten zusammengetragen. Dazu konnte auf die in Tabelle 4 aufgeführten Archive oder Institutionen zurückgegriffen werden. Eine Übersicht aller vorhandenen und verwendeten digitalen Grundlagendaten ist in den Tabellen in Anhang 1 dargestellt.

*Tabelle 4: Liste der Archive der digitalen Datensätze*

| Archiv                              | Bezeichnung   | Art der Datensätze   |
|-------------------------------------|---|--|
| Bundesamt für Landestopographie     |   | DHM 25   |
| Kantonale Archive                   | Amt für Wald<br>Amt für Natur und Umwelt<br><br>Amt für Raumentwicklung<br>Amt für Landwirtschaft, Strukturverbesserung und Vermessung<br>Fachstelle Fuss- und Wanderwege | Walddaten, Ereigniskataster<br>Gewässerdaten, Florastandorte, Moore<br><br>Fruchtfolgeflächen<br>Bodenbedeckung<br><br>Wegnetz |
| Bundesamt für Statistik             | GEOSTAT   | diverse  |
| Geotechnische Kommission            |   | Hydrologische Karte Blatt Panixerpass 1:100'000  |
| Hydrogeologischer Atlas der Schweiz |   | Niederschlagsdaten   |
| Tergeso AG                          |   | Niederschlagsdaten   |

#### 6.1.2 Massstabsproblem, Datenbewertung

Die Daten aus den verschiedenen Archiven lagen in unterschiedlichen Massstäben vor. Generell waren die Datensätze von GEOSTAT kleinmassstäblich (d.h. 1:200'000 oder maximal 1:100'000), diejenigen aus den kantonalen Archiven grossmassstäblich (oft 1:10'000).

In Anhang 2 sind die wichtigsten verwendeten Grundlagen aus dem Archiv GEOSTAT illustriert. Darunter befinden sich wichtige Grundlagen, wie z.B. die Geologie oder die Bodennutzung. Da die , insbesondere die Raumdaten des BSF in ihrer Güte zu wenig fein aufgelöst sind, musste die Übersichtsuntersuchung auf der Massstabsebene 1:50'000 bearbeitet werden, damit die Datengüte in etwa adäquat zur Darstellungsgenauigkeit ist. So wurde bereits zu Beginn der Studie die Frage diskutiert, welche Datengüte welche Darstellungsgenauigkeit erfordert. Ist es überhaupt zulässig, die kleinmassstäblichen GEOSTAT Daten für derartige Studien zu verwenden ?

Den Daten der kantonalen Archive lag ein Massstab 1:25'000 vielfach sogar 1:10'000

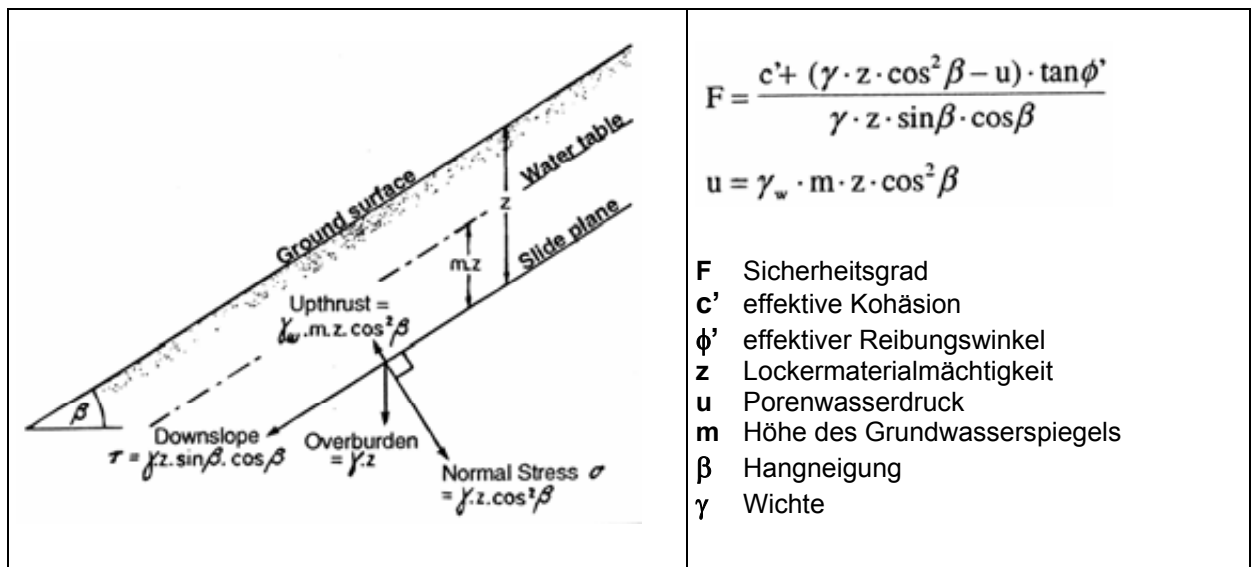
zugrunde. Die Genauigkeit von Daten wie dem Quellenkataster, den Waldbeständen oder dem Wegnetz ist für diese Studie angemessen. In Anhang 3 sind die wichtigsten, verwendeten Daten aus den kantonalen Archiven illustriert. Eine wichtige Grundlage für die vorgesehenen Arbeiten bildet dabei der Ereigniskataster. Dieser lag in einer sehr detaillierten Form vor. Es wurde unmittelbar nach den Ereignissen im November 2002 die Dokumentation und Aufnahme der Ereignisse vom Kanton in Auftrag gegeben. Die Arbeiten wurden durch die ARGE GEOTEST/tur durchgeführt. So konnte nebst dem Ereigniskataster auf diese Dokumentation zurückgegriffen werden.

Im Anhang 4 sind weitere verwendeten Daten aus verschiedenen Archiven (geotechnische Kommission) illustriert.

## 6.2 Modellansatz

### 6.2.1 Das Modell SLIDISP

Die Modellierung der Anrissgebiete erfolgte mit dem Modell „SLIDISP“ (Anhang 5). Das Modell SLIDISP bestimmt mit Hilfe der Stabilitätsberechnungsmethode Infinite-Slope-Analysis die Hangstabilität für jede Rasterzelle. Die benötigten Parameter werden flächendeckend aus den vorliegenden digitalen Geologiedaten abgeleitet und ins Modell eingegeben. Die massgebenden Parameter sind die Hangneigung, welche aus dem digitalen Höhenmodell berechnet wird, sowie die Scherparameter (Kohäsion und Reibungswinkel) des geologischen Untergrundes.



Figur 1: Schematische Darstellung des Sicherheitsfaktors F

Um die hohe natürliche Variabilität der Scherparameter abzubilden, werden die Scherparameter (Kohäsion und Reibungswinkel) nicht durch einzelne Werte pro geotechnischer Klasse sondern durch Verteilungsfunktionen beschrieben. Für die Bestimmung der Rutschanfälligkeit werden wiederholt Werte aus den Verteilungen der Scherparameter ausgewählt und mit diesen Werten jedes Mal ein Sicherheitsgrad berechnet (Der Sicherheitsgrad F einer Rasterzelle ist das Verhältnis von rückhaltenden zu treibenden Kräften gemäss der

Formel in Figur 1). Mit dieser sogenannten Monte-Carlo-Simulation können die natürlichen Variationsbreiten verschiedener Parameter in der Modellierung berücksichtigt werden.

Für das Modell wird angenommen, dass Kohäsion und Reibungswinkel je als Normalverteilung vorliegen und dass sie nicht miteinander korreliert sind. Diese Annahme stimmt in der Natur nicht, und die Stabilitätsberechnung kann unter dieser Annahme zu hohe oder zu tiefe Werte ergeben. Da die Berechnung aber mit einer grossen Anzahl von Parameterkombinationen durchgeführt wird, heben sich die zu hohen und die zu tiefen Werte auf und die Wahrscheinlichkeit der Verteilung der Sicherheitsgrade bleibt ähnlich.

Für die Bestimmung der Rutschanfälligkeit werden für jede Rasterzelle 100 Sicherheitsgrade aus zufällig ausgewählten Werten aus den Verteilungsfunktionen der Scherparameter berechnet. Dabei wird die Anzahl Fälle bestimmt, bei denen der Sicherheitsgrad  $< 1$  ist, das heisst, bei welchen Instabilität angenommen wird. Je grösser die Anzahl der Instabilitäten, desto grösser ist die Rutschwahrscheinlichkeit. Als mögliche Anrissgebiete werden diejenigen Gebiete ausgeschieden, bei denen mehr als 60 % der Parameterkombinationen einen Sicherheitsgrad  $< 1$  ergeben.

### **6.2.2 Das Modell Catch Risk - Einflussfaktorenmatrix**

Die Auslösung von Hangmuren wird nebst der Hangneigung und den für die geologischen Einheiten definierten geotechnischen Parametern von weiteren Grössen beeinflusst (z.B. ungenutzte Quellen, Strassenentwässerung, Bewirtschaftung etc). Anhand der Literatur konnten verschiedene, nicht quantifizierte Einflussgrössen aufgelistet werden. Diese wurden in einem ersten Schritt nach anrissfördernden und anrisshemmenden Einflüssen sortiert und in einer Gewichtungsmatrix dargestellt. Die digital vorhandenen Daten konnten so mit der entsprechenden Gewichtung in einem GIS (Geographisches Informationssystem) attribuiert werden.

Die verschiedenen Sätze von anrissfördernden Gebieten, anrisshemmenden Gebieten und den Anrissbereichen aus dem Modell SLIDISP wurden in der Folge zusammengeführt. Aufgrund der grossen Unsicherheiten bei der Wahl der Gewichtung für die Einflussgrössen im Modell Catch Risk, wurde den Anrissbereichen aus dem Modell SLIDISP die grösste Gewichtung zugeteilt. Das aus den GIS-Modellierungen resultierte Produkt wurde in einer Dispositionskarte von Anrissbereichen von Hangmuren dargestellt.

### **6.2.3 Umsetzung der Modelle mit Hilfe des GIS**

Die Modellberechnungen Catch Risk wurden mit Hilfe eines GIS umgesetzt. Zwecks Generierung neuer Datenlayer wurden die bestehenden Layer miteinander verschnitten, neue Attribute eingeführt und berechnet. Die Operationen wurden auf dem GIS ArcInfo (Module Arc und ArcEdit) durchgeführt. Es wurde hauptsächlich mit dem UNION-Befehl operiert und die Layer (Coverages) anschliessend in ArcEdit bereinigt und/oder im Modul Tables Attribute berechnet. Die Attributierung ermöglicht den Rückschluss auf die Originaldaten bzw. -attribute und garantiert eine grösstmögliche Nachvollziehbarkeit der neu generierten Daten.



## 6.3 Modellierungen

### 6.3.1 Modellierungen mit SLIDISP

Die beiden zentralen Modellparameter für die Modellierung der Hangmuren-Anrissflächen sind das Digitale Höhenmodell (DHM) sowie der digitale geologische Untergrund. Für die Erstellung einer einheitlichen digitalen Geologie wurden folgende zwei Datensätze verwendet:

- Vereinfachte Geotechnische Karte der Schweiz 1:200'000 (Anhang 2.1)
- Hydrogeologische Karte Panixerpass 1:100'000 (Anhang 4)

Die beiden Grundlagen werden zusammengeführt und dabei aus den 30 Merkmalen Geotechnik und den 13 Merkmalen Hydrogeologie, drei spezifische geologische Einheiten zusammengefasst, die für die Modellierung der Hangmuren verwendet werden können. Diese Einheiten unterscheiden sich in den Parametern des inneren Reibungswinkels, der Kohäsion und der Wassersättigung. Anschliessend wird dieser neue Datensatz mit dem digitalen Datensatz des Waldes (Anhang 3), der im Massstab 1:10'000 vorliegt, ergänzt. Es wird lediglich zwischen „Wald“ und „kein Wald“ differenziert.

Im Gebiet Surselva waren die oben genannten Grundlagendaten alle vorhanden. Im Gebiet Hinterrhein lagen als geologische Grundlage lediglich die geotechnische Karte der Schweiz und als Waldbestand der Layer der Pixelkarte 1:25'000 vor.

Tabelle 5 zeigt beispielhaft die Umsetzung von Geologischen / Geotechnischen Einheiten in die Modellierungsklassen mit den zugehörigen Modellparametern.

*Tabelle 5: Beispiel der Umsetzung der Geologie in SLIDISP Modellparameter*

| Geotechnische Einheit | Modell.-Einheit (Klasse) | $\phi$ (Mittelwert) | $\phi$ (Standardabw.) | C' | Wassersättigung (Porenwasser) |
|-----------------------|--------------------------|---------------------|-----------------------|----|-------------------------------|
| A                     | 1                        | 18                  | 3                     | 0  | 20%                           |
| B<br>C<br>D           | 2                        | 22                  | 3                     | 0  | 40%                           |
| E<br>F                | 3                        | 25                  | 3                     | 0  | 50%                           |
| G                     | 4                        | 28                  | 3                     | 0  | 70%                           |
| H                     | 5                        | 35                  | 3                     | 0  | 80%                           |

Die Lockergesteinsbedeckung wurde nach folgendem Ansatz klassiert:

- In den Gebieten mit Felssignaturen im DHM besteht keine Lockergesteinsbedeckung.
- Die Gebiete mit Festgesteinen in der geologischen Grundlagenkarte weisen nur eine geringe Lockergesteinsmächtigkeit von maximal 0.5m auf.
- In den restlichen Gebieten wurden die Mächtigkeiten anhand von Erfahrungswerten geschätzt.

- d) Die Gebiete der Einheiten von b) und c) wurden zudem noch mit einem Neigungskriterium verknüpft. Je steiler das Gelände, desto geringer ist die Lockergesteinsmächtigkeit.

Aus dem DHM wurde flächendeckend der Topo-Index berechnet, welcher das topographisch bedingte Wassersättigungs-Potential für jede Rasterzelle definiert. Der Topo-Index korrigiert somit die für jede Modellierungsklasse pauschal definierte Wassersättigung in Funktion der Geländeoberflächenform. Der Topo-Index berechnet sich wie folgt:

$$\text{Topo-Index} = \ln(a / \tan \beta)$$

(a: Fläche, die durch die Rasterzelle entwässert;  $\beta$  = Hangneigung Rasterzelle)

Die Modellierung der Anrissgebiete erfolgt mit dem Modell „SLIDISP“ mit den Inputgrössen Neigung (DHM), Mächtigkeit der Lockergesteinsbedeckung, Geologie (Reibungswinkel und Kohäsion), Wald und Wassersättigung (siehe Kapitel 6.2.1). Die Anrisszonen wurden für die beiden Grobperimeter Surselva (Anhang 10) und Hinterrhein (Anhang 11) separat modelliert.

### **6.3.2 Einflussfaktorenmatrix**

Aus den vorhandenen Daten wurden in einem ersten Schritt all diejenigen Parameter ausgewählt, welche gemäss Literatur in irgendeiner Weise einen Einfluss auf die Bildung von Hangmuren haben könnten. Als Grundlagendaten dienten die in Kapitel 6.1.2 aufgeführten Grössen. Die Gliederung in anrissfördernde und anrisshemmende Faktoren erfolgte dann aufgrund von eigenen Erfahrungswerten oder weiteren Literaturangaben. Für Gewichtung mit einem Punktsystem von –10 (anrisshemmend) bis +10 (anrissfördernd) wurde der Massstab der Datengrundlage, die Unsicherheit des Einflusses und die vorhandenen Erfahrungen miteinbezogen. In Tabelle 6 ist die für die erste Modellierung verwendete Matrix dargestellt.

Tabelle 6: Einflussfaktorenmatrix

| Förder- und Hemmfaktor                |  | Gewichtung |
|---------------------------------------|--|------------|
| Anrissbereiche aus dem Modell SLIDISP |  | +8         |
| Niederschlag                          | Disposition extreme Punkt- und/oder Gebietsniederschläge vorhanden | ?          |
| Waldstrassen                          |  | +2         |
| Wanderwege                            |  | +1         |
| Sturmschäden                          | leichte Schäden  | +1         |
|                                       | mittlere Schäden   | +2         |
|                                       | Totalschaden   | +3         |
| Trockenwiesen                         |  | -2         |
| Flachmoore                            |  | ?          |
| Quellen                               | ungefasst  | +2         |
| Bodentyp                              | wenig durchlässig  | +1         |
|                                       | gut durchlässig  | -1         |
| Landnutzung                           | versteinte Alpweiden   | -1         |
|                                       | Schafalpen   | -1         |
|                                       | Wies- und Ackerland  | ?          |
|                                       | Heimweiden   | ?          |
|                                       | Maiensässe   | ?          |
|                                       | Unproduktive Vegetation  | ?          |

Die oben aufgeführten positiven oder negativen Gewichtungen werden in der Folge genauer erläutert.

**Anrissbereiche Modell SLIDISP:** Aufgrund der bisherigen Erfahrungen mit dem Modell wurde den Modellresultaten eine hohe Gewichtung zugeteilt. Die hier ausgeschiedenen Flächen können in der Dispositionskarte nur bei sehr stark hemmenden Bedingungen verschwinden.

**Wegnetz:** Aufgrund der Literatur (z.B. Berichte WSL, Krauer 2004) kann von einem hangmuffördernden Einfluss des Wegnetzes ausgegangen werden (Strassenentwässerung).

**Sturmschäden:** Auf Waldflächen mit Sturmschäden fehlen die Wirkung der Interzeption sowie die rückhaltenden Kräfte der Baumwurzeln im Untergrund. Das Niederschlagswasser dringt direkt in den Untergrund ein und fördert einen möglichen Anriss.

**Trockenwiesen:** Trockenwiesen sind Standorte mit geringer Bodenfeuchte. Bei einem Niederschlagsereignis dauert es lange, bis die Böden gesättigt sind. Dieser Effekt wurde als anrisshemmende Eigenschaft taxiert.

**Flachmoore:** Die Hang- und Flachmoore sind Gebiete mit einem grossen Speichervermögen. Dieser Effekt kann bei einem Niederschlagsereignis die Spitze des Abflusses dämpfen und so einen Hemmfaktor für Anrisse darstellen. Andererseits weisen diese Bereiche bereits eine relativ hohe Wassersättigung auf. Bei Niederschlägen kann es daher schnell zum Oberflächenabfluss kommen. Dadurch erhalten hangabwärtsliegende Gebiete einen zusätzlichen

Wasserinput. Dieser Effekt würde eher für einen Förderfaktor sprechen. Aufgrund dieser entgegengesetzten Effekte wurde der Faktor Flachmoor nicht in die Beurteilung integriert.

**Ungefasste Quellen:** Die ungefassten Quellen verursachen ebenfalls einen zusätzlichen Wasserinput im unterhalb liegenden Hangbereich. Sie wurden als Förderfaktor taxiert.

**Böden:** Verdichtete Böden der schlecht durchlässige Substrate verursachen einen Rückstau des Bodenwassers und damit eine Reduktion der rückhaltenden Kräfte. Es sind Förderfaktoren.

**Landnutzung:** Der Einfluss der unter dem Stichwort Landnutzung aufgeführten Begriffe ist unsicher. Die unterschiedlichen Wirkungen einiger Landnutzungstypen konnten deshalb nicht berücksichtigt werden (vgl. Tab. 6).

### 6.3.3 Modellierungen CatchRisk

Die verschiedenen Datengrundlagen der möglichen Einflussgrössen wurden gemäss der Matrix (Tabelle 6) attribuiert und miteinander verschnitten. Dabei wurden die Linien (Strassen-netz) und Punktdaten (ungefasste Quellen) talseits gepuffert. Es wurde davon ausgegangen, dass bei den Strassenentwässerungen, als auch bei den ungefassten Quellen, Wasser unkontrolliert in den Untergrund gelangen kann. Der Wirkungsbereich dieser Puffer wurde sowohl bei Quellen als auch bei den Strassen auf 20 m gesetzt.

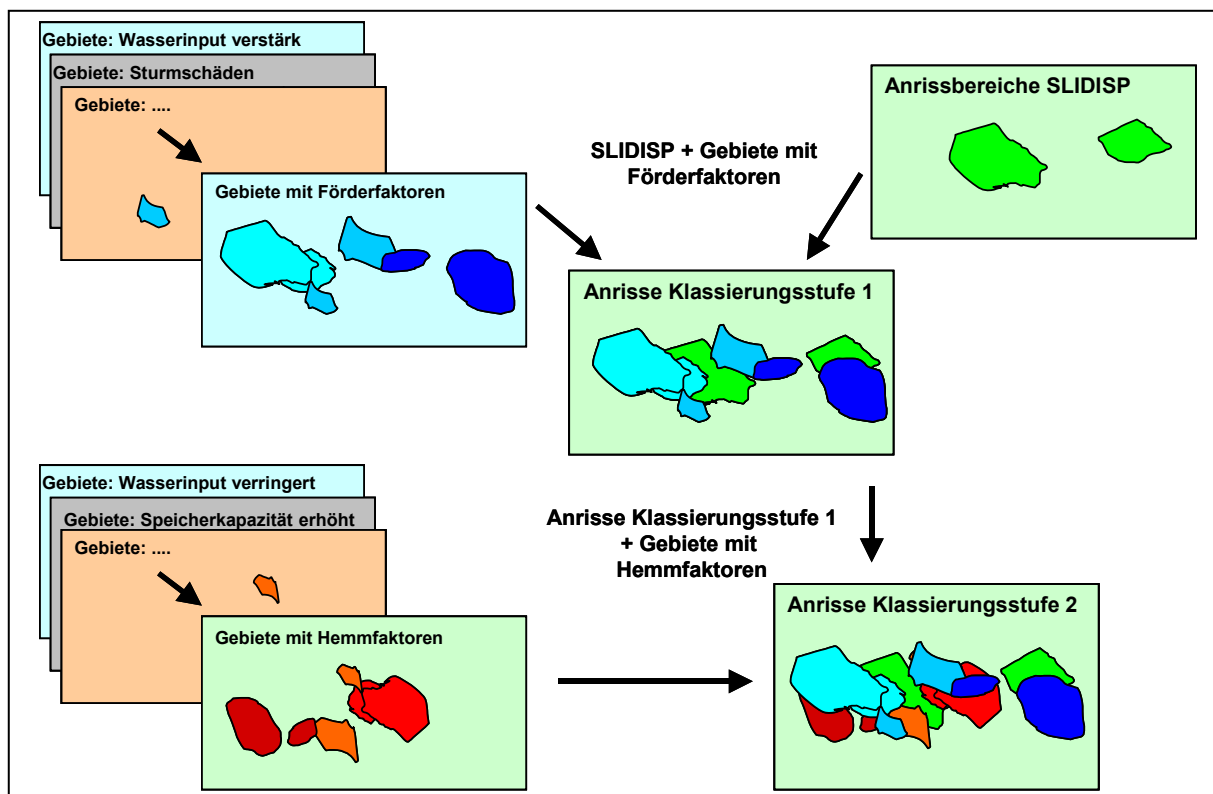


Abbildung 3:

Die Überlagerung und der anschliessende Verschnitt der verschiedenen Grundlagendaten erfolgte nach dem im Text beschriebenen Ablauf. So kann vermieden werden, dass wichtige Flächen zu früh wegfallen. Die Gebiete mit Förderfaktoren sind in blauer, diejenigen mit Hemmfaktoren in roter und die Anrissgebiete aus der Modellierung in grüner Farbe dargestellt.

Beim Zusammenfügen der Daten wurden hangmurfördernde und hangmurhemmende Datensätze separat bearbeitet. Das heisst, es wurden zuerst die Flächen der Förderfaktoren mit den Modellresultaten überlagert. Erst danach erfolgte die Zusammenlegung mit den Hemmfaktoren (Abbildung 3). Diese Reihenfolge ist wichtig, da sonst mögliche Förder- oder Hemmgebiete aufgrund der Punktierung vorzeitig vernachlässigt werden könnten.

Der Verschnitt aller Faktoren wurde in Dispositionskarten dargestellt (Anhänge 10 und 11). Es zeigt sich, dass vor allem die grossflächigen Parameter wie z.B. die Landnutzung dominieren. Diese Parameter entspringen aber gleichzeitig auch denjenigen Datensätzen, welche in einem sehr kleinen Massstab vorliegen und daher die grössten Ungenauigkeiten aufweisen.

## **6.4 Workshop 2.4.2004**

Gegen Ende der Projektetappe 1 wurden im Rahmen eines Workshops am 2. April 2004 in Chur die Modellansätze und die ersten Resultate präsentiert und anschliessend ausführlich mit den anwesenden Experten diskutiert. Dabei konnten viele Fragen geklärt werden, aber auch ebenso viele Fragen wurden in den Raum gestellt.

### **6.4.1 Fazit Workshop**

#### **A) Generelle Feststellungen:**

- Die Modellierung auf der Basis der kleinmassstäblichen Grundlagendaten ergeben ein zu pessimistisches Bild zu den potentiellen Anrissstellen für flachgründige Rutschungen.
- Die Grundlagendaten v.a. in der Geologie und bei der Bodeneignung sind für diese Anwendung zu ungenau.
- Es sind kaum Hemmfaktoren für Hangmuren vorhanden.
- Es sollten keine Daten verwendet werden, welche Szenariencharakter haben (z.B. Niederschlagsmuster, Schneefallgrenze, Sturmschäden), da die Situationen rasch ändern können.
- Förder- und Hemmfaktoren sollten nicht gewichtet werden, d.h. alle gleich miteinbeziehen.
- Wegnetz wurde als wichtiger Faktor für Hangmurenbildung schon oft erkannt (Strassenentwässerung). Dieser Zusammenhang sollte näher untersucht werden.

#### **B) Forderungen, Anregungen für weitere Untersuchungen:**

- Eine Hangneigungsanalyse der Anrisspunkte vorhandener Ereignisse sollte für die Definition der kritischen Hangneigung verwendet werden.
- Forderung nach genaueren Grundlagendaten im Bereich Geologie und Boden.
- Klärung der möglichen Einflüsse von Hangmooren und Trockenwiesen.
- Besserer Einbezug des Bodens.
- Wirkungsbereich der Strassenentwässerung auf 20 m festlegen und nur in einzelnen Fällen verändern. Zusammenhänge genauer erfassen.
- Niederschlag (und damit Definition von kritischen Niederschlagsmengen/-intensitäten) als separates Problem betrachten.

#### 6.4.2 Umsetzung der Erkenntnisse

**Wegnetz:** Das Wegnetz hat auf die potentiellen Anrissbereiche von Hangmuren einen entscheidenden Einfluss. Diese Vermutung wird durch die Literatur (Werlen 2004, Krauer 2004, Berichte WSL) bestätigt. Für die weiteren Arbeiten soll die Strassenentwässerung in einem grossen Massstab kartiert werden. Man erhofft sich dadurch bessere Rückschlüsse über den Zusammenhang zwischen Strassenabschlag und Anrissbereich zu erhalten. Möglicherweise können sogar Aussagen über den Wirkungsbereich des unkontrolliert abfliessenden Meteorwassers unterhalb der Strasse gemacht werden.

**Geologie:** Geologie und Hangneigung sind nebst dem Boden wichtige Inputgrössen für die Modellierung der Anrissbereiche von Hangmuren. Die Forderung nach genaueren geologischen Grundlagendaten ist daher naheliegend. Diesbezüglich konnten die Synergien mit einem laufenden, vom BWG finanzierten Projekt genutzt werden. Es beinhaltet die geologisch/hydrogeologische Ursachenanalyse der Ereignisse vom November 2002 in Schlans. Die dabei erstellte geologische Detailkarte im Massstab 1:10'000 konnte für unsere weiteren Berechnungen verwendet werden.

**Boden, Bewirtschaftung:** Aufgrund der ausgeführten Arbeiten in Etappe 1, der Diskussionen im Workshop, der dürftigen geologischen Datengrundlage und einer Begehung im Gebiet Hinterrhein mit Frau E. Brähm konnte festgestellt werden, dass zur Beschreibung und Modellierung der flachgründigen Hautrutschungen die Bodeneigenschaften eine primäre Rolle spielen. So wurde klar, dass der Boden wahrscheinlich in einer separaten Modellierung behandelt werden muss. Die digital verfügbaren Bodendaten von GEOSTAT liefern in der Auflösung des Hektarrasters zu ungenaue Angaben und können nicht verwendet werden.

Dem Amt für Natur und Umwelt (ANU) war deshalb klar, dass zur Klärung dieser Fragen in einem Testgebiet eine spezielle Bodenkartierung durchgeführt werden sollte. Dazu wurde vom ANU ein Zusatzauftrag erteilt, im Gebiet Trun – Schlans eine spezielle, den Untersuchungszielen angepasste Bodenkartierung durchzuführen. Die von der GEOTEST AG vorgeschlagene und mit dem ANU im Gelände diskutierte Methode basiert auf der Technik, wie sie beispielsweise für detaillierte Bodenkarten bei Güterzusammenlegungen zur Anwendung kommt. Die Methode wurde primär an der landwirtschaftlichen Forschungsanstalt Reckenholz (FAL) entwickelt.

**Ereigniskataster:** Aufgrund der Auswertung in Form von GIS-Hangneigungsanalysen des Ereigniskatasters, konnten Anhaltspunkte über die kritische Hangneigung im Gebiet Surselva gewonnen werden. Diese Resultate konnten mit Erkenntnissen aus anderen Studien (Krauer 2004) ergänzt und so zur Kalibrierung des Modells verwendet werden.

**Hangmoore / Trockenwiesen:** Da weder aus der Literatur noch aus den Geländebegehungen eindeutige Zusammenhänge eruiert werden konnten, wurden Hangmoore und Trockenwiesen nicht mehr in die Modellierungen integriert.

**Matrix der Einflussfaktoren:** Die Arbeiten und der Workshop hatten gezeigt, dass sich ein Punktesystem für die Gewichtung aufgrund der grossen Unsicherheiten nicht eignet (Tabelle 6).



Zudem sollte bei einer Gefahrenbeurteilung der „worst case“ abgebildet werden. Demzufolge dürfen Faktoren wie die Schneefallgrenze oder Flächen mit Sturmschäden in Wäldern nicht berücksichtigt werden (vgl. Kap. 9., 9.2, 9.3). Für die weiteren Arbeiten wurde die in Tabelle 7 dargestellte, angepasste Matrix verwendet. Die möglichen Einflüsse wurden ohne Gewichtung lediglich in positive und negative Faktoren unterteilt. Alle Grössen, welche nicht zu einem „worst case“ Szenario beitragen, wurden nicht berücksichtigt. Die Tabelle zeigt, dass beim Einbezug der Feuchtgebiete weiterhin unklar ist, welchen Einfluss sie auf die Auslösung von Hangmuren haben. Es fällt auf, dass keine Hemmfaktoren mehr vorhanden sind.

*Tabelle 7: Vereinfachte Einflussmatrix*

| Förder- und Hemmfaktoren |  | Beurteilung                                     |
|--------------------------|--|---|
| Niederschlag             | Disposition zu extremen Punktniederschläge vorhanden | Förderfaktor                                    |
| Wegnetz                  |  | Förderfaktor                                    |
| Fusswege                 |  | Förderfaktor                                    |
| Sturmschäden             | leichte Schäden<br>mittlere Schäden<br>Totalschaden  | Keine Wertung<br>Keine Wertung<br>Keine Wertung |
| Trockenwiesen            |  | Keine Wertung                                   |
| Sumpf/ Feuchtgebiete     |  | ?   |
| Quellen                  | ungefasst  | Förderfaktor                                    |
| Schneefall               | Schneefallgrenze<br>Saison                           | Keine Wertung<br>Keine Wertung                  |

## **7. Arbeitsschritte Etappe 2 (Detailstudie)**

### **7.1 Datenerhebung**

#### **7.1.1 Ereigniskataster**

Der bestehende Ereigniskataster wurde durch das Büro für Davos, mit verschiedenen, vom Kanton bereits aufgenommenen Ereignissen ergänzt. Die Auswertung des Katasters, d.h. die Hangneigungsanalyse der registrierten Ereignisse, wurde ebenfalls durch das Büro für durchgeführt. Alle Grundlagen basieren dabei auf einem Massstab 1:10'000.

#### **7.1.2 Geologie**

Während der Sommermonate wurde von Dr. Thomas Lardelli im Rahmen eines BWG Projektes im Gebiet Schlans eine flächendeckende, geologische Karte im Massstab 1:10'000 erstellt, die in digitaler Form zur Verfügung stand (Ausschnitt Anhang 6). Die Karte wurde aus Geländeaufnahmen und den vorhandenen digitalen Grundlagen und der geologischen Karte des Tödi-Vorderrheintal-Gebietes 1:50'000 (Weber 1924) zusammengestellt.

#### **7.1.3 Strassenentwässerung**

In Etappe 1 wurden die Strassenentwässerungen der Forst und Gemeindestrassen mit einer Pufferung des Strassennetzes in die GIS-Modellierung integriert. Die Schlussfolgerungen des Workshops wie auch die Literatur (Krauer 2004) zeigten, dass der Einfluss der Strassenentwässerung unbedingt genauer betrachtet werden sollte. So versickert bei Starkniederschlägen bei den Strassenabschlägen punktuell viel Wasser. Um diesen punktuellen Wassereinput genau zu erfassen, wurden die Strassenabschläge und Versickerungsstellen entlang der Forst- und Gemeindestrassen im Massstab 1:10'000 vom Amt für Wald kartiert (Ausschnitt Anhang 7).

#### **7.1.4 Boden**

Der Vorteil einer Bodenkartierung liegt darin, dass man eine bewährte Erhebungstechnik einsetzen konnte, welche die Bodeneigenschaften in repräsentativen Punkten mit Bodenprofilen exakt erfasst. Anhand dieser genauen bodenkundlichen Punktdaten, den flächig verfügbaren Grundlagendaten (Topographie und geologische Information), wurde ein räumliches Bodenmodell entwickelt. Während der anschliessenden Detailkartierung im Feld wurde das Bodenmodell durch die Geländeanalyse (Oberflächenformen) und Handsondierungen laufend verifiziert und verfeinert. Bodenareale gleicher Eigenschaften wurden auf der Karte als geschlossene Polygone ausgeschieden und mit der entsprechenden Bodeninformation versehen.

In dieser den Fragestellungen angepassten „schlanken“ Bodenkartierung wurden sechs speziell ausgewählte Bodenprofile (Anhang 8) ausgehoben. Zusätzlich wurden drei natürliche Aufschlüsse als Bodenprofil erfasst. An 22 weiteren Standorten wurden Handsondierungen mehrheitlich mit dem Pürckhauer-Handbohrer (Hohlmeisselbohrer mit Nutenweite von 2,0 cm), bei hohem Steingehalt mittels Handdrehbohrer durchgeführt (Anhang 8).

Die Aufschlusstiefe der Bodenprofile betrug 140 cm bis 200 cm, diejenigen der Handsondie-

rungen zwischen 60 cm und 120 cm. Die Beprobungstiefe des Pürckhauer-Handbohrers ist auf 100 cm begrenzt. Der Handbohrstock (Hohlmeisselbohrer mit einer Nutenweite von ca. 0.7 cm) wurde in Einzelfällen für die rasche Abklärung der möglichen Eindringtiefe eingesetzt. Die Beprobungsstandorte sind in der Karte Anhang 12 eingetragen.

Während den Arbeiten wurden bei den Bodenprofilen alle erfassbaren Kenngrößen wie die Horizontmächtigkeit (nach Möglichkeit bis auf den C-Horizont), Bodenstruktur, Dichte, Farbe, Eisen- und Manganfleckigkeit, Skelettgehalt (Steingehalt), Korngrößenverteilung, Gehalt an organischer Substanz, pH-Wert, Kalkgehalt, Durchwurzelung, Regenwurmgänge und die aktuelle Bodenfeuchtigkeit erfasst. Diese Kenngrößen erlaubten eine vollständige Klassifikation des Bodenprofils, eine detaillierte Beurteilung des Wasserhaushalts und eine Bezeichnung von möglichen Gleitflächen. Bei der bodenkundlichen Aufnahme der Handsondierungen wurden die gleichen Parameter erfassbar, die Unschärfe ist jedoch deutlich höher.

Alle erhobenen Daten wurden auf einem der Aufnahmeart entsprechenden Protokoll zusammengestellt (siehe Abbildung 4); der vollständige Datensatz wurde dem Auftraggeber bereits abgeliefert.

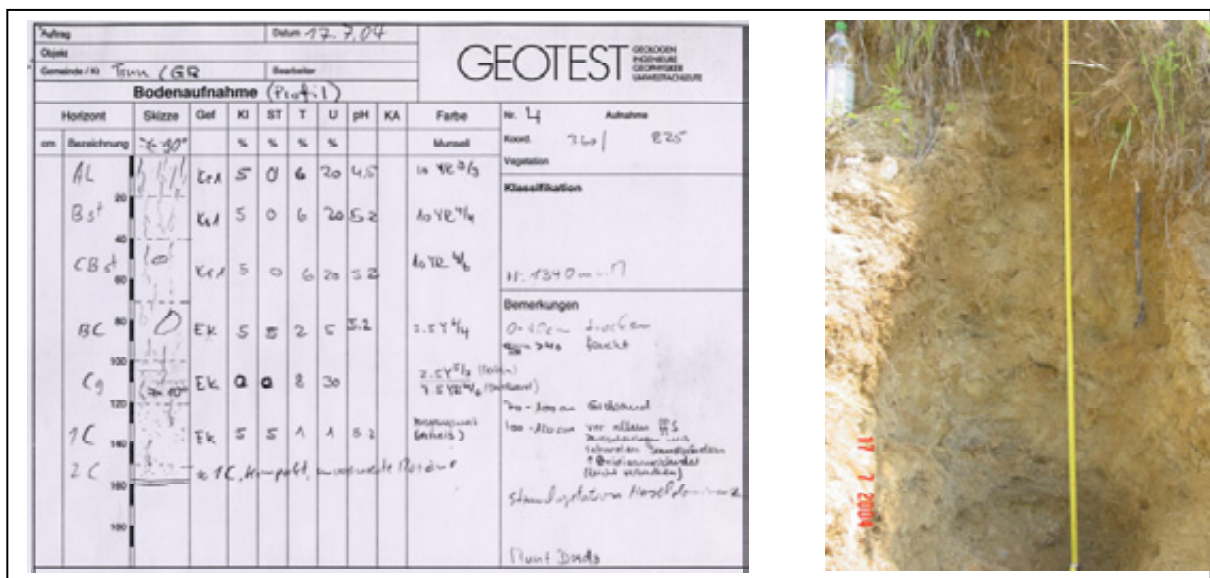


Abbildung 4:  
Bodenprofil mit Protokollblatt für eine Profilaufnahme im Detailperimeter Trun. Die Handsondierungen wurden in einem gleichen Protokollblatt festgehalten.

Zusätzlich zu den Bodenaufnahmen wurden in ausgewählten Gebieten geomorphologische und hydrologische Oberflächenanalysen durchgeführt. Dabei konnten detaillierte Informationen über vermutete Wasserfließwege, Versickerungsstellen und Stauhorizonte erfasst werden. Diese Eigenschaften wurden ebenfalls in der Karte Anhang 12 eingetragen.

Die Zusammenhänge zwischen Hangmuren und bodenkundlichen Sachverhalten wurden bisher nur in einigen wenigen Studien untersucht (Bspl. Berichte WSL). Das generelle Arbeitskonzept kann wie folgt zusammengefasst werden:

- (1) Analyse der Luftbilddaufnahmen der Ereignisse im November 2002.

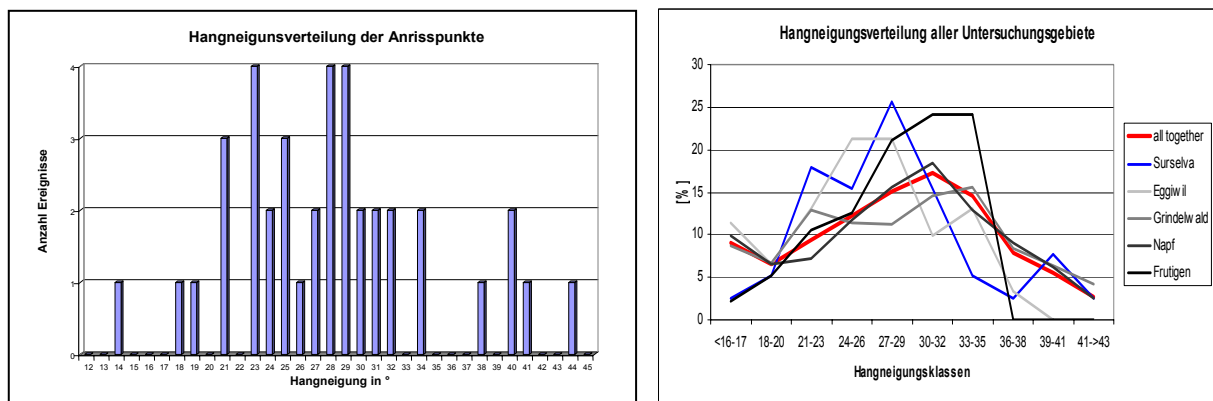
- (2) Profilaufnahmen im Anrissbereich von ausgewählten Hangmuren mit dem Ziel, die möglichen bodenkundlichen Sachverhalte zur Auslösung der Rutschung eruieren zu können.
- (3) Profilaufnahmen ausserhalb von Anrissbereichen als Vergleich zu Pkt. (2).
- (4) Detailkartierung in den zwei Testgebieten Schlans und Trun. Die Detailkartierung umfasste die Oberflächenanalyse und die Bodensondierung.

Im Sinne eines kostengünstigen Vorgehens wurden auf der Untersuchungsfläche nur wenig Handsondierungen gemacht. Bei einer grösseren Anzahl von Flächen wurden Annahmen aufgrund der Luftbilder und der Analogieschlüsse aus den erworbenen Gebietskenntnissen bei den Profilerhebungen getroffen.

## 7.2 Datenanalyse und Bewertung

### 7.2.1 Hangneigungen aus Ereigniskataster

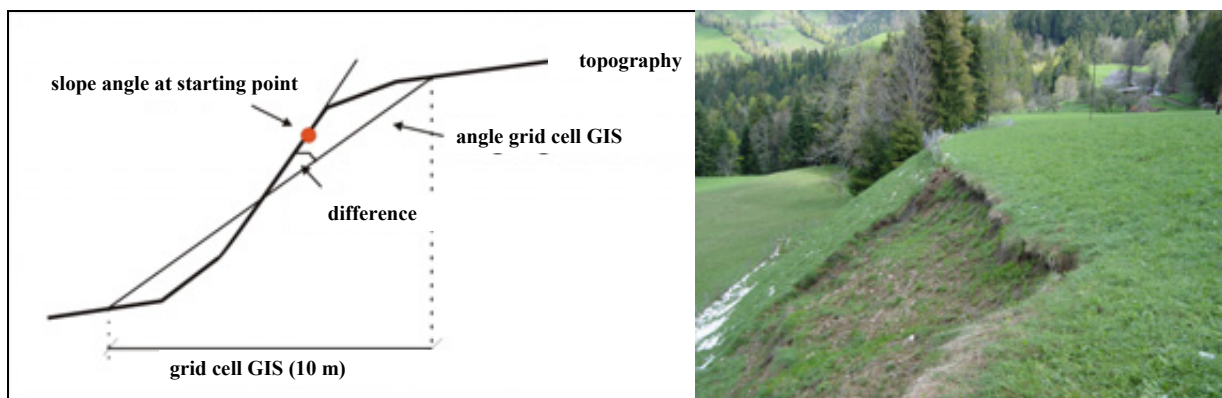
Bei den im Ereigniskataster erfassten Ereignissen wurden die Anrisszonen ausgeschieden und in einem GIS mit dem digitalen Höhenmodell verschnitten. So konnte für jedes Ereignis die durchschnittliche Hangneigung im Anrissbereich ermittelt werden. Die Hangneigungsverteilung für den Detailperimeter Schlans / Trun ist in Abbildung 5 dargestellt. Abbildung 5 zeigt zudem einen Vergleich der Ereignisse in der Surselva mit anderen Untersuchungen im Kanton Bern. Anhand dieser Histogramme können die Resultate der Modellierung auf ihre Qualität überprüft und entsprechend geeicht werden.



**Abbildung 5:**  
Hangneigungsverteilungen der Anrisszonen der Ereignisse im Detailperimeter Schlans / Trun (links) und in anderen Untersuchungsgebieten (nach Werlen 2004).

Die Hangneigungsverteilung der Anrissbereiche aller erfassten Ereignisse im Untersuchungsgebiet sind in etwa normalverteilt (um den Wert 27°) und reichen von 14° bis 44°. Erstaunlich ist die hohe Anzahl Anrisse unterhalb von 20°. Dieses Phänomen ist an die Auflösung des digitalen Höhenmodells gekoppelt (Werlen 2004, Krauer 2004). Die Berechnungen der Hangneigungen im DHM basieren auf Zellengrössen von 10x10 m. D.h. für eine Zelle wird der durchschnittliche Hangneigungswert berechnet. Je nach topographischer Situation können so bei ungünstiger Lage der Rasterzelle relativ grosse Abweichungen zur realen

Hangneigung auftreten. In Abbildung 6 ist dieser Sachverhalt grafisch dargestellt. Bei gleichmässig verlaufenden Hängen ohne grosse Terrassierung und in steilem Gelände ist dieser Fehler gering. In flachen Hangbereichen und bei Geländekanten sind die grössten Fehler zu erwarten. Gemäss Werlen (2004) liegen die realen Hangneigungen um bis zu  $6^\circ$  höher als im GIS errechnet. Aufgrund dieser Erkenntnisse ist anzunehmen, dass der Mittelwert der Normalverteilung vermutlich nicht bei  $27^\circ$  liegt, sondern um die  $30^\circ$ . Dieser Sachverhalt ist für die Eichung des Modells oder für die Überprüfung der Modellresultate von Bedeutung.



**Abbildung 6:**  
*Erläuterung des systematischen Fehlers bei der Berechnung von Hangneigungen in einem GIS (nach Werlen 2004). Das Beispiel zeigt die Entstehung des Fehlers an einer Geländekante.*

## 7.2.2 Geologische Detailkartierung

Bei der geologischen Detailkartierung wurden alle vorhandenen Aufschlüsse im Untersuchungsperimeter kartiert und mit Untersuchungsergebnissen aus vorhandenen geologischen Gutachten ergänzt. Anhand der geologischen Kenntnisse konnte so eine flächendeckende, interpolierte Karte im Massstab 1:10'000 erstellt werden. Der grösste Teil des Untersuchungsgebietes ist von Moränenablagerungen bedeckt. Man erhoffte sich durch die Detailkartierung Informationen über die Mächtigkeit der Lockergesteinsschichten zu erhalten. Dies war jedoch nicht der Fall. Ein Vergleich mit den vorhandenen geologischen Unterlagen zeigt, dass der Gewinn an zusätzlicher Information dürftig ist. Einzig in den höchstgelegenen Teilen des Untersuchungsgebietes konnten wichtige zusätzliche Informationen erlangt werden. In diesem Bereich wurde eine Fels- und Bergsturzaablagerung erkannt, welche in den alten Grundlagen nicht vorhanden war. Aufgrund dieser Erkenntnis konnte keine markante Verbesserung der Modellresultate erwartet werden. Dabei muss auf die schwierigen Voraussetzungen hingewiesen werden, im Untersuchungsgebiet sind kaum Festgesteinsaufschlüsse vorhanden. Diese Gegebenheit erschwert eine Kartierarbeit enorm.

## 7.2.3 Strassenentwässerung

Bei der Kartierung der Strassenabschläge wurden alle vorhandenen Strassenabschläge in einem Punktlayer erfasst. Dabei wurden auch jene Stellen erfasst, wo Meteorwasser ohne

Abschlag punktuell in den unterliegenden Hang fließen kann. In vielen Bereichen versickert jedoch das Strassenwasser diffus über grosse Strecken. Diese Abschnitte wurden bei der Kartierung nicht erfasst. Dadurch ergibt sich ein unvollständiges Bild der Versickerungsstellen von Strassenwasser. Trotzdem wurde der Datensatz für die Erstellung der Dispositionskarte berücksichtigt.

Aufgrund dieser Aspekte konnte davon ausgegangen werden, dass die in Etappe 1 angewendete talseitige Pufferung des Wegnetzes eine realistische Annahme war. Offen bleibt nach wie vor die Frage der Grösse des hangabwärts gerichteten Wirkungsbereiches.

## **7.2.4 Bodenkartierung**

### *7.2.4.1 Generelle Ergebnisse*

Die Bodenuntersuchungen im Umkreis der Anrissbereiche von Hangmuren und die Kontrolluntersuchungen auf benachbarten Böden ohne Schäden ergaben folgende generelle Sachverhalte:

- Die untersuchten Bodenprofile weisen deutlich erkennbare Horizontübergänge auf, welche als Gleitflächen für flachgründige Rutschungen dienen könnten.
- Die Gleitflächen entstehen bei Wechseln des Bodengefüges, der Porenraumverteilung, der Korngrössenverteilung und des Skelettgehaltes.
- Die untersuchten Böden weisen keine erkennbaren anthropogenen Verdichtungen an der Oberfläche auf (z.B. Viehtritt oder Verdichtungen durch landwirtschaftliche Fahrzeuge). Die Bodenstruktur ist locker und zeigt ein gutes Wasserspeichervermögen.
- Die untersuchten Böden weisen natürliche Dichteunterschiede im Unterboden auf.
- Die untersuchten Böden weisen nur in Einzelfällen erkennbare Vernässungsmerkmale auf. Diese Vernässungen sind zum Teil bereits auf der topografischen Grundlagenkarte 1:25'000 eingetragen. Die weiteren Stellen wurden in der neu erstellten Bodenkarte erfasst (Anhang 12).
- Die Detailkartierung (Anhang 12 / 13) zeigte, dass die an den einzelnen Standorten gewonnen bodenkundlichen, hangmurenrelevanten Informationen durch die Kartiertechnik auf die Fläche extrapoliert werden konnten. Die Kenntnisse des Bodenaufbaus gekoppelt mit einer genauen Oberflächenanalyse erlaubten, eine bodenkundlich begründete Hangmurendisposition zu definieren.

### *7.2.4.2 Hauptprozesse*

Anhand der pedologischen Untersuchungen konnten drei wichtige Faktoren in Bezug auf die Bildung von Hangmuren definiert werden:

**Schwammeffekt** (Abbildung 7):

Die Bodenkartierung hat gezeigt, dass an der Oberfläche keine künstlichen Verdichtungen vorhanden sind. Niederschlag kann gut und einfach in den Boden infiltrieren. Das infiltrierte Wasser wird in der guten Struktur zurückgehalten. Der Boden saugt sich rasch voll, wodurch



sein Eigengewicht um ein Vielfaches erhöht wird. Zusätzlich wird die Kohäsion durch das vorhandene Wasser deutlich verringert.



*Abbildung 7:  
Lockerer Boden mit hohem Wasserspeichervermögen  
(bei Bodenprofil 3)*

**Interflow** (Abbildung 8):

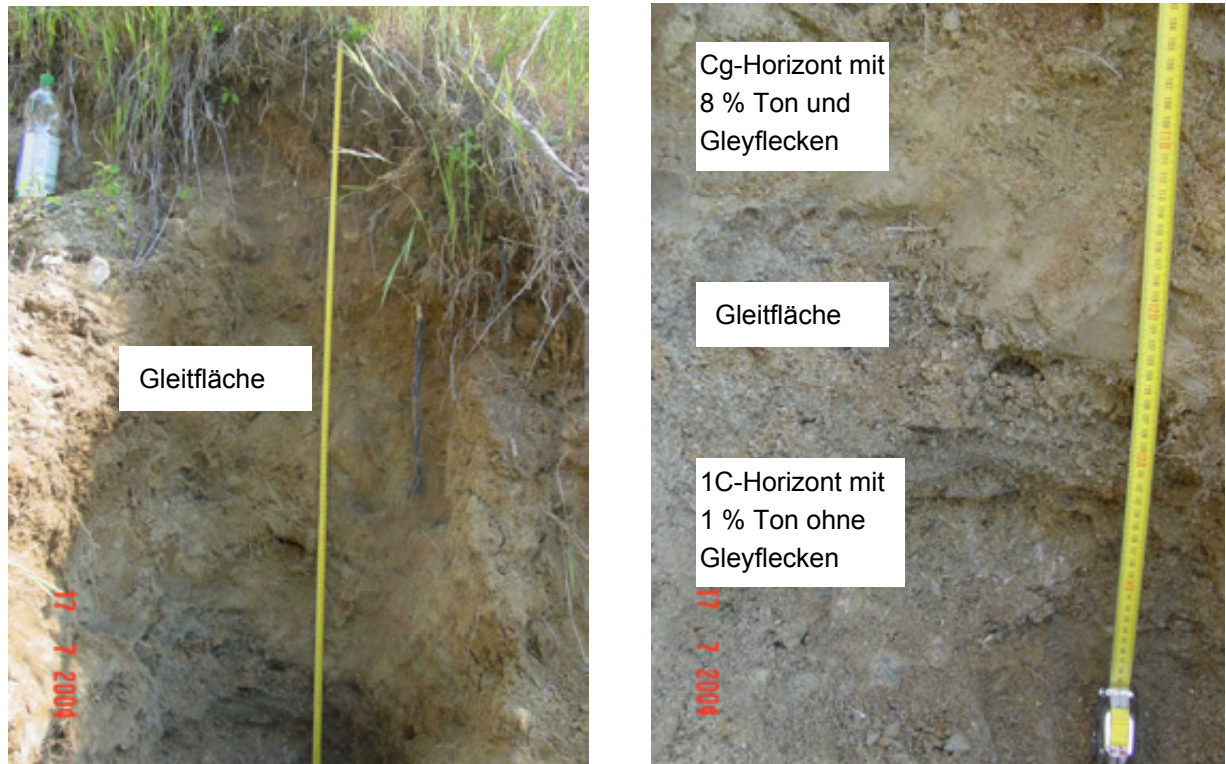
Aufgrund der guten Durchlässigkeit der Horizonte weist der Bodenkörper einen grossen Interflow auf. Das von der Oberfläche einsickernde und seitlich zufließende Wasser destabilisiert die Bodenstruktur.



*Abbildung 8:  
Gleyflecken als Hinweis auf einen  
Interflow im Bereich des BC- und C-  
Horizontes (bei Bodenprofil 6)*

### **Gleitflächeneffekt** (Abbildung 9):

In den Gefüge- und Strukturübergängen zwischen den Bodenhorizonten kann sich bei geringen Änderungen der Wassersättigung ein Rückstau bilden. Dadurch kann die Ablösung des aufliegenden Bodenmaterials provoziert werden.



*Abbildung 9:*  
*Übersicht einer Anrissstelle seitlich einer Hangmure (links) mit Detailaufnahme, in welcher der Körnungswechsel und die Gleitfläche sichtbar sind (rechts).*

#### **7.2.4.3 Wichtige Einzelbeobachtungen:**

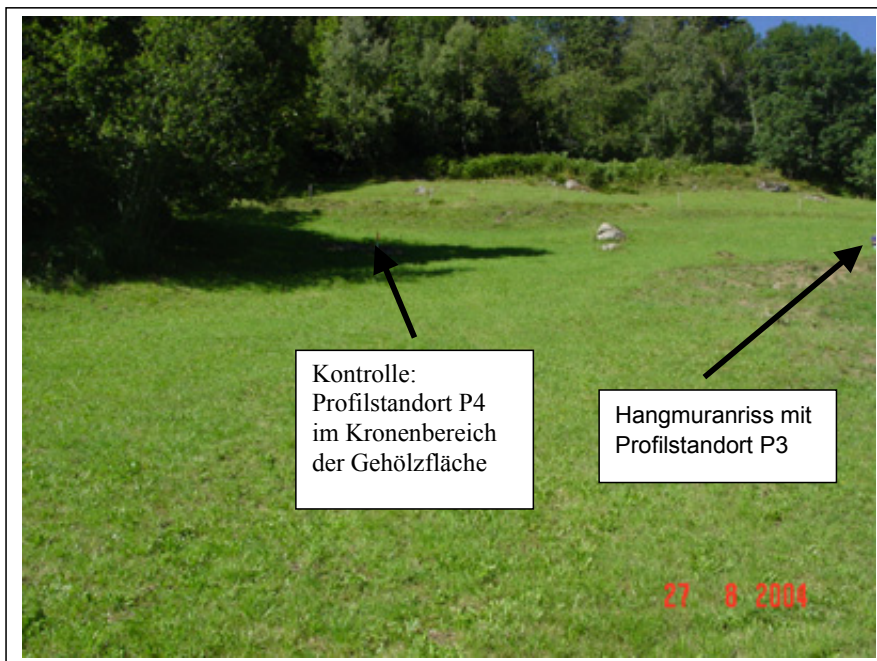
##### **A) Ausbildung des Wurzelwerks**

Die Ausbildung des Wurzelwerks wird anhand der beiden Profile P3 und P4 erläutert. Das Profil P3 wurde unmittelbar oberhalb der Anrissstelle einer Hangmure erstellt, das Profil P4 als Kontrolle ca. 10 Meter seitlich auf gleicher Höhe in Richtung einer Gehölzfläche (Abbildung 10). Die bodenkundliche Analyse der beiden Profile (Profilaufnahmen siehe Abbildung 11) ergab den folgenden Befund:

Profil P3 weist eine Durchwurzelung bis in 100 cm Tiefe auf, mit einer maximalen aktiven Wurzeltiefe bis auf 60 cm unter Terrain. Die Wurzeln sind fein und stammen ausschliesslich von Gräsern und Klee.

Das Kontrollprofil P4 weist eine Durchwurzelung bis 140 cm auf, mit einer maximalen aktiven Wurzeltiefe bis auf 90 cm unter Terrain. Es handelt sich dabei um deutlich stärkere, z.T. verholzte Wurzeln, welche seitlich aus der Gehölzfläche in den untersuchten Standort eingewachsen sind.





*Abbildung 10:  
Bodenuntersuchungen  
im Bereich einer Hang-  
mure mit Kontrolleprofil  
unmittelbar seitlich des  
Anrissbereiches*



*Abbildung 11:  
Fotos der beiden Profile P4 (links, Kontrollprofil mit deutlich verholzten Wurzeln) und P3 (rechts, un-  
tiefe, feine Wurzeln)*

#### Diskussion:

Die Wurzeln in Profil P4 haben eine ‚bioramierende‘ Wirkung, welche bei sonst gleicher Ausgangslage den Boden im Bereich P4 stabilisiert und so Anrisse von Hangmuren hemmt. Zudem existieren bei P4 zwei weitere bodenkundliche Faktoren, welche ebenfalls einen stabilisierenden Charakter haben. Dies ist einerseits der hohe Steingehalt im tieferen Unterboden,

der die Reibungskräfte erhöht und die Wasserdurchlässigkeit verbessert. Andererseits ist es der erhöhte Humusgehalt des Bodens, der die Aggregatstabilität deutlich verstärkt.

## B) Ausbildung des Reliefs

Die Ausbildung des Reliefs kann anhand der beiden Profilstandorte P1 (Anrissbereich) und P2 (Kontrollprofil seitlich des Anrissbereiches) erläutert werden. Die Bodeneigenschaften der Profile P1 und P2 unterscheiden sich kaum, beide weisen eine Dichtlagerung im BC-Horizont unterhalb von 80 cm Tiefe auf. Der Hauptunterschied liegt in der Ausgestaltung des Geländes. Das Relief oberhalb von P1 weist eine langgezogene, in Richtung von P1 verlaufende Geländemulde auf, die oberhalb von P1 in eine Hangterrasse übergeht (Abbildung 12). Beim Standort P2 fehlen diese beiden charakteristischen Geländeeigenschaften (siehe Abb. 14).

Das Oberflächenwasser wird in der Geländemulde oberhalb von P1 gesammelt, resp. aufgestaut. Es kommt zu einer Infiltration unmittelbar oberhalb der Hangterrasse. Der zusätzliche Interflow verursacht auf der Gleitfläche im Übergang des lockeren CB-Horizonts zum dichtgelagerten BC-Horizont eine Destabilisierung.

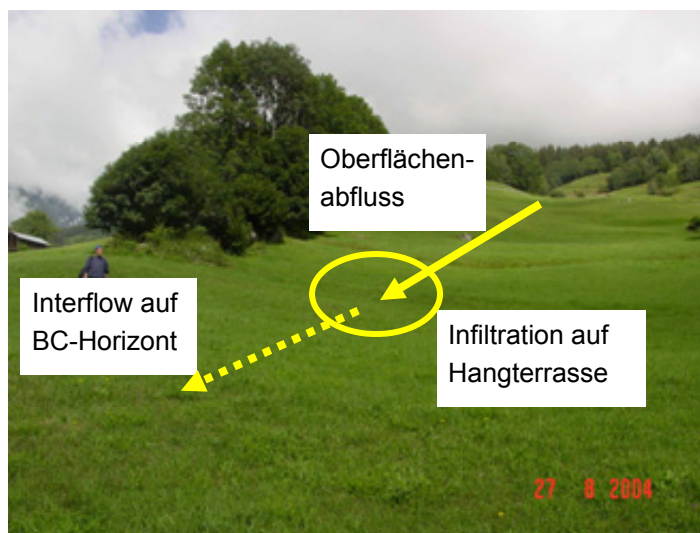


Abbildung 12:  
Standort von P1: Geländemulde mit Hangterrasse oberhalb von P1



Abbildung 13:  
Situation unterhalb von P1: Steilböschung unterhalb der Hangterrasse mit Anrissbereich der Hangmure.



*Abbildung 14:  
Standort P2: Reliefsituation bei P2  
ohne ausgeprägte, grossflächige Ge-  
ländemulde und Hangterrasse.*

## 7.3 Modellierungen

### 7.3.1 Modellansatz

Das Prinzip der Modellierungen in Etappe 2 war identisch mit demjenigen in Etappe 1. Die Parameter für das Modell SLIDSP wurden aus den zusätzlich erfassten geologischen Daten abgeleitet. Zudem wurde eine separate Modellierung mit den aus den pedologischen Aufnahmen abgeleiteten Parametern durchgeführt. Die beiden Modellresultate wurden miteinander verglichen. Je nach Gebiet wurden für die Dispositionskarte die Anrissbereiche der Modellierung mit den geologischen Inputparametern (Felsgebiete, Gebiete oberhalb von 1800 m ü. M. wo keine oder nur äusserst geringmächtige Böden vorhanden sind) oder diejenigen mit pedologischen Parametern verwendet. Die zusätzlichen Angaben, welche aus den Datensätzen der Strassenabschläge und den ungefassten Quellen stammten, flossen via Begleittext in die Beurteilung ein.

### 7.3.2 Modellierung mit Detailgeologie

Wie bereits in Kapitel 7.2.2 erwähnt, wurden durch den Einbau der neuen geologischen Datengrundlage (Massstab 1:10'000) nur unwesentlich bessere Resultate erzielt. Die Grundlagendaten von Etappe 1 und Etappe 2 weisen abgesehen von einer Stelle (Bergsturzablageung) kaum Unterschiede auf.

### 7.3.3 Modellierung mit pedologischen Datengrundlagen

Bei der Bodenkartierung wurden Flächen gleicher Bodenparameter (Bodentyp) ausgeschieden (siehe Kapitel 7.2.4). Die Angaben je definiertem Bodentyp wurden in einer Tabelle (vgl. Tabelle 8) zusammengetragen. Nebst den Neigungsangaben wurden vor allem die Tiefe der potentielle Gleitfläche (entspricht der relevanten Bodenmächtigkeit) und die geotechnische



Zusammensetzung des Bodenmaterials (Gefüge) für die Umsetzung in die Modellparameter des Modells SLIDISP verwendet. Die Umsetzung erfolgte dann anhand der deutschen bodenkundlichen Kartieranleitung (1994). Darin sind die geotechnischen Parameter „Winkel innerer Reibung“, „Durchlässigkeit“ und „Kohäsion“ für verschiedene Bodenarten und Bodentypen definiert. Diese Parameter wurden zusammen mit der Mächtigkeit der relevanten Bodenschicht für die Infinite-Slope-Analysis (vgl. Anhang 5, Struktur SLIDSIP) benötigt. Mit dem getroffenen Ansatz konnten die pedologischen Grössen in die für das Modell notwendigen geotechnischen und hydrologischen Grössen umgerechnet werden. Diese Umsetzung anhand der vorhandenen Tabellen und Grafiken der Kartieranleitung ist uneindeutig und in allen Schritten nachvollziehbar. Die Transparenz bei der Ermittlung der Inputparameter ist vollständig gewährleistet.

*Tabelle 8: Beispiel der Charakterisierung einer in der Bodenkarte ausgeschiedenen Fläche (Details siehe Anhänge 13.1 – 13.8).*

| Lokalform   | Bodentyp (en)                        | Abriss- oder Gleithorizonte <sup>2)</sup> , Begründung (W=Wechsel) | Hori-zont <sup>3)</sup> | Unter-grenze | Gefü-ge | Kies % | Steine % | Ton % | Schluff % | Sand | pH Hellige | Kalk HCl |
|---|--------------------------------------|--|-------------------------|--------------|---------|--------|----------|-------|-----------|------|------------|----------|
| Neigung: < 25 % - 50 %  | Schwach saure Braunerde, tiefgründig |  | Ah                      | 10 cm        | Kr1     | 4      | 0        | 22    | 40        | fS   | 5.1        | 0        |
| Oberfläche: Langgezogener, grasbewachsener Flachhang mit Bachlauf, -> <b>Durchfluss des Murgangs ausserhalb des Bachlaufs</b> |                                      | W in Gefüge  | AB                      | 40 cm        | Kr1     | 4      | 0        | 22    | 40        | fS   | 5.2        | 0        |
|   |                                      |  | Bw                      | 80 cm        | Po2     | 4      | 4        | 15    | 40        | fS   | 5.3        | 0        |
|   |                                      | W in Gefüge, Skelett, Dichte, Wassergehalt                         | BC                      | 120          | Po2     | 10     | 10       | 8     | 30        | gS   | 5.2        | 0        |
|   |                                      |  | C(g)                    | > 160 cm     | Ek      | 10     | 10       | 6     | 30        | gS   | 5.2        | 0        |

Die während der Kartierarbeiten gemachten Beobachtungen über-, ober- als auch unterirdischer Wasserfliesswege konnten nicht in die Modellierung integriert werden. Dazu war die Auflösung des DHM ungenügend. Engräumige Phänomene und Strukturen werden im DHM 25/10 nicht abgebildet. Die Beobachtungen wurden bei der Plausibilisierung der Resultate beigezogen.

## 7.4 Niederschlag

### 7.4.1 Allgemeine Überlegungen

Für die Entstehung von Hangmuren sind aus meteorologischer Sicht grundsätzlich folgende Faktoren relevant: Vorregen, Ereignisniederschlag, Zeitlicher Verlauf der Niederschlagsintensität (insbesondere Zeitpunkt und Niveau der maximalen Intensitäten), Schneefallgrenze, Schneeschmelze und Bodeneigenschaften.

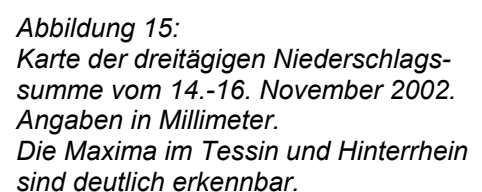
Denkbar wäre folgende Modellvorstellung:

Hangmuren entstehen, wenn der Bodenwassergehalt im Hang eine kritische Schwelle überschreitet. Der Bodenwassergehalt ergibt sich als Bilanz der Zuflüsse und Abflüsse. Zuflüsse sind in erster Linie der Vorregen, der Ereignisniederschlag und die Schneeschmelze. Abflüsse sind die verschiedenen Drainageeffekte im Boden (Tiefensickerung usw.) und - über län-



Welche Intensitäten im Detail relevant sind (z.B. die mittleren Intensitäten oder die maximalen Intensitäten über z.B. 1 h, 3 h oder 12 h), ist aber nicht zum vornherein klar.

Im Rahmen der Unwetterdokumentation beauftragte das BWG das Büro Tergeso AG in Sargans mit der Erarbeitung einer Studie zu den Niederschlagsverhältnissen im November 2002. Die Karte der dreitägigen Niederschlagssumme vom 14.-16. November zeigt das Maximum im Tessin und ein Niederschlagsfeld, das von der Alpensüdseite zungenförmig nach Norden übergreift. Die beobachtete Wetterlage mit Niederschlägen, die von der Alpensüdseite nach Norden übergreifen, ist typisch für die Region.



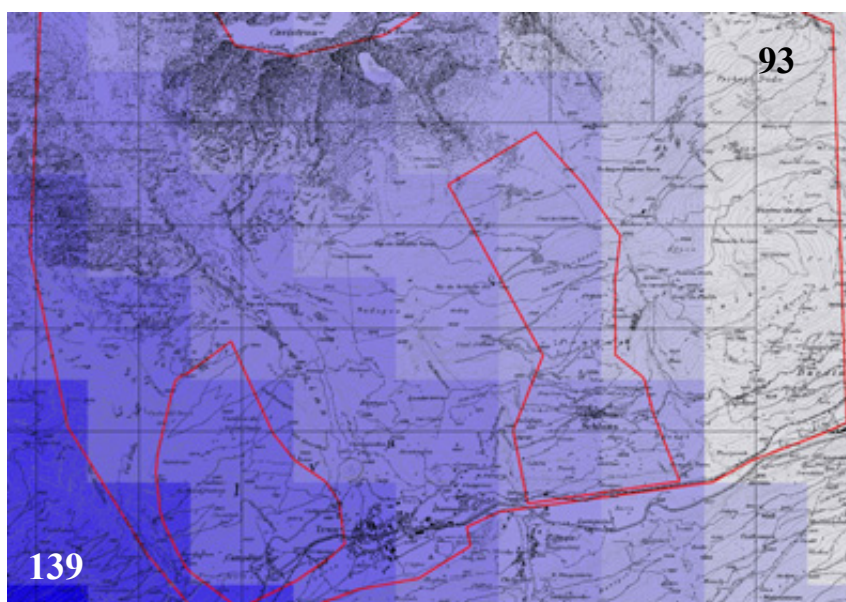
Ausgehend von den in dieser Untersuchung vorgelegten Messungen der MeteoSchweiz, wurden für die beiden Untersuchungsgebiete Surselva und Hinterrhein die folgenden Niederschlagsdaten auf einem Kilomergitter bestimmt:

3-tägiger Niederschlag (vom 14.11.2002, 06 UTC bis 17.11.2002, 06 UTC)

24-stündiger Niederschlag (vom 15.11.2002, 20 UTC bis 16.11.2002, 20 UTC)

12-stündiger Niederschlag (vom 16.11.2002, 08 UTC bis 16.11.2002, 20 UTC)

Die Daten dürften das grossräumige Niederschlagsfeld während den Ereignissen im November 2002 zutreffend repräsentieren, sollten allerdings hinsichtlich der kleinräumigen Niederschlagsverteilung nicht überinterpretiert werden. Alle ausgewerteten Niederschlagsdaten sind in Anhang 9 dargestellt. In Abbildung 16 ist der 24-stündige Niederschlag für das Gebiet Surselva in einem Kilomergitter dargestellt. Die Zunahme des Niederschlags in Richtung Südwesten von 93 mm auf 139 mm ist auf die bereits beschriebene Wetterlage zurückzuführen.



*Abbildung 16:  
Darstellung des 24-  
stündigen Niederschlags  
(Kilomerraster) in der  
Surselva mit Angaben  
der kleinsten und gröss-  
ten Niederschlagssumme  
in mm. Das Muster der  
allgemeinen Wetterlage ist  
deutlich erkennbar.*

#### **7.4.3 Bewertung der Niederschlagsdaten aus der Ereignisanalyse November 2002 und Vergleich mit den Daten des Hydrologischen Atlases der Schweiz**

Verantwortlich für die Auslösung der Rutschungen und Hangmuren waren die aussergewöhnlichen, lange andauernden Starkniederschläge. Drei aufeinanderfolgende Tage mit Niederschlägen in der Grössenordnung von 85 mm sind sehr selten und haben eine Wiederkehrdauer von deutlich über 100 Jahren. Ein Vergleich mit dem hydrologischen Atlas der Schweiz zeigt, dass das Untersuchungsgebiet zudem in einer Zone mit extremen Punktregen liegt (Abbildung 17). Wie bereits erwähnt, sind es diese Starkniederschläge nach langen Nässeperioden, welche solche seltenen Ereignisse auslösen können. Ein Vergleich von Abbildung 16 mit Abbildung 17 zeigt eine gute Übereinstimmung einerseits des Niederschlagsmusters, andererseits der Niederschlagsmengen. Die Tatsache, dass das Untersuchungsgebiet im Einflussbereich von extremen Punktregen liegt, kann sich verschärfend auf die Gefahrensituation bezüglich Hangmuren auswirken.

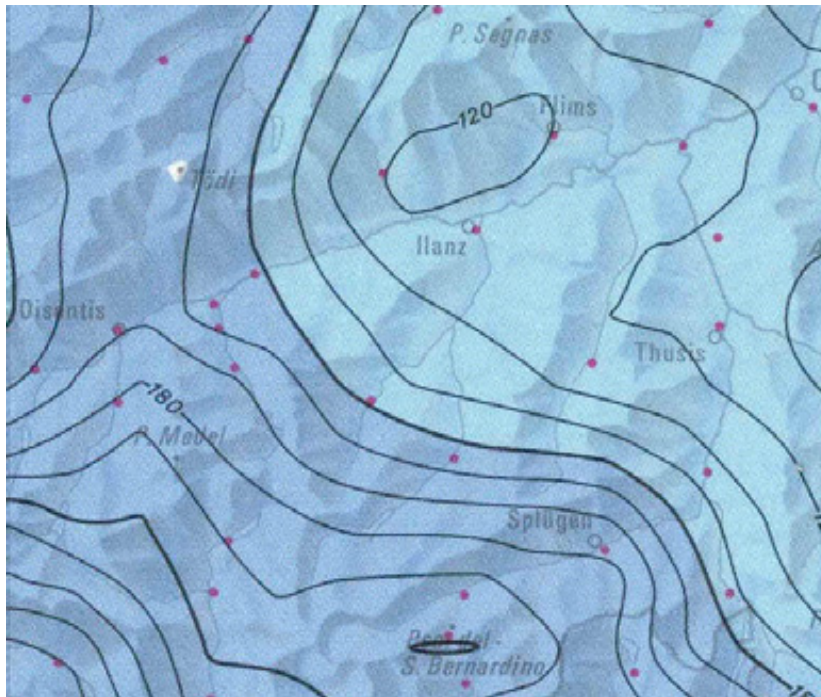


Abbildung 17:

*Ausschnitt der räumlichen Verteilung der Niederschlagshöhen für extreme 24-stündige Punktrege. Wiederkehrdauer 100 Jahre aus dem Hydrologischen Atlas der Schweiz.*

*Das Gebiet Schlans – Trun weist Niederschläge von ca 150 – 170 mm auf.*

#### 7.4.4 Niederschlags-Vorgeschichte

Der November 2002 war fast in der ganzen Schweiz ungewöhnlich feucht. Nach den Messungen von MeteoSchweiz erreichte der Monatsniederschlag im Kanton Graubünden durchschnittlich 450 % des langjährigen Mittels. Die Vorperiode war im Kanton Graubünden ab 26. 10. 2002 zunächst annähernd niederschlagsfrei. In den Schadensgebieten auf der Alpen-nordseite stellte sich vom 2. bis 11. 11. 2002 eine weitgehend regnerische Phase ein, besonders im Vorderrheintal. Bedingt durch das wolkige Wetter und die fortgeschrittene Jahreszeit war dort überdies die Verdunstung unbedeutend, so dass die Vorbelastung der Böden bis zum Ereignis als relativ hoch einzustufen ist (Tergeso 2003).

Diese Untersuchungen zeigen, dass die Vorgeschichte bei der Entstehung von Hangmuren von entscheidender Bedeutung ist. Dieser Aspekt wird bei der Modellierung berücksichtigt, indem von einem vollständig gesättigten Untergrundsystem ausgegangen wird („worst case“). Im Hinblick auf eine mögliche Frühwarnung bei Starkniederschlägen muss die Niederschlag-Vorgeschichte berücksichtigt werden (siehe Kapitel 9.3).

#### 7.4.5 Einfluss der Schneefallgrenze

Für die Entstehung von Unwetterschäden ist in erster Linie der Anteil des Niederschlages in flüssiger Form relevant (d.h. der Regen). Weil im vorliegenden Fall keine Messungen dieses Anteils existieren, muss er indirekt abgeschätzt werden. Ein wichtiger Parameter ist dabei die Schneefallgrenze. Massgebend für die Schneefallgrenze ist das vertikale Temperaturprofil in der freien Atmosphäre. Näherungsweise lässt sich die Schneefallgrenze allerdings auch aus Temperaturmessungen an Bodenstationen ableiten. Nach diesen Messungen befand sich die Nullgradgrenze zur fraglichen Zeit auf rund 2000-2200 m ü.M. Die Schneefallgrenze liegt - je nach Ereignis - etwa 200-500 m unter der Nullgradgrenze.

Mit den Temperaturmessungen der IMIS-Station Puzetta (2195 m ü.M.) und einem angenommenen vertikalen Temperaturgradienten von 6 °C/km, ergeben sich die folgenden mittleren Nullgradgrenzen:

für den 3-tägigen Niederschlag      2100 m ü.M.  
 für den 24-stündigen Niederschlag   2060 m ü.M.  
 für den 12-stündigen Niederschlag   2030 m ü.M.

Konkrete Beobachtungen zur Schneefallgrenze wurden von Urban Maissen (Disentis) zusammengetragen. Die Beobachtungen zeigen deutlich, dass die Schneefallgrenze bei einem Ereignis nicht zwingend konstant ist, sondern dass sowohl räumlich wie zeitlich beachtliche Unterschiede auftreten können. In der Regel ist es nur beschränkt möglich, diese Unterschiede im Detail zu erfassen. Man kann davon ausgehen, dass oberhalb der Nullgradgrenze ausschliesslich Schnee fällt und unterhalb der Schneefallgrenze ausschliesslich Regen. Der Höhenbereich zwischen der Nullgradgrenze und der Schneefallgrenze ist eine Übergangszone, in der neben Schnee auch Regen vorkommen kann. Der gefallene Schnee bleibt aber in dieser Zone nicht vollständig am Boden liegen, sondern schmilzt zu einem gewissen Teil schon im Laufe des Ereignisses wieder ab und trägt zur Abflussbildung bei. Daher ist für die Entstehung von Unwetterschäden genau genommen nicht die Schneefallgrenze massgebend, sondern die temporäre Neuschneegrenze am Ende des Ereignisses. Das heisst die Höhe über Meer, ab welcher der beim Ereignis gefallene Neuschnee noch über das Ereignis hinaus liegen blieb. Unterhalb dieser Grenze gelangt der ganze Ereignisniederschlag schon während des Ereignisses zum Einsickern, bzw. zum Abfluss.

Urban Maissen (Disentis) stellte die folgenden Beobachtungen zur temporären Neuschneegrenze zur Verfügung:

| Datum    | Disentis<br>[m ü.M.] | Sumvitg<br>[m ü.M.] | Trun / Schlans<br>[m ü.M.] |
|----------|----------------------|---------------------|----------------------------|
| 15.11.02 | 1350                 | 1400-1500           | 1400                       |
| 16.11.02 | 1600                 | 1800                | 2000 +                     |
| 17.11.02 | 1250                 | 1400                | 1400                       |

Im Raum Splügen / Hinterrhein lag die temporäre Neuschneegrenze nach Thomas Mengelt (Splügen) auf etwa 1800-2000 m ü. M.. Angaben zum zeitlichen Verlauf sind nicht verfügbar. Die Tatsache, dass im Gebiet Hinterrhein praktisch der gesamte Niederschlag in Form von Schnee gefallen war, erklärt die geringe Anzahl an Hangmuren. Diese Ausführungen zeigen, dass der Effekt des Schneefalls bei der Frühwarnung bei Starkniederschlägen nicht vernachlässigt werden kann.

In Abbildung 18 sind die beiden Untersuchungsperimeter Surselva und Hinterrhein mit den entsprechenden Schneefallgrenzen dargestellt.



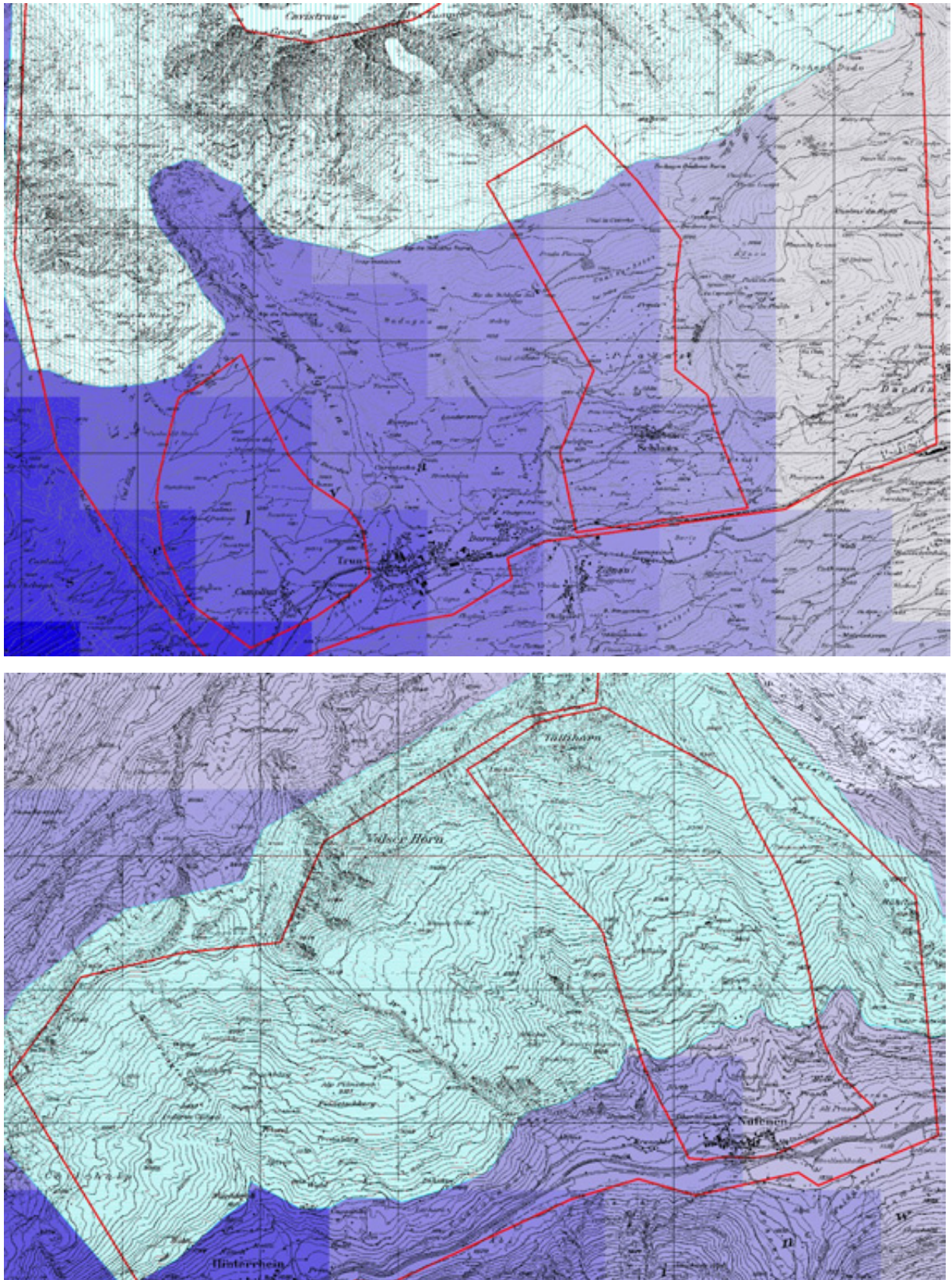


Abbildung 18:  
Darstellung des 24-stündlichen Niederschlags und der Schneefallgrenze; Surselva oben und Hinterrein unten. Die Betrachtung der Schneefallgrenze erklärt warum im Gebiet Hinterrein kaum Ereignisse auftraten (Darstellung unmassstäblich).

#### **7.4.6 Einbezug des Niederschlags in der Gefahrenbeurteilung**

Die bisherigen Ausführungen über den Niederschlag deuten auf die Schwierigkeit beim Einbezug des Niederschlags in die Gefahrenbeurteilung hin. Die Gefahrenbeurteilung geht von einem „worst case“ Szenarium aus. Dies bedeutet, dass der Untergrund bereits gesättigt ist, dass die grösstmögliche Niederschlagsmenge fällt, und dass der gesamte Niederschlag in flüssiger Form zum Abfluss gelangt. Aufgrund dieser Aspekte kann der Niederschlag nicht in die Beurteilung einfließen und wurde dadurch bei der Modellierung auch nicht berücksichtigt.

Ganz anders präsentiert sich die Situation bei der Frühwarnung. Sollen in Zukunft Situationen und Ereignisse wie diese vom November 2002 frühzeitig erkannt werden, so muss der Niederschlag, d.h. die Vorgeschichte, die Schneefallgrenze, die Tendenz der extremen Punktregnen und möglicherweise die Jahreszeit berücksichtigt werden. Auf diese Thematik wird in Kapitel 9.3 detaillierter eingegangen.

### **8. Resultate und Bewertung**

Mit den Untersuchungen in Etappe 1 konnte ein Inventar der für die Fragestellungen vorhandenen, digitalen Grundlagendatensätze erstellt werden. Diese Daten lagen in sehr unterschiedlichen Massstäben vor. Die Resultate zeigten, dass die verwendeten, grösstenteils kleinmassstäblichen Datensätze, für diese Art von Untersuchungen nur im Ausnahmefall (z.B. bei nationalen Projekten, Massstabebene 1:25'000 und kleiner) verwendet werden können. Um die Zielsetzungen des Kantons zu erfüllen, mussten für die Arbeiten in Etappe 2 genauere Datensätze erhoben werden.

In Etappe 2 wurden drei unterschiedliche Methoden zur Verfeinerung der Resultate verfolgt:

- a) Mit einer detaillierten Kartierung des geologischen Untergrundes wurde versucht, die geotechnischen Eingangsparameter zusammen mit einer detaillierten Auswertung des Ereigniskatasters für das Modell SLIDISP genauer zu bestimmen.
- b) Spontane, oberflächliche Rutschungen erfassen grösstenteils nur die obersten Bodenschichten. Diese weisen andere geotechnische Eigenschaften auf als der geologische Untergrund. Aus dieser Erkenntnis wurden pedologische Untersuchungen durchgeführt. Es sollten Modellierung der Anrisspunkte mit Parametern, die aus pedologischen Untersuchungen abgeleitet werden, durchgeführt werden.
- c) Mit einer detaillierten Aufnahme der Strassenentwässerung sollte gezeigt werden, dass unkontrollierter zusätzlicher Wassereinput in einen Hang eine erhöhte Rutschaktivität zur Folge hat.

In den folgenden Kapiteln werden die Resultate der verschiedenen Aufnahmeverfahren aus Etappe 1 und 2 dargestellt und miteinander verglichen.

#### **8.1.1 Strassenentwässerung**

Die Daten der Strassenentwässerung zeigten ein unvollständiges Bild. Über grosse Bereiche versickerte das Wasser diffus in den unterliegenden Hang. Punktuelle Abflüsse waren nur bei Stellen von Strassenabschlägen oder deutlichen topographischen Mulden sichtbar. Eine Verbindung der Strassenentwässerung mit vorhandenen Ereignissen konnte im vorliegenden Fall nicht explizit hergestellt werden. Die Untersuchungen von Krauer (2004) im Gebiete Sumvig



zeigten jedoch, dass eine grosse Anzahl der abgegangenen Hangmuren auf die Strassenentwässerung zurückzuführen waren. Es wurde jedoch nicht erläutert, auf welche Weise dieser Zusammenhang sichergestellt wurde. Im Untersuchungsgebiet des vorliegenden Projektes können an einigen wenigen Stellen Vermutungen über einen Zusammenhang zwischen Strassenwasser und Hangmuren aufgestellt werden. Um sie zu überprüfen müssten jedoch noch zusätzliche Abklärungen vorgenommen werden.

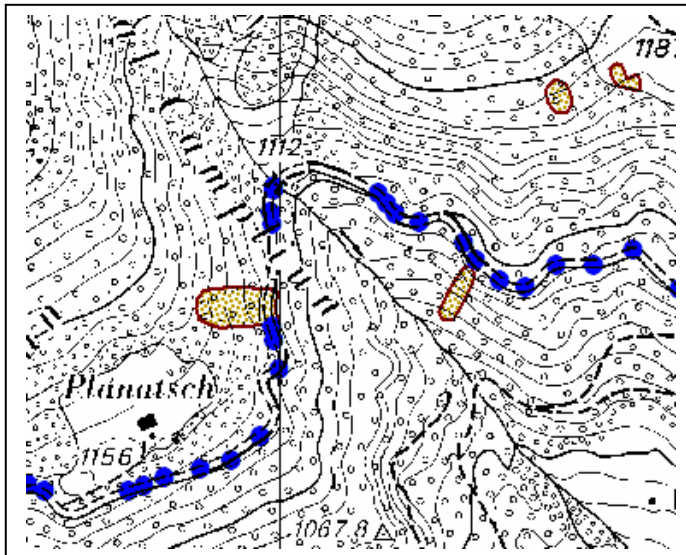


Abbildung 19:  
Darstellung der Ereignisse im November 2002, und den kartierten Strassenabschlüssen im Gebiet Trun (ca. 1:5'000). Bei dem in der rechten Hälfte des Bildes liegenden Ereignis kann ein Zusammenhang zwischen Strassenentwässerung und Auslösung der Hangmure vermutet werden.

So ist der Wirkungsbereich des unkontrolliert versickerten Strassenwassers (Bereich in dem das Strassenwasser die Bildung von Hangmuren fördert) weiterhin unbekannt. Mit Beregnungs- oder Färbversuchen in Gebieten mit unterschiedlicher Topographie talseits der Strasse könnte dieser in einer ersten Annäherung bestimmt werden. Ob dann genauere Angaben über die Kopplung von Strassenentwässerung und Anrissen von Hangmuren möglich wären, würde sich dann zeigen.

### 8.1.2 Modellierung mit geologischen Daten

Die Resultate der Modellierung mit den geologischen Detailangaben ergaben nur marginale Verbesserungen bei der Bestimmung der potentiellen Anrissbereiche. Dieses Erkenntnis ist für weitere Arbeiten entscheidend. Bei Untergrundverhältnissen, wie sie im Untersuchungsgebiet vorliegen, ist die Geologie nebst der Hangneigung nicht die entscheidende Grösse bei der Modellierung von Anrisspunkten von Hangmuren. Die Untergrundverhältnisse können wie folgt charakterisiert werden:

- Es sind wenige geologische Aufschlüsse vorhanden. D.h. bei der Erstellung einer geologischen Karte existieren viele Unsicherheiten.
- Vielerorts besteht eine mächtige Überdeckung des anstehenden Felsens mit Lockergestein (meist Moräne oder Gehängeschutt). Die darunterliegenden Felsformationen sind nur in geringem Masse entscheidend für die untersuchte Problematik.
- Starke Bewirtschaftung des Gebietes (d.h. vielerorts guter Bodenaufbau).

Aus diesen Punkten geht hervor, dass der Bodenaufbau einen weitaus grösseren Einfluss auf die Bildung von Hangmuren hat als die aus der Lithologie des Anstehenden abgeleiteten Parameter.

### 8.1.3 Modellierung mit pedologischen Daten

Die Modellierung mit den pedologischen Daten führte zu erstaunlich guten und plausiblen Resultaten. Die Darstellung der Dispositionsflächen für Anrisse von Hangmuren in den bearbeiteten Perimetern Trun und Schlans befinden sich in den Anhängen 14 und 15. Als Anrissflächen wurden diejenigen Gebiete ausgeschieden, bei denen mehr als 60% der berechneten Parameterkombinationen einen Sicherheitsgrad  $< 1$  aufweisen (Sicherheitsgrad  $< 1$  bedeutet, dass ein instabiler Zustand eintritt, siehe Kap. 6.2.1).

In Gebieten mit intensiver Bewirtschaftung und mächtigen Überdeckungen des anstehenden Felsuntergrundes durch Moränen liefern Modellrechnungen mit pedologischen Datengrundlagen generell plausible Resultate. Hinzu kommt, dass die Umsetzung der Bodeninformation in die Modellparameter in jeder Hinsicht transparent und nachvollziehbar ist (siehe Tabelle 8, S. 34).

Die während der Kartierarbeiten gemachten Beobachtungen über Wasserfliesswege (ober- als auch unterirdische) lieferten für die Plausibilisierung der Modellresultate wichtige Anhaltspunkte (Abbildung 12 u. 13). Sie konnten, wie bereits erwähnt, wegen der zu geringen Auflösung des DHM nicht in die Modellierung einbezogen werden. Dies wird sich in Zukunft mit der Grundlage des Laser-Höhenmodells (DTM-AV) ändern.

Die Plausibilisierung der Resultate erfolgte aber auch anhand der Hangneigungsverteilung. In einem GIS kann für alle in den Modellrechnungen erhaltenen instabilen Rasterzellen des Untersuchungsgebietes eine mittlere Hangneigung berechnet werden. Die Neigungsverteilung dieser Zellen ist in Abbildung 20 dargestellt. Vergleicht man diese Verteilung mit der Hangneigungsverteilung der tatsächlichen Ereignisse (Abbildung 5), so ist eine erstaunlich gute Übereinstimmung sichtbar.

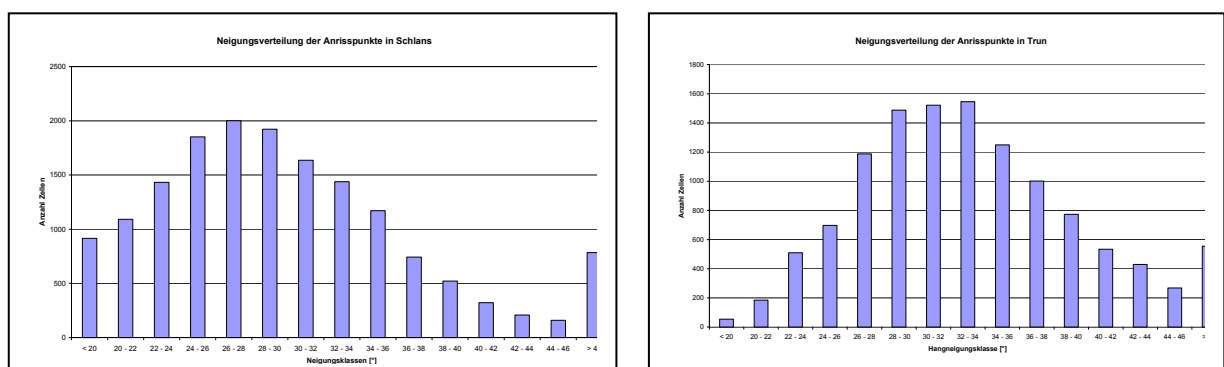


Abbildung 20:

Hangneigungsverteilung aller instabilen Rasterzellen in den Untersuchungsgebieten Schlans (links) und Trun (rechts). Die Maxima der beiden Verteilungen liegen bei 27° (Schlans) und 32° (Trun). Ein Vergleich mit Abbildung 5 zeigt die gute Übereinstimmung von Modell und Realität. Die tatsächlichen Ereignisse zeigen ebenfalls eine Häufungen bei den benannten zwei Klassen.



#### 8.1.4 Plausibilisierung mit Hilfe der Oberflächenanalysedaten

Während den pedologischen Aufnahmen wurden zusätzliche, detaillierte Beobachtungen der Morphologie und der möglichen ober- oder unterirdischen Wasserfließwege vorgenommen. Damit konnten die obigen Resultate plausibilisiert werden. Es zeigte sich, dass viele Geländeeffekte aufgrund der Auflösung des DHM im Modell gar nicht zum Vorschein kamen. Der in Abbildung 21 dargestellte Kartenausschnitt zeigt den Zusammenhang zwischen den erkannten Wasserfließwegen und Versickerungsstellen von Ereignissen im Gebiet Darplauns (Schlans). Die Versickerungsstellen wurden bereits in der Luftbildanalyse erkannt, die Wasserfließwege jedoch erst im Gelände. Beide Strukturen (Wasserfließwege) wurden aber im DHM25/10 nicht oder nur ungenügend abgebildet. Daher wurde bei der Modellierung das gesamte Gebiet als möglicher Anrissbereich für Hangmuren ausgeschieden. Eine Differenzierung war nicht möglich. Mit einem genaueren Höhenmodell könnten diese vermuteten Wasserströme mit Hilfe der Topindexfunktion modelliert werden. Das Gebiet würde nicht mehr gesamthaft als potentieller Anrissbereich erscheinen, sondern in einzelne kleine Bereiche unterteilt.

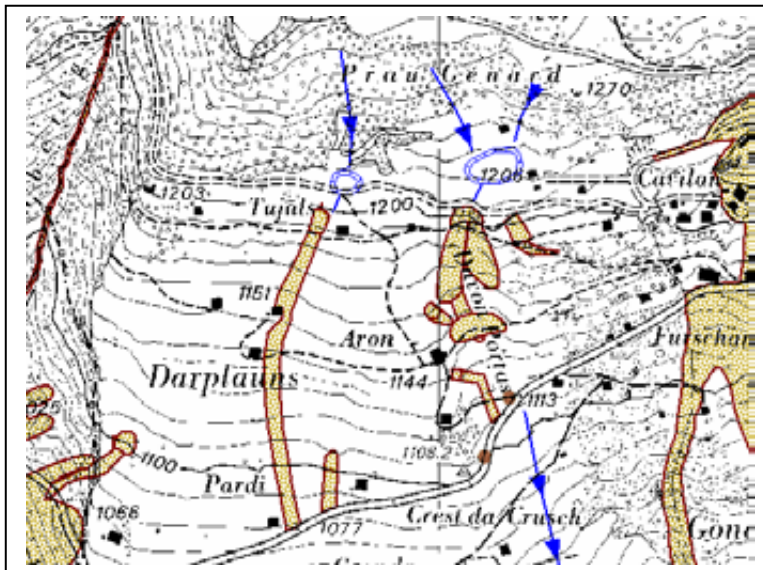


Abbildung 21:  
Ausschnitt Perimeter Schlans: Die aufgrund der Oberflächenanalyse erstandenen Hinweise über die möglichen Wasserfließwege bei gesättigtem Untergrund (blaue Pfeile) und Versickerungsstellen (blaue Kreise) helfen bei der Plausibilisierung der Abrisszonen der verschiedenen Ereignisse (braun).

## 9. Antworten auf die Zielsetzungen

Während des Unwetters im November 2002 wurden viele Gebiete in Graubünden durch Rutschungen, Hangmuren und Murgänge verwüstet. Für diese Prozesse bestehen im Kanton nur wenige Gefahrenkarten. Dadurch wurden die betroffenen Gemeinden und die kantonalen Behörden z.T. bezüglich des räumlichen Auftretens und der Intensitäten überrascht.

Basierend auf diesem Hintergrund hatten die Verantwortlichen im Bereich Naturgefahren und die Vertreter der am Projekt beteiligten Ämter die in Kapitel 2 aufgelisteten generellen Projektziele formuliert. Die ursprünglichen Zielsetzungen wurden aufgrund der gewonnen Erkenntnisse sinnvoll zusammengefasst.

### 9.1 Zielsetzung 1:

**Der Kanton GR kennt die wesentlichen Grundlagen die für solche Modellrechnungen erforderlich sind und weiss welche Grundlagen er prioritär erarbeiten und in digitaler Form bereitstellen muss**

Die Modellierung der Disposition von Hangpartien im Lockergestein bezüglich ihrer Anfälligkeit auf das Abrutschen bei extremen Niederschlagsbedingungen ist seit längerem bekannt und wurde erfolgreich mit dem Modell SLIDISP bewerkstelligt. Im vorliegenden Projekt Catch Risk wurde versucht, nebst den Standardgrundlagen der Hangneigung und der geologisch - geotechnischen Informationen weitere, digital verfügbare Grundlagen einzubeziehen, womit die Aussagegenauigkeit erhöht werden kann.

Aufgrund der Projektergebnisse kann diese Frage schlüssig beantwortet werden (Tabelle 9).

*Tabelle 9:*

*Grundlagen, die für eine erfolgreiche Modellierung für die Ausscheidung von Anrissgebieten von **flachgründigen** Rutschungen zur Erstellung von Gefahrenkarten im Massstab 1:10'000 erforderlich sind*

| Grundlagen            | bereits digital vorhanden  | muss zwingend erhoben und digitalisiert werden      |
|-----------------------|----------------------------|---|
| Geologie              | Nur marginal               | ist im Massstab 1:25'000 oder grösser zu erheben    |
| Boden                 | nein                       | ist im Massstab 1:10'000 oder grösser zu erheben    |
| Topographie (DHM)     | Ja als Basismodell 25      | muss rechnerisch auf ein DHM 10 interpoliert werden |
| Laser DHM (DTM-AV)    | Bis 2000 m ü. M. verfügbar | muss mit dem DHM 10 im Randbereich verknüpfbar sein |
| Vegetation, Wald      | ja                         |   |
| Strassen- und Wegnetz | ja                         |   |
| Quellen               | ja                         |   |

## **9.2 Zielsetzung 2:**

### **Der Kanton kann die Erkenntnisse nutzen und bei der Erstellung der Gefahrenkarten ‚Rutschung‘ Prioritäten setzen.**

Aus der Projektetappe 1 resultierte, dass die erforderlichen Grundlagen zur Geologie und Geotechnik nur im Massstab 1:200'000 flächendeckend zur Verfügung stehen. Zudem sind die Daten der Bodennutzung aus dem Hektarraster BFS wohl flächendeckend verfügbar, jedoch von der Auflösung und der Lagegenauigkeit für die Verwendung im Hinweis-Massstab 1:25'000 oder 1:50'000 nur sehr grobe Resultate liefern.

Die wesentlich bessere geologisch-hydrogeologische Karte Panixerpass wurde im Bereich Trun/Schlans zu Versuchszwecken von der Geotechnischen Kommission digitalisiert. Die Anwendung dieser Grundlage brachte wesentliche Verbesserungen, doch ist dieses Kartenwerk leider nicht für die ganze Kantonsfläche verfügbar.

Da diese Grundlagendaten nicht ohne Zusatzaufwendungen für eine grossflächige Modellierung zur Verfügung stehen, ist es nicht sinnvoll, in die Bereitstellung dieser Daten zu investieren, zumal diese Grundlagen bei der Erstellung von seismischen Mikrozonierungskarten eine essentielle Grundlage darstellen. Auch bei der Analyse und Beurteilung von Murgang- und Sturzprozessen kann die Güte der Modellierungen beim Einbezug von digitalen geologischen und/oder hydrogeologischen Grundlagenkarten massiv verbessert werden.

Wir empfehlen deshalb, auf die Erstellung einer Hinweiskarte mit der Ausscheidung von Hangpartien mit einer Disposition für flachgründige Rutschungen zu verzichten, zumal mit den Resultaten aus dem BAFU-Projekt „SilvaProtect“ inzwischen bereits eine grobe Hinweiskarte für Hangmuren existiert. Demzufolge sollte das Schwergewicht auf die Erstellung von Gefahrenkarten basierend auf unseren Erkenntnissen aus der Etappe 2 gelegt werden.

## **9.3 Zielsetzung 3:**

### **Der Kanton kann zukünftig Warnungen zu Starkniederschlägen im untersuchten Perimeter in praktikable ‚Gefahrenstufen‘ für Rutschungen umsetzen.**

Die Unwetterereignisse im November 2002 haben sowohl in ihrem Auftreten als auch im Ausmass alle überrascht. Die Zusammenhänge zwischen dem Auftreten von Starkniederschlägen, Rutschungen, Hangmuren und Murgängen sind bekannt, das spezielle räumliche Auftreten und die extremen Reichweiten hingegen sind noch schlecht dokumentiert und analysiert.

Diese Thematik wurde anlässlich des ersten Catch Risk Workshops vom 2.4.2004 in Chur in der Expertengruppe eingehend diskutiert, und es wurde klar festgehalten, dass Gefahrenkarten die Gefahrenstufen für sog. Worst Case Szenarien auszuweisen haben. Zudem sollten in den Gefahrenkarten keine Szenarien mit unterschiedlichen Niederschlagsmustern einbezogen werden.

Aufgrund der eingehenden Analysen der Niederschlagsereignisse im November 2002 (Büro Tergeso) wurde deutlich gezeigt, dass das Muster der Niederschlagsverteilung durch die Karten der extremen Punktregen im Hydrologischen Atlas der Schweiz, Blatt 2.4<sup>2</sup> sehr gut abgebildet werden. (siehe Kap. 7.4).

Aus dieser Erkenntnis einerseits, und der interessanten Feststellungen zum Witterungsverlauf, insbesondere der Verlauf der Schneefallgrenze bei den Ereignissen Nov. 02 anderer-

seits, sollte ein Versuch zur Erstellung einer Entscheidungshilfe zur Frühwarnung durchgeführt werden. Im nachfolgenden Flussdiagramm ist eine erste Skizze einer Entscheidungshilfe für eine Frühwarnung für Hangmuren und Murgänge dargestellt.

Im Rahmen eines speziellen Projektes könnte diese Entscheidungshilfe in ein Expertensystem integriert werden. Dieses System könnte auf der Basis von Wetter-Radarinformationen und den anhand der in Etappe 2 vorgeschlagenen Modellierungen der potentiellen Rutschgebiete basieren. Eine eventuelle Automatisierung des Expertensystems wäre denkbar.

Im nachfolgenden Flussdiagramm (Abb. 22) sind die Elemente des Meteoentscheids als ein Basiselement im Expertensystem nur grob skizziert, es war nicht Gegenstand des Projekts, diesen Teil im Detail zu entwickeln. In Abbildung 22 werden die grundsätzlichen Zusammenhänge gezeigt, die die Situation der Höhenlage der Schneefallgrenze berücksichtigen, denn es hat sich bereits bei den Unwetteranalysen 1987 gezeigt, dass diesem Umstand eine zentrale Bedeutung zukommt. Ebenso spielt als zweiter Faktor die Niederschlags-Vorgeschichte eine zentrale Rolle. Die Vorgeschichte wird bezüglich Jahreszeit und Dauer des Vorregens in Verknüpfung mit der Karte der extremen Punktregnen des HADES ins Expertensystem eingeführt.

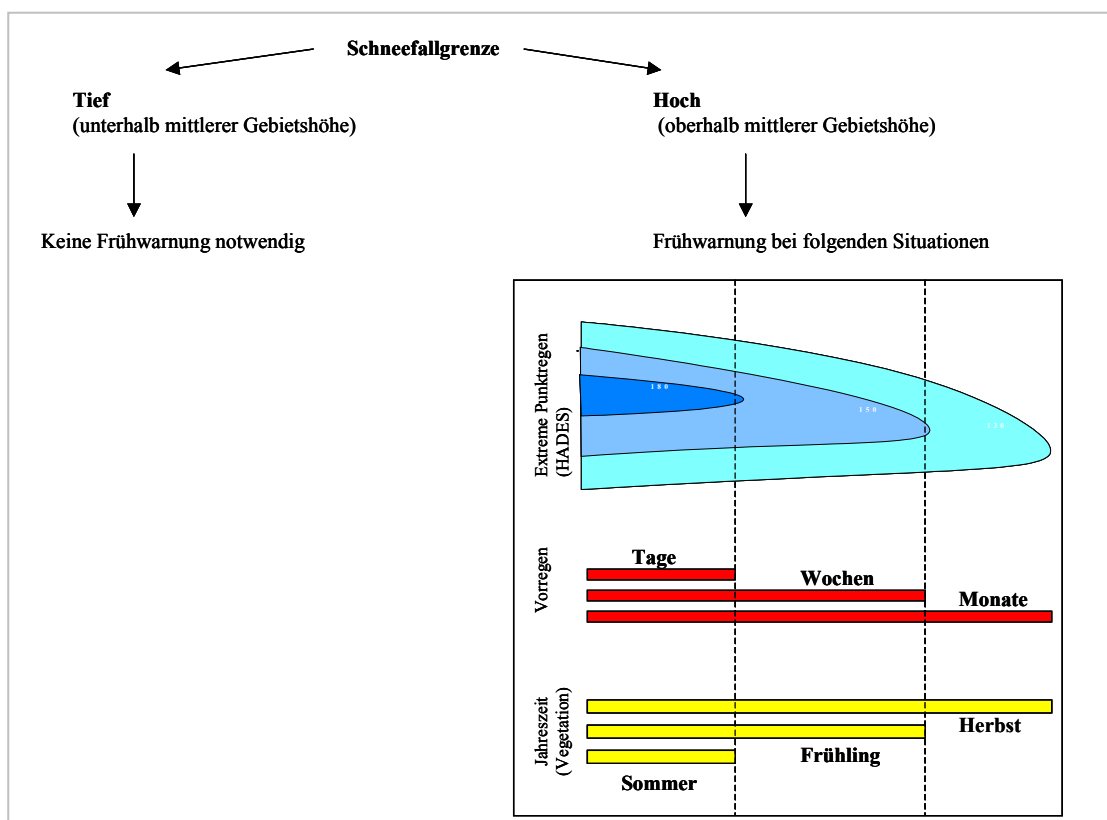


Abbildung 22: Entwurf Flussdiagramm zum Einbezug der Meteosituation in ein Expertensystem zur Frühwarnung bei Murgängen und Hangmuren

## 10. Empfehlungen und weiteres Vorgehen

Die im Projekt gewonnen bodenkundlichen Erkenntnisse zeigen, dass Hangmuren primär von pedologischen Sachverhalten mitbestimmt sind. Die angewandte Bodenkartiertechnik ermöglicht eine relativ rasche Erfassung der relevanten Bodendaten. Für die Anwendung auf grössere Gebiete ist die Vorgehensweise noch zu vereinfachen. Unter Einbezug der Ansprüche anderer Fachbereiche an eine Bodenkartierung kann so ein ideales Werkzeug für weitere Projekte geschaffen werden. Für die Optimierung der Bodenkartiertechnik sind drei wichtige Aspekte zu beachten:

### (1) Verstärkung der Multifunktionalität der Bodenkartierung:

Die Bodendaten sind vielfältig in den Bereichen Land- und Forstwirtschaft, des Meliorationswesens, der Raumordnung, des Gewässer-, Natur- und Landschaftsschutzes und eben neu in den Naturgefahren einsetzbar. Die vielfältige Nutzbarkeit der Bodeninformation erfordert ein zwischen den verschiedenen Disziplinen koordiniertes Konzept zur Erhebung, Verwaltung und Anwendung der Daten. Die Koordination umfasst Fragen der Qualität und des Massstabs der Erhebung, der GIS-mässigen Ablage und Abrufbarkeit der Daten. Durch die optimierte Verwendbarkeit der Bodeninformation könnten die finanziellen Lasten auf mehr Nutzer verteilt werden.

### (2) Anpassung der Bodenkartiertechnik an die Bedürfnisse der Nutzer der Bodendaten:

Die im vorliegenden Projekt eingesetzte Bodenkartiertechnik entspricht der Technik wie sie in der Schweiz von der landwirtschaftlichen Forschungsanstalt Reckenholz (agroscope FAL Reckenholz) und der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz entwickelt wurde. Der zu leistende Aufwand wird im Wesentlichen von der Feldarbeit bestimmt. Moderne Techniken wie Luftbildanalyse und GIS-Applikationen können die Effizienz der eingesetzten Mittel erheblich steigern. Die Verifikation im Feld des für ein Gebiet entwickelten Bodenmodells entfällt jedoch nicht.

Die Intensität der Feldarbeit ist jedoch nicht nur abhängig vom Einsatz moderner Techniken sondern auch von der Fragestellung. Parzellenscharfe Daten erfordern immer eine hohe Dichte an Felddaten, welche entsprechend grossmassstäblich dargestellt werden und eine hohe räumliche Verlässlichkeit aufweisen. Solche Daten werden häufig im Massstab 1:2'000 oder grösser erhoben.

Genügt demgegenüber eine Genauigkeit, welcher die Erfassung einer Geländekammer von beispielsweise 10 ha als kleinste Einheit verlangt (wie sie z.B. zur Modellierung von Hangmuren erforderlich ist), so kann eine Informationsdichte gewählt werden, welche einem Erhebungsmassstab von 1:5'000 entsprechen kann. Der Erhebungsaufwand im Feld würde sich in diesem Fall im Vergleich zur Detailkarte um 60 % oder mehr verringern.

### (3) Verbesserung der projektspezifischen Bodenkartiertechnik (Naturgefahren):

- Erarbeitung eines bodenkundlichen Schlüssels zur Erfassung der für die Beurteilung von Anrisspunkten spontaner Rutschungen relevanter Parameter auf der Basis der bisherigen Bodenkartiertechnik. Dazu gehört u.a. die Geländemorphologie, Pflanzenbewuchs und Durchwurzelung, sowie die Ansprache von Verdichtungen und möglichen Gleitflächen.

- Verbesserung der luftbild- und GIS-gestützten Auswertungstechnik unter Anwendung des Laser DHM (DTM-AV) für ein ‚multifunktionales‘ Bodenmodell als Grundlage der Kartierkampagne im Feld (Reliefanalyse).
- Erweiterung der Auswahlkriterien bei der Profilstandortwahl: bis anhin wurde bei der Standortwahl die Erfassung des flächenrelevanten Bodeninventars als Hauptkriterium angewendet. Neu müsste zusätzlich die für Hangmuren relevanten Standorteigenschaften einbezogen werden.
- Erweiterung der Profilaufnahmetechnik: Quantitative und qualitative Erfassung des Bewuchses und der Durchwurzelung, Aufnahme von Gleitflächen, Durchführung von geotechnischen Messungen, Probenahme für geotechnische Analysen.
- Erweiterung der Detailkartierung: Detailliertere Erhebung der Geländemorphologie, Erhebung der Pflanzenbewuchsmerkmale, Einbezug der Spatenprobe.

GEOTEST AG

# **Anhänge**

## **Nr. 1 - 17**