



SFIG - SCHWEIZERISCHE FACHGRUPPE FÜR INGENIEURGEOLOGIE
GSGI - GROUPEMENT SUISSE DE LA GEOLOGIE DE L'INGENIEUR

Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren
Groupe de travail Danger naturel et Géologie

AGN-Projekt

Verbesserung der Hangmurenbeurteilung

Arbeitsbericht 1. Phase

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt BAFU
Abteilung Gefahrenprävention
3003 Bern

Frauenfeld/Bern/Horw, 30. September 2015, rev. 29. Februar 2016

Autoren:

Séverine Boll-Bilgot, Géologue-Hydrogéologue Conseil, Bern
Dr. Ueli Gruner, Kellerhals + Haefeli AG, Bern
Dr. Markus Liniger, Geotest AG, Horw
Prof. em. Dr. Aurèle Parriaux, EPFL, Lausanne
Dr. Roland Wyss, Dr. Roland Wyss GmbH, Frauenfeld (Projektleitung)

INHALT

	ZUSAMMENFASSUNG	10
1	AUSGANGSLAGE, AUFTRAG	12
1.1	Spontane Rutschungen und Hangmuren	12
1.2	Raumplanerische Umsetzung	12
1.3	Zielsetzung	13
1.4	Auftrag	14
1.5	Ausgeführte Arbeiten und Projektteam	14
2	VERWENDETE UNTERLAGEN	15
3	DEFINITIONEN	16
3.1	Allgemein	16
3.2	Spontane Rutschungen	16
3.3	Hangmuren	16
4	GRUNDSÄTZE, BISHERIGE METHODIK, HANDLUNGSBEDARF	17
4.1	Grundsätze	17
4.2	Wichtige prozessbeeinflussende Faktoren	17
4.2.1	Allgemeines	17
4.2.2	Die kritische Hangneigung	18
4.2.3	Die spezifischen Förderfaktoren	18
4.3	Ungenügende Berücksichtigung geologischer Faktoren	19
4.4	Bisherige Methodik (AGN 2004)	19
4.5	Handlungsbedarf	20
4.5.1	Berücksichtigung der Geologie und der Hydrogeologie zur Gefahrenbeurteilung	20
4.5.2	Geologische Förderfaktoren	20
4.5.3	Verbesserung der Zuordnung von Jährlichkeiten	20
4.5.4	Verbesserung der Bestimmung der Reichweiten	21
4.6	Ziel für die Feldstudie	21
5	AUSGEFÜHRTE ARBEITEN	22
5.1	Überarbeitung Erfassungsblatt WSL	22
5.2	Felduntersuchungen	23
6	METHODE GEOLEP	24
6.1	Introduction	24
6.1.1	Sondages à la tarière à main	25
6.1.2	Identification des géotypes et des unités géologiques homogènes	26
6.1.3	Essais in situ	26
6.1.4	Sources d'erreur	27
6.2	Application à l'analyse des coulées de boue	27
6.2.1	Evaluation de la prédisposition aux coulées de boue	27
6.2.2	Modélisation de l'intensité des coulées de boue	28
7	FELDUNTERSUCHUNGEN	32

7.1	Trubschachen	32
7.1.1	Disposition	32
7.1.2	Durchgeführte Untersuchungen	35
7.1.3	Resultate und Interpretation	35
7.2	Eltschingera	41
7.2.1	Disposition	41
7.2.2	Investigations in situ	43
7.2.3	Résultats et interprétation	44
7.3	Alpnachstad	46
7.3.1	Disposition	46
7.3.2	Durchgeführte Untersuchungen	48
7.3.3	Resultate und Interpretation	48
7.4	Ennetbürgen	51
7.4.1	Disposition	51
7.4.2	Durchgeführte Untersuchungen	53
7.4.3	Resultate und Interpretation	54
7.5	Les Avants	56
7.5.1	Disposition	56
7.5.2	Investigations in situ	59
7.5.3	Résultats et interprétation	59
7.6	Travers	61
7.6.1	Disposition	61
7.6.2	Investigations in situ	64
7.6.3	Résultats et interprétation	64
7.7	Schwellbrunn	66
7.7.1	Disposition	66
7.7.2	Durchgeführte Untersuchungen	69
7.7.3	Resultate und Interpretation	70
7.8	Altstätten	73
7.8.1	Disposition	73
7.8.2	Durchgeführte Untersuchungen	76
7.8.3	Resultate und Interpretation	76
7.9	St. Antönien	78
7.9.1	Disposition	78
7.9.2	Durchgeführte Untersuchungen	81
7.9.3	Resultate und Interpretation	81
8	ERGEBNISSE DER UNTERSUCHUNGEN	83
8.1	Aufnahme von Hangmureneignissen	83
8.2	Testgebiete und Fragestellung	83
8.3	Zusammenfassende Befunde der Feldaufnahmen	84
8.4	Beurteilung der Hangmuren	87
8.5	Fazit für die Praxis	88
8.6	Offene Fragen	89
9	EMPFEHLUNGEN, WEITERES VORGEHEN	90

FIGUREN

Figur 1:	Lage der untersuchten Gebiete.	24
Figur 2:	Logigramme de la méthode GEOLEP.	25
Figur 3:	Effet du contraste de perméabilité entre le substratum et la couverture.	26
Figur 4:	Relation entre la conductivité hydraulique à saturation et la valeur de bleu de méthylène des formations superficielles meubles (Bilgot & Parriaux 2009a).	28
Figur 5:	Cohésion effective (kPa) à saturation en fonction de la granulométrie et de l'indice de plasticité des formations superficielles meubles (d'après Bilgot & Parriaux 2011, modifié).	29
Figur 6:	Situation 1:25'000 mit Lage des geologischen Querprofiles.	32
Figur 7:	Hangmurenereignisse im «Vordere Chrümpelgrabe» vom August 2005.	33
Figur 8:	Geologisches Querprofil durch den Chrümpelgraben 1: 5'000/2'000 (2.5 × überhöht).	34
Figur 9:	Trubschachen: Diagramm Plastizitätsindex vs. Ton- und Silt-Gehalt der Proben (mit Angaben der Hangneigung bei der Probenahmestelle).	36
Figur 10:	Trubschachen: Diagramm Hangneigung vs. Ton-Silt-Gehalt der Proben (mit Angaben über Lage der Probe bezüglich Hangmurenanriss).	37
Figur 11:	Trubschachen: Häufigkeitsverteilung der Hangmurenereignisse im benachbarten Langnau beim Unwetter im August 2005 (Total 460 Ereignisse).	38
Figur 12:	Localisation de la zone d'étude et du profil géologique.	41
Figur 13:	Coulées initiées en 2005.	42
Figur 14:	Coupe géologique schématique du versant d'Eltschingera.	43
Figur 15:	Eltschingera: Diagramme représentant le pourcentage de limons et argiles en fonction de l'indice de plasticité, ainsi que la pente au point d'échantillonnage.	45
Figur 16:	Eltschingera: Corrélation entre granulométrie, épaisseur des formations superficielles, pente du versant et occurrence de coulées de boue.	45
Figur 17:	Testgebiet Alpnachstad, (Chälenrain).	46
Figur 18:	Geologisches Profil Testgebiet Chälenrain (Alpnachstad).	47

Figur 19:	Alpnachstad: Diagramm Plastizitätsindex vs. Ton- und Silt-Gehalt der Proben (mit Angaben der Hangneigung bei der Probenahmestelle).	48
Figur 20:	Alpnachstad: Diagramm Hangneigung vs. Ton-Silt-Gehalt der Proben.	49
Figur 21:	Hangmurensuren Alpnachstad von 2005.	50
Figur 22:	Testgebiet Ennetbürgen (Buochli).	51
Figur 23:	Fotos von Ereignissen Ennetbürgen.	52
Figur 24:	Schematisches Querprofil Ennetbürgen.	52
Figur 25:	Ennetbürgen: Diagramm Plastizitätsindex vs. Ton- und Silt-Gehalt der Proben (mit Angaben der Hangneigung bei der Probenahmestelle).	54
Figur 26:	Ennetbürgen: Diagramm Hangneigung vs. Ton-Silt-Gehalt der Proben.	54
Figur 27:	Localisation de la zone d'étude et du profil géologique.	56
Figur 28:	Coulées initiées en juin 2007, huit jours après l'événement.	57
Figur 29:	Coupe géologique schématique du versant des Avants.	58
Figur 30:	Diagramme représentant le pourcentage de limons et argiles en fonction de l'indice de plasticité, ainsi que la pente au point d'échantillonnage.	59
Figur 31:	Corrélation entre granulométrie, épaisseur des formations superficielles, pente du versant et occurrence de coulées de boue.	60
Figur 32:	Localisation de la zone d'étude et du profil géologique.	61
Figur 33:	Coulée initiée en avril 2006, un mois après l'événement ; on remarquera que les venues d'eau sont toujours présentes dans la niche d'arrachement.	62
Figur 34:	Image LIDAR du versant affecté par les coulées de boue.	62
Figur 35:	Coupe géologique schématique du site de Travers.	63
Figur 36:	Travers: Diagramme représentant le pourcentage de limons et argiles en fonction de l'indice de plasticité, ainsi que la pente au point d'échantillonnage.	65
Figur 37:	Travers: Corrélation entre granulométrie, épaisseur des formations superficielles, pente du versant et occurrence de coulées de boue.	65
Figur 38:	Lage des Testgebietes Schwellbrunn (Flurname «Eisigeli»).	66
Figur 39:	Schematisches geologisches Querprofil durch das Testgebiet Schwellbrunn (Verlauf der Profilsur in der Falllinie des Hanges).	67

Figur 40:	Auszug Gefahrenhinweiskarte (aus www.geoportal.ch , Stand August 2015).	67
Figur 41:	Ausbruchs- und Transitbereich einer Hangmure aus einer steilen Böschung im Eisigeli (Ereignis Hm_1, vgl. <i>Beilage 31</i>). Der Holzschuppen wurde beschädigt.	68
Figur 42:	Anrissbereich einer Hangmure mit freigelegtem Fels.	69
Figur 43:	Auswirkungen der hohen Niederschlagsintensität.	69
Figur 44:	Schwellbrunn: Diagramm Plastizitätsindex vs. Ton- und Silt-Gehalt der Proben (mit Angaben der Hangneigung bei der Probenahmestelle).	71
Figur 45:	Schwellbrunn: Diagramm Hangneigung vs. Ton-Silt-Gehalt der Proben (mit Angaben über Lage der Probe bezüglich Hangmurenanriss).	71
Figur 46:	Testgebiet Altstätten (Flurname «Lahmern-Guggerstobel»).	73
Figur 47:	Lage des Testgebietes Altstätten (rote Markierung) im Relief.	74
Figur 48:	Altstätten: Diagramm Plastizitätsindex vs. Ton- und Silt-Gehalt (mit Angabe der Hangneigung bei der Probenahmestelle).	77
Figur 49:	Altstätten: Diagramm Hangneigung vs. Ton-Silt-Gehalt der Proben (mit Angaben über Lage der Probe bezüglich Hangmurenanriss).	77
Figur 50:	Das Untersuchungsgebiet St. Antönien.	78
Figur 51:	Blick ins Untersuchungsgebiet von Süden (Stand 2007).	79
Figur 52:	Schematisches Querprofil Tschatschuggen–St. Antönien.	80
Figur 53:	St. Antönien: Diagramm Plastizitätsindex vs. Ton- und Silt-Gehalt (mit Angabe der Hangneigung bei der Probenahmestelle).	82
Figur 54:	St. Antönien: Diagramm Hangneigung vs. Ton-Silt-Gehalt der Proben (mit Angaben über Lage der Probe bezüglich Hangmurenanriss).	82
Figur 55:	Alle Daten: Diagramm Plastizitätsindex vs. Ton- und Silt-Gehalt (mit Angabe Anrissbereich (rot) / standfester Untergrund (blau)).	86
Figur 56:	Alle Daten: Diagramm Hangneigung vs. Ton-Silt-Gehalt der Proben (mit Angabe Anrissbereich (rot) / standfester Untergrund (blau)).	87

TABELLEN

Tabelle 1:	Untersuchungsgebiete.	23
Tabelle 2:	Aperçu des modélisations effectuées sur le site des Avants.	30
Tabelle 3:	Aperçu des modélisations effectuées sur le site d'Eltschingera.	30
Tabelle 4:	Zusammenstellung der wichtigsten Parameter der verschiedenen Untersuchungsgebiete.	84

BEILAGEN

Beilage 1:	Trubschachen: Orthofoto 1:10'000 mit Hangmurenereignissen und Probenahmestellen
Beilage 2:	Trubschachen: Hangneigungskarte 1:10'000
Beilage 3:	Trubschachen: Karte 1:10'000 mit Zusammenstellung der Korngrössenanalysen und der Plastizitätsindizes
Beilage 4:	Trubschachen: Gefahrenkarte 1:10'000
Beilage 5:	Trubschachen: Tabellarische Zusammenstellung der Ergebnisse der Probenanalysen
Beilage 6:	Eltschingera: Orthofoto 1:10'000 mit Hangmurenereignissen und Probenahmestellen
Beilage 7:	Eltschingera: Hangneigungskarte 1:10'000
Beilage 8:	Eltschingera: Karte 1:10'000 mit Zusammenstellung der Korngrössenanalysen und der Plastizitätsindizes
Beilage 9:	Eltschingera: Gefahrenkarte 1:10'000
Beilage 10:	Eltschingera: Tabellarische Zusammenstellung der Ergebnisse der Probenanalysen
Beilage 11:	Alpnachstad: Orthofoto 1:2'000 mit Hangmurenereignissen und Probenahmestellen
Beilage 12:	Alpnachstad: Hangneigungskarte 1:2'000
Beilage 13:	Alpnachstad: Orthofoto 1:2'000 mit Zusammenstellung der Korngrössenanalysen und der Plastizitätsindizes
Beilage 14:	Alpnachstad: Gefahrenkarte 1:2'000
Beilage 15:	Alpnachstad: Zusammenstellung der Ergebnisse der Probenanalysen
Beilage 16:	Ennetbürgen: Orthofoto 1:2'000 mit Hangmurenereignissen und Probenahmestellen
Beilage 17:	Ennetbürgen: Hangneigungskarte 1:2'000

- Beilage 18: Ennetbürgen: Orthofoto 1:2'000 mit Zusammenstellung der Korngrössenanalysen und der Plastizitätsindizes
- Beilage 19: Ennetbürgen: Gefahrenkarte 1:2'000
- Beilage 20: Ennetbürgen: Zusammenstellung der Ergebnisse der Probenanalysen
- Beilage 21: Les Avants: Orthofoto 1:5'000 mit Hangmureneignissen und Probenahmestellen
- Beilage 22: Les Avants: Hangneigungskarte 1:5'000
- Beilage 23: Les Avants: Karte 1:5'000 mit Zusammenstellung der Korngrössenanalysen und der Plastizitätsindizes
- Beilage 24: Les Avants: Gefahrenkarte 1:5'000
- Beilage 25: Les Avants: Tabellarische Zusammenstellung der Ergebnisse der Probenanalysen
- Beilage 26: Travers: Orthofoto 1:5'000 mit Hangmureneignissen und Probenahmestellen
- Beilage 27: Travers: Hangneigungskarte 1:5'000
- Beilage 28: Travers: Karte 1:5'000 mit Zusammenstellung der Korngrössenanalysen und der Plastizitätsindizes
- Beilage 29: Travers: Gefahrenkarte 1:5'000
- Beilage 30: Travers: Tabellarische Zusammenstellung der Ergebnisse der Probenanalysen
- Beilage 31: Schwellbrunn: Übersicht Untersuchungsgebiet 1:2'000 mit Hangmureneignissen und Probenahmestellen
- Beilage 32: Schwellbrunn: Topografie Untersuchungsgebiet 1:2'000
- Beilage 33: Schwellbrunn: Hangneigungskarte 1:2'000
- Beilage 34: Schwellbrunn: Situation 1:2'000 mit Zusammenstellung der Korngrössenanalysen und der Plastizitätsindizes
- Beilage 35: Schwellbrunn: Tabellarische Zusammenstellung der Ergebnisse der Probenanalysen
- Beilage 36: Altstätten: Übersicht Untersuchungsgebiet 1:2'000 mit Phänomenen und Hangmureneignissen 2013
- Beilage 37: Altstätten: Hangneigungskarte 1:2'000
- Beilage 38: Altstätten: Situation 1:2'000 mit Zusammenstellung der Korngrössenanalysen und der Plastizitätsindizes
- Beilage 39: Altstätten: Gefahrenkarte 1: 2'000
- Beilage 40: Altstätten: Tabellarische Zusammenstellung der Ergebnisse der Probenanalysen
- Beilage 41: St. Antönien: Übersicht Untersuchungsgebiet 1:20'000
- Beilage 42: St. Antönien: Hangneigungskarte 1:5'000

- Beilage 43: St. Antönien: Topografie 1:2'000 mit Zusammenstellung der Korngrössenanalysen und der Plastizitätsindizes
- Beilage 44: St. Antönien: Tabellarische Zusammenstellung der Ergebnisse der Probenanalysen

ANHÄNGE

- Anhang 1: Prozessbeeinflussende Faktoren von Hangmuren.
- Anhang 2: Essai de caractérisation *in situ* des formations (Essai de terrain).

ZUSAMMENFASSUNG

Spontane Rutschungen und Hangmuren werden heute oft auf der Basis der AGN-Methodik von 2004 beurteilt. Im Auftrag des BAFU war durch die Projektgruppe der AGN die Frage der Verbesserung der Beurteilungsmethodik zu untersuchen. Dabei stand insbesondere eine vertiefte Feldansprache und -beurteilung im Zentrum der Arbeiten:

- a. Aufzeigen des Einflusses der Geologie/Hydrogeologie auf die Prozesse,
- b. Differenziertere Abgrenzung von Ausbruchgebieten unter Berücksichtigung geologischer Gegebenheiten,
- c. Bessere Beurteilung der Ausbruchhäufigkeit unter Berücksichtigung geologischer Gegebenheiten,
- d. Evaluation einer einfachen Felduntersuchungsmethode in Testgebieten, welche kostengünstig mehr geologische Informationen zur Beurteilung und Parameter zur Modellrechnung möglichen Fließverhaltens liefern kann.

Unter den prozessbeeinflussenden Faktoren (Grunddisposition und spezifische Förderfaktoren) werden die geologischen resp. hydrogeologischen Faktoren oft noch zu wenig gut berücksichtigt, namentlich der geologische Untergrund sowie die hydrogeologische Disposition (Wasserführung und Durchlässigkeitsdiskontinuitäten in Fest- und Lockergestein und die Reaktion der Wasserführung auf lang anhaltende oder Starkniederschläge).

Um die für die Ereignisaufnahmen und die Datenbankerfassung optimalen Grundlagen zu erhalten, wurde das Hangmuren-Erfassungsblatt WSL mit dem Ziel überarbeitet, die (hydro)geologischen Förderfaktoren im Feld besser berücksichtigen zu können.

Die Methode GEOLEP, eine Methode zur Bestimmung der Plastizität von Lockergesteinen, wurde auf ihre Feldtauglichkeit erfolgreich überprüft.

In neun geologisch unterschiedlichen, Testgebieten (OMM, Gurnigel-Flysch, Lias, Helvetikum (Drusberg-Decke, Stad-Mergel), Jura, USM, Nordpenninischer Flysch (Bündnerschiefer) wurden Erhebungen zur Geologie, Hydrogeologie und Plastizität gemacht.

Basierend auf den gemachten Untersuchungen ergeben sich folgende Ergebnisse und Interpretationen:

- a. Die Gebiete sind bezüglich Hangneigungen und Plastizitäten heterogen.
- b. Es ergibt sich eine klare Korrelation von vorhandenen Hangmuren-Anrissgebieten mit der Existenz hydrogeologischer Förderfaktoren wie wasserführende Felsschichten im Untergrund, Stauhorizonte im Felsuntergrund, Hinweise auf wasserführende Lockergesteinsschichten bzw. -rinnen.
- c. Gebietsweise ist eine Korrelation von vorhandenen Hangmuren-Anrissgebieten mit hohen Silt-/Tongehalten und entsprechend hohen Plastizitäten erkennbar. Jedoch gibt es auch Hangmuren-Anrisse bei niedrigen Plastizitäten und geringen Ton-/Siltgehalten.
- d. Es ist *keine* klare Korrelation von vorhandenen Hangmuren-Anrissgebieten mit hohen Plastizitäten festzustellen.

- e. Eine lokale, manuelle Erkundung des geologischen Untergrundes ist ein wichtiges Element bei der Hangmurenbeurteilung (Verwitterungsprozess, glaziale Überprägung). Sie liefert Angaben zu wichtigen Beurteilungsparametern wie Mächtigkeit der mobilisierbaren Schicht, Vorhandensein von Durchlässigkeitsdiskontinuitäten und Lage des Felsuntergrundes.
- f. Jedes geologisch «einheitliche» Gebiet hat seine eigenen Charakteristika und muss individuell beurteilt werden. Die Annahme, dass in geologisch einheitlichen Gebieten die Plastizität mit erhöhter Disposition für Hangmuren korreliert, ist durch eine Erweiterung der Datenmenge zu beweisen.
- g. Die Auswirkung von Korngrösse bzw. Plastizität des mobilisierten Materials auf Auslaufstrecke («run-out») und Fliessgeschwindigkeit einer Hangmure (ableitbarer Modellparameter Kohäsion) ist möglich, bedarf aber detaillierterer Abklärungen.

Für die Praxis lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- a. Vertiefte gebietsspezifische Erhebungen bezüglich Plastizität sind auf der Stufe Gefahrenkarte nicht in jedem Fall notwendig.
- b. Die Methode GEOLEP bietet ein günstiges Verfahren zur Bestimmung der Plastizität.
- c. Die Verbesserung der Modellierung von Hangmurenausbreitung und -energien muss noch vertieft untersucht werden. Dazu könnte die Methode GEOLEP zum Einsatz kommen.

Wegen zu geringer Datendichte bestehen in einzelnen Gebieten noch grössere Unsicherheiten. Der Zusammenhang zwischen Hangmurenentstehung und Plastizität in geologisch homogenen Gebieten muss noch erhärtet werden. Eine Beurteilung bezüglich Reichweiten und Intensitäten von Hangmuren wurde nicht vorgenommen. Der Einfluss der Plastizität auf die mobilisierte Masse, die Geschwindigkeit und die Auslaufstrecke wurde nicht untersucht.

Daraus ergeben sich folgende Empfehlungen

- a. Der Nutzen der Plastizitätsanalyse für die Ableitung von Modellparametern ist vertieft abzuklären. Diese Parameter dienen der Prognose von Ereignisparametern für die Objektschutzdimensionierung mittels RAMMS.
- b. Im Hinblick auf Objektschutz resp. Nutzungsänderungen von Gebieten sind vertiefte gebietsspezifische geologischen Abklärungen notwendig (geologische und hydrogeologische Förderfaktoren, Lage des Felsuntergrundes, Durchlässigkeitsdiskontinuitäten, Korngrösse/Plastizität Lockermaterial, etc.).
- c. Es muss ein systematischer Vergleich der Plastizitäten in einem Gebiet mit/ohne Hangmuren vorgenommen werden.
- d. Es muss eine Praktikermethode (mittels Handsondierungen und ggf. Plastizitätsmessungen) definiert und erprobt werden.
- e. Der Nutzen der erhobenen Parameter für eine Szenarienbildung und darauf basierende objektschutzorientierte retrospektive und prospektive Modellrechnungen (RAMMS) ist zu überprüfen.

1 AUSGANGSLAGE, AUFTRAG

Die Bearbeitung von Naturgefahren ist in der Schweiz weit fortgeschritten. Die Umsetzung in die Raum- resp. Ortsplanung zeigt aber auch Schwachstellen in der bisher angewandten Beurteilungsmethodik. Diese Beurteilungsmethodik laufend zu verbessern ist ein Ziel des BAFU und der verantwortlichen Naturgefahrenfachleute. Die AGN, Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren, ist eine Expertengruppe von Geologen, welche sich schweremwichtig mit einer Verbesserung der Beurteilungsmethodik von Massenbewegungsprozessen beschäftigt.

1.1 Spontane Rutschungen und Hangmuren

Spontane Rutschungen und Hangmuren werden heute oft auf der Basis der AGN-Methodik von 2004 (AGN, 2004) beurteilt. Es ist eine pragmatische Methode, welche zu einer gut nachvollziehbaren Bestimmung der Anrissgebiete führt. Sie wird mittlerweile in vielen Kantonen angewendet.

Die konsequente Anwendung der Methode hat aber auch Mängel oder beantwortet gewisse Fragen nicht:

- Es entstehen grosse Gefahrenflächen (vor allem blauer Gefahrenstufe), obwohl die Ereignisse zeigen, dass innerhalb der Flächen sehr wohl grosse Unterschiede auftreten.
- Die Methode macht nur Aussagen zum Ort von möglichen Ausbrüchen.
- Die Methode macht keine Aussage zu den Intensitäten im Anriss-, Transit- und im Auslaufbereich.
- Die Auslaufbereiche der Prozesse und damit der Prozessraum kann nicht mit der Methode abgegrenzt werden.

1.2 Raumplanerische Umsetzung

Gebiete mit Gefährdung durch spontane Rutschungen und Hangmuren befinden sich oft in Hanglagen, welche für die Bebauung attraktiv sind. Dies führt bei der Umsetzung der Gefahrenkarten in die Ortsplanung zu anspruchsvollen gesellschaftlichen Fragen und Interessenkonflikten:

- Bebauung versus Gefahren und Risiken: Ist eine Bebauung mit Auflagen möglich?
- Art der Bebauung: Eine unter die Gleitflächen fundierte und mit guter Entwässerung kombinierte Bebauung kann die Gefahr eliminieren oder mindestens stark verringern.
- Schutz der Objekte und deren Bewohner: Welche Objektschutzmassnahmen sind erforderlich?
- Versicherungsschutz: Wie sind die verbleibenden Risiken versichert?

Da Raumplanungsverfahren öffentlich sind, besteht bei diesem Schritt für die betroffenen Bürger erstmals ein rechtliches Mittel zur Einsprache gegen die Gefahrenbeurteilung, welche den Gefahrenkarten zugrunde liegt. Dieser wichtige gesellschaftliche Dialogschritt führt von behördenverbindlichen Gefahrenkarten zu

allgemein rechtsgültigen Gefahrenzonen. Hier zeigen sich die Probleme und Interessenkonflikte daher am deutlichsten:

- Der Fachmann möchte eine möglichst exakte und alle möglichen Gefahrenprozesse umfassende Beurteilung abgeben. Es werden Gefahren mit Wiederkehrdauer von bis zu 300 Jahren berücksichtigt, aber unser dokumentierter Wissenstand umfasst bei spontanen Rutschungen und Hangmuren in der Regel nur die letzten 50 bis maximal 100 Jahre. Der Fachmann beurteilt daher im Wissen um seine Verantwortung und die beschränkten Möglichkeiten zur exakten Bestimmung der Intensitäten und der Reichweiten die Hangmurenprozesse in der Regel nicht mit den Mittelwerten seiner Parameterabschätzung, sondern eher mit Werten im oberen Bereich des Möglichen (Umhüllende der Prozessausdehnung).
- Gebäudeversicherungen wollen ihre Risiken möglichst gering halten. Sie haben daher das Anliegen, möglichst wenig Gefahrengebiete einzuzonen und bei Einzonungen die festgelegten Schutzanforderungen für den Objektschutz hoch anzusetzen.
- Der Landeigentümer oder die einzonende Gemeinde möchten eine präzise und scharfe Beurteilung, um die in der Schweiz stark beschränkten Bodenreserven möglichst optimal, sicher und gewinnbringend bebauen zu können. Die Gewinnoptimierung kann zur Verharmlosung der Gefährdung und verantwortungsloser Inkaufnahme zukünftiger Schäden und Risiken führen.
- Der zukünftige Bewohner will absolute Sicherheit und kennt das Wort Eigenverantwortung heute nicht mehr. Im Schadenfall wird meist der Staat (einzonende Behörde oder kantonale Fachstellen) oder der beurteilende Naturgefahrenfachmann angeklagt.

In diesem Spannungsfeld von Verantwortung und Interessen sind Konflikte nicht zu verhindern. Diese werden heute vermehrt nach amerikanischem Vorbild juristisch ausgetragen. Dies ist nicht im Sinne der ursprünglichen Gesetzgebung für den Umgang mit Naturgefahren (Bundesgesetz vom 4. Oktober 1991 über den Wald, WaG, Bundesgesetz über den Wasserbau 1991). Verlierer, sprich Zahler, bei Naturereignissen gibt es immer. Ein Teil der Gesellschaft – Besitzer, Versicherungen, Gemeinden, Kantone, Bund, Hilfsfonds, Naturgefahrenverantwortliche, Planer, Bauherren – zahlen immer. Bei den juristischen Streitigkeiten gibt es nur einen sicheren Gewinner.

Der Risikodialog sollte unter allen Betroffenen und Beteiligten als Dialog, verantwortungsvoll und fachlich korrekt, unter Einbezug der Unsicherheiten geführt werden. Das BAFU ist sich der Problematik im Umgang mit Naturgefahren bewusst. Als Beitrag zur Verbesserung des Umsetzungsprozesses möchte es die Beurteilungsgenauigkeit der Gefährdung durch spontane Rutschungen und Hangmuren verbessern.

1.3 Zielsetzung

Dem Projekt «Verbesserung der Hangmurenbeurteilung» wurden folgende übergeordnete Ziele zu Grunde gelegt:

- Überarbeitung und Ergänzung des Erfassungsblattes WSL zur Aufnahme von Hangmuren, insbesondere bezüglich geologischer Förderfaktoren.
- Überprüfung bestehender Definitionen (spontane Rutschungen, Hangmuren etc.)
- Beurteilung der bisherigen Methodik.
- Verbesserung der Methodik zur Beurteilung von Hangmuren.

1.4 Auftrag

Ein Projektteam von Experten aus der Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren (AGN) der Schweizerischen Fachgruppe für Ingenieurgeologie (SFIG-GSGI) arbeitete einen entsprechenden Vorgehensvorschlag aus.

Ausgangspunkt war die Frage, welche Verbesserungen die Feldansprache für spätere Abschätzungen oder Modellrechnungen liefern kann. Dabei zu berücksichtigen waren die bestehende Methodik der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) sowie eine am GEOLEP der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) neu entwickelte Feldmethode zur Bestimmung der Plastizität von Lockergesteinen.

1.5 Ausgeführte Arbeiten und Projektteam

In einem ersten Schritt wurde einerseits das bestehende Aufnahmeformular für Hangmuren der WSL überarbeitet und ergänzt. Diese Arbeit erfolgte mit dem Ziel, dass bei der Aufnahme von Hangmuren alle geologischen und hydrogeologischen Faktoren so erfasst werden, dass eine spätere Beurteilung möglich ist und für künftige Abschätzungen und Prognosen die notwendigen Beurteilungsgrundlagen vorhanden sind.

Andererseits war in ausgewählten Testgebieten die Methodik der Hangmurenbeurteilung zu überprüfen und dabei die neue Methode des GEOLEP zur Plastizitätsanalyse zu verifizieren.

Basierend auf dem Projektvorschlag vom 5. April 2013 wurde der Dr. Roland Wyss GmbH, stellvertretend für die AGN, am 26. April 2013 der Auftrag: «Datenbank Hangmuren - Phase 1: Verbesserung der Hangmurenbeurteilung» erteilt.

Folgende Experten sind Mitglieder der AGN und haben in der Projektgruppe für diesen Bericht mitgearbeitet:

- Dr. Ueli Gruner, Kellerhals und Haefeli AG, Bern
- Dr. Markus Liniger, Geotest AG, Horw
- Prof. em. Dr. Aurèle Parriaux, EPFL, GEOLEP, Lausanne
- Dr. Roland Wyss, Dr. Roland Wyss GmbH, Frauenfeld
(Leitung und Federführung)

Die Projektgruppe wurde im Verlaufe der Arbeit durch Séverine Boll-Bilgot ergänzt, welche massgeblich an der Erarbeitung der Feldmethode Plastizitätsanalyse beteiligt war.

2 VERWENDETE UNTERLAGEN

- AGN (2004): Gefahreneinstufung Rutschungen i. w. S. – Permanente Rutschungen, spontane Rutschungen und Hangmuren – Entwurf. Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren, Schweizerische Fachgruppe für Ingenieurgeologie SFIG-GSGI; im Auftrag des (ehem.) Bundesamtes für Wasser und Geologie.
- BAFU (2015): Schutz vor Massenbewegungsgefahren – Vollzugshilfe für das Gefahrenmanagement von Rutschungen, Steinschlag und Hangmuren. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug. In Bearbeitung.
- Beaulieu, J. (1979): Identification géotechnique de matériaux argileux naturels par la mesure de leur surface au moyen du bleu de méthylène. Thèse de doctorat de 3ème cycle. Université de Paris-Sud, Orsay.
- Bilgot, S. & Parriaux, A. (2011): Coupling 3D GIS-based modelling and field methods to evaluate landslide hazard predisposition. EGU General Assembly. Vienna: Geophysical Research Abstracts.
- Egli Engineering (2009): Die Einwirkung von Hangmuren auf Gebäude - Sammlung, Sichtung und Auswahl der Fallbeispiele. Internal report, unpublished, Bundesamt für Umwelt.
- Egli Engineering (2011): Die Einwirkung von Hangmuren auf Gebäude - Analyse, Dokumentation und Interpretation von Schadenfällen. Internal report, unpublished, Bundesamt für Umwelt.
- Loup, B., Egli, T., Stucki, M., Bartelt, P., McArdell, B. & Baumann, R. (2012): Impacts pressures of hillslope debris flow. Back calculation and simulation (RAMMS). 12 th Congress INTERPRAEVENT 2012, Conference Proceedings, S. 225–236.
- Pantet, A., Parriaux, A. & Thelin, P. (2007): New method for in situ characterization of loose material for landslide mapping purpose, p. 166–179.
- Parriaux, A., Turberg, P., Lance, J.-M., & Giorgis, D. (2015): Geotypen: Ein neues Konzept, welches die geologische Information für die Raumplanung optimiert. Swiss Bull. angew. Geol. 20/1, p. 47–60.
- Parriaux, A., Turberg, P., Lance, J.-M., & Giorgis, D. (2007): La méthode des géotypes pour le microzonage sismique. Tracés - Bulletin technique de la suisse romande, 15/16, S. 19–24.
- Pouyt, M. (2004): Développement et test d'identification de terrain dans le domaine des instabilités de versant. Travail de diplôme pour l'obtention du titre d'ingénieur géologue, Université de Lausanne.
- Rickli, C., Kamm, S. & Bucher, H. (2005): Flachgründige Rutschungen. Projektbericht Ereignisanalyse Hochwasser 2005 zuhanden des Bundesamtes für Umwelt BAFU. Eidg. Forschungsanstalt WSL Birmensdorf.

3 DEFINITIONEN

3.1 Allgemein

Bei flachgründigen (bis mittelgründigen) spontanen Rutschungen und Hangmuren handelt es sich grob gesagt um zwei Endglieder von Prozessen, welche aber graduell ineinander übergehen können. Sie werden beide bei starken Niederschlägen ausgelöst. Die geologisch-geotechnischen Eigenschaften der Lockergesteinsschichten und hohe Porenwasserdrücke in den Lockergesteinen haben dabei entscheidenden Einfluss bei der Prozessauslösung. Im Gegensatz zur strengen Definition der spontanen Rutschungen von 2004 als rasche Aktivierung von Teilen von permanenten Rutschungen dehnen wir den Begriff aus. Spontane Rutschungen können sich auch in normalerweise stabilen Gebieten ereignen.

3.2 Spontane Rutschungen

Spontane, meist flachgründige Rutschungen können sich aus Rutschgebieten, in stabilen Lockergesteinshängen oder als Hautrutschung der Verwitterungs- und Humusschicht auf Fels ereignen.

Spontane Rutschungen sind gekennzeichnet durch eine basale Scherfläche. Es kommt im Untergrund meist durch erhöhte Porenwasserdrücke zu einem Scherbruch. Auf der sich bildenden Verschiebungsfläche gleitet die Rutschmasse mehr oder weniger kompakt als zusammenhängende Masse ab und überfährt das Vorland. Die Bewegungen sind eher langsam. Dabei kommt es an der Front zu Aufstauchungen. Bei hohem Wassergehalt oder Zutritt von Fremdwasser ist aber auch ein hangmurenartiger, schnellerer Abgang möglich. Im englischen Sprachgebrauch unterscheidet man auch zwischen «first move» (Initialprozess) und «second move» (Ausbreitungsprozess).

3.3 Hangmuren

Hangmuren entstehen durch hohe Porenwasserdrücke im Lockergesteinsuntergrund. Bei Überdruck kommt es zu einem Grundbruch und einem meist turbulenten Abgang des Lockermaterials. (In Österreich wird auch der Begriff «Hangwasserexplosion» verwendet.) Meist ist der austretende Wasserschwall aber nicht deutlich beobachtbar. Hangmuren ereignen sich oft in geschichteten Lockergesteinseinheiten mit besser durchlässigen Einheiten zwischen schlechter durchlässigen Schichten.

Das mobilisierte Material bewegt sich weitgehend aufgelöst, als wassergesättigte oder übersättigte turbulente Masse mit Lockermaterial, Boden und Bewuchs. Hangmuren können hohe Geschwindigkeiten erreichen und dadurch eine grosse Ausdehnung und zerstörerische Wirkung haben.

4 GRUNDSÄTZE, BISHERIGE METHODIK, HANDLUNGSBEDARF

4.1 Grundsätze

Grundsätzlich basieren die Gefahrenbeurteilungen in der Schweiz auf drei Standbeinen:

- Historische Ereignisse, welche im sogenannten **Ereigniskataster** zusammengefasst werden.
- Geländebeobachtungen mit Kartierung der prozessspezifischen Spuren im Gelände, welche in der **Karte der Phänomene** dargestellt werden.
- **Berechnungen** mit prozessspezifischen Berechnungsmodellen oder empirischen Schätzmethoden.

Aufgrund dieser drei Hilfsmittel müssen Aussagen zu Prozesshäufigkeiten und Prozessintensitäten gemacht werden. Die Einstufung in die Gefahrenstufen (rot, blau, gelb, gelbweiss, weiss) erfolgt nach den schweizweit gültigen Vorgaben, basierend auf dem 9-er Diagramm (mit Spezifizierungen für gewisse Prozesse).

Einer der am schwierigsten zu beurteilenden Prozesse sind spontane Rutschungen und Hangmuren:

Viele spontane Rutschungen und Hangmuren ereignen sich im Landwirtschaftsland ohne grössere Schäden zu verursachen. Sie sind daher oft nicht dokumentiert und somit im Ereigniskataster nicht erfasst.

Die Flurschäden werden oft rasch wieder in Stand gestellt und die Spuren damit verwischt. Die Karte der Phänomene erfasst daher nie alle Gebiete mit früheren Hangmuren-Ereignissen.

Die Berechnungsmodelle für spontane Rutschungen und Hangmuren sind nicht sehr weit entwickelt. Zwar gibt es einerseits gängige geotechnische Modelle, welche die Entstehung von Scherbrüchen berechnen bzw. Aussagen zum Fliessverhalten und zur Ausbreitung von spontanen Rutschungen und Hangmuren liefern können; die Resultate sind aber oft nicht plausibel bzw. nicht nachvollziehbar und stimmen mit tatsächlichen Ereignissen häufig nicht überein. Andererseits bestehen heute auch physikalische Modelle, welche die Ausbreitung und das Fliessverhalten von Hangmuren nachrechnen können. Aber auch hier bestehen Unschärfen, weil die relevanten Eingabeparameter im Gelände in der Regel nur schwer zu bestimmen sind.

4.2 Wichtige prozessbeeinflussende Faktoren

4.2.1 Allgemeines

Die Entstehung von Hangmuren oder spontanen Rutschungen wird im Wesentlichen durch nachfolgende Faktoren begünstigt:

- Durch eine Grunddisposition, welche über die Zeit mehr oder weniger konstant bleibt: Dazu gehören
 - die topografischen Verhältnisse (Hangneigung)
 - die geologisch/hydrogeologischen und geotechnischen Verhältnisse.

- Durch eine variable Disposition des Wassergehaltes im Untergrund (Ausgangsfeuchtigkeit («Vorfeuchte»), Porenwassergehalt, Porenwasserdruck).

Bei der **Grunddisposition** sind die Hangneigung und die physikalischen Eigenschaften des vorhandenen Lockergesteins die massgebenden, prozessbeeinflussenden Faktoren. Für vergleichbare geologische Einheiten (z. B. Geotypen, s. Parriaux et al. 2015) lässt sich empirisch mit Ereignissen, Ereignisspuren und allenfalls ergänzt mit geotechnischen Berechnungen eine kritische Hangneigung bestimmen (statistischer Wert einer kritischen Hangneigung; vgl. Abschnitt 4.2.2).

Daneben beeinflussen auch spezifische Förderfaktoren die Grunddisposition (vgl. Abschnitt 4.2.3). Es sind dies:

- Lokale topografische Verhältnisse und hydrologische Verhältnisse.
- Spezielle lokale geologische und hydrogeologische Verhältnisse.

Bei der **variablen Disposition** bildet der Wassergehalt im Untergrund den massgebenden, prozessbeeinflussenden Faktor. Diese Disposition wird durch eine Vielzahl von möglichen spezifischen Förderfaktoren bestimmt, auf welche im Abschnitt 4.2.3 im Detail eingegangen wird.

Als eigentlicher **Auslöser** wirken letztlich Starkniederschläge. Zur Rutschung oder Hangmure kommt es nämlich dann, wenn die variable Disposition und die auslösenden Niederschläge zusammen den kritischen Wert für einen Scherbruch oder einen Grundbruch überschreiten.

Vereinfachend kann gesagt werden, dass die Entstehung einer Hangmure im Wesentlichen durch die Hangneigung, die geologischen Verhältnisse, durch das im Untergrund vorhandene Wasser sowie den Niederschlag bestimmt wird.

Wichtige prozessbeeinflussende Faktoren sind (s. Abschnitte 4.2.2 und 4.2.3):

- Hangneigung,
- Spezifische Förderfaktoren.

4.2.2 Die kritische Hangneigung

Mittels einer statistischen Hangneigungsanalyse von dokumentierten Ereignissen eines Untersuchungsgebietes mit vergleichbarer Lockergesteinsbedeckung (Kataster, Spuren im Gelände) kann eine kritische Hangneigung bestimmt werden. Dabei wird ein Mittelwert errechnet (i_{quer}), abzüglich der Standardabweichung (i_s); dies ergibt den so genannten *Schwellenwert* (kritische Hangneigung $i = i_{\text{quer}} - i_s$). Bei geringer Datenmenge können auch Werte aus benachbarten Gebieten mit gleichen geologischen Verhältnissen (z. B. gleiche Geotypen) mitberücksichtigt werden.

Die Ereignisauswertung kann mit allfällig weiteren stummen Zeugen in den zu bearbeitenden Gebieten ergänzt werden. Im Weiteren sollen die Katastereinträge im Detail analysiert werden: Gibt es z. B. Hinweise bezüglich Jährlichkeiten oder gibt es Hinweise über die Intensitäten?

4.2.3 Die spezifischen Förderfaktoren

Für die Bestimmung und Eruierung dieser sehr verschiedenartigen spezifischen Faktoren wurde eine Zusammenstellung im Sinne einer *Checkliste* gemacht; sie ist

in *Anhang 1* zu finden. Die Liste richtet sich generell nach der AGN-Methode 2004 und ist mit dem im Rahmen dieses Auftrages zusammen mit der WSL überarbeitete Erfassungsformular für Hangmurenereignisse abgestimmt.

Die Checkliste dient als Grundlage für die Prozessansprache, welche bei jeder Feldaufnahme für eine Gefahrenkartierung gemacht wird. Für eine Ereignisdokumentation empfehlen wir das ausführlichere Erfassungsblatt der WSL. Die Förderfaktoren werden grundsätzlich in Bezug auf folgende vier verschiedene Hauptaspekte beurteilt:

- 1) Topografisch/hydrologische Faktoren (z. B. spezielle Geländeformen, Vernässungen etc.)
- 2) Geologische und hydrogeologische Faktoren (z. B. Lage eines Wasserstauers, Auftreten von wasserführenden Schichten im Untergrund etc.)
- 3) Biologische Faktoren (z. B. Wald, Auftreten von Viehgangeln etc.)
- 4) Menschliche Faktoren (z. B. Strassenentwässerung, alte Drainagen etc.).

Zu allen vier Hauptaspekten sind auf der Checkliste in *Anhang 1* Unteraspekte aufgeführt, wobei jeweils verschiedene Fragestellungen formuliert und dazu auch mögliche Antworten aufgeführt sind.

4.3 Ungenügende Berücksichtigung geologischer Faktoren

Die geologischen Faktoren sind in den heutigen Beurteilungen von spontanen Rutschungen und Hangmuren vielfach zu wenig gut berücksichtigt. Oft sind diese auch nicht bekannt.

Fehlen Ereignisse, so ist die Bestimmung der Häufigkeiten mit der bestehenden Methode möglich. Die resultierenden Flächen sind aber oft zu gross oder undifferenziert. Ohne Ereignisse oder Sondierungen können die Intensitäten der Prozesse nur geschätzt werden.

4.4 Bisherige Methodik (AGN 2004)

Die Beurteilung erfolgt über einen Hangneigungsansatz mit einem Bewertungs-Flussdiagramm, welches zwei der drei Instrumente der Gefahrenkartenerstellung (Ereigniskataster und Karte der Phänomene mit Spuren im Gelände) integriert. Zudem enthält es auch eine gutachterliche Komponente. Der Gefahrenbeurteiler kann durch die Bewertung von geologischen und menschlichen Förderfaktoren die Häufigkeit von Ereignissen unterschiedlich gewichten. Die geologischen Förderfaktoren werden in der Beurteilung aber oft, obwohl vorhanden oder mit vorhandenen Daten bestimmbar, ungenügend berücksichtigt, was die Qualität der Beurteilung deutlich verschlechtert.

Die Methodik AGN sagt, wie in *Abschnitt 1.1* erwähnt, nichts zu Intensitäten und zur Ausdehnung der Prozessräume. Die Beurteilung dieser Grössen basiert meist auf Analogieschlüssen zu historischen Ereignissen, aus allenfalls in der Umgebung bekannten Baugruben oder Sondieraufschlüssen und auf geologisch abgestützten Schätzungen der Mächtigkeit der mobilisierbaren Schicht. Schätzungen müssen genügen, weil für die Erstellung der Gefahrenkarten keine zusätzlichen Sondierungen durchgeführt werden. In gewissen Fällen werden auch Modellrechnungen

durchgeführt, wobei die Bestimmung der relevanten Eingabeparameter oft mit grossen Unsicherheiten behaftet ist.

In den nachfolgenden Kapiteln wird aufgezeigt, wie die geologische Information für die Beurteilung von spontanen Rutschungen und Hangmuren mit einer einfachen, kostengünstigen Methode verbessert werden kann.

4.5 Handlungsbedarf

4.5.1 Berücksichtigung der Geologie und der Hydrogeologie zur Gefahrenbeurteilung

In der Karte der Phänomene werden nur Spuren von Prozessen dokumentiert. Für wirklich aussagekräftige Beurteilungen müssen geologisch relevante Informationen zwingend berücksichtigt werden.

- Der geologische Untergrund beeinflusst entscheidend die Entstehung von spontanen Rutschungen und Hangmuren auf verschiedene Arten. Hänge mit mergeligem Untergrund (z. B. Palfris Mergel, Gisigermergel, Opalinuston etc.) sind extrem rutschanfällig. Hänge mit unterschiedlich durchlässigem Aufbau sind deutlich rutschanfalliger als homogen aufgebaute Hänge.
- Die Ereignisse von 2005 zeigten den starken Einfluss von Karstwasser auf die Entstehung von Hangmuren. Hydrogeologische Überlegungen gehören daher in Gebieten mit Karstgesteinen im Untergrund zu jeder seriösen Gefahrenbeurteilung.

4.5.2 Geologische Förderfaktoren

Die verbesserte Erfassung der geologischen Förderfaktoren (s. auch *Anhang 1*) ist Teil dieses Auftrags. Zusammen mit der WSL wurde unabhängig vom vorliegenden Bericht das Erfassungsblatt für Hangmurenereignisse angepasst und vor allem im Hinblick auf geologische Förderfaktoren verbessert.

Im Rahmen dieses Auftrages wurden Tests in Pilotgebieten gemacht. Getestet wurden einfache, kostengünstige Felduntersuchungen mit der GEOLEP-Methode der EPFL Lausanne. Diese Tests wurden mit Handsondierungen ausgeführt. Die Felduntersuchungen sollen zu einer Verbesserung der Aussagen über den geologischen Untergrund (Mächtigkeit der mobilisierbaren Schicht, Heterogenität und Aufbau der Lockergesteinsschichten) beitragen und damit zu einer besseren Aussage der Disposition und der zu erwartenden Intensitäten führen. Die Daten dieser Untersuchungen werden in den nachfolgenden Kapiteln erläutert.

4.5.3 Verbesserung der Zuordnung von Jährlichkeiten

Die Methode AGN 2004 hat zu einer Art checklistenartigen und damit nachvollziehbaren Beurteilung der Gefahr von spontanen Rutschungen und Hangmuren geführt (gewisse Bearbeiter geben solche Checklisten standardmässig ab, siehe auch Abschnitt 4.2). In Gebieten mit grossen Ereignissen im Bereich von 100-jährlichen bis 300-jährlichen Wiederkehrperioden wie z. B. 1999, 2005, 2014, führt die unreflektierte Anwendung von Checklisten zwangsläufig aber zu einer Überbewertung der Gefährdung durch spontane Rutschungen und Hangmuren. Die geologischen Förderfaktoren müssen sich bei solchen Ereignissen zwingend manifestiert haben, sonst sind sie eben nicht vorhanden. Geht man in solchen Fällen mit der

Methode AGN vor, so werden die Ereignishäufigkeiten in der Regel überbewertet. Das BAFU hat diesem Umstand in der Überarbeitung der Vollzugshilfe «Schutz vor Massenbewegungen» (BAFU 2015, in Bearbeitung) Rechnung getragen. Es hat ein angepasstes Flussdiagramm entwickelt, welches bei Vorhandensein von gut dokumentierten Ereignissen das Vorgehen aufzeigt: Die Einstufung der Ereignishäufigkeit erfolgt dabei über die Beurteilung und Einstufung der dokumentierten Grossereignisse. Bei diesem Vorgehen besteht die Herausforderung darin, den grossen Niederschlagsereignissen eine Jährlichkeit für die Wassersättigung im Boden zuzuordnen. Am ehesten kann dies über die Statistiken der Seestände oder der Abflüsse in grossen Vorflutern erfolgen, da die Böden auch eher langsam auf Niederschlag reagieren, vergleichbar mit der Wasserführung in den Seen und grossen Vorflutern in den Talböden.

4.5.4 Verbesserung der Bestimmung der Reichweiten

Die Bestimmung der Reichweiten und Intensitäten von Hangmuren ist schwierig. Eine quantitativ verlässliche Erfassung dieses Prozesses ist aber für die Erstellung von Gefahrenkarten und die Planung von Schutzmassnahmen (Objektschutz) zwingend nötig. Bis heute basiert die Bestimmung der Intensitäten von Hangmuren praktisch nur auf Analogieschlüssen von Ereignissen im Ereigniskataster und auf Schätzwerten. Mit verschiedenen Modellen wird seit längerem versucht, den Prozess Hangmure quantitativ besser in den Griff zu bekommen und die Energien, vor allem die Anpralldrücke von Hangmuren, exakter bestimmen zu können. Das BAFU beobachtet unter anderem auch das von der WSL entwickelte Modell RAMMS. Im Rahmen des Projektes Hangmuren des BAFU wurden in jüngster Zeit 2 Studien durchgeführt (vgl. auch Loup et al. 2012):

- Die Einwirkung von Hangmuren auf Gebäude, Fallbeispiele (Egli Engineering AG, 2009)
- Die Einwirkung von Hangmuren auf Gebäude, Analyse (Egli Engineering AG, 2011)

Die bisher ausgeführten Forschungen zeigen aber deutlich, dass die Berechnungen sehr sensitiv auf die beiden in die Berechnung einflussenden Parameter μ (Coulomb Koeffizient) und ξ (turbulenter Fliesskoeffizient) sind. Die Bestimmung dieser beiden Koeffizienten ist aber sehr schwierig und auch bei der Nachrechnung von Hangmurenereignissen nicht mit absoluter Sicherheit erfassbar, so dass die Berechnungen je nach angewandtem Berechnungsansatz auch innerhalb des Modells RAMMS stark streuen (Egli Engineering, 2011). Das BAFU verfolgt daher weiterhin auch die Entwicklung anderer Modelle und Berechnungsansätze.

Allenfalls lassen sich die Parameter mit den einfachen Felduntersuchungen besser eingrenzen. Zu dieser Problematik kann diese Studie aber noch keine Aussagen machen.

4.6 Ziel für die Feldstudie

Das Ziel der vorliegenden Studie ist eine Verbesserung der Methode bezüglich der Aussagekraft zu Ausbruchgebieten, Ausbruchhäufigkeiten und Intensitäten der Prozesse spontane Rutschung und Hangmure:

- Aufzeigen des Einflusses der Geologie/Hydrogeologie auf die Prozesse.
- Verbesserung der Methodik zur Beurteilung und Differenzierung der Ausbruchgebiete von spontanen Rutschungen und Hangmuren unter Berücksichtigung der geologischen Gegebenheiten.
- Verbesserung der Methodik zur Beurteilung der Häufigkeit der Ausbrüche unter Berücksichtigung der geologischen Förderfaktoren.
- Test einer einfachen Felduntersuchungsmethode in Testgebieten, welche kostengünstig mehr geologische Informationen zur Beurteilung liefern kann. Damit sollen neben den oben aufgeführten Punkten auch eine Verbesserung der Aussagen zur Mächtigkeit der mobilisierbaren Schicht und allenfalls Aussagen zum möglichen Fließverhalten resultieren.

5 AUSGEFÜHRTE ARBEITEN

5.1 Überarbeitung Erfassungsblatt WSL

Für Aufnahme der flachgründigen Rutschungen und Hangmuren der Unwetter 1997 in Sachseln durch die WSL wurde ein entsprechendes Aufnahmeformular entwickelt und erprobt. Im Verlaufe weiterer Ereignisse und deren Aufnahmen (Napf und Appenzell, Unwetter 2002; Napf, Entlebuch und St. Antönien, Unwetter 2005), wurde das Formular weiterentwickelt. Die Befunde dieser Aufnahmen hat die WSL in separaten Datenbanken erfasst.

Im Hinblick auf ein Zusammenführen der verschiedenen Datenbanken hat die WSL die bestehenden Formulare zusammengeführt, systematisiert und vereinheitlicht. Um eine genügende Berücksichtigung der geologischen und hydrogeologischen Faktoren sicher zu stellen, wurde durch das BAFU eine Zusammenarbeit zwischen WSL und AGN initiiert.

Für die Bearbeitung dieser Fragestellungen fanden insgesamt 9 Arbeitsgruppensitzungen statt, davon 3 Sitzungen gemeinsam mit der WSL. Dabei wurden die Fragen der Berücksichtigung geologischer und hydrogeologischer Faktoren intensiv diskutiert. In einem iterativen Prozess konnte so ein Vorschlag erarbeitet werden, welcher, nach einer Erprobungsphase, für die weitere Aufnahme von Rutschungen und Hangmuren verwendet werden kann.

Wichtigste geologische und hydrogeologische Parameter sind:

- Geologisch-tektonische Lage des Gebietes
- Felduntergrund/Festgestein: Art, Struktur, Textur, Wechsellagerung, Orientierung
- Mächtigkeit, Art und Aufbau der Lockergesteine (ober- und unterhalb der Gleitfläche)
- Hydrogeologische Disposition: Wasserführung in Fest- und Lockergestein, Durchlässigkeitsdiskontinuitäten

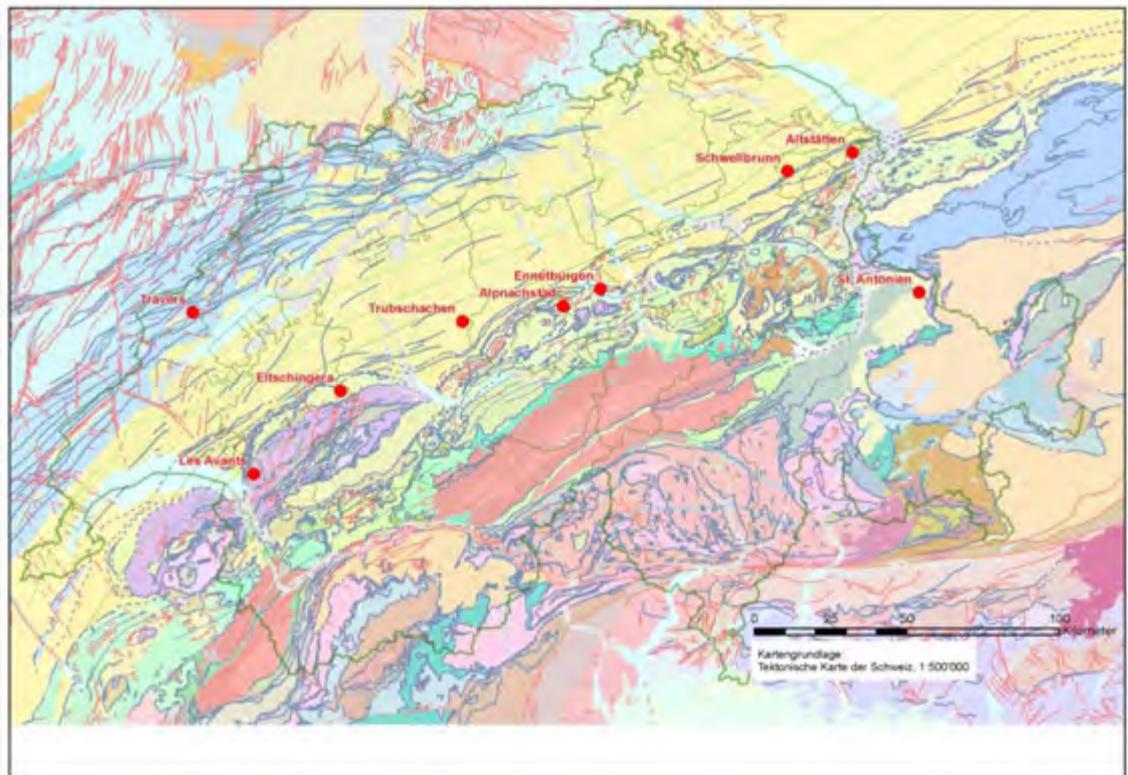
Neben der Bearbeitung des Aufnahmeformulars wurde auch der dazugehörige Kommentar angepasst und ergänzt.

5.2 Felduntersuchungen

Es wurden in 9 Gebieten vertiefte Untersuchungen durchgeführt (*Tabelle 1* und *Figur 1*). Kriterien für die Auswahl eines Gebietes waren: Möglichst aktuelle Hangmurenereignisse, Verfügbarkeit von Daten und unterschiedliche geologisch-hydrogeologische Disposition. Die Methode GEOLEP (vgl. *Kapitel 6*) wurde in gewissen Gebieten eher bezüglich flächiger Aussage, bezüglich Grundbeurteilung und Verbesserung der Ausbruchprognose getestet. In anderen Gebieten wurde in sehr begrenztem lokalem Rahmen versucht, eine Erklärung zu finden, wieso im gleichen Hang an einer Stelle eine Hangmure ausbrach, daneben aber nicht.

Gebiet	Geologie/ Tektonik	Bearbeiter	Gefahren- karte	Methoden- test
Trubschachen	Mittelländische, flachliegende Molasse, OMM	Kellerhals+Haefeli AG	Grösster Teil nein	Flächig
Eltschingera	Préalpes, Gurnigel-Flysch	Kellerhals+Haefeli AG, S. Boll-Bilgot	Nein (Gefahren- hinweiskarte Rutschungen und Hang- muren)	Flächig
Alpnachstad	Helvetikum, Drusberg- Decke, Stad-Mergel	Geotest AG	Ja	Lokal, Detailtest
Ennetbürgen	Helvetikum, Drusberg- Decke, Stad-Mergel	Geotest AG, z. T. A. Parriaux, S. Boll-Bilgot	Ja	Lokal, Detailtest
Les Avants	Préalpes: Lias	A. Parriaux, S. Boll-Bilgot	Ja	Flächig
Travers	Jura	A. Parriaux, S. Boll-Bilgot	Ja	Flächig
Schwellbrunn	Subalpine Mo- lasse, USM	Dr. Roland Wyss GmbH, S. Boll-Bilgot	Nein	Flächig
Altstätten	Subalpine Mo- lasse, USM	Dr. Roland Wyss GmbH	Ja	Lokal, Detailtest
St. Antönien	Nordpennini- scher Flysch, Bündnerschiefer	WSL, Dr. Roland Wyss GmbH	Nein	Lokal, Detailtest

Tabelle 1: Untersuchungsgebiete.



Figur 1: Lage der untersuchten Gebiete.

Neben geologischen Feldaufnahmen wurden in allen Gebieten Plastizitätsanalysen durchgeführt. Die Beschreibung und Interpretation erfolgte unter Verwendung der zur Verfügung stehenden Geodaten (DTM und dessen Derivate, Orthofotos, Luftbilder, Bodendaten etc.).

Die Resultate der Untersuchungen sind in Kapitel 0 beschrieben.

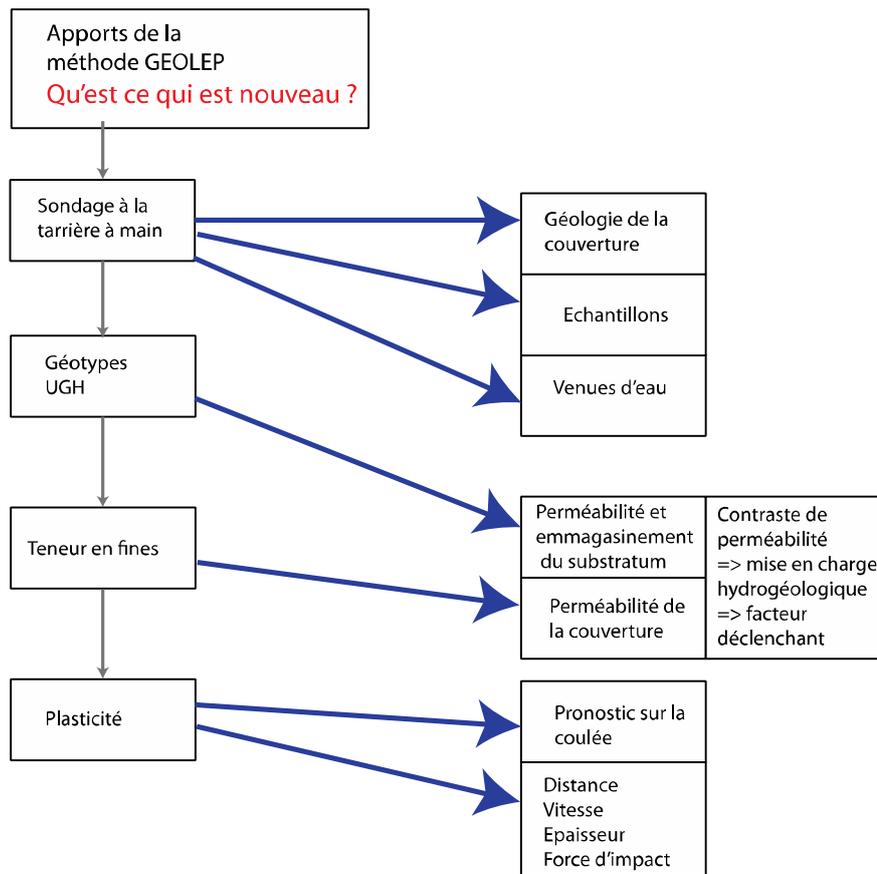
6 METHODE GEOLEP

6.1 Introduction

Un des buts de ce travail est de tester l'introduction de la méthode GEOLEP en prolongement de la méthode AGN. Depuis de nombreuses années, le Laboratoire de géologie de l'ingénieur et de l'environnement de l'EPFL (GEOLEP) a développé des méthodes facilitant l'usage de la géologie dans le cadre de l'aménagement du territoire. C'est déjà l'introduction de la notion de «géotypes» qui a permis au Canton de Vaud de rédiger une carte géologique agrégée et homogène sur la vingtaine de feuilles au 1/25'000 concernées (Parriaux et al. 2007; Parriaux et al. 2015). Par une traduction en géotypes également des données de sondage, il a été possible de construire des modèles géologiques 3D en géotypes de plusieurs feuilles. Cette base géologique a été utilisée pour différentes applications comme le microzonage sismique, la protection des eaux, la géothermie à basse enthalpie, le potentiel d'infiltration dans les plans généraux d'évacuation des eaux et la gestion des ressources du sous-sol urbain (méthodologie DEEP CITY, Parriaux et al. 2010).

Dans le domaine des dangers naturels, les géotypes ont été utilisés dans l'optique de définir dans le territoire des unités géologiques homogènes (UGH). Chaque unité géologique homogène est caractérisée par des propriétés géologiques qui sont utiles pour évaluer les risques d'instabilité des versants, notamment les glissements de terrain et les coulées. Ces propriétés sont déterminées par le géologue sur le terrain de manière simple et bon marché, en même temps qu'il cartographie les phénomènes.

La méthode GEOLEP pour les glissements superficiels et les coulées comprend les étapes suivantes (Figur 2).



Figur 2: Logigramme de la méthode GEOLEP.

6.1.1 Sondages à la tarière à main

Les sondages à la tarière à main permettent facilement d'accéder à la nature géologique de la couverture meuble sur un mètre environ, de déterminer une stratigraphie et son épaisseur et de prendre des échantillons dans de bonnes conditions. Le nombre de sondages dépend de la complexité de la zone à étudier et bien entendu de l'enjeu.

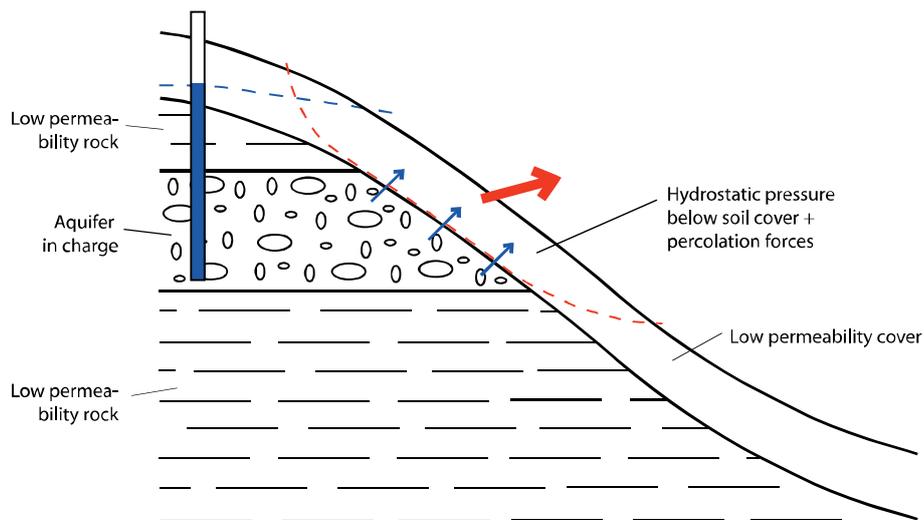
6.1.2 Identification des géotypes et des unités géologiques homogènes

Tant pour le substratum que pour la couverture, on cartographie la zone en termes de géotypes. Si nécessaire, on définit au sein d'un géotypes différentes unités géologiques homogènes, notamment sur la base des échantillons collectés. Le géotype du substratum permet d'attribuer un ordre de grandeur de sa perméabilité ainsi qu'une estimation des volumes d'eau qui sont susceptibles d'alimenter une coulée en cas de rupture de la couverture.

6.1.3 Essais in situ

Une technique a été recherchée pour déterminer sur le terrain, de manière simple, deux facteurs importants dans la dynamique des glissements et des coulées : la teneur en fines du matériel et sa plasticité. Suite aux travaux de Pouyt, 2004, (Pantet et al. 2007), elle a été finalement mise au point et optimisée (Bilgot & Parriaux 2009a). La technique analytique est décrite en détail en *annexe*.

La teneur en fines permet d'estimer la perméabilité de la couverture. Avec la perméabilité du substratum, on peut calculer le contraste de perméabilité et en déduire le risque de mise en charge hydrogéologique sous la couverture (*Figur 3*), facteur déclenchant prépondérant dans ce genre de phénomène.



Figur 3: Effet du contraste de perméabilité entre le substratum et la couverture.

La plasticité donne des indications sur le mode de rupture et de fluage du glissement ou de la coulée. Une haute plasticité caractérisera une rupture pas trop brutale, une vitesse modérée ainsi qu'une extension modérée également. Au contraire, une plasticité faible donnera lieu à des ruptures soudaines, avec des grandes vitesses de propagation et une extension importante vers l'aval, ceci d'autant plus si le coefficient d'emmagasinement du substratum est élevé.

Les deux grandeurs caractérisées in situ peuvent être interprétées qualitativement. On peut aussi les introduire dans des modèles hydrogéologiques et géotechniques.

Le choix de la densité d'échantillonnage pour l'obtention de ces valeurs joue ainsi un rôle prépondérant: si l'on peut se contenter de ne prélever que quelques échantillons dans une zone visiblement homogène, il est utile en revanche de procéder à de nouveaux tests en cas de changement visible ou supposé des propriétés des formations : le nombre de tests à effectuer ne sera donc pas fonction de la taille de la zone à investiguer mais plutôt de sa variabilité.

6.1.4 Sources d'erreur

Les résultats obtenus suite aux essais de caractérisation *in situ* peuvent présenter des erreurs dues aux propriétés des matériaux échantillonnés:

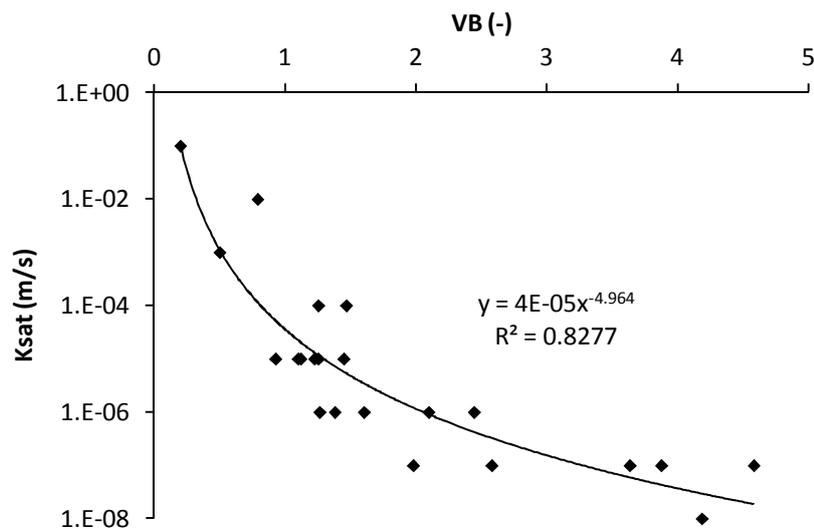
- Dans le cas d'échantillons riches en argiles et présentant une faible teneur en eau, il est possible que des particules fines restent collées sur des sables ou agrégées entre elles; les fractions granulométriques les plus grossières sont alors surestimées aux dépens de la fraction des limons fins et argiles; les échantillons testés présentent alors des IP non négligeables malgré des teneurs en argiles nulles; cela peut être évité en incorporant suffisamment d'eau à l'échantillon ainsi qu'en agitant longuement et fortement le tube;
- Dans le cas d'échantillons riches en matière organique, celle-ci aura tendance à adsorber le bleu de méthylène: la valeur de bleu et donc la limite de liquidité et l'indice de plasticité sont ainsi artificiellement surestimés; on peut s'attendre à ce cas de figure lorsque l'on observe des éléments flottants à la surface du liquide dans les tubes; cela peut être évité en prélevant les échantillons suffisamment en profondeur (au-delà de 50 cm) et en enlevant le plus d'éléments organiques possibles lors du tamisage.

6.2 Application à l'analyse des coulées de boue

6.2.1 Evaluation de la prédisposition aux coulées de boue

L'un des facteurs pouvant aggraver la prédisposition aux coulées de boue est la présence d'un contraste de perméabilité entre le substratum et les formations superficielles. C'est en particulier le cas lorsque des calcaires karstifiés sont recouverts d'une faible épaisseur de moraine de fond: lors d'une forte mise en charge du karst, l'eau reste bloquée sous la couverture; si la pression est suffisamment élevée, la libération brutale de l'eau peut entraîner une coulée de boue.

Des essais d'infiltration de type Porchet ont permis de mettre en évidence une corrélation entre la conductivité hydraulique à saturation des formations meubles et leur valeur de bleu (*Figur 4*, Bilgot & Parriaux 2009a). En permettant d'identifier les zones présentant des perméabilités basses en surface et en ayant une connaissance suffisante des propriétés hydrogéologiques du substratum rocheux, on peut mettre en évidence des zones plus sensibles aux phénomènes de coulées de boue.

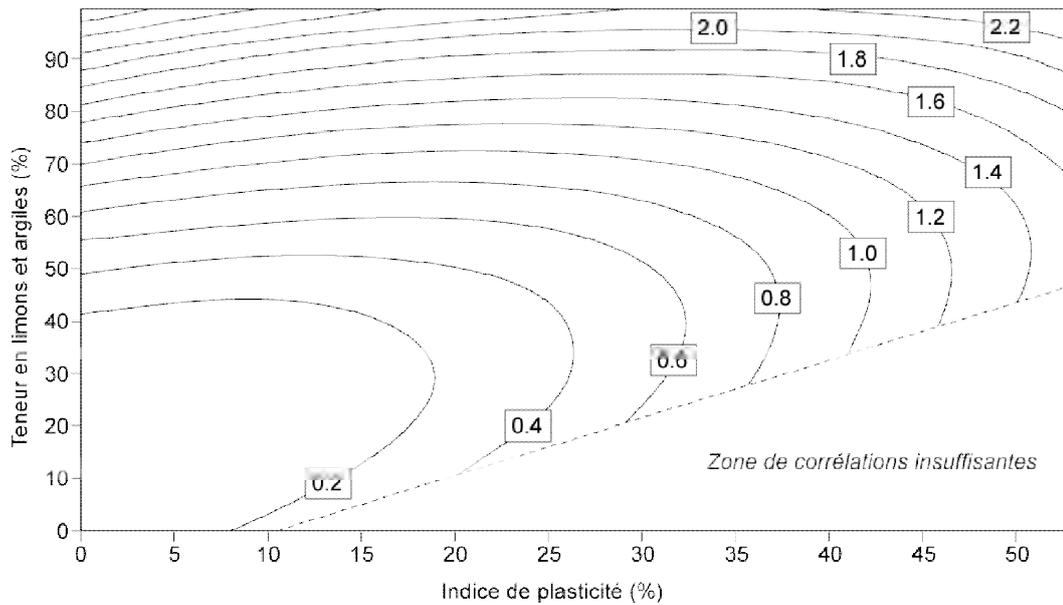


Figur 4: Relation entre la conductivité hydraulique à saturation et la valeur de bleu de méthylène des formations superficielles meubles (Bilgot & Parriaux 2009a).

6.2.2 Modélisation de l'intensité des coulées de boue

L'intensité des coulées de boue, et en particulier son énergie et l'épaisseur des dépôts, peuvent être évalués grâce à des logiciels de modélisation pour lesquels on doit connaître les propriétés des matériaux, en particulier leur viscosité et leur cohésion. Ces paramètres peuvent être déterminés en laboratoire, ou encore en procédant à une calibration durant la modélisation, ce procédé itératif pouvant être long à effectuer.

La connaissance de la valeur de bleu de méthylène et de la granulométrie peut nous permettre de faciliter ce processus, dans la mesure où il existe une corrélation entre celles-ci et la cohésion effective des matériaux testés (Figur 5, d'après Bilgot & Parriaux 2011, modifié).



Figur 5: Cohésion effective (kPa) à saturation en fonction de la granulométrie et de l'indice de plasticité des formations superficielles meubles (d'après Bilgot & Parriaux 2011, modifié).

Pour les matériaux de cohésion non nulle, ce qui concerne la plupart des formations contenant une fraction même minime d'argile, ce paramètre joue un rôle très important dans la modélisation: des tests effectués avec le logiciel RAMMS sur les sites des Avants (*Table 2*) et d'Eltschingera (*Table 3*) ont en effet montré que les énergies maximales calculées devenaient peu sensibles aux variations de μ et de ξ à partir du moment où l'on tenait compte d'une cohésion non nulle en accord avec les conditions du terrain (0.3 kPa pour les Avants, 1.7 kPa pour Eltschingera). Par ailleurs, des variations de cohésion au sein d'un même ordre de grandeur n'avaient pas non plus d'impact important dans le calcul des énergies maximales. Ces tendances semblent se vérifier d'autant plus que les cohésions utilisées sont élevées.

	c' (kPa)	μ (-)	ξ (m/s ²)	v max (m/s)	h max (m)	P max (kPa)	Erreur relative (P max)
Référence	0.3	0.6	400	2.0	0.5	8.4	0%
En faisant varier ξ	0.3	0.6	200	2.0	0.5	8.6	2%
	0.3	0.6	600	2.0	0.5	8.1	4%
En faisant varier μ	0.3	0.5	400	2.4	0.5	9.2	10%
	0.3	0.7	400	1.9	0.5	7.6	10%
En faisant varier c'	0.2	0.6	200	2.0	0.5	8.5	1%
	0.2	0.6	400	2.0	0.5	8.9	6%
	0.2	0.6	600	2.0	0.5	8.8	5%
	0.4	0.6	200	2.0	0.5	8.9	6%
	0.4	0.6	400	2.0	0.5	8.8	5%
	0.4	0.6	600	2.0	0.5	9.2	10%
Avec c' = 0 kPa							
En faisant varier ξ	0	0.6	200	2.0	0.5	6.8	19%
	0	0.6	400	2.0	0.5	9.4	12%
	0	0.6	600	2.0	0.5	10.4	24%
En faisant varier μ	0	0.5	600	2.3	0.5	11.7	39%
	0	0.7	600	1.9	0.5	6.7	20%

Tabelle 2: Aperçu des modélisations effectuées sur le site des Avants.

	c' (kPa)	μ (-)	ξ (m/s ²)	v max (m/s)	h max (m)	P max (kPa)	Erreur relative (P max)
Référence	1.7	0.7	400	2.4	0.9	11.6	0%
En faisant varier ξ	1.7	0.7	200	2.4	0.9	11.5	1%
	1.7	0.7	600	2.4	0.9	12.0	3%
En faisant varier μ	1.7	0.6	400	2.6	1.0	12.1	4%
	1.7	0.8	400	2.4	0.9	11.7	1%
En faisant varier c'	1.5	0.7	200	2.4	0.9	11.5	1%
	1.5	0.7	400	2.4	0.9	11.7	1%
	1.5	0.7	600	2.5	0.9	12.0	3%
	2	0.7	200	2.4	0.9	11.5	1%
	2	0.7	400	2.4	0.9	11.6	0%
	2	0.7	600	2.4	0.9	11.8	2%
Avec c' = 0 kPa							
En faisant varier ξ	0	0.7	200	2.0	1.0	12.3	6%
	0	0.7	400	2.8	1.0	16.5	42%
	0	0.7	600	3.0	1.0	19.0	64%
En faisant varier μ	0	0.6	600	3.9	1.0	29.7	156%
	0	0.8	600	2.6	0.9	13.5	16%

Tabelle 3: Aperçu des modélisations effectuées sur le site d'Eltschingera.

En utilisant la valeur en pourcents de la pente moyenne dans la zone de propagation pour le coefficient de frottement de Coulomb μ , 400 m/s^2 pour le coefficient de frottement visco-turbulent ξ et une cohésion basée sur les résultats des essais *in situ*, il a été possible pour ces deux sites d'obtenir directement des distances de propagation réalistes pour les deux sites étudiés, sans passer par une fastidieuse phase de calibration. Ces premiers résultats s'étant avérés prometteurs, il serait intéressant de réaliser des tests similaires sur d'autres sites d'études.

7 FELDUNTERSUCHUNGEN

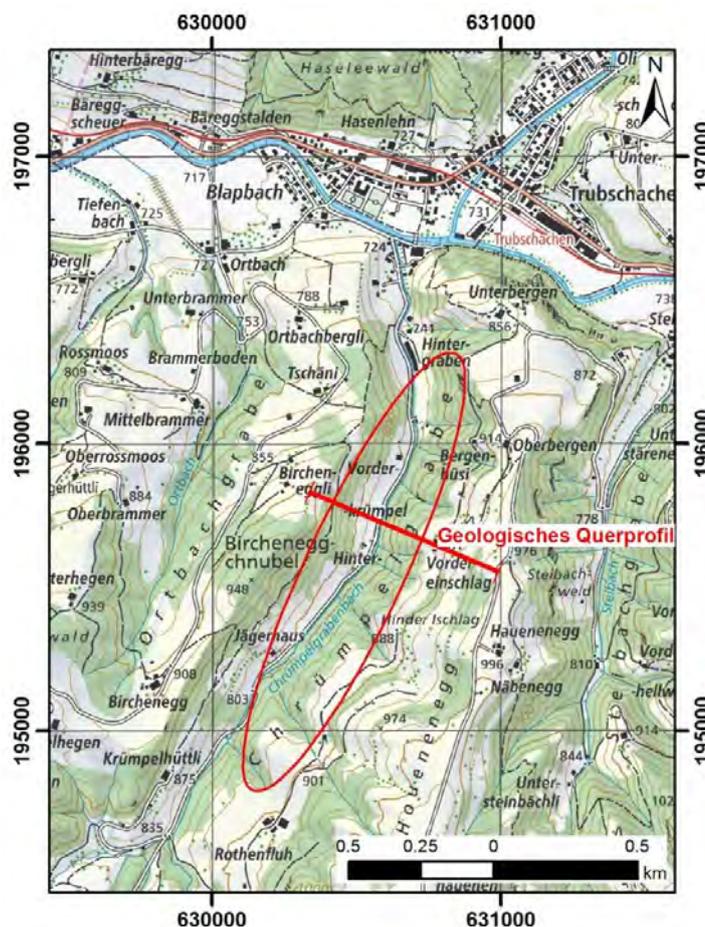
7.1 Trubschachen

Die Bearbeitung des Gebiets Trubschachen wurde durch die Kellerhals + Haefeli AG vorgenommen. Die Plastizitätsmessungen im Feld führte S. Boll-Bilgot durch.

7.1.1 Disposition

Lage

Das Testgebiet Trubschachen liegt im Chrümpelgraben in der Emmentaler Gemeinde Trubschachen (Kanton Bern). Der Chrümpelgraben ist ein typisches, kleines, tief in den Molassefels eingeschnittenes Tal, das aus dem Gebiet Blappach im Süden auf einer Strecke von rund 4 km nach NNE direkt zum Dorf Trubschachen verläuft. Das eigentliche Testgebiet selbst zieht sich vom Chrümpelhüttli im Süden auf einer Länge von rund 2 km nach NNW. Es umfasst einerseits Gebiete am steilen, orografisch linksseitigen und im unteren Teil meist nicht bewaldeten Hang, andererseits aber auch Bereiche auf der rechten Talseite, hier jedoch meist in grösserer Höhe. Die Schwerpunktkoordinaten des Gebietes befinden sich zwischen 629.800/194.700 im Süden und 630.700/196.600 im Norden (Situation vgl. *Figur 6*).



Figur 6: Situation 1:25'000 mit Lage des geologischen Querprofils.

Die Bachsohle im Testgebiet liegt zwischen ca. 830 m ü. M. und ca. 730 m ü. M. nahe des Dorfes Trubschachen. Das Gefälle innerhalb des Untersuchungsgebietes beträgt rund 5 %. Während der rechtsseitige untere Teil der steilen Talflanke meist bewaldet ist, werden die ebenfalls steilen, linksseitigen Hänge im unteren Teil landwirtschaftlich genutzt (Weideland). Die beiden Molassefelsrücken beidseits des Chrümpelgrabens liegen auf einer Höhe von ca. 900 bis 1000 m ü. M. und sind teils bewaldet. Gegen oben flachen die beiden Talflanken leicht ab.

Ereignisse

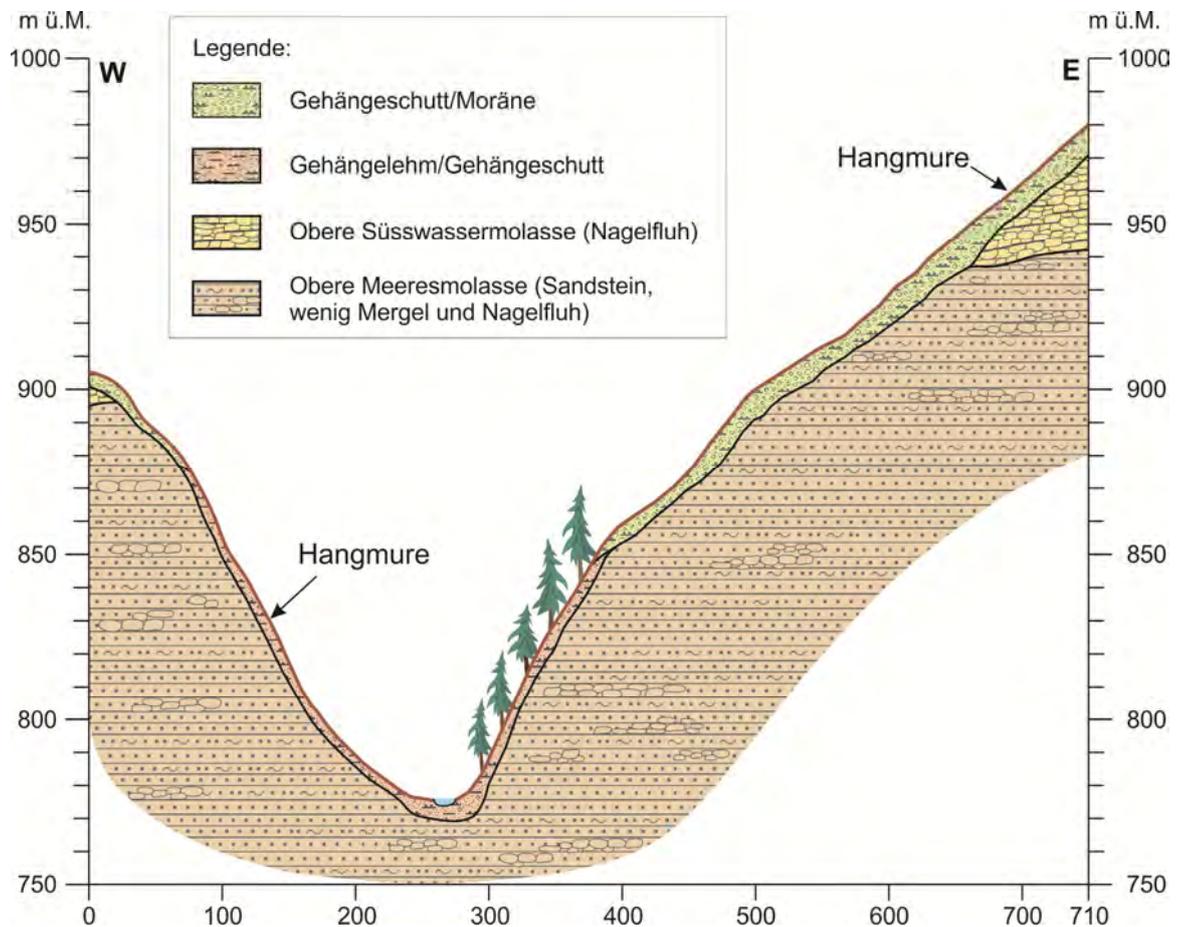
Im Chrümpelgraben sind zahlreiche Hangmurenereignisse dokumentiert. Der entsprechende Ereigniskataster ist in der *Beilage 1* zu finden (Orthophoto, 1:10'000; Quelle Ereigniskataster: Geoportal Kt. Bern [1]). Daraus geht hervor, dass solche Ereignisse in erster Linie in den steilen, nicht bewaldeten Talflanken auf der orografisch linken Talseite stattgefunden haben. Auf der Karte sind zudem auch 18 Probeentnahmestellen aufgetragen (vgl. *Abschnitt 7.1.2*). Zwei Ereignisse aus dem Jahre 2005 sind auf *Figur 7* zu sehen.



Figur 7: Hangmurenereignisse im «Vordere Chrümpelgrabe» vom August 2005.

Geologie/Hydrogeologie

Der Felsuntergrund der steilen Talflanken ist aus Gesteinen der sog. Oberen Meeresmolasse («Helvétien») aufgebaut, bestehend in erster Linie aus Sandstein mit einzelnen Nagelfluhhorizonten und seltenen Mergelzwischenlagen. Zuoberst auf den beiden Geländerrücken tritt die darüber liegende Nagelfluh der Oberen Süswassermolasse auf. Die geologische Situation ist grob auch aus dem über beide Talflanken gezogenen, überhöhten geologischen Profil auf *Figur 8* ersichtlich (1:5'000/1:2'000; Lage vgl. *Figur 6*). Die Lockergesteinsschicht besteht in den steilen Talflanken aus einer in der Regel nur ein bis drei Meter mächtigen Abfolge von Gehängelehm oder seltener Gehängeschutt. In den höheren Bereichen liegt eine meist wenige Meter mächtige Schicht aus Moräne bzw. verschwemmter Moräne über der Nagelfluh, teils kombiniert mit etwas Gehängeschutt.



Figur 8: Geologisches Querprofil durch den Chrümpelgraben 1: 5'000/2'000 (2.5 × überhöht).

Das «lehmige» Lockergestein weist eine eher schlechte Durchlässigkeit auf. Aus den einzelnen Nagelfluhhorizonten im Felsuntergrund kann je nach Bergwasserspiegellage Wasser in das Lockergestein übertreten (Kluft- oder Schichtwasseraustritt). Zwischen Lockergestein und Molassefels besteht eine ausgeprägte hydrogeologische Diskontinuität.

Hangneigung

Die Hangneigung im Untersuchungsgebiet ist auf der Karte 1:10'000 in der *Beilage 2* ersichtlich (5°-Unterteilung, basierend auf DHM25). Daraus geht hervor, dass die unteren, steilen Talflanken eine Neigung von rund 25° bis gegen 40° aufweisen (lokal sogar noch etwas steiler). Oberhalb der Steilflanken, d.h. bei deren Abflachung zu den Geländerücken hin, liegen die Hangneigungen teilweise unterhalb 25°.

Gefahrenkarte

Der Perimeter der Gefahrenkarte der Gemeinde Trubschachen umfasst im Testgebiet den nördlichsten Abschnitt des Chrümpelgrabens. Dort wurde den relativ steilen Hängen rechts- und linksseitig des Grabens eine blaue Gefahrenstufe bezüglich eines potenziellen Hangmurenereignisses mit dem Index HM 5 zugeordnet, d.h. eine mittlere Eintretenswahrscheinlichkeit bei einer mittleren Intensität (*Beilage 4*). Auf dieser Beilage sind auch die Umrisse der Ereignisse sowie die Probenahmestellen eingetragen.

7.1.2 Durchgeführte Untersuchungen

Anzahl und Lage der Probenahmestellen

Insgesamt wurden im Testgebiet Trubschachen 18 Proben genommen und bezüglich Korngrössenzusammensetzung bzw. Plastizität untersucht (Methodik der Probeentnahme vgl. Kapitel 6). Die detaillierte Lage der einzelnen Probenahmestellen ist auf den Karten der Ereignisse, der Hangneigung und der Gefahrenkarte zu finden. Auf der Übersichtskarte in der *Beilage 3* sind zudem zusammenfassend die Ergebnisse der Korngrössenverteilung und des pro Probe ermittelten Plastizitätsindex dargestellt.

Die detaillierten Ergebnisse der Proben finden sich auf der Tabelle in der *Beilage 5*, wo u. a. auch einzelne Werte, die Sondiertiefen und hilfreiche Bemerkungen zur Geologie bzw. zur Lage der Probeentnahmestelle aufgeführt sind.

Beschreibung der Probenahmestellen

- Die **Sondiertiefe** war sehr unterschiedlich und lag zwischen 0.3 und 0.8 m.
- Die **geologischen Verhältnisse** in den einzelnen Sondierungen zeigen, dass es sich in den steilen unteren Talflanken vorwiegend um Gehängelehm handelt. Bei den Proben 15 bis 18 auf der rechten, höher gelegenen Talseite lagen die Probenentnahmestellen im moränenartigen Material.
- Die **Probenahmestellen** (in der *Beilage 5* detaillierter beschrieben) lagen in den steilen Flanken der linken Talseite häufig in kleinen Anrissnischen oder in kleinen Rinnen. Allerdings wurden in den steilen Bereichen auch Proben ausserhalb von Rinnen entnommen; dies gilt zudem auch für die Proben in den höher gelegenen Bereichen (Proben 7, 11, 17 und 18).

7.1.3 Resultate und Interpretation

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Korngrössenverteilungen und der Plastizitätsindizes (*Beilagen 3* und *5*) können wie folgt zusammengefasst werden:

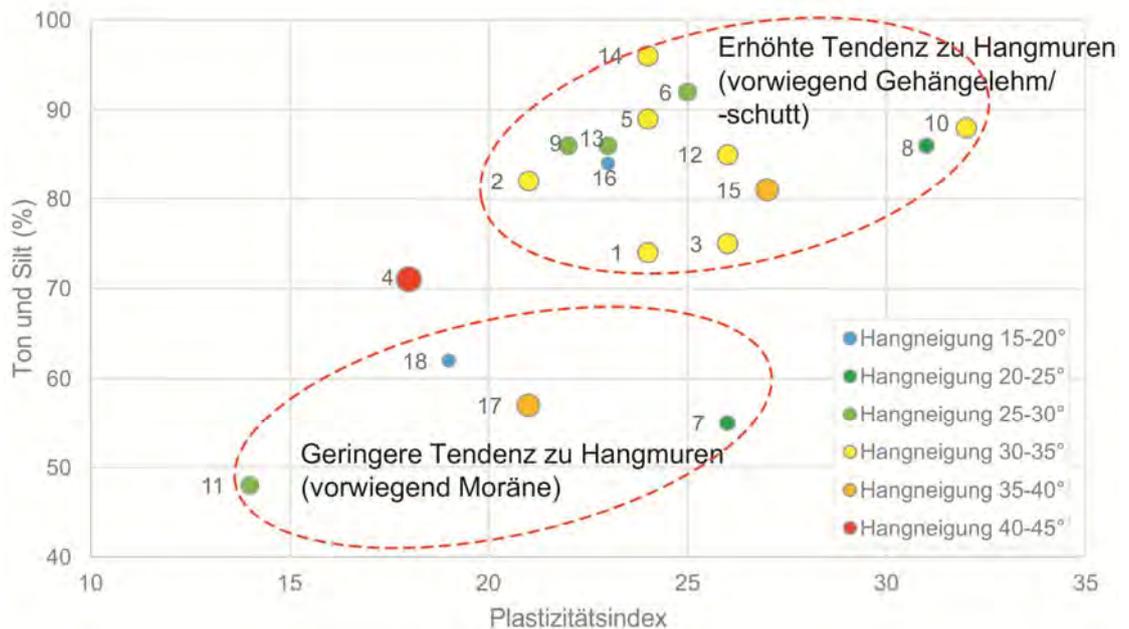
- Bei den Proben in den steilen, tiefer liegenden Taflankenbereichen wurden in der Regel Silt-Ton-Anteile von über 70 % ermittelt. Teilweise kam sogar überhaupt kein grob- oder mittelkörniger Sand vor (Probennummer 6, 8, 10 und 14). Geologisch gesehen handelt es sich vor allem um Gehängelehm.

- In den höher gelegenen Probenentnahmestellen auf der rechten, östlichen Seite des Chrümpelgrabens – hier tritt vorwiegend Moräne oder auch etwas Gehängeschutt auf – lagen die Ton-Silt-Anteile grob zwischen 50 und 60 %, und es ergaben sich erhöhte Sand-Anteile von ca. 10 bis 25 % (grob- bis mittelkörnig).

Interpretation

In der Grafik auf der *Figur 9* wurden von allen Proben jeweils der Ton-Silt-Gehalt und der Plastizitätsindex sowie die auf Grund der Hangneigungskarte ermittelte Geländeneigung bei der Probenahmestelle aufgetragen. Daraus und aus den oben beschriebenen Ergebnissen lassen sich – mit Vorsicht – folgende Interpretationen vornehmen:

- Bei geringerem Feinanteil (bzw. bei erhöhtem grob- und mittelkörnigem Sandanteil) lag der Plastizitätsindex tendenziell ebenfalls tief. Dies trifft vor allem auf die Proben aus dem Moränengebiet zu. Beim maximal ermittelten Sandanteil von 26 % (Grob- und Mittelsand) wurde ein minimaler Plastizitätsindex von 14 festgestellt.
- Bei den wenigen Proben, welche keinen Sandanteil zeigten (Probenummer 6, 8, 10 und 14), waren die Plastizitätsindizes vergleichsweise hoch bzw. waren mit 31 (Probenummer 8) und 32 (Probenummer 10) sogar am höchsten.



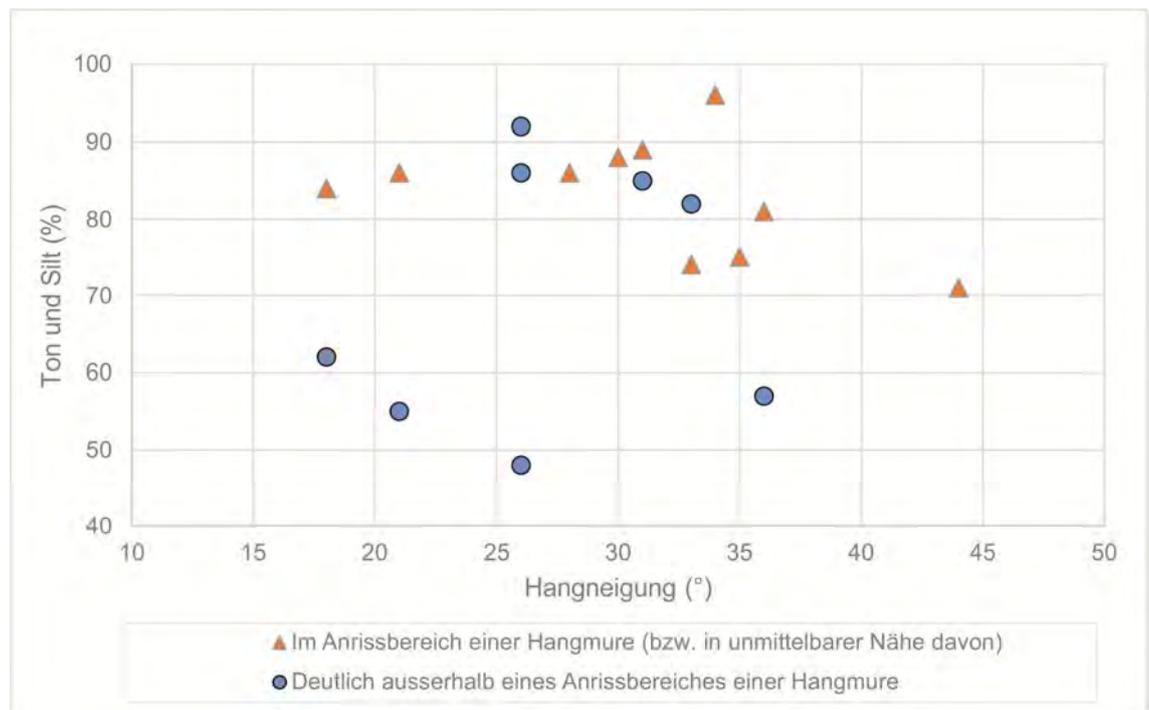
Figur 9: Trubschachen: Diagramm Plastizitätsindex vs. Ton- und Silt-Gehalt der Proben (mit Angaben der Hangneigung bei der Probenahmestelle).

Auf dem Diagramm in *Figur 10* wurden der Ton-Silt-Gehalt der Proben und die Hangneigung bei den einzelnen Probenahmestellen aufgetragen. Dabei wurde unterschieden zwischen Proben im Anrissbereich selbst (bzw. in unmittelbarer Um-

gebung) und deutlich ausserhalb des Anrissbereichs. Die Grafik zeigt relativ klar, dass bei den Proben aus dem Anrissbereich durchwegs ein Ton-Silt-Gehalt von z.T. deutlich über 70 % vorlag. Die Hangneigung der beprobten Anrissbereiche lag jedoch innerhalb einer grossen Spannweite zwischen 18° und fast 45°!

Bei den Proben ausserhalb der Anrissbereiche waren bezüglich der Feianteile eher grosse Unterschiede zu erkennen.

Figur 10 erlaubt die – wiederum vorsichtige – Interpretation, dass zumindest bei einem vergleichsweise tiefen Ton-Silt-Gehalt die Tendenz zu Hangmuren eher gering sein dürfte.



Figur 10: Trubschachen: Diagramm Hangneigung vs. Ton-Silt-Gehalt der Proben (mit Angaben über Lage der Probe bezüglich Hangmurenanriss).

Vergleiche der Ergebnisse mit den geologischen und geomorphologischen Randbedingungen

Geologie

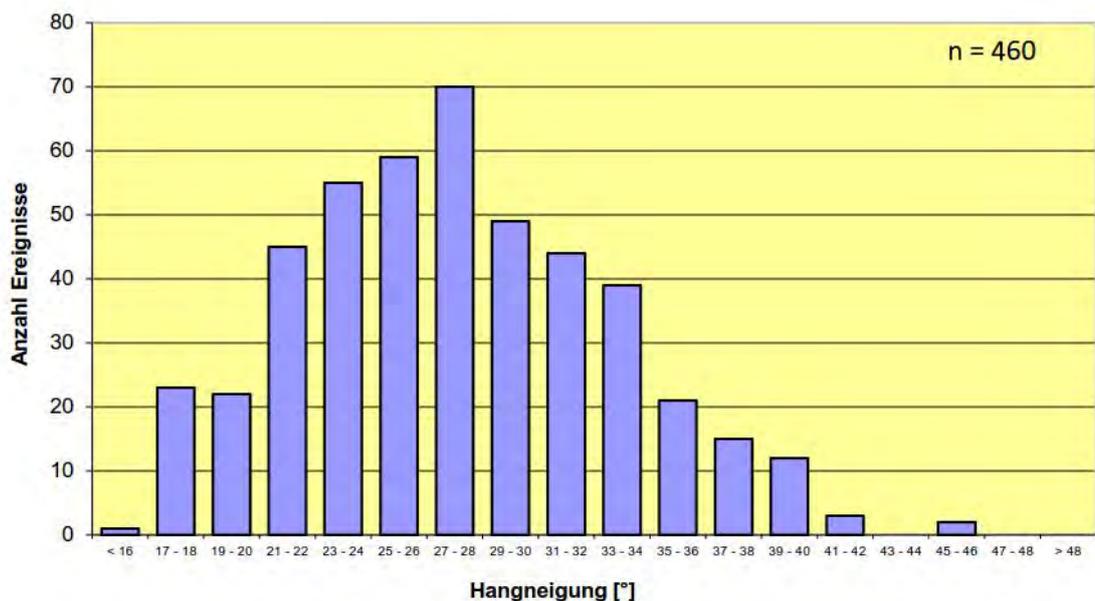
Gemäss der geologischen Karte 1:25'000 (Blatt Langnau) liegt bei allen Probenahmestellen – mit Ausnahme der Probe 15 ganz im Süden – das gleiche Untergrundgestein vor, nämlich Sandsteine der Oberen Meeresmolasse. Die Karte allein liefert im Untersuchungsperimeter allerdings keine differenzierten Angaben über die Zusammensetzung der Lockergesteinsüberdeckung. Ohne detaillierte Feldaufnahmen sind somit auf Grund der geologischen Literatur keine weiteren Folgerungen möglich.

Wie die geologischen Aufnahmen der Sondierstellen (*Beilage 5*) und auch das grobe geologische Querprofil (*Figur 8*) zeigen, besteht das Lockergestein in den tiefer gelegenen, steilen Talflanken in erster Linie aus Gehängelehm. Gemäss dem Ereigniskataster wurde hier auch die weitaus grösste Anzahl von Hangmuren registriert (allein im Untersuchungsperimeter weit über 20 Ereignisse).

Hangneigung

Bei den oben aufgeführten zahlreichen Ereignissen in der steilen, nicht bewaldeten Talflanke linksseitig des Chrümpelgrabens liegt die Hangneigung meist deutlich über 25° . Die meisten Probenahmestellen liegen in diesen steilen Bereichen und sind damit repräsentativ für diese Exposition des Geländes. In den Gebieten ausserhalb dieser Talflanken sind die Hangneigungen unterschiedlich und teilweise auch deutlich unter 25° . Dies hat in erster Linie mit den unterschiedlichen geologischen Verhältnissen zu tun (z. B. glaziale Erosionstätigkeiten).

Im Rahmen der Ereignisaufnahmen von Hangmuren in der Gemeinde Langnau nach dem Unwetter von August 2005 wurde eine Häufigkeitsverteilung der Anrisse bei Hangmuren nach Hangneigung erstellt (vgl. Figur 11). Grundlage bildeten insgesamt 460 Hangmurenereignisse. Die Ereignisse in der Gemeinde Langnau fanden in einem geologisch praktisch identischen Gebiet wie in Trubschachen statt. Rund $2/3$ der Ereignisse wiesen Hangneigungen (Anrisszone) von über 25° auf, der Mittelwert lag bei ca. 27.5° . Bemerkenswert ist jedoch, dass rund 150 Ereignisse bei einer Hangneigung von weniger als 25° und knapp 50 bei einer Neigung von $\leq 20^\circ$ losbrachen. Angaben über die geologischen Detailverhältnisse der einzelnen Hangmuren in Langnau – z. B. Zusammensetzung der Lockergesteinsschicht – liegen hier leider nicht vor.



Figur 11: Trubschachen: Häufigkeitsverteilung der Hangmurenereignisse im benachbarten Langnau beim Unwetter im August 2005 (Total 460 Ereignisse).

Fazit für das Testgebiet Trubschachen

- Die steilen Talflanken zeigen alle eine ähnliche Hangneigung (deutlich über 25°) und zudem auch eine ähnliche geologische bzw. hydrogeologische Grunddisposition (Gehängelehm über Molassesandstein bzw. Nagelfluhorizonte als potenzielle Wasserleiter).
- Der Ereigniskataster zeigt, dass die weitaus meisten Ereignisse im Untersuchungsgebiet in Bereichen mit steiler Hangneigung und einer Lockergesteinsüberdeckung aus Gehängelehm aufgetreten sind (rund 2/3 der Ereignisse wiesen eine Hangneigung > 25° auf).
- Bei allen 10 Proben aus einem Anrissbereich lag der Ton-Silt-Gehalt über 70 %. Dabei wurde an 8 von 10 Probestellen eine Hangneigung von über 27° festgestellt.
- Bei den Proben mit über 70 % Ton und Silt wurden fast durchwegs auch höhere Plastizitätsindizes von über 20 gemessen.
- Aus den vier oben aufgeführten Aspekten kann – mit Vorbehalt – geschlossen werden, dass ein Zusammenhang zwischen erhöhtem Plastizitätsindex bzw. zwischen hohem Feinkornanteil und einer erhöhten Tendenz zu einer Hangmuren besteht. Für einen Hangmurenprozess dürfte generell ein Plastizitätsindex von über 20 notwendig sein, damit diesbezüglich ein Gefahrenpotenzial besteht.
- Eine relevante Korrelation zwischen Hangneigung und Plastizitätsindex wurde nicht festgestellt.
- In Gebieten mit moränenartigem Lockergestein liegt der Plastizitätsindex in der Regel unter 20 (und der Sandanteil ist erhöht). Diese Gebiete haben eine geringere Tendenz zu Hangmuren, selbst wenn die Hangneigung lokal deutlich über 25° liegt.
- In den steilen Talflankengebieten mit dem aus Gehängelehm bestehenden Lockergestein sind, soweit das Gebiet nicht bewaldet ist, überall Hangmuren denkbar. Der ganz im Norden für die Gemeinde Trubschachen ausgeschiedene blaue Gefahrenbereich (HM5) ist somit korrekt und würde, falls der Gefahrenkartenperimeter nach Süden in den Chrümpelgraben ausgeweitet würde, somit das ganze steile Talflankengebiet umfassen.
- Die vorwiegend aus Moränenmaterial zusammengesetzten und in der Regel auch weniger steilen Gebiete auf den Geländerücken und den angrenzenden Gebieten müssen bezüglich Hangmurengefährdung differenzierter betrachtet werden. Eine steile Hangneigung von über 25° allein genügt in diesem Fall nicht für eine erhöhte Gefährdung. Mit einem Plastizitätsindex von unter 20 dürfte hier die Gefährdung durch Hangmuren eher gering sein (evtl. gelber Gefahrenbereich).

Schlussfolgerungen für das Testgebiet Trubschachen

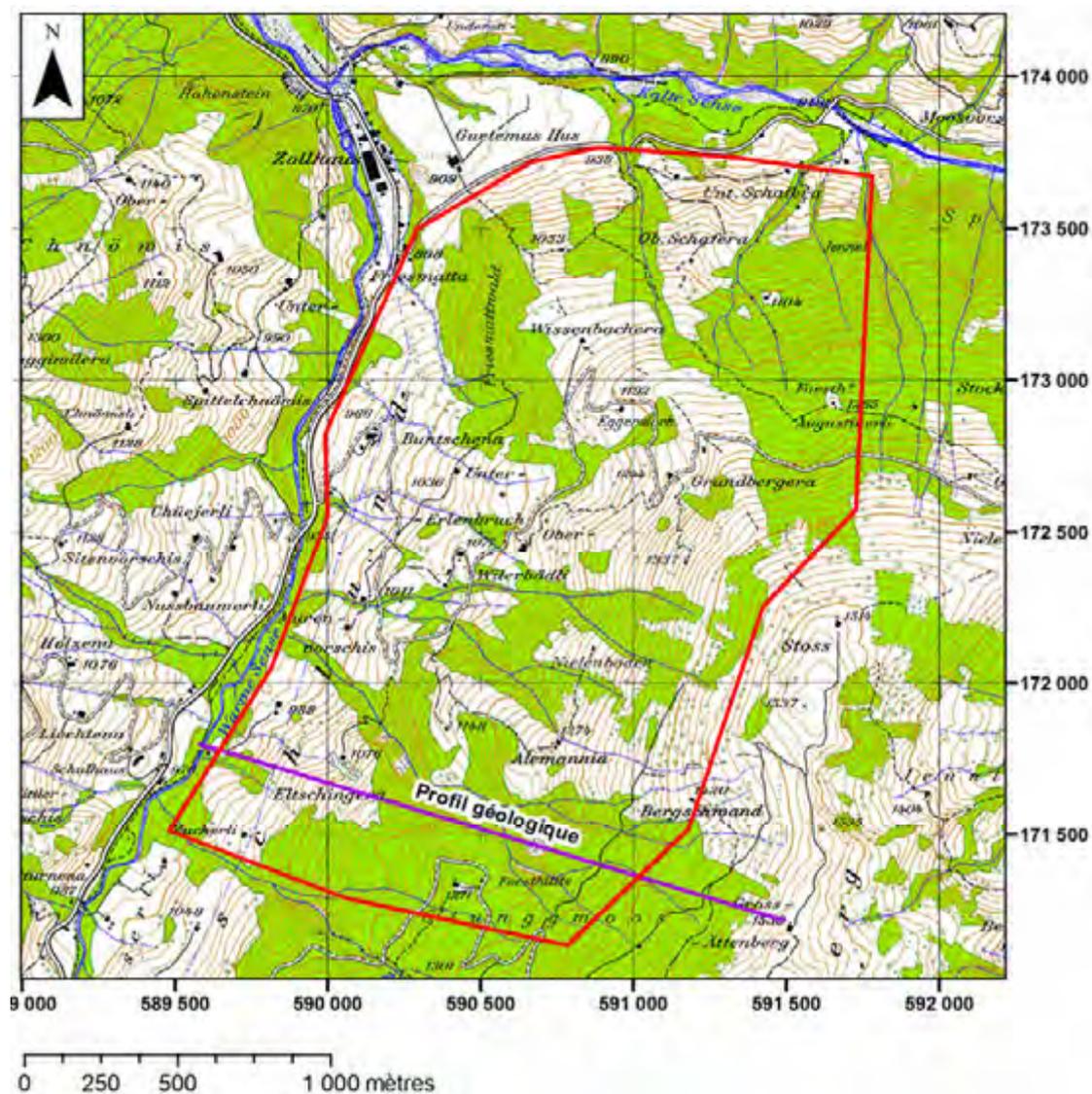
Mit der Methode GEOLEP ist im Testgebiet Trubschachen eine Differenzierung der allgemeinen Disposition für Hangmuren und somit auch bezüglich der Gefährdung möglich. Folglich wäre bei der Erstellung einer Gefahrenkarte für den Chrümpelgraben auf der Basis der topografischen, geologischen und hydrogeologischen Grunddaten bzw. Förderfaktoren und unter Berücksichtigung des Plastizitätsindex sowie der Korngrößenverteilung eine Unterteilung der seitlichen Hänge in eine mittlere Gefährdung (blau) und eine geringe Gefährdung (gelb) sinnvoll. Konkret würde dies bedeuten, dass auch in Gebieten, wo der Schwellenwert der kritischen Hangneigung – im Fall von Trubschachen wäre dieser Wert neu vermutlich zwischen 25° und 27° – überschritten wird, eine geringe Gefährdung (gelb) ausgeschieden werden kann, wenn der Plastizitätsindex dort unter 20 liegt.

7.2 Eltschingera

Die Bearbeitung des Gebiets Eltschingera erfolgte durch S. Boll-Bilgot.

7.2.1 Disposition

Le site d'étude d'Eltschingera est situé dans les Préalpes fribourgeoises, à environ trois kilomètres en amont du Schwarzssee, au cœur des flyschs du Gurnigel (cf. *Figur 12*). Le substratum est composé d'une alternance de grès fracturés et de bancs de marnes. S'ils peuvent localement être recouverts de lambeaux de moraine, la majeure partie des formations visibles en surface est composée d'éboulis, de flyschs altérés et de masses glissées (*Figur 14*).



Figur 12: Localisation de la zone d'étude et du profil géologique.
(Cf. *Figur 14*)

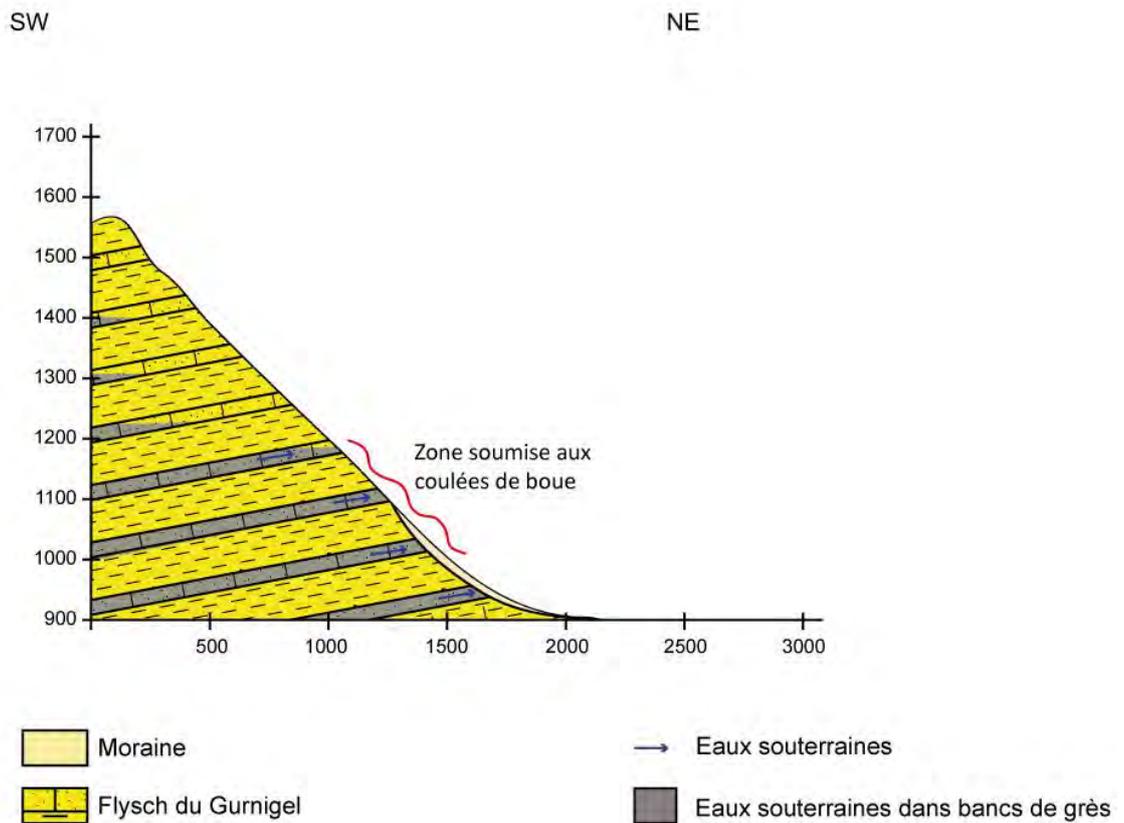
Le site d'Eltschingera a été à plusieurs reprises affecté par des coulées de boue de versant. De nombreuses niches d'arrachement sont visibles dans le versant, la plupart végétalisées (amont du chalet 1078 m situé en haut du cirque), d'autres toujours actives et laissant affleurer les bancs de grès sous-jacents (cf. *Figur 13*). Les événements de 2005, faisant suite à de fortes précipitations, ont pu être bien documentés: deux coulées d'environ 400 m³ s'étaient alors déclenchées dans la partie amont du secteur, détruisant un pâturage et menaçant le chalet 1078 m.



Figur 13: Coulées initiées en 2005.
(Photo: Service des constructions et de l'aménagement du Canton de Fribourg).

La cause probable de l'occurrence de ce phénomène est la mise en charge de l'aquifère des grès fracturés recouvert d'une faible épaisseur (quelques dizaines de cm) de flysch altérés très peu perméables (*Figur 14*). La concentration d'écoulements superficiels a également pu jouer un rôle dans le déclenchement de la coulée.

Seule la carte indicative des dangers pour les glissements profonds et les coulées de boue est actuellement disponible sur cette zone ; le versant étant en grande partie affecté par des glissements permanents, il n'est pas surprenant de voir que la majeure partie du secteur d'étude est en danger indicatif, ce qui ne semble pas correspondre à la réalité pour les coulées de boue (celles-ci ne sont visibles qu'au lieu-dit Eltschingera et quasiment absentes en dehors de celui-ci).



Figur 14: Coupe géologique schématique du versant d'Eltschingera.

Ce site a été choisi pour les raisons suivantes:

- Le site d'étude présente des zones fréquemment soumises aux coulées, et d'autres qui en sont totalement dépourvues;
- L'événement de 2005 est bien documenté, que ce soit au niveau des conditions géologiques comme des conditions météorologiques.
- Les éléments déclenchants de la coulée sont pour la plupart bien identifiés; par ailleurs, l'influence anthropique peut globalement y être exclue;
- Les environs d'Eltschingera présentent des caractéristiques géologiques et morphologiques similaires mais peu voire pas de traces de coulées; ils sont en revanche soumis aux glissements permanents : il serait intéressant de trouver ce qui différencie des contextes.

7.2.2 Investigations in situ

Dix-huit échantillons ont été prélevés dans la zone d'étude, à une profondeur comprise entre 30 et 80 centimètres, correspondant la plupart du temps à la profondeur du substratum gréseux. Ces formations étaient à dominante argilo-limoneuse, présentant de l'ensemble de très fortes plasticités (de 20 à 35 %). Trois contextes ont pu être distingués:

- Dans le cirque d’Eltschingera ainsi qu’au nord de Wissenbachera, une couverture superficielle de maximum 50 cm d’épaisseur composée de flyschs altérés;
- Entre Eltschingera et Wissenbachera, une couverture superficielle d’épaisseur variable (de quelques cm à plus d’un mètre) composée d’éboulis pris dans une matrice également très plastique;
- A l’amont de Wissenbachera, plus d’un mètre d’épaisseur de flyschs altérés extrêmement plastiques.

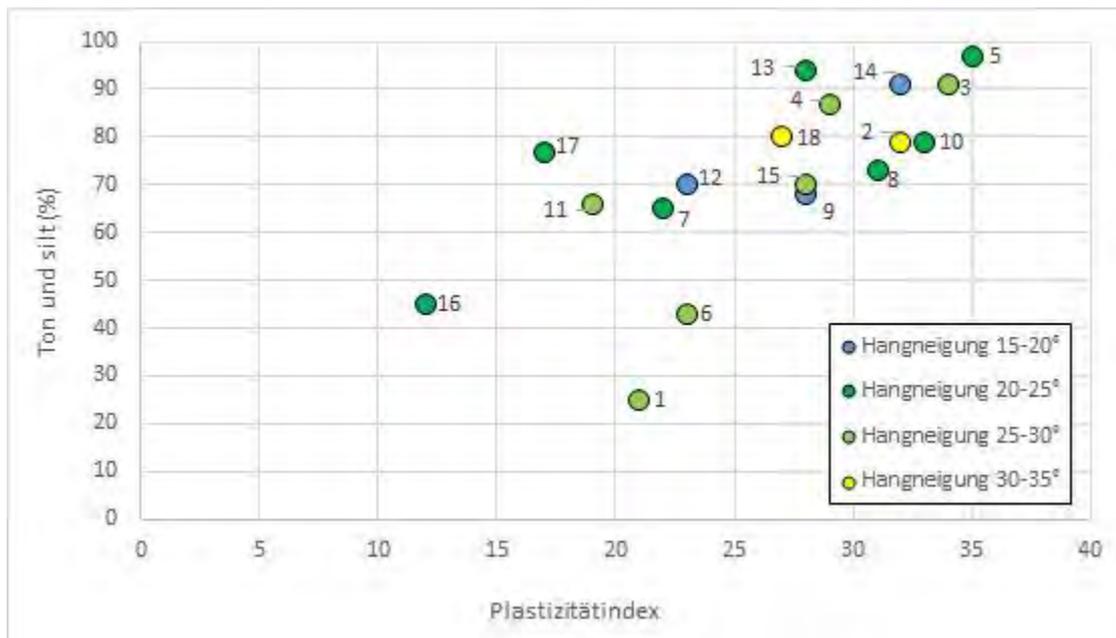
7.2.3 Résultats et interprétation

Les plasticités étant hautes sur l’ensemble du versant, il est difficile d’établir un lien entre la forte plasticité des formations superficielles et la présence de coulées de boue sur ce site (cf. *Figur 15*): contrairement au site de Trubschachen, les essais *in situ* et donc les propriétés géotechniques des formations meubles n’ont dans ce cas *a priori* pas de rôle à jouer, ou du moins pas à elles seules: il est intéressant de noter que les coulées se concentrent dans les zones où les trois conditions suivantes sont réunies (*Figur 16*):

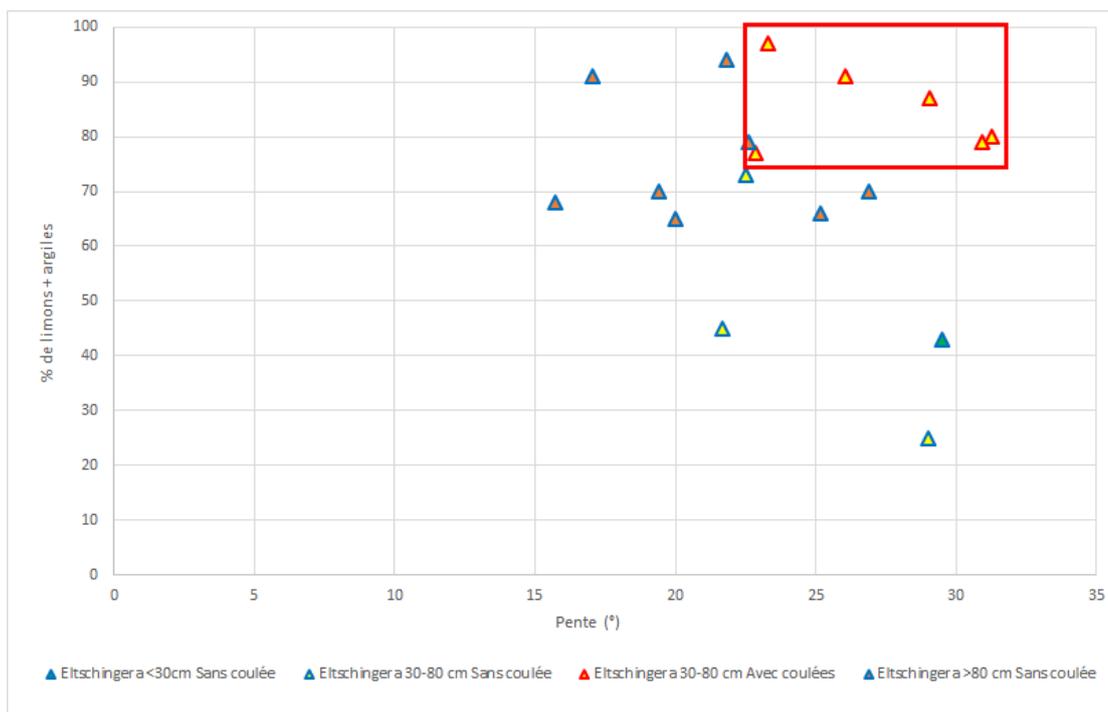
- Faible épaisseur de couverture (30 à 80 cm);
- Pente marquée (23 à 33°);
- Forte teneur en limons et argiles (>70%).

Il est probable que, dans ce cas, l’association entre ces différents paramètres soit la clé de la prédisposition aux coulées de boue, une épaisseur trop importante de couverture pouvant empêcher le déclenchement de celles-ci et plutôt être la cause de glissements permanents: on pourrait dans ce cas ainsi écarter de la carte de dangers outre les zones de pentes faibles celles présentant de fortes épaisseurs de formations meubles (pour lesquelles le substratum ne serait pas atteignable à la tarière).

On ne peut pas exclure non plus la présence de différences au niveau du substratum, la forte hétérogénéité de celui-ci pouvant être la cause de venues d’eau plus importantes ou plus brutales en certains points du versant.



Figur 15: Eltschingera: Diagramme représentant le pourcentage de limons et argiles en fonction de l'indice de plasticité, ainsi que la pente au point d'échantillonnage.



Figur 16: Eltschingera: Corrélation entre granulométrie, épaisseur des formations superficielles, pente du versant et occurrence de coulées de boue.

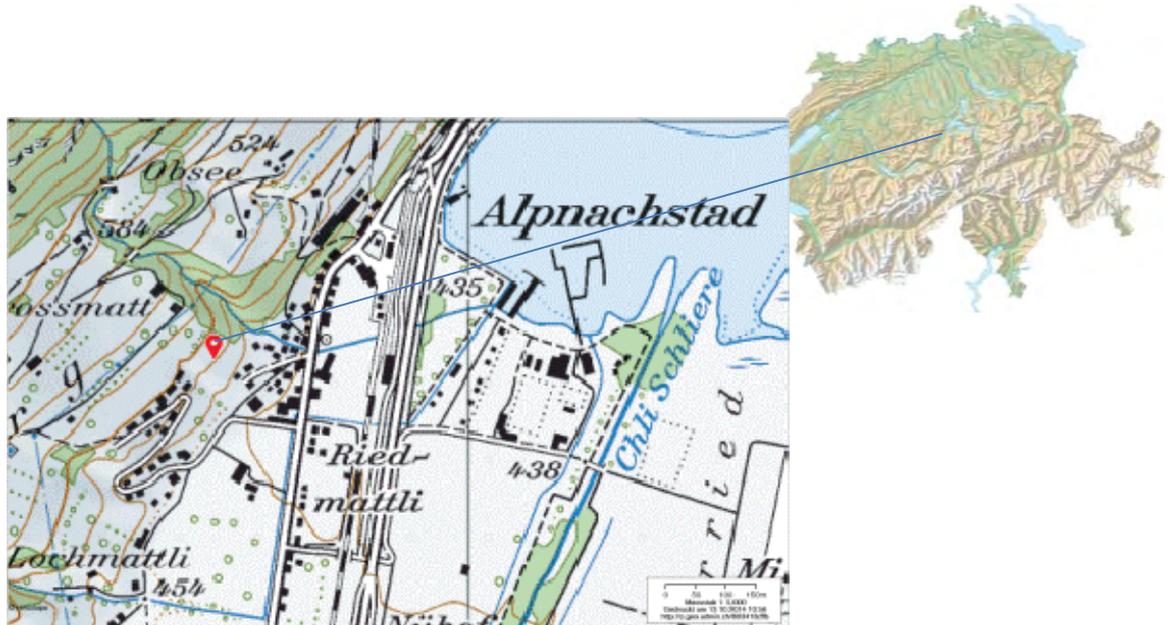
7.3 Alpnachstad

Die Bearbeitung des Gebiets Alpnachstad wurde durch die Geotest AG vorgenommen.

7.3.1 Disposition

Lage

Das Testgebiet Alpnachstad liegt am Südfuss des Pilatus in der Gemeinde Alpnach im Kanton Obwalden.



Figur 17: Testgebiet Alpnachstad, (Chälenrain).
Gemeinde Alpnach (Kanton Obwalden), Koordinaten: 663.580/200.600.

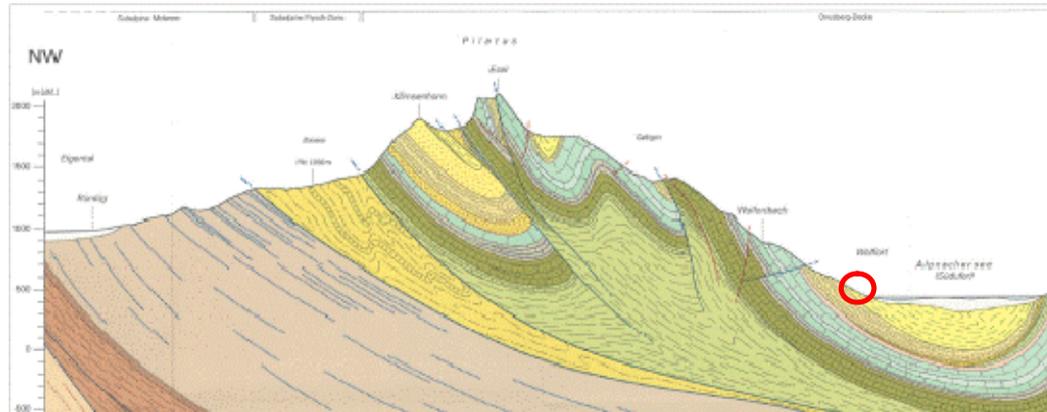
Ereignisse

In Alpnachstad (Chälenrain) ereigneten sich schon mehrmals und immer wieder Hangmuren. Das Lockergestein von maximal ca. 1 m Mächtigkeit rutschte auf hangparallel einfallenden Mergelschichten (Stad-Mergel, helvetisches Tertiär) ab. Sehr ausgeprägt waren die Hangmuren im Jahr 2005 (*Beilage 11, Figur 21*).

Der Hang wurde nach 2005 wieder in Stand gestellt (Sicherung mit Holzrost, teilweise Materialersatz, Aufforstung). Die Beprobung erfolgte an der Anrisskante, unmittelbar oberhalb der Abbruchgebiete.

Geologie/Hydrogeologie

Das Testgebiet wird gebildet durch subparallel zum Hang einfallende Stad-Mergel (bis 45° steil), welche von einer ca. 0.5–1 m mächtigen Lockergesteinsschicht (Moräne) bedeckt sind (s. *Figur 18*).



Figur 18: Geologisches Profil Testgebiet Chälénrain (Alpnachstad). Der Standort Chälénrain (rot markiert) liegt in der sogenannten Stad-Formation (Stad-Mergel). (Geologischer Atlas der Schweiz, Blatt Alpnach, Profil 2).

Die Geologie/Hydrologeologie hat einen entscheidenden Einfluss auf die Bildung von Hangmuren. Die durchlässigere Moräne rutscht auf wenig durchlässigem Fels.

Hangneigungen

Die Hangneigungen sind aus der *Beilage 12* ersichtlich. Die Ausbruchstellen haben Neigungen zwischen 28 und 35°. Unmittelbar über den Ausbruchstellen im Bereich der Probenahmestellen sind die Hangneigungen mit 25–30° leicht geringer. Die Hangneigung nimmt dann am Hangfuss im Bereich der Häuser sprunghaft ab auf unter 15°.

Gefahrenkarte

Die bestehende Gefahrenkarte Alpnach wurde im Jahre 2005 erstellt (vgl. *Beilage 14*). Das Ereignis 2005 wird im Gebiet aufgrund der Seestände als mindestens 200-jährliches Ereignis eingestuft. Es ist eine blaue Gefahrenstufe im Bereich der Hangmurenausbruchgebiete ausgeschieden (schwache bis mittlere Intensität bei 100-jährlichen Ereignissen).

Interessant ist das Gebiet aber aus zwei weiteren Gründen:

- Der gleiche Hang unmittelbar daneben ist verbaut. Dort ereigneten sich trotz identischen geologischen Verhältnissen keine Hangmuren. Der Einfluss der Verbauung auf den Prozess spontane Rutschung und Hangmuren kann deutlich sichtbar gemacht werden.
- Mehrere Häuser am Hangfuss wurden von den Hangmuren 2005 getroffen und unterschiedlich stark beschädigt. Ein Haus hat eine armierte Betonrückwand. Das Beispiel eignet sich daher zur Studie der Wirkung von Objektschutzmassnahmen und wurde für eine Testrechnung mit dem Modell RAMMS verwendet (Egli Engineering 2009 und 2011).

7.3.2 Durchgeführte Untersuchungen

Anzahl und Lage der Probenahmestellen

Insgesamt wurden im Testgebiet Alpnachstad vier Proben genommen und bezüglich Korngrössenzusammensetzung bzw. Plastizität untersucht (Methodik der Probenentnahme vgl. *Kapitel 6*). Die Probenanzahl ist gering und ohne statistische Aussagekraft. Dieses Beispiel wurde aber gewählt, da hier gut eingrenzbare Verhältnisse herrschen und später die Hangmurenwirkung simuliert und mit unabhängigen statischen Berechnungen überprüft werden kann. Die detaillierte Lage der einzelnen Probenahmestellen ist auf den Karten der Ereignisse, der Hangneigung und der Gefahrenkarte zu finden. Die Probenahme erfolgte leicht oberhalb der ehemaligen Anbruchstellen, damit sicher gestellt war, dass kein Sanierungsmaterial beprobt wurde. Auf der Übersichtskarte in der *Beilage 13* sind zudem zusammenfassend die Ergebnisse der Korngrössenverteilung und des pro Probe ermittelten Plastizitätsindex dargestellt.

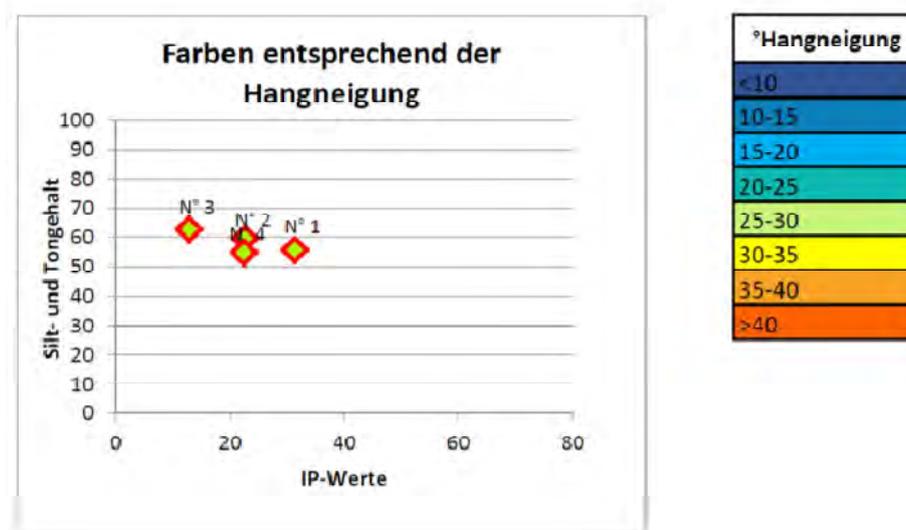
Die detaillierten Ergebnisse der Proben finden sich auf der Tabelle in der *Beilage 15*, wo u. a. auch einzelne Werte, die Sondiertiefen und die Hangneigung bei der Sondierstelle aufgeführt sind

Beschreibung der Probenahmestellen

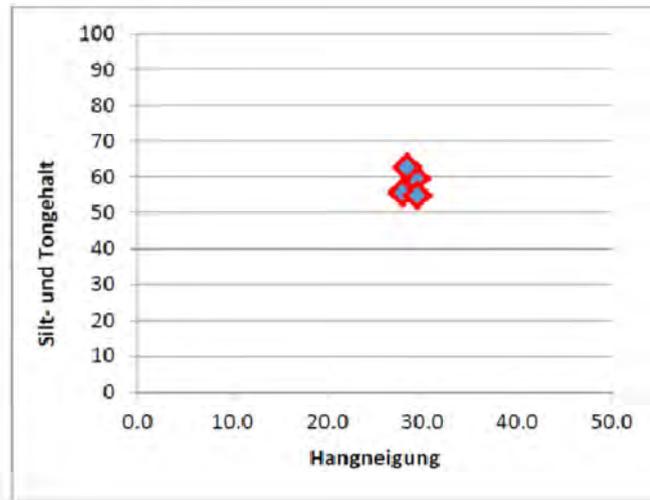
- Die Sondiertiefe lag zwischen 0.3 m und 0.85 m. Das Material war sehr homogen unter der Humusschicht.
- Es handelt sich um Moränenmaterial und Verwitterungsmaterial der unterliegenden Stad-Mergel. Als Gleitfläche wirkt die Felsoberfläche.

7.3.3 Resultate und Interpretation

Ergebnisse und Interpretation der Probeanalysen



Figur 19: Alpnachstad: Diagramm Plastizitätsindex vs. Ton- und Silt-Gehalt der Proben (mit Angaben der Hangneigung bei der Probenahmestelle). (Proben von Stellen mit Hangmurenausbrüchen sind rot umrandet.)



Figur 20: Alpnachstad: Diagramm Hangneigung vs. Ton-Silt-Gehalt der Proben. (Proben von Stellen mit Hangmurenausbrüchen sind rot umrandet.)

Die Ergebnisse der Korngrößenverteilungen und der Plastizitätsindizes können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Eigenschaften der Proben sind bezüglich Silt- und Tongehalt sehr homogen. Sie sind deutlich höher als in Ennetbürgen mit vergleichbarem Felsuntergrund. In Ennetbürgen ist die Moränenbedeckung mächtiger.
- Bezüglich Plastizitätsindex variieren die Proben zwischen 13 und 31.
- Die wenigen Proben lassen keine weitergehenden Interpretationen zu.

Vergleiche der Ergebnisse mit den geologischen und geomorphologischen Randbedingungen und den Hangneigungen

Eine erste Übersicht ergibt, dass die Hangneigung und die geologischen Verhältnisse die primär kritischen Faktoren sind:

- Die steilen Talflanken zeigen alle für die Hangmurenausbruchbereiche eine ähnliche Hangneigung (25–35°).
- Die Methode AGN führte hier zu einem guten Ergebnis bei der Gefahrenbeurteilung und Erstellung der Gefahrenkarte. Der ganze Hang wurde als Hang mittlerer Gefährdung ausgeschieden (HM3/5, blaue Gefahrenstufe). Der Ereigniskataster mit nachfolgenden Ereignissen 2005 (ca. 60- bis 100-jährlich) zeigt, dass diese im Untersuchungsgebiet in Zonen mit kritischen Hangneigungen ausgebrochen sind. Die Hangmuren hatten maximal mittlere Intensität. Die Häuser am Hangfuss wurden nicht zerstört.

Fazit für das Testgebiet Alpnachstad

- Die steilen Talflanken zeigen alle eine ähnliche Hangneigung (deutlich über 25°) und zudem auch ähnliche geologische bzw. hydrogeologische Randbedingungen (deutlicher Durchlässigkeitskontrast: Moränenmaterial und Verwitterungsschutt über Stad-Mergel) Wasser zirkuliert vorwiegend an der Grenze Lockergestein/Fels).

- Der Ereigniskataster zeigt, dass alle Ereignisse im Untersuchungsgebiet in Zonen mit kritischen Hangneigungen aufgetreten sind.
- Die vor den Ereignissen mit der Methode AGN erstellte Gefahrenkarte bildete die Ereignisse sehr gut ab.
- In den steilen Talflankengebieten mit der geringmächtigen Lockergesteinsbedeckung über steil hangparallel einfallendem Fels sind Hangmuren überall denkbar
- Ein guter Schutz gegen das Ausbrechen von Hangmuren bietet die Überbauung. Das unmittelbar angrenzende Gebiet ist überbaut. Hier haben sich keine Hangmuren ereignet.
- Die Hangneigung im Probegebiet ist sehr einheitlich, so dass sich dieses Gebiet weniger für die Bestimmung der Hangmurenausbruchswahrscheinlichkeit aufgrund der Plastizität eignet, sondern vielmehr als Testgebiet zu Hangmurenachrechnungen.
- Die Methode Geolep wird hier kaum zu einer Verbesserung der Gefahrenkarte in den Ausbruchbereichen führen. Weitere Untersuchungen sollen aber zeigen, dass mit der Methode ermittelte Eingabegrößen bessere Werte für die Hangmurenberechnungen ergeben und dadurch die Intensitäten und die Auslaufbereiche besser erfasst werden können. Dies wäre eine Verbesserung zur Festlegung der Dimensionierungsgrößen (Energien, Geschwindigkeiten, Anprallhöhen) für allfällige Objektschutzmassnahmen.



Figur 21: Hangmurensuren Alpnachstad von 2005.
Die Bebauung schützt vor Hangmurenausbrüchen: Der bebaute Hang links im Bild hat weitgehend die gleichen geologischen Voraussetzungen wie der Hang, in welchem Hangmuren entstanden.

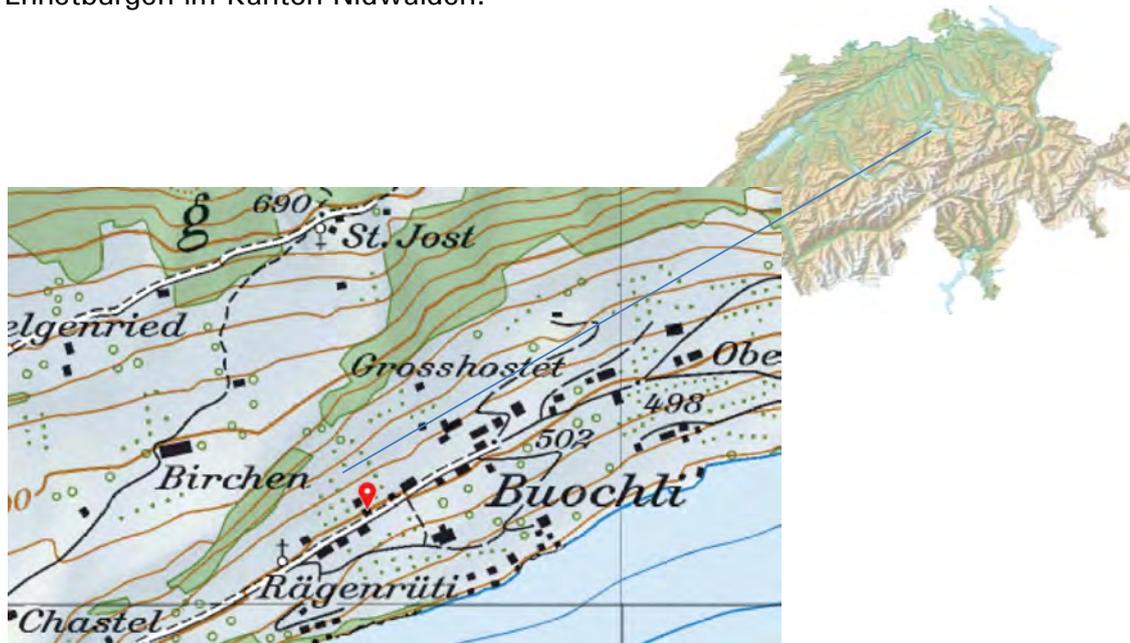
7.4 Ennetbürgen

Die Bearbeitung des Gebietes Ennetbürgen wurde durch die Geotest AG vorgenommen.

7.4.1 Disposition

Lage

Das Testgebiet Ennetbürgen liegt am Südfuss des Bürgenstocks in der Gemeinde Ennetbürgen im Kanton Nidwalden.



Figur 22: Testgebiet Ennetbürgen (Buochli).
Gemeinde Ennetbürgen (Kanton Nidwalden), Koordinaten: 675.750/206.260.

Ereignisse

Im Testgebiet Ennetbürgen ereigneten sich mehrmals Hangmuren. Die grössten Ereignisse mit vielen Hangmuren sind dokumentiert aus dem Sommer 1934 (sehr heftiges Gewitter), dem August 2005 (langanhaltende mehrtägige Starkniederschläge viel Karstwasseraustritten, *Figur 23*) sowie von Mai/Juni 2013 (*Figur 23* und *Beilage 16*).

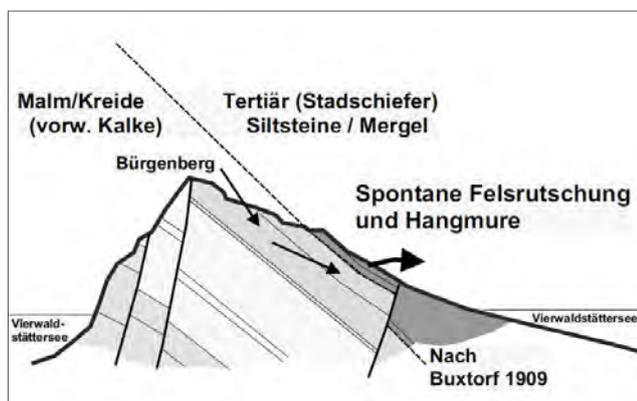


Figur 23: Fotos von Ereignissen Ennetbürgen. Oben Mai 2013, unten August 2005, links Übersicht, rechts abgehobene Felschicht.

Geologie/Hydrogeologie

Das Testgebiet liegt im Bereich der Helvetischen Randkette (Bürgenstock-Teildecke der Drusberg-Decke). Die Lockergesteine bestehen aus wenigen Dezimetern bis ca. 2 m mächtigem Moränenmaterial, verschwemmter Moräne und Verwitterungsschutt. Sie liegen auf subparallel zum Hang einfallenden, tertiären Stad-Mergeln, Assilinengrünsandsteinen und Nummulitenkalken (bis ca. 42° steil, s. Figur 24).

Der sehr heterogen durchlässige Untergrund führt zum Abrutschen der Lockergesteine auf der Felsoberfläche oder auf einer härter gelagerten Moränenschicht. Sowohl spontane Rutschungen als auch Hangmuren sind zu beobachten. Karstwasser im Fels und hohe Porenwasserdrücke spielen eine wichtige Rolle bei der Prozessauslösung. 2005 wurde an einer Stelle sogar der oberste Meter der Mergelschichten abgehoben und rutschte samt Lockergesteinsbedeckung ab (Figur 23).



Figur 24: Schematisches Querprofil Ennetbürgen. Hohe Kluftwasserdrücke führten 2005 nicht nur zu Hangmuren, sondern in einem Fall sogar zu einer Felsrutschung in den tertiären Stad-Mergeln.

Hangneigungen

Die Hangneigungen sind aus der *Beilage 17* ersichtlich. Die Ausbruchstellen haben Neigungen von 25–35°. Über den Ausbruchstellen wird das Gelände zuerst steiler (>40°: Fels der Bürgen-Formation: harte Sandsteine) und danach deutlich flacher (10–20°). Hangabwärts nimmt die Neigung im Auslaufbereich der Hangmuren kontinuierlich ab bis auf Neigungen von 20–10°.

Gefahrenkarte

Die bestehende Gefahrenkarte Ennetbürgen wurde im Jahre 2006 erstellt (vgl. *Beilage 19*). Es ist eine gelbe und blaue Gefahrenstufe im Bereich der Hangmurenausbruchgebiete ausgeschieden. Die Anrissmächtigkeiten <1m ergeben schwache Intensitäten (gelbe Gefahrenstufen). Blau wurde in steileren Berichten ausgeschieden, da angenommen wurde, dass Prozesse sich dort beschleunigen können. Die grosse Hangmure ganz links in *Figur 23* wurde 2005 mit Holzkasten verbaut und daher nicht in vollem Ausmass in der Gefahrenkarte berücksichtigt.

7.4.2 Durchgeführte Untersuchungen

Anzahl und Lage der Probenahmestellen

Insgesamt wurden im Testgebiet Ennetbürgen 13 Proben genommen und bezüglich Korngrössenzusammensetzung bzw. Plastizität untersucht (Methodik der Probeentnahme vgl. *Kapitel 6*). Die detaillierte Lage der einzelnen Probenahmestellen ist auf den Karten der Ereignisse, der Hangneigung und der Gefahrenkarte zu finden. Auf der Übersichtskarte in der *Beilage 18* sind zudem zusammenfassend die Ergebnisse der Korngrössenverteilung und des pro Probe ermittelten Plastizitätsindex dargestellt.

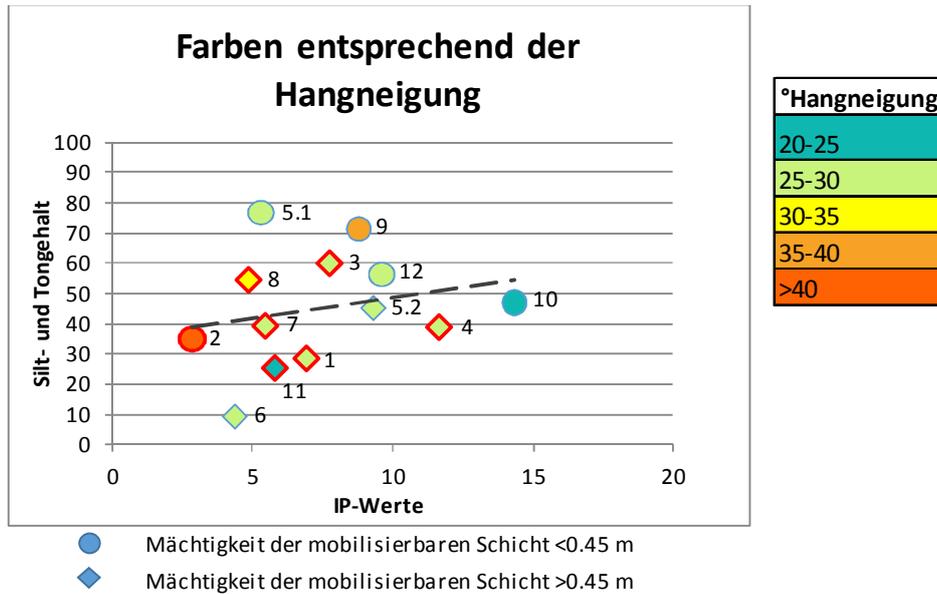
Ohne Ereignisse wäre der Hang mit der Methode AGN 2004 praktisch überall gleich beurteilt worden. Die Untersuchungen sollten Hinweise zur Präzisierung geben, wieso an gewissen Stellen Hangmuren losbrachen, unmittelbar daneben aber nicht.

Die detaillierten Ergebnisse der Proben finden sich auf der Tabelle in der *Beilage 20*, wo u. a. auch einzelnen Werte, die Sondiertiefen und hilfreiche Bemerkungen zur Geologie bzw. zur Lage der Probeentnahmestelle aufgeführt sind.

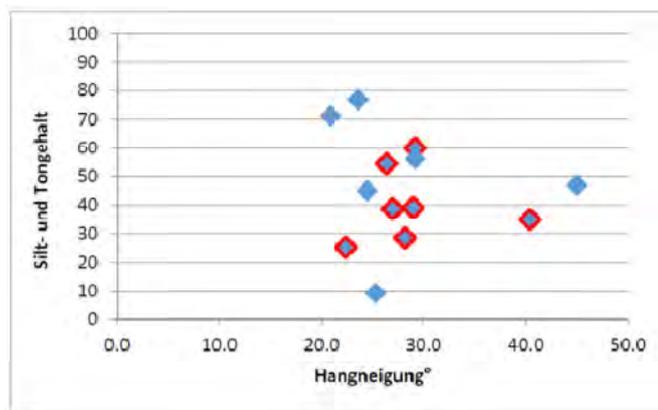
Beschreibung der Probenahmestellen

- Die Sondiertiefe war sehr unterschiedlich und lag zwischen 0.2 und 0.55 m.
- Es handelt sich um verschwemmtes Moränenmaterial, welches auf härterer Moräne aufliegt oder auf einer dünnen Verwitterungsschicht vom Fels getrennt ist.
- Probestelle Nr. 2 stellt eine Ausnahme dar. Hier ereignete sich 2013 eine Hangmure. Aufgrund der Spuren war hier austretendes Wasser aus dem Fels hauptverantwortlich für den Abgang.

7.4.3 Resultate und Interpretation



Figur 25: Ennetbürgen: Diagramm Plastizitätsindex vs. Ton- und Silt-Gehalt der Proben (mit Angaben der Hangneigung bei der Probenahmestelle). (Proben von Stellen mit Hangmurenausbrüchen sind rot umrandet.)



Figur 26: Ennetbürgen: Diagramm Hangneigung vs. Ton-Silt-Gehalt der Proben. (Proben von Stellen mit Hangmurenausbrüchen sind rot umrandet.)

Ergebnisse und Interpretation der Probeanalysen

Die Ergebnisse der Korngrößenverteilungen und der Plastizitätsindizes (Figur 25) können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Lockergesteinsmächtigkeit ist ein wichtiger mitbestimmender Faktor für die Hangmurenentstehung. Im untersuchten Teil von Ennetbürgen ereigneten sich keine Hangmuren bei Mächtigkeiten <0.5 m (Ausnahme Nr. 2 mit sehr starkem Felswasserzutritt).
- Die IP-Werte sind klein im Vergleich zu anderen Testgebieten.
- Die Proben weisen keine eindeutige Korrelation der IP-Werte zum bestimmten Silt- und Tongehalt auf.

- Wenn nur die Proben aus den Anrissen verglichen werden, ist bis auf die Ausnahme Nr. 2 eine leichte Korrelation sichtbar. Nimmt man nur die Proben gleicher Hangneigungsklassen wird die Korrelation noch besser.
- Probe 6 hat den niedrigsten Silt- und Tongehalt. Trotz Überschreitung der kritischen Hangneigung kam es bisher zu keinem Hangmurenabgang (erst deutlich weiter hangabwärts).
- Probe 11 ist eventuell durch die Sanierung 2005 gestört oder die Neigung ist nach der Sanierung nicht mehr natürlich (früher evtl. steiler und toniger).
- Die Streuung der Daten zeigt, dass im Gebiet Ennetbürgen neben der Zusammensetzung der Deckschicht auch die Hangneigung, die Lockergesteinsmächtigkeit und die unterschiedliche Durchlässigkeit massgebende Grössen für die Hangmuren-Entstehung sind.
- Die sehr niedrigen Plastizitätswerte der Probe 2 korrelieren mit einer geringen Ausdehnung der Hangmure.

Vergleiche der Ergebnisse mit den geologischen und geomorphologischen Randbedingungen und den Hangneigungen

Eine Erste Übersicht ergibt, dass die Hangneigung und die geologischen Verhältnisse die primär kritischen Faktoren sind:

- Probe 9: Keine Hangmure trotz kritischer Neigung und hohem Tongehalt (felsnah).
- Probe 2: Eigentlich zu steil und zu felsig: Hangmure aber wegen Kluftwasser.
- Probe 5.1: Kein Abgang trotz hohem Tongehalt: Zu wenig steil, felsnah.
- Probe 6: Kein Abgang trotz überschreiten der kritischen Neigung (evtl. wegen zu geringem Silt- und Tongehalt).
- Bei gleicher Neigung kann die Methode GEOLEP allenfalls zur Feinunterscheidung nützen.

Fazit für das Testgebiet Ennetbürgen

Die steilen Talflanken zeigen alle für die Hangmurenausbruchbereiche eine ähnliche Hangneigung (25–30°, teilweise leicht mehr). Der Ereigniskataster zeigt, dass die Ereignisse im Untersuchungsgebiet meist in Zonen mit kritischen Hangneigungen ausgebrochen sind.

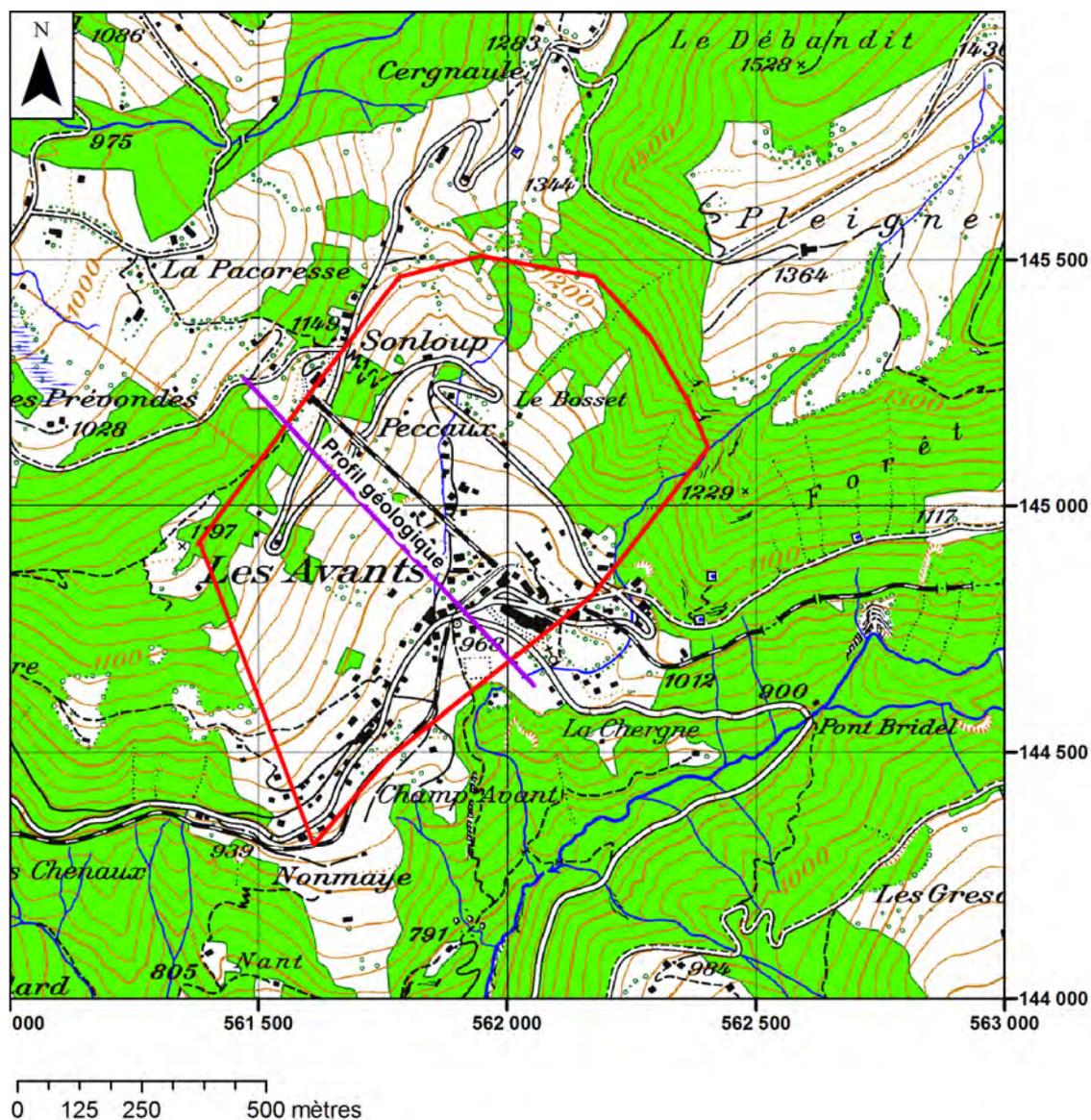
- Wenn Hangmuren in flacheren oder steileren Gebieten entstanden, waren eindeutig geologisch-hydrogeologische Faktoren verantwortlich.
- Mit der Bohrstockmethode konnte z.T. gezeigt werden, wieso an gewissen Stellen keine Hangmuren ausbrachen (geringere Lockergesteinsmächtigkeit). Ohne Bohrstocksondierungen wäre diese Aussage nicht möglich.

7.5 Les Avants

Die Bearbeitung des Gebiets Les Avants wurde durch A. Parriaux und S. Boll-Bilgot vorgenommen.

7.5.1 Disposition

Le site d'étude des Avants est situé dans les Préalpes vaudoises, à environ deux kilomètres au Nord-Est de Montreux (cf. *Figur 27*). Le substratum est composé de calcaires du Lias présentant une karstification peu développée mais une forte fracturation ainsi que des interlits marneux. Ils sont recouverts de lambeaux de moraine de fond rhodanienne ainsi que d'éboulis (cf. *Figur 29*).



Figur 27: Localisation de la zone d'étude et du profil géologique. (Cf. *Figur 29*)

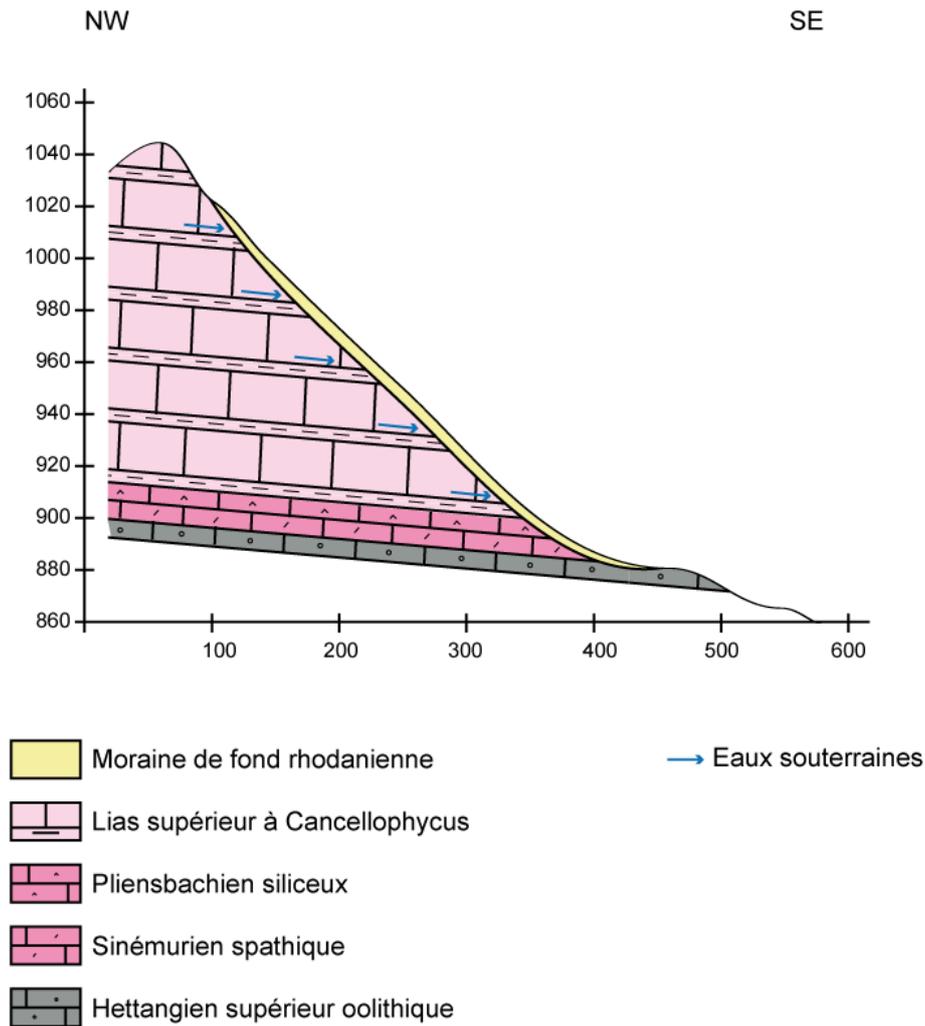
Ce site est fréquemment affecté par des coulées de boue de versant (cf. *Beilage 21*). De nombreuses niches d'arrachement sont visibles dans le versant, bien qu'en grande partie végétalisées, et des événements ayant eu lieu en 1911, 1957 et 2007 ont pu être documentés. Affectant les formations morainiques sur des épaisseurs allant de quelques dizaines de centimètres à un mètre (jusqu'à trois mètres pour l'événement de 1911), ils ont localement mis à nu les calcaires sous-jacents. Ces événements se sont tous déroulés après de longues périodes de fortes pluies.



Figur 28: Coulées initiées en juin 2007, huit jours après l'événement.

La cause probable de l'occurrence de tels phénomènes dans ce versant est la présence d'une formation présentant de fortes hétérogénéités de perméabilité recouverte de faibles épaisseurs de matériaux peu perméables : suites à de fortes pluies, l'aquifère sous-jacent se met en charge et l'eau ne peut s'évacuer facilement, bloquée par la couverture (cf. *Figur 29*). La pression sous celle-ci va ainsi augmenter jusqu'à ce que la couverture cède sous la forme d'une coulée de boue.

Une carte indicative est disponible pour les glissements superficiels et spontanés. Réalisée de façon automatisée, elle ne met visiblement en zone de danger que les pentes de plus de 20°. Si l'ensemble des coulées observées s'est bien initiée dans cette zone, on peut néanmoins constater que la partie Est du site, ne présentant jusqu'à présent aucun événement, est également considéré comme dangereuse dans son ensemble.



Figur 29: Coupe géologique schématique du versant des Avants.

Ce site a été choisi pour les raisons suivantes:

- Les pentes et le substratum sont homogènes sur l'ensemble du site (cf. Beilage 22), seules changent les caractéristiques de la couverture (moraine de fond riche en fines et dépôts de pentes grossiers), permettant de mettre en évidence le rôle de celle-ci;
- Le site d'étude présente des zones fréquemment soumises aux coulées, et d'autres qui en sont totalement dépourvues;
- Il existe de nombreux documents concernant les événements dans ce versant (photographies, données hydrologiques), et de nombreuses prospection (géotechnique, géophysique, hydrologique) y ont déjà été menées;
- Les éléments déclenchants de la coulée sont pour la plupart bien identifiés ; par ailleurs, l'influence anthropique peut globalement y être exclue.

7.5.2 Investigations in situ

Seize échantillons ont été prélevés dans la zone d'étude, à une profondeur moyenne de 45 cm (cf. *Beilagen 23* et *25*). Deux catégories ont pu être distinguées :

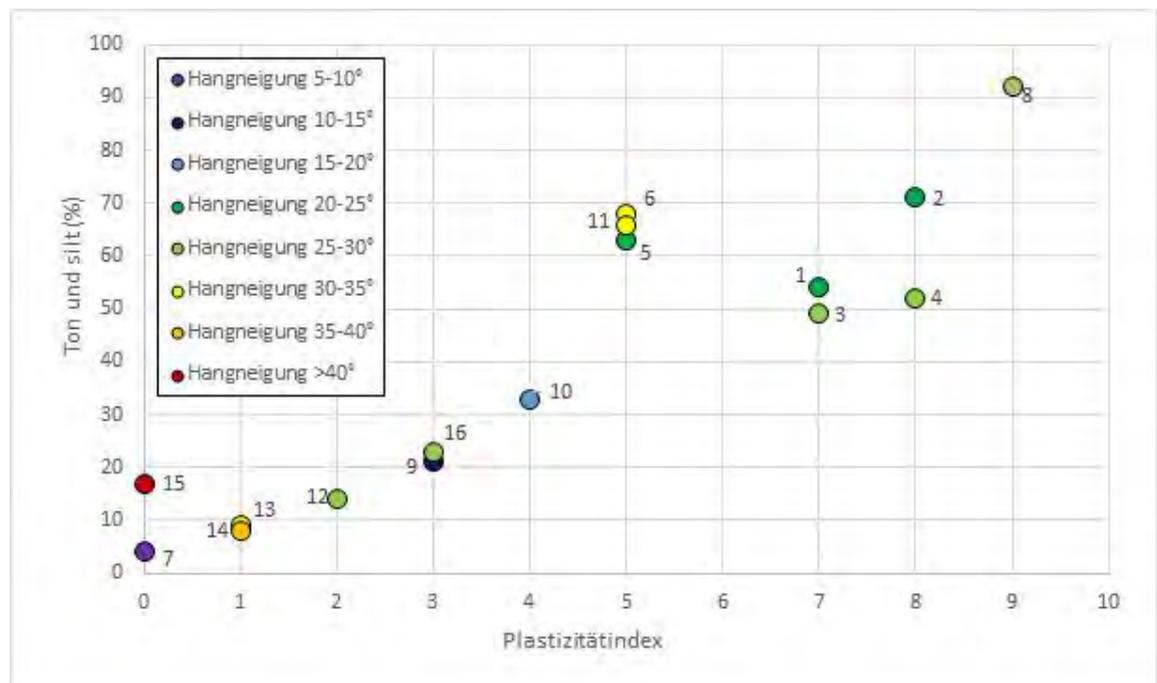
- Au Sud du funiculaire, des matériaux d'origine morainique riches en limons et argiles et de plasticité comprise entre 5 et 10%; ils présentent une cohésion non négligeable et leur perméabilité est faible;
- Au Nord du funiculaire ainsi qu'à proximité des crêtes, des dépôts de pentes (éboulis et colluvions) beaucoup plus sableux, très peu cohésifs, dont la plasticité n'excède pas les 5%; leur perméabilité est quant à elle plus élevée.

Le mode de prélèvement des échantillons à la tarière a montré que le substratum est globalement très proche de la surface au Sud du funiculaire, le plus souvent à moins d'un mètre de profondeur. Des forages géothermiques et géotechniques montrent que les dépôts de pentes atteignent en revanche plusieurs mètres d'épaisseur au Nord de celui-ci.

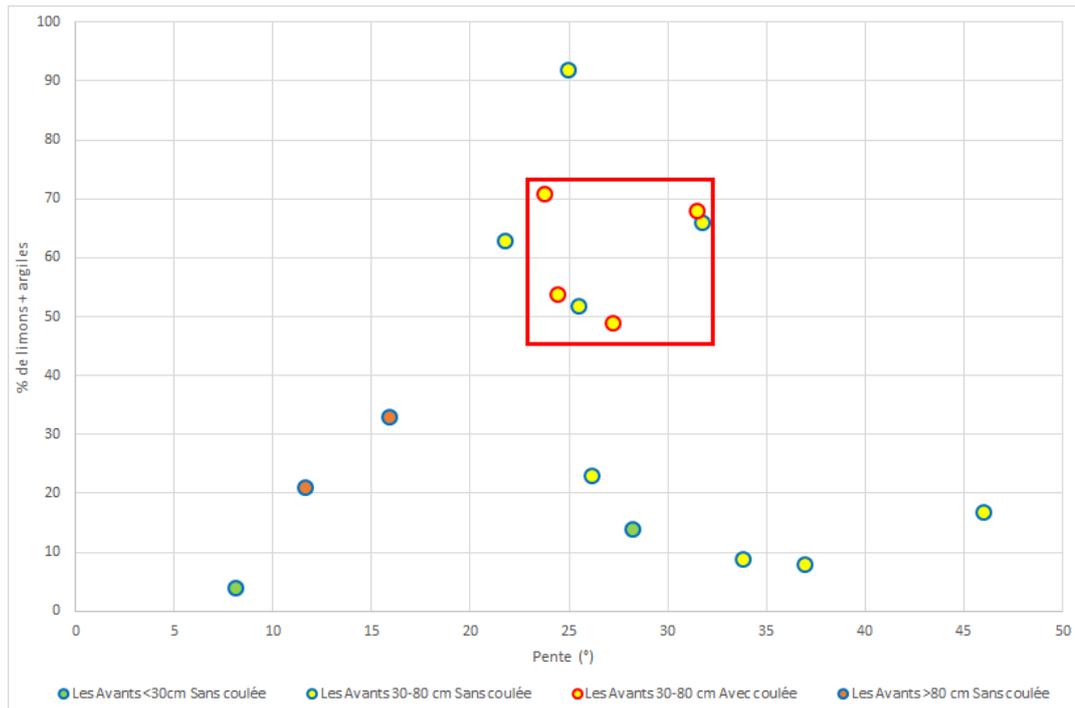
7.5.3 Résultats et interprétation

Les essais in situ ont montré une bonne corrélation entre la présence de matériaux riches en fines (plus de 50% de limons et argiles) de plasticité supérieure à 5%, cohésifs et peu perméables, et la présence de coulées de boue de versant. Les zones présentant des granulométries plus grossières et de plasticité plus faibles (inférieure à 5%, moins cohésives et plus perméables), ne sont ici au contraire pas touchées par ces phénomènes.

On peut aussi voir une relation entre les zones présentant de faibles épaisseurs de couverture et l'occurrence de coulées de boue (cf. *Figur 31*).



Figur 30: Diagramme représentant le pourcentage de limons et argiles en fonction de l'indice de plasticité, ainsi que la pente au point d'échantillonnage.



Figur 31: Corrélation entre granulométrie, épaisseur des formations superficielles, pente du versant et occurrence de coulées de boue.

Ces observations tendent à confirmer que la présence de coulées de boue est ici bien liée à une augmentation de la pression de pores à l'interface entre le substratum et les formations superficielles, l'eau ne pouvant s'évacuer facilement en cas de mise en charge de l'aquifère sous-jacent.

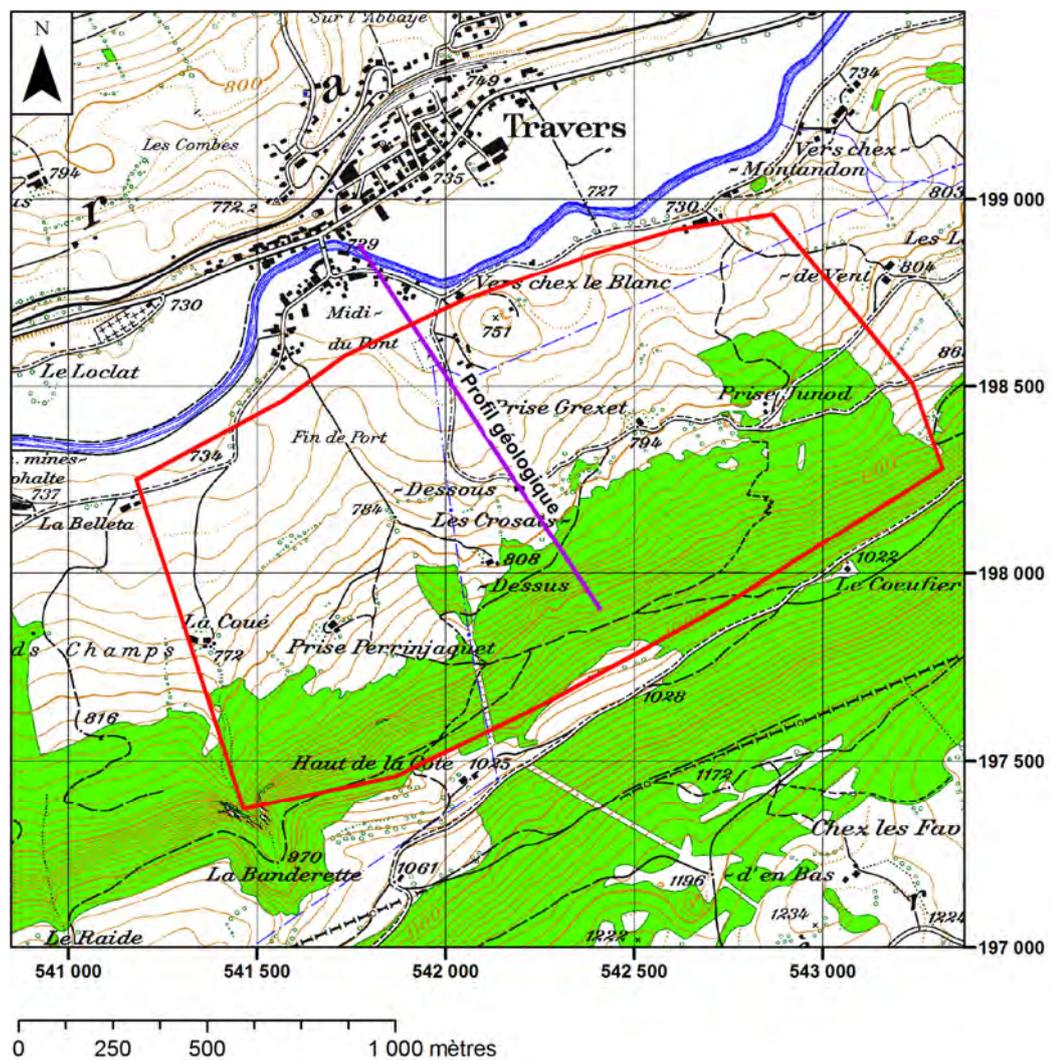
Ainsi, il serait possible d'exclure des zones de dangers les zones présentant de trop fortes épaisseurs de matériaux meubles (> 80 cm) ainsi que celles présentant des plasticités faibles (< 5%): cela permettrait par exemple de ne plus considérer la partie Est du site d'études comme dangereux en ce qui concerne les coulées de boue.

7.6 Travers

Die Bearbeitung des Gebiets Travers wurde durch A. Parriaux und S. Boll-Bilgot und vorgenommen.

7.6.1 Dispositon

Le site d'étude de Travers est situé dans le Jura Neuchâtelois, à environ vingt kilomètres à l'Ouest de Neuchâtel (cf. *Figur 32*). La zone d'étude est bordée au Sud-Est par un chevauchement mettant en contact des formations calcaires karstifiées du Malm avec la molasse Burdigalienne et au Nord-Ouest par les alluvions de l'Areuse. Ces formations sont recouvertes de moraines bordières jurassiennes ainsi que, dans la partie amont du secteur, d'un important voile d'éboulis (cf. *Figur 35*).



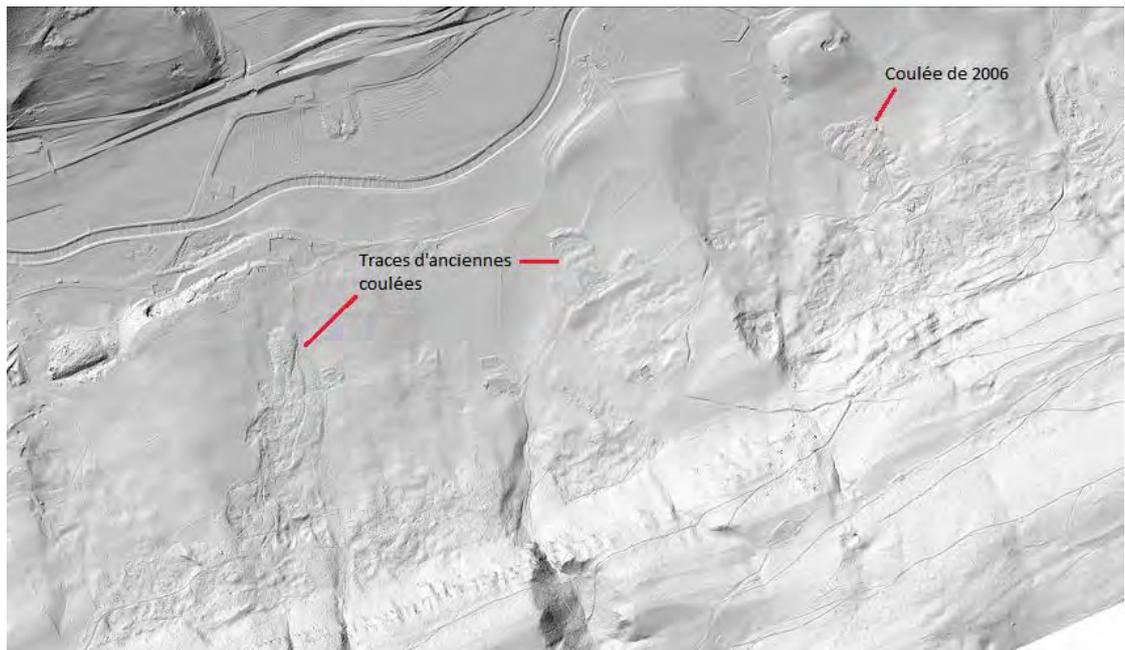
Figur 32: Localisation de la zone d'étude et du profil géologique.
(Cf. *Figur 35*)

Suite à d'importantes précipitations, le versant a été affecté en avril 2006 par une coulée de boue d'environ 150'000 m³, sur une profondeur d'environ 3 à 4 mètres. Cette coulée était composée de matériaux morainiques. Plusieurs sources ont été observées dans la niche d'arrachement (cf. *Figur 33*).



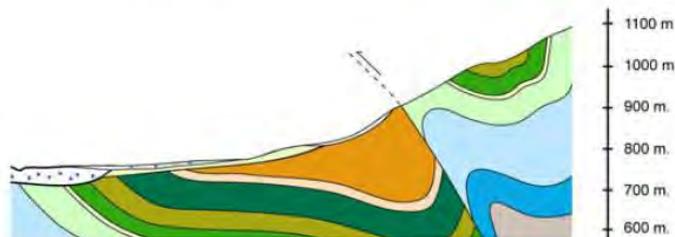
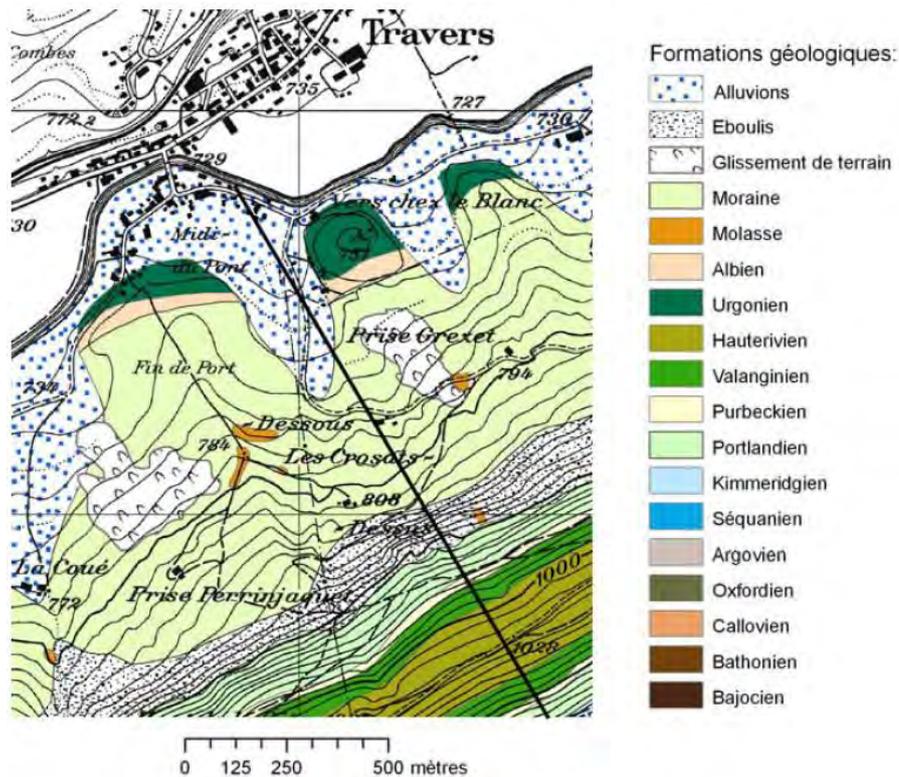
Figur 33: Coulée initiée en avril 2006, un mois après l'événement ; on remarquera que les venues d'eau sont toujours présentes dans la niche d'arrachement.

Si aucun autre événement n'a été documenté dans ce versant, les images LIDAR montrent en revanche la présence de nombreuses niches d'arrachement et dépôts de coulées de boue qui se fondent actuellement dans la végétation, mais dont la géométrie est similaire à celle de l'événement de 2006 (cf. *Figur 34* et *Beilage 26*).



Figur 34: Image LIDAR du versant affecté par les coulées de boue. (Source: www.sitn.ne.ch).

La cause probable de cette coulée est la présence d'un aquifère karstique recouvert d'une faible épaisseur de matériaux peu perméables (cf. *Figur 35*), les fortes pressions de pores à l'interface entre le karst en charge et la couverture ayant fait céder celle-ci. En 2006, les sources visibles dans la niche d'arrachement ont par ailleurs mis plusieurs mois avant de tarir.



Figur 35: Coupe géologique schématique du site de Travers.

Une carte de dangers pour les glissements profonds et les coulées de boue est actuellement disponible sur cette zone. Les pentes supérieures à 20° y ont été classées en danger faible, celles présentant des glissements permanents actifs en danger moyen et les dépôts des coulées identifiables sur l'image LIDAR en danger fort: ces résultats sont discutables dans la mesure où une nouvelle coulée de boue semble peu probable là où la couche mobilisable a déjà été emportée, mais au contraire pourrait être attendue là où les conditions sont similaires à celles observables dans les précédentes zones d'initiation.

Ce site a été choisi pour les raisons suivantes:

- Les niches d'arrachement des différentes coulées présentes dans ce versant sont toutes localisées le long d'une même ligne marquant le chevauchement des calcaires du Malm sur la molasse;
- L'événement de 2006 a pu être documenté en détail dès son apparition et de nombreuses études y ont été menées;
- La niche d'arrachement de 2006, très nette, a permis de visualiser clairement la surface de rupture ainsi que les venues d'eau.

7.6.2 Investigations in situ

Vingt échantillons ont été prélevés dans la zone d'étude, à une profondeur comprise entre 50 et 80 centimètres (cf. *Beilagen 28 et 30*). Quatre catégories ont pu être distinguées:

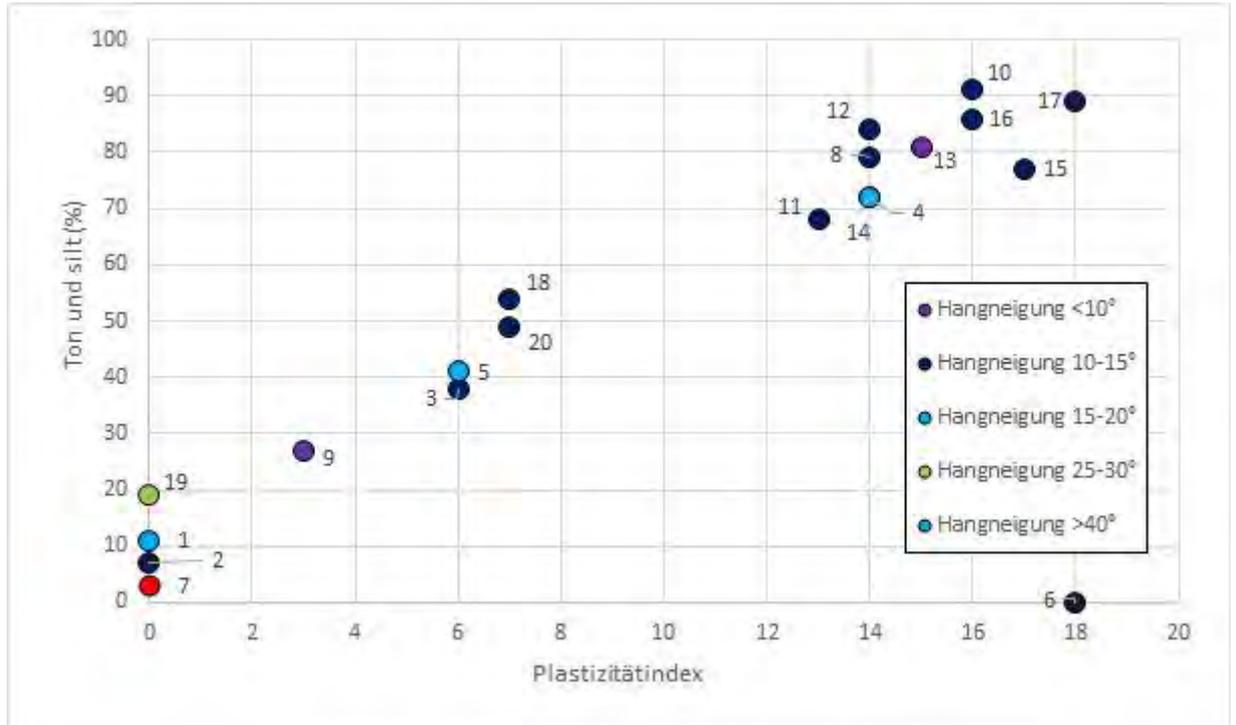
- Au pied du versant, des matériaux sablo-limoneux de faibles plasticité correspondant à de la molasse altérée;
- Entre 770 et 800 mètres d'altitude, ainsi que dans la coulée, des matériaux morainiques limono-argileux, de plasticité élevée (entre 10 et 20 %), présentant une forte cohésion et une perméabilité faible;
- Au-dessus de 800 mètres d'altitude, des dépôts de pente pauvres en matrice, celle-ci étant plus riches en sable, peu cohésive et plus perméable, présentant des plasticités faibles à nulles;
- A l'aval de la Prise Perrinjaquet, des matériaux très sableux mais présentant malgré tout une forte plasticité; la zone étant très marécageuse, cela pourrait être dû à la présence de matière organique, pourtant non décelée à l'œil nu.

Le mode de prélèvement des échantillons à la tarière, la niche d'arrachement ainsi que les fouilles en cours de réalisation le long de la route ont montré que le substratum se situe à deux à trois mètres de profondeur.

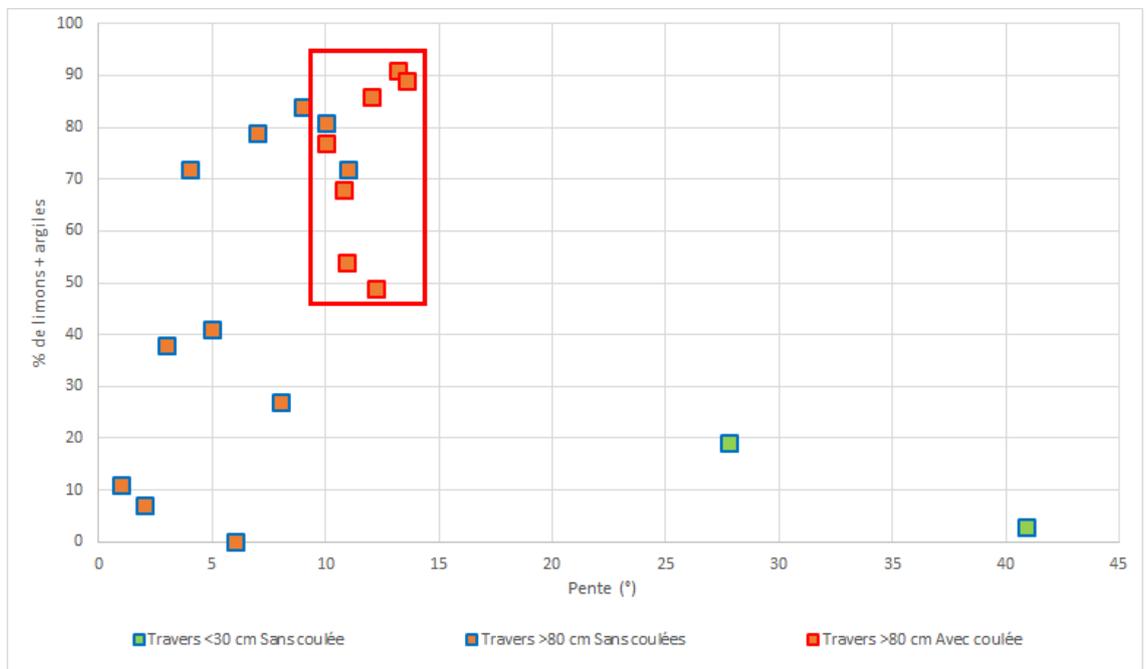
7.6.3 Résultats et interprétation

Il est possible de faire un lien entre la forte teneur en fines des formations superficielles et la présence de coulées de boue sur ce site (cf. *Figur 37*). Toutefois, la localisation des niches d'arrachement le long d'une ligne correspondant au contact entre les calcaires du Malm et la molasse tend à indiquer que ce paramètre est également important à prendre en compte: en créant un barrage hydraulique, la molasse favorise la concentration des écoulements souterrains, ce qui pourrait être le moteur de ces coulées. En empêchant l'eau de s'évacuer, les formations superficielles morainiques peu perméables ont également sans doute favorisé l'apparition de coulées de boue.

Dans ce cas, les essais in situ n'apportent pas de réponse à eux seuls à la problématique de la prédisposition aux coulées de boue: une analyse hydrogéologique plus complète avec la mise en évidence de zones d'arrivées d'eaux et de zones de barrages hydrauliques permettrait une bien meilleure différenciation des zones favorables à l'initiation de coulées de boue.



Figur 36: Travers: Diagramme représentant le pourcentage de limons et argiles en fonction de l'indice de plasticité, ainsi que la pente au point d'échantillonnage.



Figur 37: Travers: Corrélation entre granulométrie, épaisseur des formations superficielles, pente du versant et occurrence de coulées de boue.

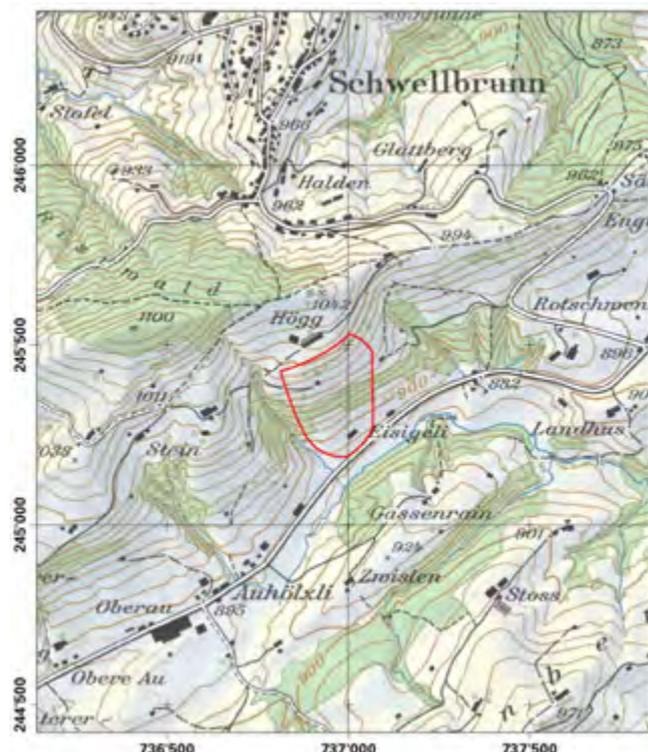
7.7 Schwellbrunn

Die Bearbeitung des Gebiets Schwellbrunn wurde durch die Dr. Roland Wyss GmbH vorgenommen. Die Plastizitätsmessungen im Feld führte S. Boll-Bilgot durch.

7.7.1 Disposition

Lage

Das Untersuchungsgebiet liegt nördlich der Strasse Schönengrund–Waldstatt im Kanton Appenzell AR.



Figur 38: Lage des Testgebietes Schwellbrunn (Flurname «Eisigeli»).

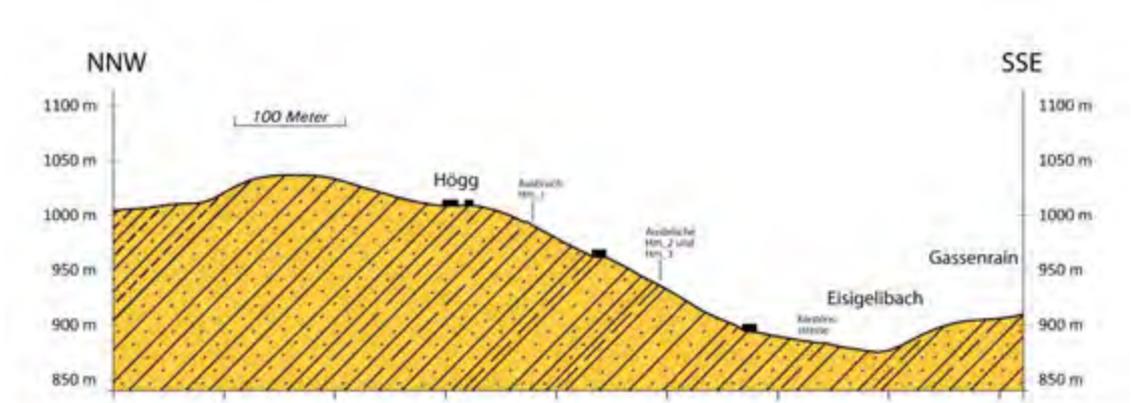
Ereignisse

Im Testgebiet Schwellbrunn wie auch in den umliegenden Gebieten (Schönengrund, Urnäsch, Waldstatt, Herisau) ereigneten sich am 10. Juli 2011 anlässlich eines kurzen aber heftigen Starkregens nach langer Trockenperiode zahlreiche Hangmuren und Spontanrutschungen. Die Niederschlagsdauer lag unter 1 h bei einer Niederschlagssumme von wahrscheinlich zwischen 60 und 110 mm (vgl. «Ereignisdokumentation Unwetter 10. Juli 2011», Ing. Bart AG vom 31.12.2012 und Hydrologischer Spezialbericht des BAFU vom 23.9.2011).

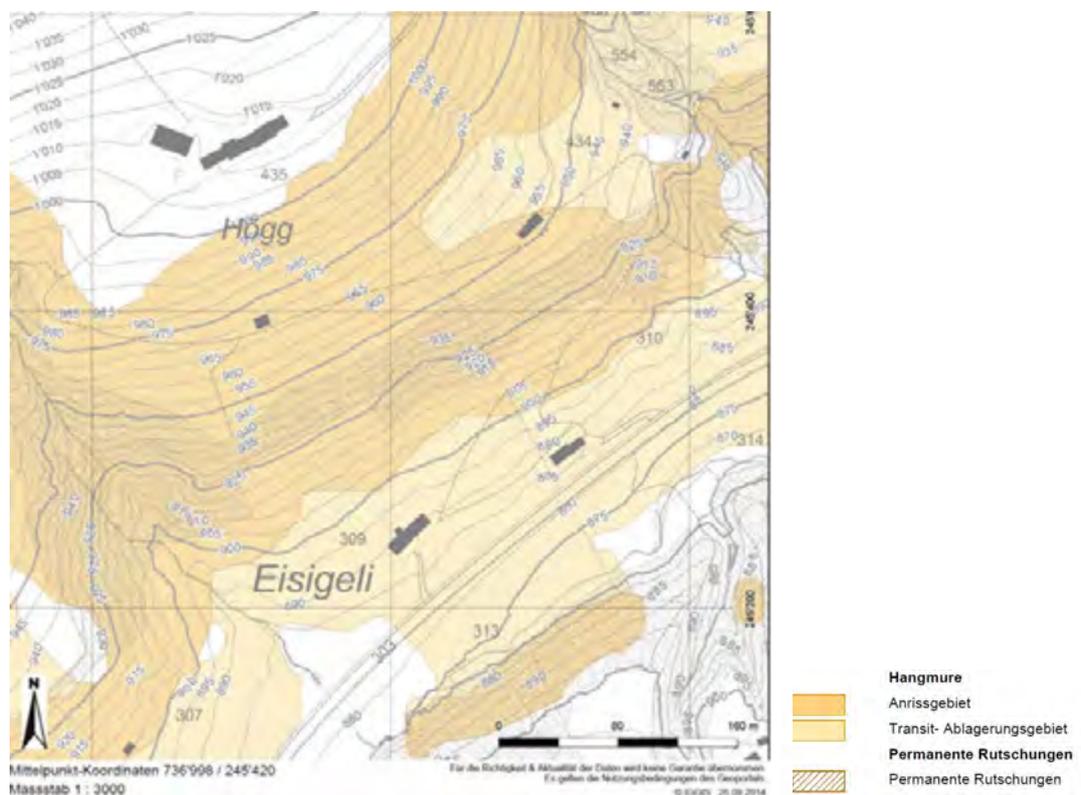
Geologie / Hydrogeologie

Im genauer untersuchten Gebiet mit Flurnamen «Eisigeli» befinden sich mehrere stumme Zeugen (verwachsene Ausbrüchnischen und Ablagerungen), jedoch wurden seit über 50 Jahren keine Ereignisse registriert. Das Gebiet befindet sich im Bereich der Subalpinen Molasse (Schichteinfallen ca. 35° nach NNW). Lokal domi-

nieren als Felsuntergrund Sandstein und Mergel der Unteren Süsswassermolasse (USM, Aquitanien). Überlagert wird der Felsuntergrund von Hanglehm, teilweise auch von geringmächtiger Moräne. Das Felsniveau liegt gemäss Sondierungen zwischen 0.5 und 1.2 m unter der Terrainoberfläche (vgl. *Figur 42*).



Figur 39: Schematisches geologisches Querprofil durch das Testgebiet Schwellbrunn (Verlauf der Profilspur in der Falllinie des Hanges).



Figur 40: Auszug Gefahrenhinweiskarte (aus www.geoportal.ch, Stand August 2015).

Auslösung

Ausgelöst wurden die Ereignisse 2011 wahrscheinlich durch eine Kombination aus rasch ansteigenden Poren- und Felswasserdrücken und gleichzeitig intensivem Oberflächenabfluss, welcher die abfliessenden Hangmuren verbreitet stark verwässerte und die Reibung an der Terrainoberfläche reduzierte, wodurch grosse Reichweiten entstanden (vgl. *Figur 43*).

An einer Stelle nicht auszuschliessen ist zudem ein anthropogener Einfluss auf die Auslösung. Dieser Einfluss erfolgte durch eine möglicherweise undichte Wasserleitung, welche den westlichen Teil des Hanges (oberhalb Ereignis Hm2, vgl. *Beilage 32*) quert und eine Vernässung des Hanges verursacht haben könnte.

Gefahrenkarte

Das Untersuchungsgebiet Schwellbrunn befindet sich ausserhalb des Gefahrenkartenperimeters, es liegt hier lediglich eine Beurteilung auf Stufe Gefahrenhinweis-karte (*Figur 40*) vor. In dieser wird die Hangmurengefährdung unterteilt nach Anriss- und Transit/Ablagerungsgebiet aufgeteilt dargestellt. Diese Beurteilung korrespondiert im Untersuchungsgebiet mit den 2011 aufgetretenen Ereignissen.

Besonderheiten

- In einem bezüglich Hangneigung und Landnutzung homogenen Hang ereigneten sich am 10. Juli 2011 verschiedenartige Prozesse (Hangmuren mit grosser und geringer Reichweite, Anrisse, Spontanrutschungen) (vgl. *Figur 41*). Einige Hangbereiche mit vergleichbarer Hangneigung (wie übrigens auch die bewaldeten, steileren Gebiete) waren von Ereignissen hingegen *nicht* betroffen.
- Das auslösende Ereignis war ein lokaler Starkniederschlag, dessen Wiederkehrperiode aufgrund von Radarmessungen vergleichsweise tief (lokal 5 bis 20 Jahre) eingeschätzt wird, welcher aber insgesamt «seltene bis sehr seltene Gesamtbedingungen» und entsprechend hohe Abflüsse generierte (aus der Ereignisanalyse, Berichte der Ingenieure Bart AG, 2012).
- Die Ereignisse wurden zeitnah photographisch und räumlich dokumentiert. Es existiert eine Ereignisdokumentation (siehe oben).



Figur 41: Ausbruchs- und Transitbereich einer Hangmure aus einer steilen Böschung im Eisigeli (Ereignis Hm_1, vgl. *Beilage 31*). Der Holzschuppen wurde beschädigt. Aufnahmen vom 12.07.2011.



Figur 42: Anrissbereich einer Hangmure mit freigelegtem Fels. Wenige Dezimeter mächtiger Ausbruchsbereich einer Hangmure (links) und deren Gleitfläche auf Mergel/Sandstein (rechts) (Ereignis Hm_3, vgl. *Beilage 31*). Aufnahmen vom 12.07.2011.



Figur 43: Auswirkungen der hohen Niederschlagsintensität. Der intensive Oberflächenabfluss zeigte sich in der grossen Reichweite des stark verflüssigten, mobilisierten Lockermaterials (Bild links). Limitierend auf die Reichweite wirkte neben dem bewaldeten Teil der Transitstrecke auch die infolge von Trittbremen erhöhte Bodenreibung (links). Am obersten Anrisspunkt eines Ereignisses (Hm_2, vgl. *Beilage 31*) wurde ein Hangwasseraustritt beobachtet (rechts). Am gleichen Hang weiter unten wurde innere Erosion durch Hangwasser beobachtet, welche lokal Löcher im Boden verursachte. Aufnahmen vom 12.07.2011.

7.7.2 Durchgeführte Untersuchungen

Anzahl und Lage der Probenahmestellen

Insgesamt wurden im Testgebiet Schwellbrunn 9 Proben genommen und bezüglich Korngrössenzusammensetzung bzw. Plastizität untersucht (Methodik der Probenentnahme vgl. Kapitel 6). Die detaillierte Lage der einzelnen Probenahmestellen ist auf den Karten der Ereignisse, der Hangneigung und der Gefahrenkarte zu finden. Auf der Übersichtskarte in der *Beilage 34* sind zudem zusammenfassend die Ergebnisse der Korngrössenverteilung und des pro Probe ermittelten Plastizitätsindex dargestellt.

Die detaillierten Ergebnisse der Proben finden sich in der *Beilage 35*.

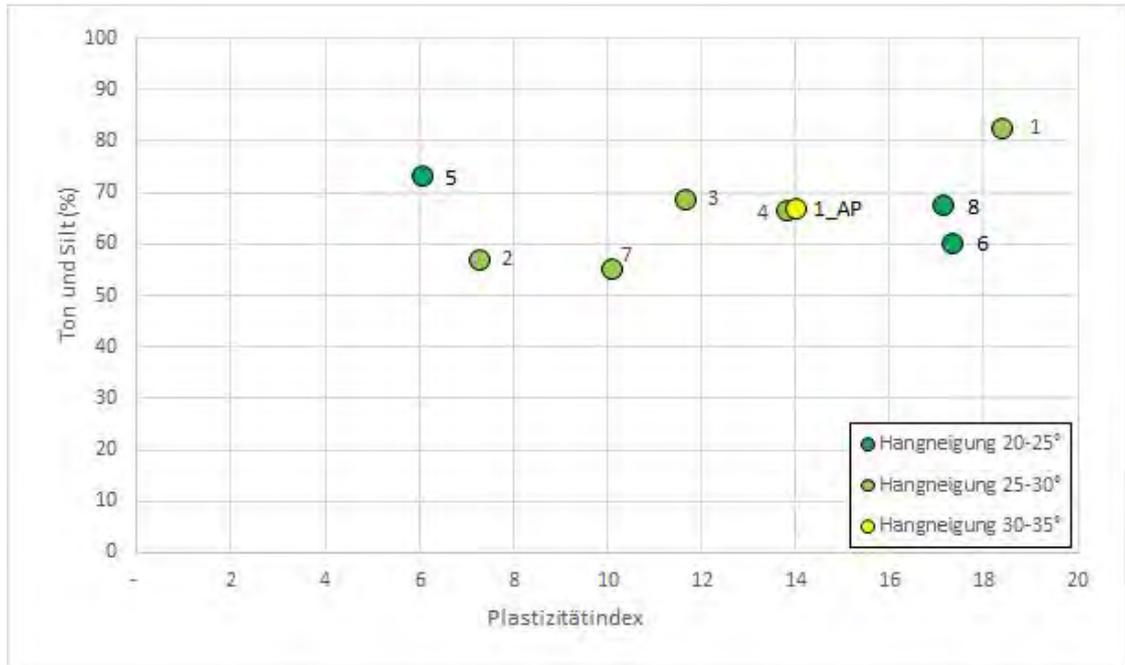
Beschreibung der Probenahmestellen

- Die Probenahmestellen lagen im Bereich der Anrisse von Hangmuren, in nicht mobilisierten Bereichen sowie in Bereichen, wo lediglich Anrisse registriert wurden (vergleiche *Beilagen 31 bis 35*).
- Die Entnahmetiefe lag in der Regel zwischen 0.3 und 0.4 m.
- Es handelt sich um Material aus dem Unterboden, welcher auf Sandstein oder Hanglehm gebildet wurde. Moräne wurde lediglich in der nordwestlichsten Probenahmestelle (Nr. P2_AP) angetroffen.

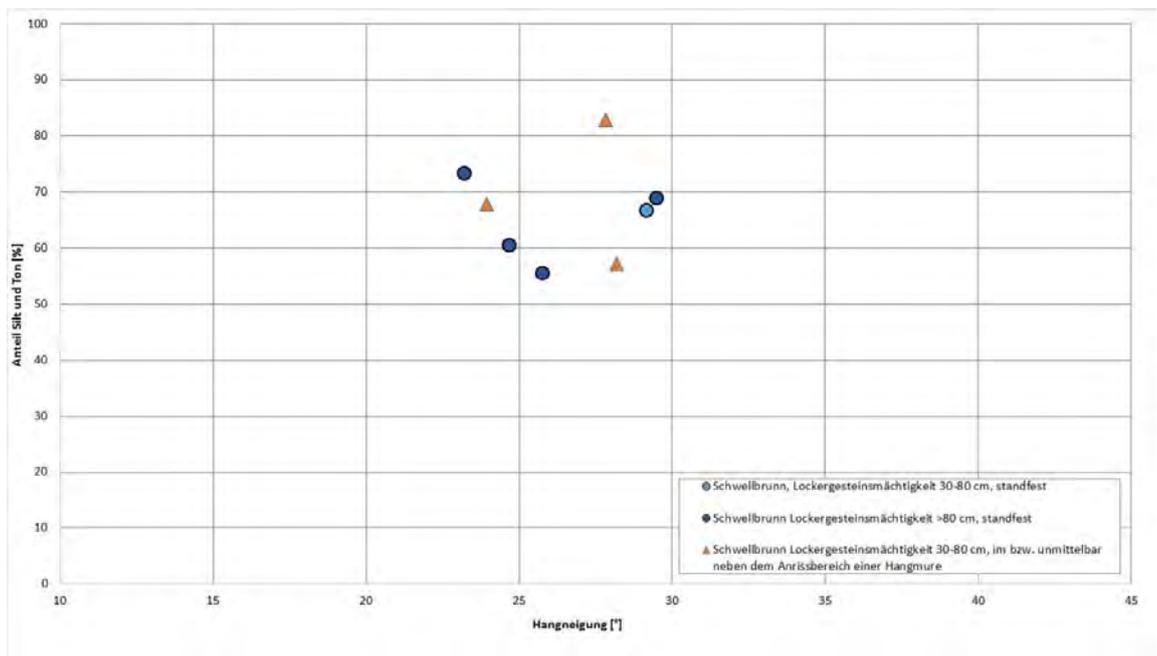
7.7.3 Resultate und Interpretation

Ergebnisse und Interpretation der Plastizitätsanalysen und Bodenaufnahmen

- Die Feinsilt- und Tongehalte sind vergleichsweise hoch ($\phi = 22\%$)
- Die Silt- und Tonfraktion dominieren ($\phi = 66\%$)
- Gemessene Plastizitäten (IP) liegen im mittleren Bereich ($\phi = 13\%$)
- Die Verhältnisse bezüglich Körnung sind vergleichsweise homogen, mit Tendenz zu leicht erhöhtem Anteil an Feinsilt und Ton im Bereich der Anrissgebiete (Hm)
- Tendenz zu erhöhter Plastizität im Bereich der Anrissgebiete (IP $\phi = 15\%$) verglichen mit Proben ausserhalb mobilisierter Gebiete (IP $\phi = 9\%$).
- Das Niveau Fels liegt zwischen 0.5 und 1.2 m unter OK Terrain (an den Probenahmestellen).
- Merkmale der Böden am Standort:
 - Bodentyp: Saure Braunerde (pH CaCl₂ ca. 5)
 - Ausgangsgestein: durchwegs Sandstein
 - Skelettgehalt: durchwegs gering ($< 5\%$)
 - Körnungsklasse gem. FAL 24: sandiger Lehm bis Lehm (17 bis 23 % Ton)
 - Gründigkeit: mässig tiefgründig bis tiefgründig (50 bis über 100 cm Ober- und Unterboden)
 - Wasserhaushalt: mehrheitlich hangwasserbeeinflusst, stellenweise auch stauwasserbeeinflusst (im Bereich der Trittbermen).
- Diskontinuitäten: Primär im Übergang Boden-Fels, sekundär auch zwischen Bodenschichten unterschiedlicher Dichte (Staunässe infolge Viehtritt sowie bei vorhandenem Hangwasser).



Figur 44: Schwellbrunn: Diagramm Plastizitätsindex vs. Ton- und Silt-Gehalt der Proben (mit Angaben der Hangneigung bei der Probenahmestelle).



Figur 45: Schwellbrunn: Diagramm Hangneigung vs. Ton-Silt-Gehalt der Proben (mit Angaben über Lage der Probe bezüglich Hangmurenanriss).

Fazit für das Testgebiet Schwellbrunn

Im Testgebiet «Eisigeli» wurden 2011 durch einen aussergewöhnlich heftigen Starkniederschlag zahlreiche Hangmuren und Spontanrutschungen ausgelöst. Im betroffenen Gebiet wurden vor dem Ereignis während rund 50 Jahren keine Ereignisse registriert, jedoch dokumentieren stumme Zeugen frühere Aktivität.

Die Probenahmen am Standort erfolgten mit dem Ziel, Hinweise auf unterschiedliche Plastizitäten bei gleich bleibenden übrigen Bedingungen zu erhalten. Ausserdem sollten durch parallel dazu aufgenommene Bodenprofile neben dem Niveau des Felsuntergrundes Hinweise auf Diskontinuitäten in den Bodenschichten (Verdichtung, Vernässung) dokumentiert werden.

Kritische Grösse für die Auslösung von Hangmuren im Untersuchungsgebiet war neben der Hangneigung die Geländeform (gleiche oder höhere Hangneigung unterhalb des Anrissbereiches). Die Plastizitätsanalysen lassen in Gebieten mit gleicher Hangneigung eine schwach ausgeprägte Tendenz zu erhöhter Plastizität in mobilisierten Bereichen erkennen. Die Variabilität bezüglich Feinerdekörnung dürfte die Folge der variablen Tiefe des Felsuntergrundes und allfälliger vergangener Hangbewegungen sein.

7.8 Altstätten

Die Bearbeitung des Gebiets Altstätten wurde durch die Dr. Roland Wyss GmbH vorgenommen. Die Plastizitätsmessungen im Feld führte A. Parriaux durch.

7.8.1 Disposition

Lage

Das Untersuchungsgebiet liegt ca. 1.5 km nördlich von Altstätten am Nordwestrand des St. Galler Rheintals.



Figur 46: Testgebiet Altstätten (Flurname «Lahmern-Guggerstobel»).

Ereignisse

Zwischen dem 31. Mai bis 2. Juni 2013 ereigneten sich im Gebiet Lahmern zahlreiche Spontanrutschungen und Hangmuren, permanente Rutschungen wurden reaktiviert. Im Gebiet wurden im Rahmen einer Gefahrenabklärung rund 20 Ereignisse dokumentiert. Hinweise aus dem Gemeindearchiv, von Gemeindevertretern und von Anwohnern auf frühere Ereignisse im Perimeter wurden ebenfalls erhoben.

Geologie / Hydrogeologie

Der Untergrund im Untersuchungsgebiet liegt im Bereich der Subalpinen Molasse (Schichteinfallen ca. 35° nach SSE) und besteht aus Nagelfluh, Sandsteinen und Mergeln der Unteren Süsswassermolasse (Aquitainen). Diese Gesteinsformationen sind in den steilen Tobeinschnitten teilweise anstehend. Mehrheitlich wird der Felsuntergrund überlagert von unterschiedlich mächtiger Moräne der Würm-Vergletscherung, von Gehängeschutt und stellenweise von Rutschmassen.

Anlässlich der Begehungen in der ersten Hälfte Juni 2013 wurden stellenweise wasserführende Schichten im Gestein (ca. LK 758'355 / 251'693) und im überlagernden Moränenmaterial (mehrere Gebiete) festgestellt.



Figur 47: Lage des Testgebietes Altstätten (rote Markierung) im Relief. Gut erkennbar ist der Verlauf des Guggerstobels ungefähr rechtwinklig zum Schichteinfallen der USM. Links, oberhalb des unteren Bildrandes ist die grosse schichtparallele Rutschung «Oberer Weidist» erkennbar (rund 1 Mio. m³, schwarzer Kasten), welche im Juni 2013 ebenfalls reaktiviert wurde (Bildquelle: map.geo.admin.ch).

Geomorphologie

Das beurteilte Gebiet befindet sich in einem mehrheitlich zwischen 25 und 45° steilen Einschnitt des Tobelbaches. Die Westseite des Tobels ist gegenüber der Ostseite steiler. In der Westseite wurden anlässlich der Feldbegehung denn auch deutlich mehr frische Rutschungen und Anzeichen früherer Rutschaktivität angetroffen, als dies in der Ostflanke der Fall war. An mehreren Stellen wurden verwachsene Ausbrüchnischen früherer Spontanrutschungen oder Hangmuren beobachtet. Die in *Beilage 36* dargestellten Rutschungen Z5 (aktiv) und Z8 (wenig aktiv, reaktivierbar) sind grössere permanente Rutschungen im Gebiet.

Die primäre treibende Kraft der permanenten Rutschungsprozesse im Untersuchungsgebiet ist der nur teilweise verbaute Tobelbach, welcher sich seit dem letzten Rückzug des Gletschers anhaltend ins Gelände erodiert.

Böden

Die angetroffenen Wald- und Landwirtschaftsböden zeigten stellenweise Anzeichen von Vernässung, welche auf wasserstauende Schichten im Untergrund schliessen lassen (siehe auch kantonale Karte der Landwirtschaftsböden, www.geoportal.ch). Auf der Westseite des Tobels wurden in den Anrissflächen der frisch abgegangenen Spontanrutschungen und Hangmuren mehrfach Drainage-Auslässe beobachtet, welche durch die Ereignisse teilweise zerstört wurden. Diese

Drainagen ebenso wie die Strassenentwässerung über die Schulter könnten als Auslösefaktoren der Rutschungsereignisse in diesen Bereichen eine wesentliche Rolle gespielt haben.

Auslösung

Aufgrund der Niederschlags-Messwerte der Station Widnau SG wird geschätzt, dass die Rutschungen von Anfang Juni 2013 im Untersuchungsgebiet *Lahmern* durch ein Niederschlagsereignis der Wiederkehrperiode von rund 50 Jahren ausgelöst wurden. Zwischen dem 19. Mai und dem 2. Juni 2013 wurden in Widnau mit 229 mm rund 21 % des an dieser Station durchschnittlichen Jahresniederschlags gemessen. Die maximale Tagessumme betrug an dieser Station 63.1 mm (1. Juni 2013).

Gefahrenkarte

Das Untersuchungsgebiet befindet sich ausserhalb des Gefahrenkarten-Perimeters. Im Rahmen eines Massnahmenkonzepts Naturgefahren der Gemeinde wurde im Gebiet im Jahr 2013 aufgrund früherer Ereignisse eine Punktuelle Gefahren-Abklärung bezüglich der Gefährdung durch Massenbewegungen durchgeführt. Die Gefahrenbeurteilung erfolgte unter Berücksichtigung früherer Einzelereignisse und der zahlreichen Ereignisse im Jahr 2013. Die Einordnung der Wiederkehrperiode der Ereignisse 2013 erfolgte basierend auf der Niederschlagsstatistik der Station Widnau SG.

Die Abklärungen ergaben an der westlichen Tobelböschung mehrheitlich erhebliche und mittlere Gefährdung (Matrix-Felder 7/8 resp. 4/5). An der östlichen Tobelböschung liegt nur gebietsweise eine Gefährdung vor (Matrix-Felder 2, 5 und 7).

Besonderheiten

- In einem kurzen Zeitraum ereigneten sich verschiedenartige Prozesse (Hangmuren mit grosser und geringer Reichweite, Anrisse, Spontanrutschungen, Reaktivierungen permanenter Rutschungen, Uferrutschungen) (vgl. *Beilage 36*). Einige Hangbereiche mit vergleichbarer Hangneigung waren von Ereignissen hingegen *nicht* betroffen.
- Die ostexponierte Tobelböschung war von Ereignissen überaus stark betroffen, die westexponierte praktisch nicht (*Beilage 36*).
- In einigen Gebieten überlagerten sich verschiedene Prozesse (z. B. Hangmuren über mittelgründigen permanenten Rutschungen)
- Das auslösende Ereignis waren grossflächige lang anhaltende und intensive Niederschläge.
- Die Ereignisse wurden zeitnah photographisch und räumlich dokumentiert. Es existiert eine Ereignisdokumentation (Auszug in *Beilage 36*).

7.8.2 Durchgeführte Untersuchungen

Anzahl und Lage der Probenahmestellen

Im Testgebiet Altstätten wurden im Anrissbereich von Hangmuren respektive Spontanrutschungen durch A. Parriaux 4 Proben genommen und bezüglich Korngrössenzusammensetzung und Plastizität untersucht (Methodik der Probeentnahme vgl. Kapitel 6). Die Lage der einzelnen Probenahmestellen ist in den *Beilagen 36 ff.* zu finden. In *Beilage 38* sind zudem zusammenfassend die Ergebnisse der Korngrössenverteilung und des pro Probe ermittelten Plastizitätsindex dargestellt.

Die detaillierten Ergebnisse der Proben finden sich in der *Beilage 40*.

Beschreibung der Probenahmestellen

- Die 4 Probenahmestellen lagen im Bereich des Anrisses von Hangmuren (P1 und P3) und von einer Spontanrutschung resp. einer reaktivierten permanenten Rutschung (P2 und P4) (vergleiche *Beilage 36*).
- Die Entnahmetiefe wurde nur fotografisch dokumentiert. Alle Proben wurden gemäss Fotos aus den noch offenen Anrissen entnommen. Es handelt sich um Material aus Unterboden und Untergrund (Moräne).
- Die Probenahme erfolgte in einem aktiven Rutschgebiet (Reaktivierung Anfang Juni 2013), in dem sich gebietsweise spontane und permanente Prozesse überlagern. Es ist folglich ein ausgesprochen heterogener Aufbau von Untergrund (mehrheitlich Moräne, gebietsweise rutschaktiv) und Boden anzunehmen.

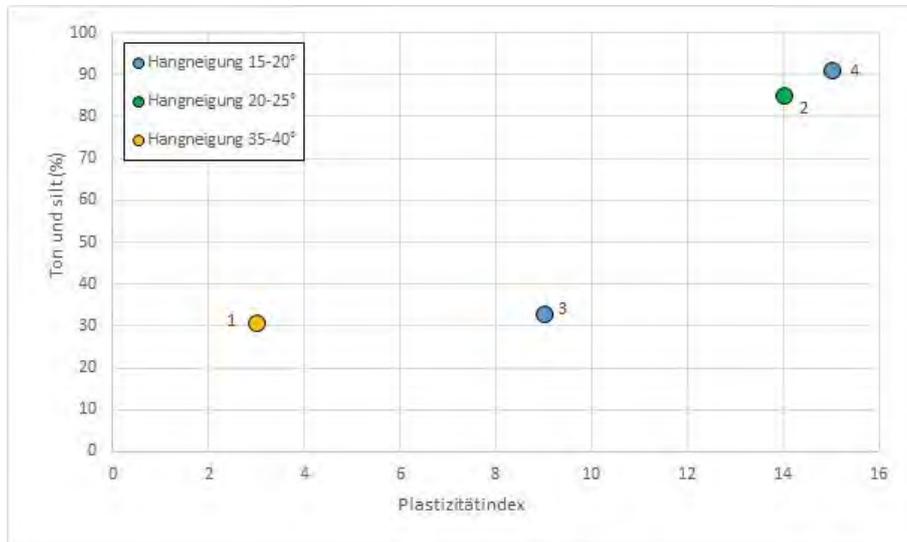
7.8.3 Resultate und Interpretation

Ergebnisse und Interpretation der Plastizitätsanalysen und Ereignisdokumentation

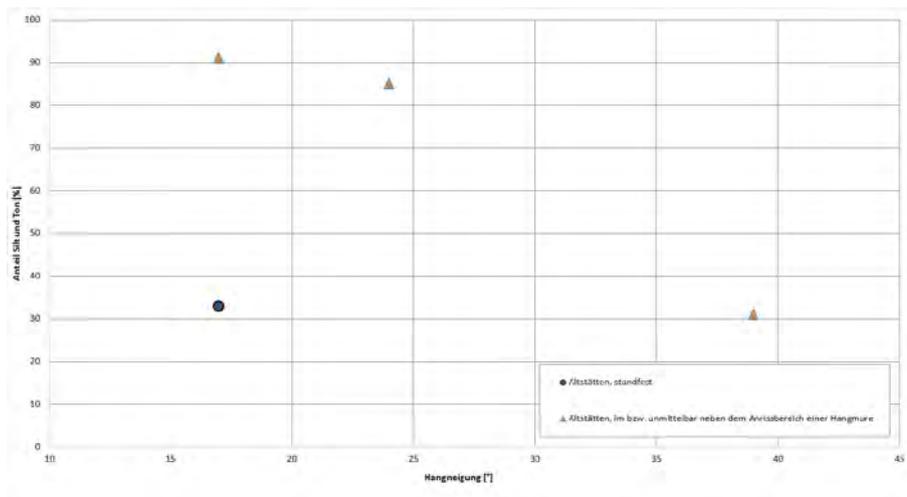
Statistisch relevante Angaben sind heikel, da nur an 4 Stellen Messungen erfolgten.

- Proben 2 und 4: Hoher Feinsilt- und Tongehalt und hohe Plastizität
- Proben 1 und 3: Tiefer Feinsilt- und Tongehalt und tiefe Plastizität
- Merkmale der Böden am Standort (gemäss Beobachtungen und kantonaler Karte der Landwirtschaftsböden, www.geoportal.ch):
 - Bodentyp: Braunerde, stellenweise evtl. Braunerde-Gley oder Rendzina
 - Ausgangsgestein: Moräne
 - Skelettgehalt: mässig bis gross (10 bis 30 %)
 - Körnungsklasse gem. FAL 24: sandiger Lehm bis toniger Lehm (15 bis >30 % Tongehalt)
 - Gründigkeit der Bodenschicht: 50 bis über 100 cm im Bereich der Probenahmestellen (gemäss Fotos)
 - Wasserhaushalt: stauwasserbeeinflusst, stellenweise auch hangwasserbeeinflusst (beobachtete Wasseraustritte).
- Diskontinuitäten sind zwischen Bodenschichten mit unterschiedlichen Tongehalten (Stauwasser) sowie im Übergang Boden-Moräne (Hangwasser) und Moräne-Fels (Felswasser) anzunehmen. Es wird angenommen, dass sich die Basis der

grösseren permanenten Rutschungen im Übergang Moräne-Fels befindet. Anrisse von Hangmuren wurden mehrheitlich im Übergang Boden-Moräne beobachtet.



Figur 48: Altstätten: Diagramm Plastizitätsindex vs. Ton- und Silt-Gehalt (mit Angabe der Hangneigung bei der Probenahmestelle).



Figur 49: Altstätten: Diagramm Hangneigung vs. Ton-Silt-Gehalt der Proben (mit Angaben über Lage der Probe bezüglich Hangmurenanriss).

Fazit für das Testgebiet Altstätten

Im Testgebiet Altstätten wurde Anfang Juni 2013 mit zuerst lang anhaltenden und anschliessend intensiven Niederschlägen ein bereits zuvor rutschaktives Gebiet reaktiviert.

Kritische Grössen für die Auslösung der Hangmuren waren neben den grossen Regenmengen eine Rutschprozesse stark begünstigende Grunddisposition (Diskontinuitäten in Boden und Untergrund und in der Folge verbreitet rutschaktive Bereiche). Die stark unterschiedlichen Plastizitäts- und Feinerdekorngewerte zwischen den Proben P1/P3 und P2/P4 werden als Indikator für die heterogenen Verhältnisse in Boden und Untergrund des Testgebietes interpretiert.

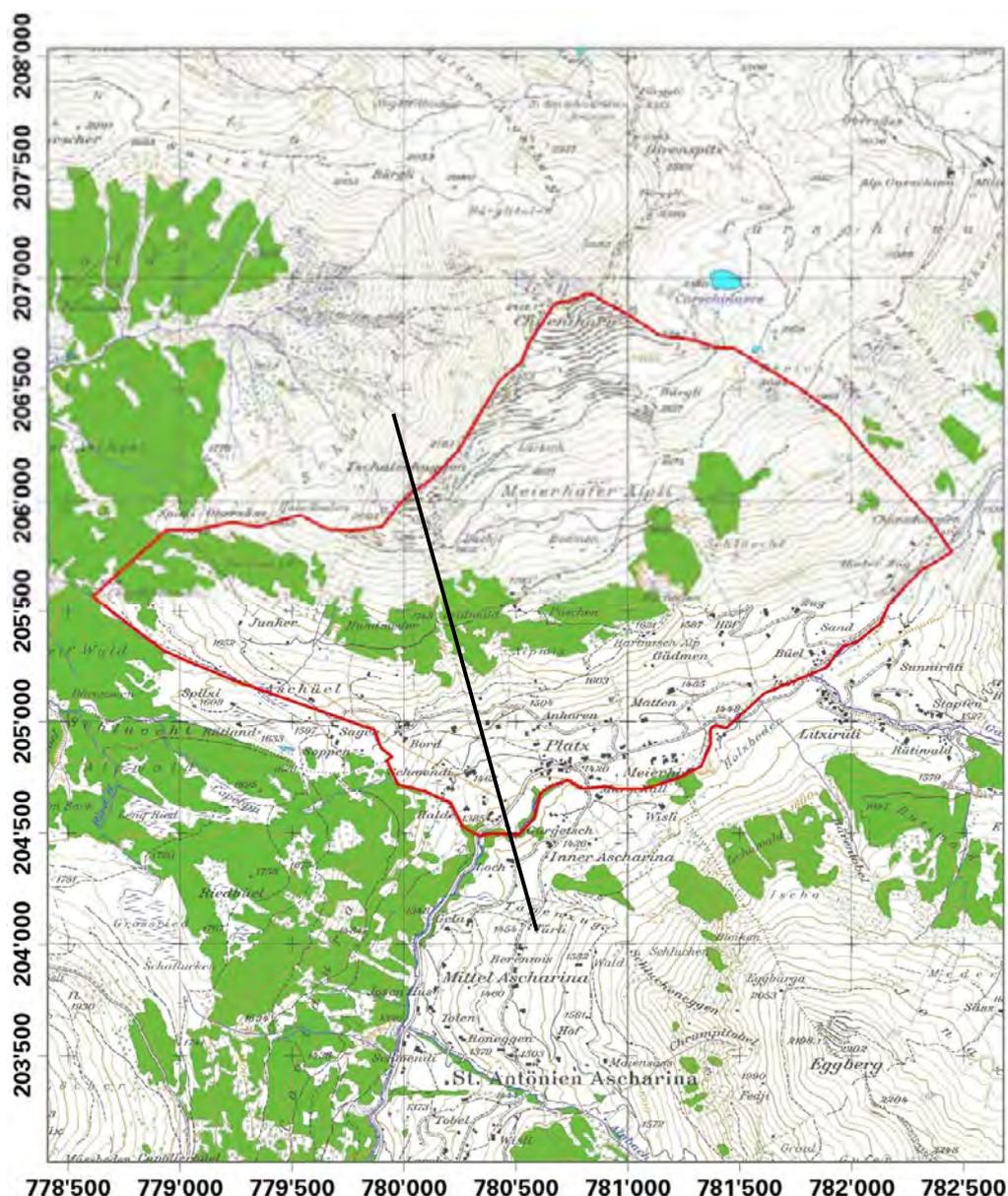
7.9 St. Antönien

Die Aufnahmen der Hangmuren St. Antönien direkt nach den Ereignissen 2005 erfolgten durch die Eidg. Forschungsanstalt WSL. Die weitere Bearbeitung wurde durch die Dr. Roland Wyss GmbH vorgenommen. Die Plastizitätsmessungen 2013 im Feld führte A. Parriaux durch.

7.9.1 Disposition

Lage

Das Untersuchungsgebiet liegt nördlich von St. Antönien, einerseits in den südexponierten Abhängen des Spitzi-Obersäss, Hubelboden, Tschatschuggen und Chüenihorn und andererseits bei Schwendi, einem ostexponierten Abhang.



Figur 50: Das Untersuchungsgebiet St. Antönien.
(Profilspur: s. Figur 52).



Figur 51: Blick ins Untersuchungsgebiet von Süden (Stand 2007). Auffällig sind die zahlreichen Rinnen im westlichen Teil des Gebietes.

Ereignisse

Im Gebiet von St. Antönien ereigneten sich auf einem Areal von 4.7 km² insgesamt 50 Rutschungen bzw. Hangmuren. Ein Flächenanteil von 73 % (3.4 km²) wies dabei eine Hangneigung zwischen 20 und 50 % auf (Rickli et al., 2005).

Die meisten Ereignisse lagen im Bereich des Südhanges des Tschatschuggen zwischen Spitzi–Obersäss und Alpwis.

Gemessene Niederschlagsmengen im Gebiet zwischen Vaduz und Davos (ANETZ-Stationen) vom 18. August bis 23. August 2005 betrugen 155 mm respektive 118 mm. Für diese Periode wurden im Tagessammler St. Antönien 185 mm registriert, davon allein am 22. August eine Summe von 116 mm (Rickli et al., 2005).

Geologie / Hydrogeologie

Das Gebiet liegt im Bereich des Flyschs der Tomül-Decke und ist aus sog. Prättigau-Schiefen aufgebaut. Es handelt sich dabei um Schichtfolgen der Pfävisgrat-Serie (Turon), der Fadura-Serie (Coniac–Santon = Unteres Senon), der Gyrenspitz-Serie (Campan und älteres Maastricht) und der Eggberg-Serie (Maastricht).

Die Fadura-Serie im Liegenden besteht vorwiegend aus einer dünnbankigen Abfolge von mergeligen Kalken, abwechselnd mit dichten Kalken, Sandkalken und Feinbreccien.

Die Gyrenspitz-Serie besteht vorwiegend aus polygenen Breccien wechsellagernd mit Mergelschiefen und Sandsteinen.

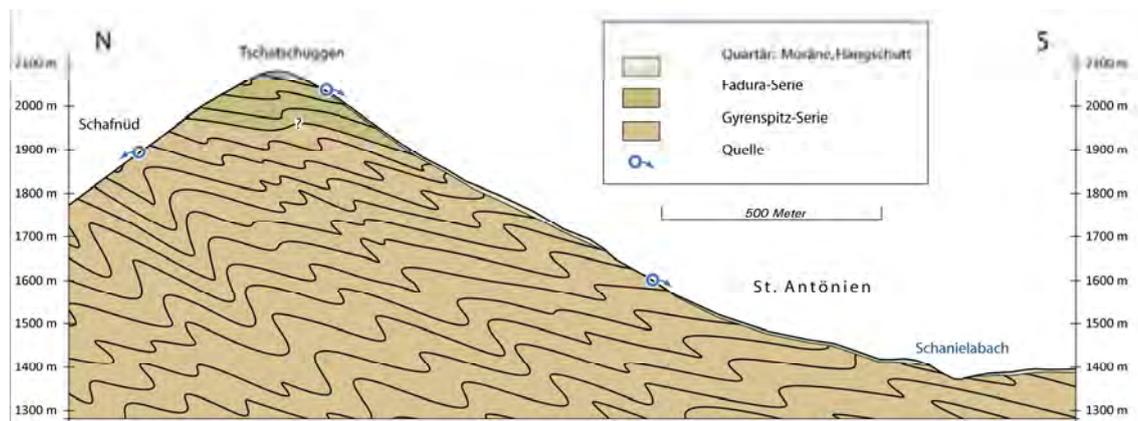
Die Schichtung/Hauptschieferung fällt mit 30–50° gegen Nordosten ein. Die Gesteine sind anchimetamorph.

Die Festgesteine werden von Lockergesteinen überlagert, die überwiegend durch die lokale Vergletscherung entstanden sind und entsprechend generell als Moräne klassiert werden. Lokal ist die Moräne zu Hangschutt umgelagert bzw. von Hangschutt bedeckt.

Das Gebiet Spitzi-Obersäss bis Alpwis, wo eine besondere Häufung an Hangmuren zu verzeichnen war, ist durch die Fadura-Serie aufgebaut, die von einer relativ dünnen Lockergesteinsabfolge bedeckt ist.

Die Feldbefunde zeigen vom Gebiet Chöpflerboden–Rotwald–Junker–Leidwald–Bodmer–Bärgli relativ geringmächtige (0.5–2 m) Moräne. Es handelt sich vorwiegend um beigen, siltigen bis stark siltigen Kies. Die Lagerungsdichte ist gering bis mittel, was auf lokale Umlagerung zurückzuführen ist. Aufgrund des relativ hohen Feinanteils dieser Gesteine ist die Wasserdurchlässigkeit als gering einzustufen. Im Übergang zum Oberboden nimmt der Feinanteil zu, was auf die Verwitterung von tonig-siltigen Komponenten zurückzuführen ist. Diese beigen Schichten werden oft unterlagert von auffallend grauen, kiesigen Sedimenten. Es handelt sich dabei meist um schlecht abgestuften Kies mit gerundeten Kalkkomponenten. Die Wasserdurchlässigkeit dieser Schichten ist gut bis sehr gut. Bei den kalkigen Geröllen handelt es sich um Sulzfluh-Kalk, der im Gebiet der Sulzfluh und südöstlich davon vorkommt und durch Gletschertransport ins Untersuchungsgebiet gelangte.

Im Gebiet Anhoren–Gädmen und weiter gegen NE liegt eine Moränenschuttbedeckung vor, die sich bezüglich Mächtigkeit und Materialbeschaffenheit deutlich von der anderen Moränenbedeckung unterscheidet. Es handelt sich um grau-braunen, siltigen Kies mit viel Sand und reichlich Steinen und Blöcken. Darin finden sich zwei grosse, alte Anrisse (Bachtelen, Schlüecht), die auf grössere Hangmuren schliessen lassen. NE Ahoren und im Anriss Bachtelen finden sich zahlreiche gefasste Quellen.



Figur 52: Schematisches Querprofil Tschatschuggen–St. Antönien.

Systematische Untersuchungen zur Hydrogeologie liegen keine vor. Neben verschiedenen (gefassten) Quellen insbesondere im Gebiet Anhoren–Gädmen zeigt die topografische Karte zahlreiche Wasseraustritte und Quellen auf der Westseite des Grates Spitzi-Obersass–Chüenihorn. Sie liegen direkt unterhalb der vermuteten Grenze zwischen der als Stauer wirkenden Fadura- und der besser durchlässigen Gyrenspitz-Serie (*Beilage 41*).

Demgegenüber sind relativ wenige Wasseraustritte im Gebiet Spitzi-Obersaas – Alpwis zu verzeichnen. Auffallend sind aber die häufigen Rinnen welche das Gebiet durchziehen (s. *Figur 51*). Auch ist im Bereich Hundmeder ist die Lockergesteinsbedeckung verrutscht. Das Gebiet weist eine relativ junge Bestockung auf.

Hangneigung

Die Hangmuren in St. Antönien traten alle bei Hangneigungen zwischen 20 und 45° auf, der grösste Teil bei Neigungen zwischen 25 und 35°. Die mittlere Hangneigung liegt bei 32° (Rickli et al., 2005).

Im Gebiet zwischen Spitzi–Obersäss und Alpwis mit einer auffallenden Häufung von Hangmuren im Wald liegt die Hangneigung zwischen 20 und 30° (*Beilage 42*).

Gefahrenkarte

Es lag für die vorliegende Untersuchung vom gesamten Gemeindegebiet keine Gefahrenkarte vor.

7.9.2 Durchgeführte Untersuchungen

Analyse der Hanginstabilitäten 2005

Basierend auf den Aufnahmen der WSL im Jahr 2007 wurden eigene Feldaufnahmen durchgeführt. Die Befunde sind in einem Berichtsentwurf festgehalten worden bzw. sind in einen Bericht der AGN (AGN 2008: Hochwasser August 2005, Analyse der Hanginstabilitäten) eingeflossen.

Anzahl und Lage der Probenahmestellen 2013

Im Testgebiet St. Antönien wurden im Anriss- und Transitbereich von Hangmuren aus dem Jahr 2005 durch A. Parriaux 4 Proben genommen und bezüglich Korngrössenzusammensetzung bzw. Plastizität untersucht (Methodik der Probeentnahme vgl. Kapitel 6). Die Befunde von 2008 wurden neu interpretiert. Die Lage der einzelnen Probenahmestellen ist in den *Beilagen 41 ff.* zu finden. In *Beilage 44* sind zudem zusammenfassend die Ergebnisse der Korngrössenverteilung und des pro Probe ermittelten Plastizitätsindex dargestellt.

Beschreibung der Probenahmestellen

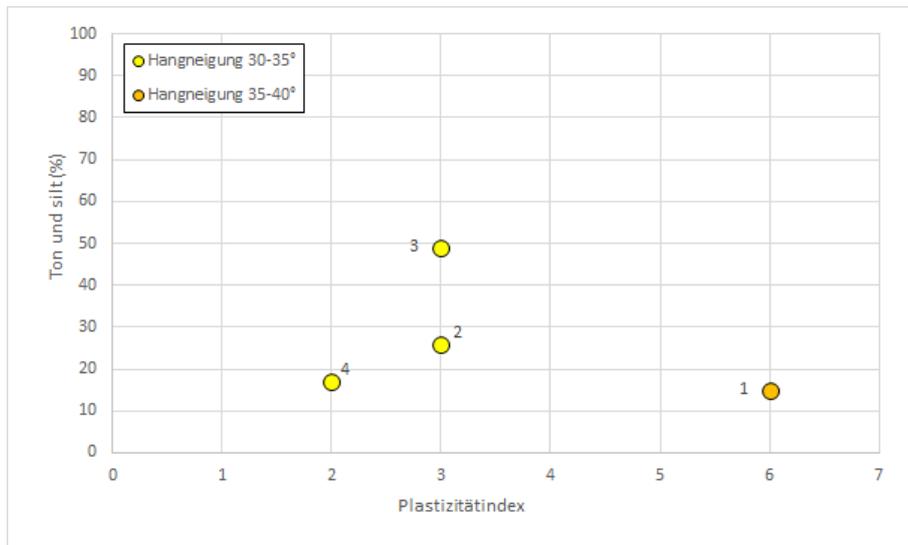
- Die 4 Probenahmestellen lagen in 2005 ausgeräumten Anrissnischen und im Transitbereich von Hangmuren (P1 bis P3) und im Anrissbereich einer frischeren Spontanrutschung (P4) (vergleiche *Beilage 41 ff.*).
- Die Entnahmestellen wurden lediglich fotografisch dokumentiert. Es handelt sich um Material aus Unterboden und Hangschutt. Konkrete Angaben zur Entnahmetiefe fehlen.

7.9.3 Resultate und Interpretation

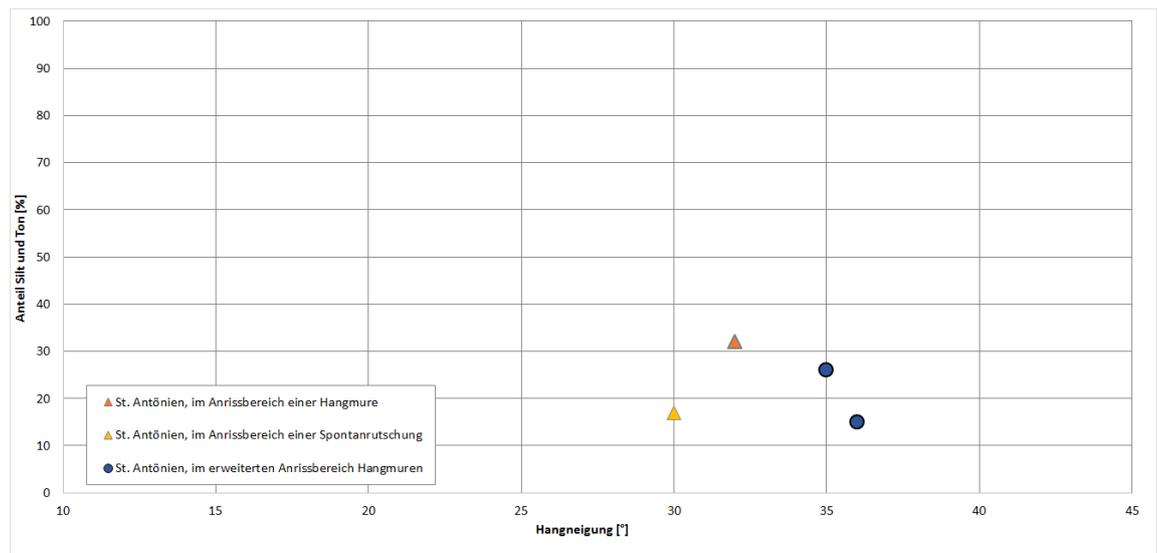
Statistisch relevante Angaben sind heikel, da nur an 4 Stellen Messungen erfolgten. Die Ergebnisse der Korngrössenanalysen und der Plastizitätsmessungen lassen sich wie folgt zusammenfassen (s. *Beilage 43*):

- Die Silt- und Tongehalte der Proben liegen zwischen 15 und 48 %.
- Gemessene Plastizitäten liegen zwischen 2 und 6 % und sind relativ homogen. Generell zeigen die untersuchten Lockergesteinsproben relativ geringe Plastizitätswerte, was für Moränenmaterial bzw. Hangschutt von Bündnerschiefern typisch ist.

- Die Fadura-Serie wirkt tendenziell als Wasserstauer, während die grobdetrیتیsche Gyrenspitz-Serie etwas stärker geklüftet ist und daher eine bessere Wasserdurchlässigkeit besitzt.
- Die Hauptentwässerung des Gebirges dürfte bei normalen Wetterbedingungen in nordwestlicher Richtung erfolgt. Bei starken Niederschlägen und einem damit verbundenen Anstieg des Gebirgswasserspiegels, dürften jedoch Quellen auf der Süd- bzw. Ostseite des Grates Spitzzi-Obersass–Chüenihorn anspringen, und aus dem Fels ins Lockergestein bzw. an die Oberfläche austreten. Heterogene Durchlässigkeitsverhältnisse in den Lockergesteinen können zum Rückstau des austretenden Wassers führen, welcher dann die Ursache für die Auslösung von Hangmuren ist.



Figur 53: St. Antönien: Diagramm Plastizitätsindex vs. Ton- und Silt-Gehalt (mit Angabe der Hangneigung bei der Probenahmestelle).



Figur 54: St. Antönien: Diagramm Hangneigung vs. Ton-Silt-Gehalt der Proben (mit Angaben über Lage der Probe bezüglich Hangmurenanriss).

8 ERGEBNISSE DER UNTERSUCHUNGEN

8.1 Aufnahme von Hangmurenereignissen

Zielführend für eine bessere Kenntnis des Prozesses Hangmuren ist die ausreichende Erfassung der geologischen und hydrogeologischen Grunddisposition. Das von der WSL entwickelte und verbesserte Aufnahmeformular bildet hierzu ein gutes Arbeitsinstrument.

8.2 Testgebiete und Fragestellung

Die Fragestellung an die Methode GEOLEP war nicht in allen Testgebieten gleich:

- In 5 Gebieten wurde eher grossräumig, flächig gearbeitet um zu sehen, ob und wie die Prozessbeurteilung mit der Methode verbessert werden kann. Hier sind die statistischen Aussagen besser, da auch eine ausreichende Probenzahl vorhanden ist.
- In 4 Gebieten wurde sehr lokal gearbeitet, um die Sensitivität der Methode zu testen. In diesen Gebieten stand die Fragestellung im Vordergrund, welche Verbesserung die Methode in der Hangmuren-Ausbruchbeurteilung bringt. Das Gebiet Alpnachstad ist wegen seiner Homogenität eher uninteressant, wurde aber vor allem wegen bereits existierenden Berechnungen für die Energien (Gebäudestatik, erste Ramms-Modellierungen) gewählt, damit die Murgangmodellierungen in Phase 2 unabhängig überprüft werden können.

8.3 Zusammenfassende Befunde der Feldaufnahmen

Die Befunde in den einzelnen Gebieten lassen sich wie folgt zusammenfassen (Tabelle 4):

Gebiet	Stumme Zeugen / Ereignisse	Niederschlag	Hydrogeol. Förderfaktoren	Hangneigung	Deckschichten (Art, Mächtigkeit)	Plastizität (typischer Wert)
Gebiete mit flächiger Fragestellung						
Trubschachen (18 Proben)	ja	lang	ja	25–40	Hanglehm/Hangschutt 1–3 m	22–27
Eltschingera (18 Proben)	ja	lang	ja	20–30	Hangschutt 0.3–1 m	30
Les Avants (18 Proben)	ja	lang	ja	25–30	Hangschutt 0.5–1 m	7
Travers (20 Proben)	ja	lang	ja	10–15	Hangschutt 0.5–2 m	15
Schwellbrunn (9 Proben)	ja	kurz	ja	24–28	Hangschutt 0.5–1 m	13
Gebiete mit lokal begrenzter Fragestellung						
Alpnachstad (4 Proben)	ja	lang	nein	25–30	Moräne 0.5–0.55 m	22
Ennetbürgen (13 Proben)	ja	lang u. kurz	Nein (ja*)	24–30 (40*)	Moräne (0.2*) 0.5–0.55 m	(3*) 7
Altstätten (4 Proben)	ja	lang	ja	25–40	Moräne 0.5–2 m	10
St. Antönien (4 Proben)	ja	lang	ja	25–35	Moräne 0.5–2 m	3

Stumme Zeugen / frühere Ereignisse: ja / nein
 Niederschlag (Intensität/Dauer): kurz / lang
 Hydrogeologische Förderfaktoren: ja / nein
 Hangneigung: Wert in °
 Deckschichten: Art, Mächtigkeit
 Plastizität: typischer Wert
 (*) Probe 2 Ennetbürgen: Eindeutig hydrogeologischer Einfluss.

Tabelle 4: Zusammenstellung der wichtigsten Parameter der verschiedenen Untersuchungsgebiete.

Gebiete mit flächiger Fragestellung

Trubschachen (OMM/OSM mit Hanglehm/Hangschutt) weist eine grosse Anzahl von Ereignissen auf. Die Hangneigungen sind mittel bis steil, die gemessenen Plastizitätswerte hoch. Mit 48–96 % (in 80 % der Proben > 70 %) waren die Silt-/Tonanteile ebenfalls hoch. Die meisten Anrisse bzw. Hangmuren waren bei Hangneigungen grösser als 25° zu verzeichnen, ein kleinerer Teil aber auch schon bei Hangneigungen zwischen 18 und 25°. Generell waren Anrisse bei hohen Silt-/Tongehalten zu verzeichnen.

In **Eltschingera** (Préalpes, Flysch) dominieren mittlere Hangneigungen, die gemessenen Plastizitätswerte sind hoch. Die meisten Hangmuren traten bei geringer Mächtigkeit der Deckschicht auf.

Les Avants (Préalpes, Lias) zeichnet sich durch mittlere Hangneigungen und geringe Plastizitätswerte aus, die gut mit den Ton-/Siltgehalten korrelieren.

Die Ereignisse in **Travers** (Jura, Molasse) treten bei sehr geringen Hangneigungen auf. Die Plastizitätswerte liegen im mittleren Bereich. Vom Typ her dürfte es sich eher um spontane Rutschungen im Sinne von AGN 2004, also um Teilreaktivierungen oder murgangartige Verflüssigungen von grossräumigen permanenten Rutschungen und nicht um eigentliche Hangmuren handeln.

In **Schwellbrunn** (Subalpine Molasse mit Hangschutt) dominieren mittlere bis grosse Hangneigungen und mittlere Plastizitätswerte.

Gebiete mit lokaler Fragestellung

Alpnachstad (Helvetikum, Stad-Mergel mit Moränenbedeckung) weist mittlere Hangneigungen von 25–30° auf. Die gemessenen Plastizitäten sind ebenfalls im mittleren Bereich. Alle Abgänge erfolgten auf Fels. Hangmuren prallten hier 2005 an Häuser. Mit ersten Ramms-Modellierungen und mit den Schäden über die Gebäudestatik existieren hier bereits unabhängige Abschätzungen der Murgangenergien.

In **Ennetbürgen** (Helvetikum, Stad-Mergel mit Moränenbedeckung) fanden die Hangmurenabgänge vorwiegend bei mittleren (24–30°), in einem Fall mit hydrogeologischem Förderfaktor auch bei grossen Hangneigungen und sehr geringer Überdeckung statt. Die gemessenen Plastizitätswerte sind relativ niedrig. Die Bewegungen erfolgten auf Fels oder innerhalb der Moräne. Die Probe 2 fällt aus dem Rahmen. Hier war ein starker Kluftwasseraustritt aus dem Felsuntergrund zu beobachten.

In **Altstätten** (Subalpine Molasse mit Moräne) erfolgten Ereignisse bei grossen Hangneigungen und mittlere Plastizitäten.

In **St. Antönien** (Bündnerschiefer) dominieren bei mittleren Hangneigungen geringe Plastizitäten.

Bezüglich Hangneigungen und Plastizitäten weisen die untersuchten Gebiete heterogene Charakteristika auf. Die Rutschungen in Travers fallen bezüglich Hangneigungen aus dem Rahmen. Die geologischen und hydrogeologischen Bedingungen sind hier aber auch deutlich anders als bei den anderen Testgebieten.

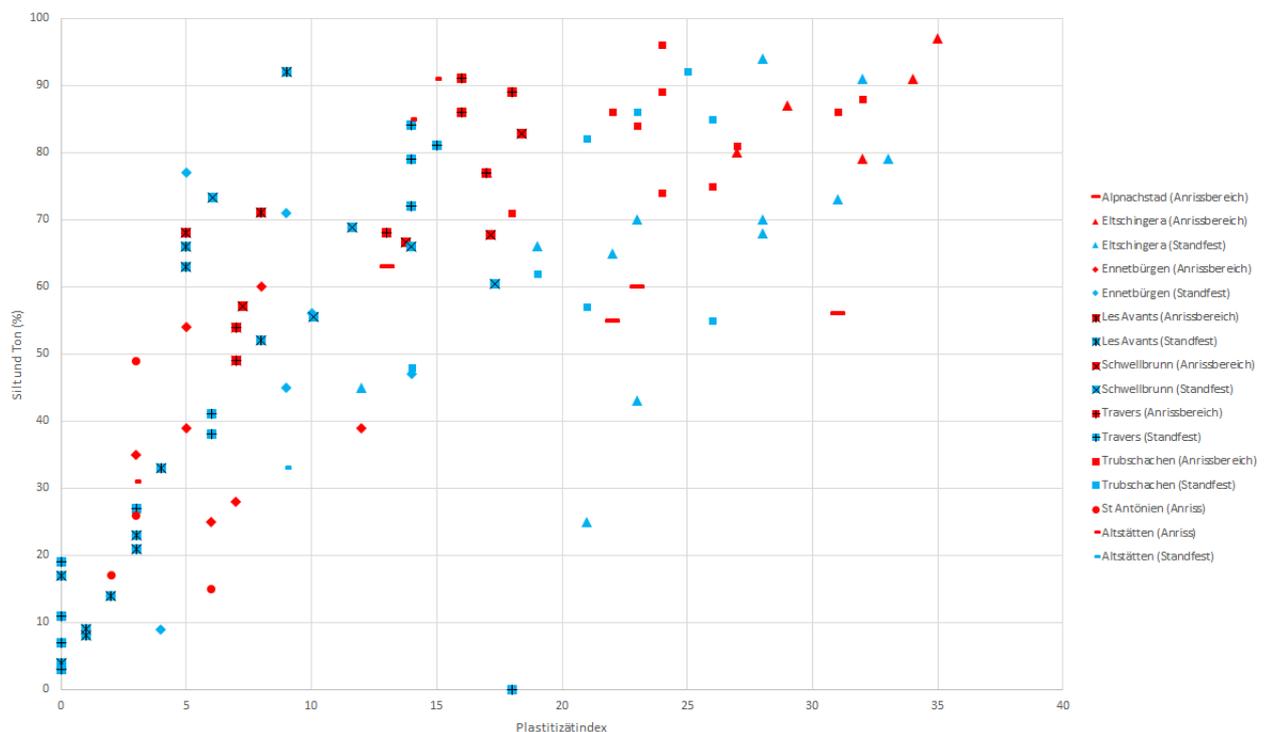
Allen untersuchten Gebieten gemeinsam sind hydrogeologische Förderfaktoren wie:

- Wasserführende Felsschichten im Untergrund,
- Stauhorizonte im Felsuntergrund,
- Hinweise auf wasserführende Lockergesteinsschichten bzw. -rinnen.

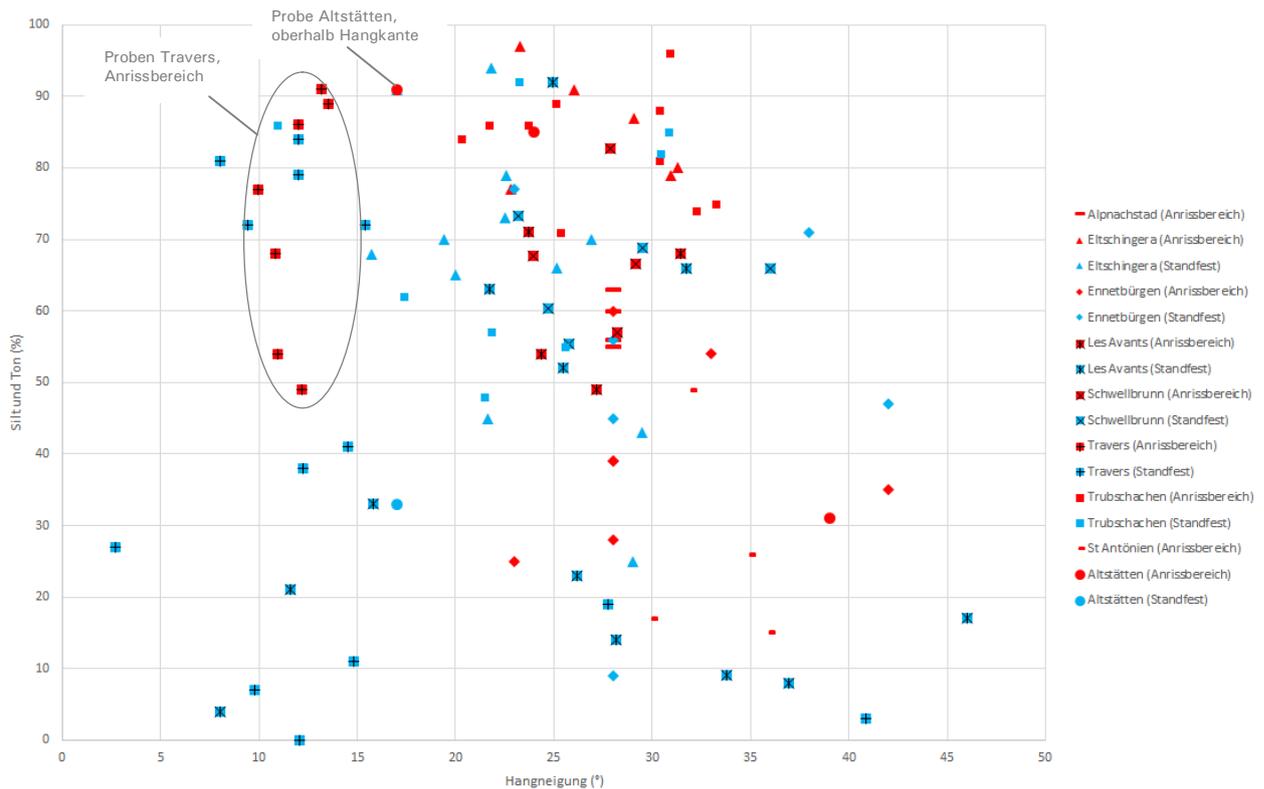
Über alle Gebiete zusammen betrachtet ergibt sich erwartungsgemäss eine Korrelation zwischen dem Plastizitätsindex und der Ton-/Siltgehalt der gemessenen Pro-

ben (Figur 55). Anrissbereiche gibt es, für jedes Gebiet gesondert betrachtet, vorwiegend bei Standorten mit hohen Plastizitäten und entsprechend hohen Silt-/Tongehalten. Die Grenzwerte variieren jedoch mit den geologischen Verhältnissen, wie nicht anders zu erwarten war. Die Hangneigung und die spezifischen Förderfaktoren spielen hier auch eine entscheidende Rolle. Das Gesamtsystem ist nicht nur durch zwei Parameter bestimmbar.

Zwischen der Hangneigung und den Silt-/Tongehalten ist keine Korrelation zu erkennen (Figur 56). Ohne Einbezug der Daten von Travers (spontane Rutschung bei sehr geringer Hangneigung) gibt es, mit einer Ausnahme, jedoch keine Anrissbereiche in Gebieten mit Hangneigungen kleiner als 20° **und** Silt-/Tongehalten kleiner als 50 %. Die Ausnahme (Altstätten) befindet sich oberhalb einer Hangkante.



Figur 55: Alle Daten: Diagramm Plastizitätsindex vs. Ton- und Silt-Gehalt (mit Angabe Anrissbereich (rot) / standfester Untergrund (blau)).



Figur 56: Alle Daten: Diagramm Hangneigung vs. Ton-Silt-Gehalt der Proben (mit Angabe Anrissbereich (rot) / standfester Untergrund (blau)).

Generell kann festgehalten werden, dass vergleichsweise höhere Plastizitäten auch eine erhöhte Tendenz zu Hangmuren zur Folge haben. Eine allgemeine Korrelation zwischen Plastizität und Anriss von Hangmuren ist jedoch nicht ersichtlich. Jedes geologisch «einheitliche» Gebiet hat seine eigenen Charakteristiken und muss individuell beurteilt werden. Wir sind jedoch der Auffassung, dass für geologisch einheitliche Gebiete eine Korrelation zwischen Plastizität und Hangmurenrisiko grundsätzlich möglich ist. Dies ist jedoch mit einer grösseren Datenmenge noch zu beweisen.

8.4 Beurteilung der Hangmuren

Disposition und Ausbruchgebiet

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass für die Beurteilung der Hangmurengefährdung die geologisch-hydrogeologische Grunddisposition und die Hangneigungen eine entscheidende Rolle spielen.

Auf der Stufe Gefahrenkarte bietet die Methodik AGN 2004 eine gute Grundlage für die Beurteilung der Ausbruchgebiete. Beim Vorhandensein von gut erhobenen Ereignisdaten ist eine Beurteilung der Ausbruchgebiete mit dieser Methode bereits heute recht zuverlässig. Ergebnisse aus Untersuchungen wie der vorliegenden sind hilfreich für die bessere Erkennung und Berücksichtigung von Grunddisposition und Förderfaktoren.

Ohne Ereignisse bestehen jedoch meist Unsicherheiten bei der Beurteilung der mobilisierbaren Lockergesteinsdecke und der Lage der Felsoberfläche, was Unsicher-

heiten in der Beurteilung von Disposition und Intensitäten zur Folge hat. Die Beurteilungsgenauigkeit der Ausbruchgebiete kann verbessert werden durch vertiefte Untersuchungen wie z. B. einfache Handsondierungen mit Korngrössenanalysen oder Plastizitätsmessungen mit der GEOLEP-Methode. Die Bohrstocksondierungen allein führen zu einer Verbesserung der Beurteilungsdatenlage bezüglich Mächtigkeit der mobilisierbaren Schicht, Durchlässigkeitsunterschiede und Lage der Felsoberfläche. Die Korngrössenverteilung der Deckschichten erlaubt eine Abschätzung der Durchlässigkeitskontraste in Bezug auf den unterliegenden Fels.

Transit- und Ablagerungsbereich

Mit der Methode AGN 2004 kann keine Aussage über Intensitäten im Transit- und Ablagerungsbereich sowie zu den Reichweiten von Hangmuren gemacht werden. Meist werden diese gutachterlich in Analogie zu bekannten Ereignissen oder mit einfachen Modellrechnungen bestimmt. Es gibt neuere Simulationsmodelle für Hangmuren (z. B. neuere Version RAMMS), welche Energien und Reichweiten heute besser berechnen können.

Die Schwierigkeit in der Praxis besteht darin, die Eingabeparameter für die Modellrechnung zu fixieren. Hier sehen wir die grosse Chance der Methode GEOLEP. Die Methode ermöglicht mit relativ bescheidenem Aufwand die Bestimmung des Plastizitätsindex und des Kornanteils der Silt- und Tonfraktion. Die Korngrösse bzw. die Plastizität des mobilisierten Materials haben eine Auswirkung auf die Auslaufstrecke («run-out») einer Hangmure. Diesbezüglich wurden jedoch bisher keine systematischen Untersuchungen durchgeführt. Diese beiden Parameter lassen sich mit der Methode GEOLEP mit geringem Aufwand bestimmen (ca. 5–7 Proben pro Tag, Probenahme und Auswertung) und daraus die Kohäsion ableiten. Letztere ist einer der wichtigen und bisher nur schwer bestimmbar Faktoren für die Hangmurenmodellierung. Es muss jedoch noch aufgezeigt werden, ob und in welchem Ausmass diese Methode zu besseren Eingabeparametern für die Modellierungen führt. Grundsätzlich führt die Anwendung der Methode GEOLEP zu einer Objektivierung von Teilen der Feldbeobachtungen.

Beurteilung der Häufigkeit

Mit der untersuchten Methode (Grabstock, GEOLOP) kann keine signifikante Verbesserung der Beurteilung der Hangmuren-Häufigkeit erreicht werden.

Die unter *Kapitel 4* vorgeschlagene Einordnung bekannter Ereignisse samt deren Auswirkungen zu gewissen Jährlichkeiten erlaubt eine unabhängige Überprüfung der mit der Methode AGN 2004 ermittelten Häufigkeiten.

8.5 Fazit für die Praxis

Vertiefte, gebietspezifische Erhebungen und Auswertungen bezüglich der Plastizität und der Korngrössenverteilung sind aus der Sicht des AGN-Projektteams auf der Stufe Gefahrenkarte nicht zwingend, beziehungsweise nur fallspezifisch notwendig. Wir empfehlen jedoch den Einsatz der Methode in Abhängigkeit des Schadenpotenzials. Bei grossem Schadenpotenzial ist die Methode GEOLEP nach unserer Auffassung von Nutzen. Im Rahmen von Einzonungsbegehren bisher un-

verbauter Gebiete und bei der Erstellung von Objektschutzgutachten (Dimensionierung von Schutzmassnahmen) verbessert die Probenahme mit Bohrstock und die Plastizitätsanalyse (zusammen mit einer Korngrössenbestimmung) die Beurteilung der Hangmurendisposition deutlich.

Die Methode ist mit 1–2 Tagen Aufwand erlernbar und einfach durchführbar. Die ganze Ausrüstung kostet ca. CHF 1'000.-. Der Aufwand für 5–7 Proben (Probenahme und Labor) beträgt ca. 1 Tag.

Die Verbesserung der Berechnung von Hangmurenausbreitung und Hangmurenenergien ist noch vertieft zu untersuchen. Wir sehen hier aber ein Anwendungsgebiet für die Methode GEOLEP. Sollten sich die oben gemachten Aussagen bezüglich Modellinputs bestätigen, so könnte die Methode ein wichtiges Instrument für die Dimensionierung von Objektschutzmassnahmen werden.

8.6 Offene Fragen

Die Datendichte bezüglich Plastizitätsmessungen und Korngrössenanalysen in einzelnen Gebieten ist noch ungenügend bzw. zu wenig systematisch. In sanierten Gebieten, insbesondere im Anrissbereich, besteht die Gefahr, dass mit Messungen nicht der gewachsene Untergrund erfasst wurde. Es stellt sich die Frage, wie mit dieser Unsicherheit umgegangen werden soll.

In weiteren Untersuchungen muss die Annahme erhärtet werden, dass für einheitliche geologische Gebiete bzw. Schichtabfolgen eine Abhängigkeit zwischen Hangmurenentstehung und Korngrössenverteilung/Plastizität existiert.

Die vorgenommenen Untersuchungen fokussieren auf den Anrissbereich der Hangmuren. Eine Beurteilung der Reichweiten der Hangmuren sowie der Intensitäten und Mächtigkeiten der Ablagerungen wurde nicht vorgenommen. Es ist eine qualitative Beurteilung des Einflusses der Plastizität auf das Verhalten der Hangmuren möglich. Unklar ist, welchen quantitativen Einfluss die Plastizität auf die mobilisierte Masse, das heisst auf die Geschwindigkeit der Hangmure bzw. auf die Auslaufstrecke hat.

Die Berücksichtigung der Plastizitätswerte für die Bestimmung der Kohäsion und die Berücksichtigung der Kohäsion für Modellierungen mit RAMMS war nicht Inhalt der durchgeführten Untersuchungen. Dieser Aspekt erscheint dem Projektteam aber als eine interessante Perspektive. Erste Berechnungen aus anderen Studien sind vielversprechend. Die Beispiele Alpnachstad und Ennetbürgen würden sich hierzu eignen, da hier nach Ereignissen Gebäudeschäden dokumentiert sind und im Beispiel Alpnachstad auch schon die Energie der Hangmuren über die Gebäudestatik nachgerechnet wurde (Egli Engineering 2011).

9 EMPFEHLUNGEN, WEITERES VORGEHEN

Der vorläufige Beurteilung, dass mit den Resultaten der Methode GEOLEP beziehungsweise mit den daraus gewonnenen Werten die Kohäsion verlässlich abgeschätzt werden kann, muss noch erhärtet werden. Ebenso muss noch einwandfrei aufgezeigt werden, dass die Berücksichtigung der Kohäsion in die Modellierungen mit RAMMS genauere Resultate ermöglichen. Sollte dies der Fall sein, würde endlich auch bei Hangmuren ein Tool zur Verfügung stehen, mit welchen genauere Dimensionierungsvorgaben für Objektschutzmassnahmen gegen Hangmuren erarbeitet werden können. Der Prozess Hangmuren könnte dann mit ähnlicher Qualität wie die anderen Naturgefahrenprozesse beurteilt werden.

Die gemachten Untersuchungen zeigen eine Verbesserung der Prognose bezüglich des Auftretens von Hangmuren im Bereich der Ausbruchgebiete. Erste Daten deuten auch auf eine mutmassliche Verbesserung zur Festlegung der Eingabeparameter für Modellierungen. Damit liessen sich die Auswirkungen auf Bauwerke besser bestimmen.

Aufgrund der vorgenommenen Untersuchungen sind aus der Sicht des Projektteams folgende Arbeitsschritte notwendig:

- Ergänzende Korngrössenanalysen und Plastizitätsmessungen in ausgewählten Gebieten (z. B. Alpnachstad, Ennetbürgen, Schwellbrunn, St. Antönien).
- Aufnahme, Korngrössenanalysen und Plastizitätsmessungen in einem Gebiet ohne Hangmuren, aber mit entsprechender geologisch-hydrogeologischer Disposition. Vergleich mit Gebieten mit Hangmuren (z. B. Schwellbrunn, Alpnachstad).
- Definition eines Vorgehens für einfache Handsondierungen mit Korngrössenanalysen und Plastizitätsmessungen und Testen der Methode durch Praktiker: Welche Schichten sind zu beproben? Vermutlich sind sowohl die potenziellen Gleitschichten und die eher wasserspeichernden überlagernden Schichten relevant. Erstere vermutlich für die Bildung der Gleithorizonte, letztere eher für die Ausbreitung der Rutschmassen.
- Nachrechnen von Hangmuren mit RAMMS unter Berücksichtigung der Kohäsion, welche sich mit den Plastizitätsmessungen ermitteln lässt.
- Einbezug und Beurteilung von Reichweiten und Ablagerungen in ausgewählten Gebieten.
- Unabhängige Prüfung und Vergleich der Berechnungsergebnisse von Hangmurenmodellierungen mit statischen Berechnungen zu aufgetretenen Schadensbildern an Gebäuden (z. B. Alpnachstad und Ennetbürgen)

Für 2016 empfehlen wir daher folgendes weitere Vorgehen:

- Verbesserung der Datengrundlage zur Hangmurenbeurteilung für verschiedene geologische Verhältnisse (Geotypen). Die vielen vorhandenen Katasterdaten sollen in dieser Hinsicht ausgewertet werden. Ziel ist es, die Bandbreite von kritischen Hangneigungen für verschiedene Geotypen zu ermitteln, damit auch in Gebieten ohne gute Ereigniskatasterdaten zuverlässige Hangmurenbeurteilungen

gemacht werden können. Wir empfehlen, 2016 ein Folgeprojekt mit dem BAFU zu starten, welches diese Thematik vertieft bearbeitet.

- Verbesserung der Prognose von Ausbreitung und Energien von Hangmuren. Die Methode GEOLEP soll noch vertieft studiert und zusammen mit Berechnungen mit RAMMS die Möglichkeiten der Hangmurensimulation geprüft werden. Wir empfehlen daher, im kommenden Jahr mit dem BAFU ein Folgeprojekt mit diesen Fragestellungen auszuarbeiten.

Frauenfeld/Bern/Horw, 30. September 2015, rev. 29. Februar 2016

BEILAGEN

- Beilage 1: Trubschachen: Orthofoto 1:10'000 mit Hangmurenereignissen und Probenahmestellen
- Beilage 2: Trubschachen: Hangneigungskarte 1:10'000
- Beilage 3: Trubschachen: Karte 1:10'000 mit Zusammenstellung der Korngrössenanalysen und der Plastizitätsindizes
- Beilage 4: Trubschachen: Gefahrenkarte 1:10'000
- Beilage 5: Trubschachen: Tabellarische Zusammenstellung der Ergebnisse der Probenanalysen
- Beilage 6: Eltschingera: Orthofoto 1:10'000 mit Hangmurenereignissen und Probenahmestellen
- Beilage 7: Eltschingera: Hangneigungskarte 1:10'000
- Beilage 8: Eltschingera: Karte 1:10'000 mit Zusammenstellung der Korngrössenanalysen und der Plastizitätsindizes
- Beilage 9: Eltschingera: Gefahrenkarte 1:10'000
- Beilage 10: Eltschingera: Tabellarische Zusammenstellung der Ergebnisse der Probenanalysen
- Beilage 11: Alpnachstad: Orthofoto 1:2'000 mit Hangmurenereignissen und Probenahmestellen
- Beilage 12: Alpnachstad: Hangneigungskarte 1:2'000
- Beilage 13: Alpnachstad: Orthofoto 1:2'000 mit Zusammenstellung der Korngrössenanalysen und der Plastizitätsindizes
- Beilage 14: Alpnachstad: Gefahrenkarte 1:2'000
- Beilage 15: Alpnachstad: Zusammenstellung der Ergebnisse der Probenanalysen
- Beilage 16: Ennetbürgen: Orthofoto 1:2'000 mit Hangmurenereignissen und Probenahmestellen
- Beilage 17: Ennetbürgen: Hangneigungskarte 1:2'000
- Beilage 18: Ennetbürgen: Orthofoto 1:2'000 mit Zusammenstellung der Korngrössenanalysen und der Plastizitätsindizes
- Beilage 19: Ennetbürgen: Gefahrenkarte 1:2'000
- Beilage 20: Ennetbürgen: Zusammenstellung der Ergebnisse der Probenanalysen
- Beilage 21: Les Avants: Orthofoto 1:5'000 mit Hangmurenereignissen und Probenahmestellen
- Beilage 22: Les Avants: Hangneigungskarte 1:5'000
- Beilage 23: Les Avants: Karte 1:5'000 mit Zusammenstellung der Korngrössenanalysen und der Plastizitätsindizes
- Beilage 24: Les Avants: Gefahrenkarte 1:5'000

- Beilage 25: Les Avants: Tabellarische Zusammenstellung der Ergebnisse der Probenanalysen
- Beilage 26: Travers: Orthofoto 1:5'000 mit Hangmureneignissen und Probenahmestellen
- Beilage 27: Travers: Hangneigungskarte 1:5'000
- Beilage 28: Travers: Karte 1:5'000 mit Zusammenstellung der Korngrössenanalysen und der Plastizitätsindizes
- Beilage 29: Travers: Gefahrenkarte 1:5'000
- Beilage 30: Travers: Tabellarische Zusammenstellung der Ergebnisse der Probenanalysen
- Beilage 31: Schwellbrunn: Übersicht Untersuchungsgebiet 1:2'000 mit Hangmureneignissen und Probenahmestellen
- Beilage 32: Schwellbrunn: Topografie Untersuchungsgebiet 1:2'000
- Beilage 33: Schwellbrunn: Hangneigungskarte 1:2'000
- Beilage 34: Schwellbrunn: Situation 1:2'000 mit Zusammenstellung der Korngrössenanalysen und der Plastizitätsindizes
- Beilage 35: Schwellbrunn: Tabellarische Zusammenstellung der Ergebnisse der Probenanalysen
- Beilage 36: Altstätten: Übersicht Untersuchungsgebiet 1:2'000 mit Phänomenen und Hangmureneignissen 2013
- Beilage 37: Altstätten: Hangneigungskarte 1:2'000
- Beilage 38: Altstätten: Situation 1:2'000 mit Zusammenstellung der Korngrössenanalysen und der Plastizitätsindizes
- Beilage 39: Altstätten: Gefahrenkarte 1: 2'000
- Beilage 40: Altstätten: Tabellarische Zusammenstellung der Ergebnisse der Probenanalysen
- Beilage 41: St. Antönien: Übersicht Untersuchungsgebiet 1:20'000
- Beilage 42: St. Antönien: Hangneigungskarte 1:5'000
- Beilage 43: St. Antönien: Topografie 1:2'000 mit Zusammenstellung der Korngrössenanalysen und der Plastizitätsindizes
- Beilage 44: St. Antönien: Tabellarische Zusammenstellung der Ergebnisse der Probenanalysen

629500

630000

630500

631000

Testgebiet Trubschachen
 Orthophoto 1:10'000
 (mit Hangmurenereignissen und Probenahmestellen)



Legende

- 1 Probenahmestellen (mit Probennummer)
- Hangmurenereignisse (aus: Ereigniskataster Kt. Bern, Geoportal)

196500

196500

196000

196000

195500

195500

195000

195000

194500

194500



629500

630000

630500

631000

Testgebiet Trubschachen
 Hangneigungskarte 1:10'000
 (mit Hangmurenereignissen und Probenahmestellen)

Legende

-  Probenahmestelle (mit Probennummer und Plastizitätsindex)
-  Hangmurenereignisse (aus: Ereigniskataster Kt. Bern, Geoportal)

Hangneigung (DHM25)

-  <math><10^\circ</math>
-  10-15°
-  15-20°
-  20-25°
-  25-30°
-  30-35°
-  35-40°
-  >40°

196500

196000

195500

195000

194500

196500

196000

195500

195000

194500

629500

630000

630500

631000

629500

630000

630500

631000



629500

630000

630500

631000

Testgebiet Trubschachen
 Karte 1:10'000 mit Zusammenstellung der
 Korngrössenanalysen und der Plastizitätsindizes



Legende

-  17 Probennummer
-  21 Plastizitätsindex
-  Sand (grob- und mittelkörnig)
-  Feinsand
-  Ton und Silt

196500

196500

196000

196000

195500

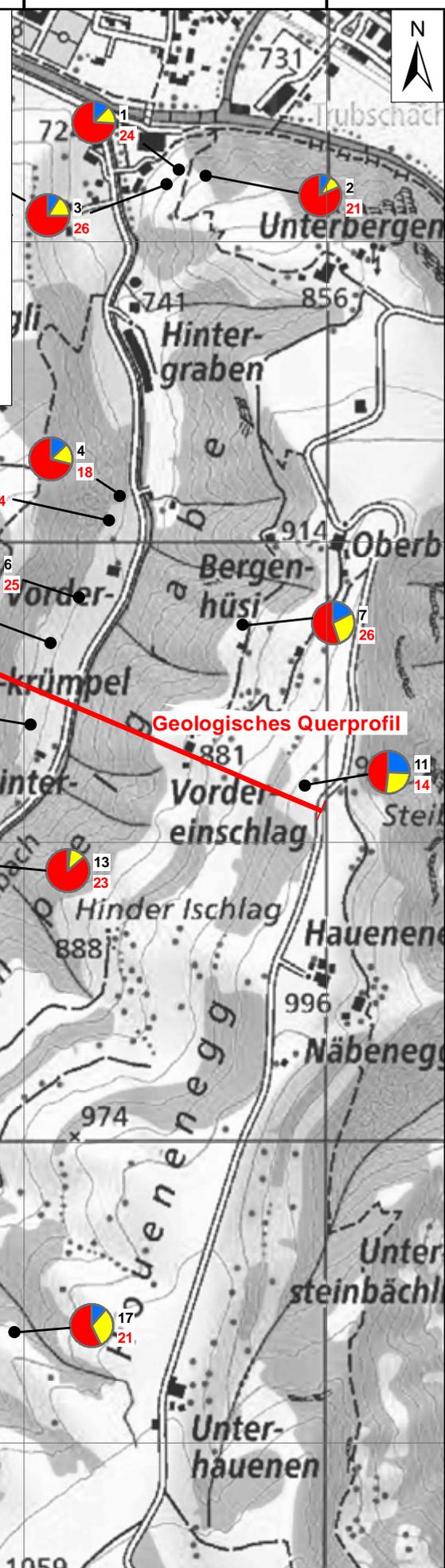
195500

195000

195000

194500

194500



Geologisches Querprofil

629500

630000

630500

631000

629500

630000

630500

Testgebiet Trubschachen
 Gefahrenkarte 1:10'000
 (mit Hangmurenereignissen und Proben-
 nahmestellen)

Legende

- 1 Probenahmestellen (mit Probennummer)
- Hangmurenereignisse (aus: Ereigniskataster Kt. Bern, Geoportal)

Gefahrenkarte Hangmuren

- Erhebliche Gefährdung
- Mittlere Gefährdung
- Geringe Gefährdung
- Restgefährdung
- Gefahrenhinweisbereich

196500



196500

196000

196000

195500

195500

195000

195000

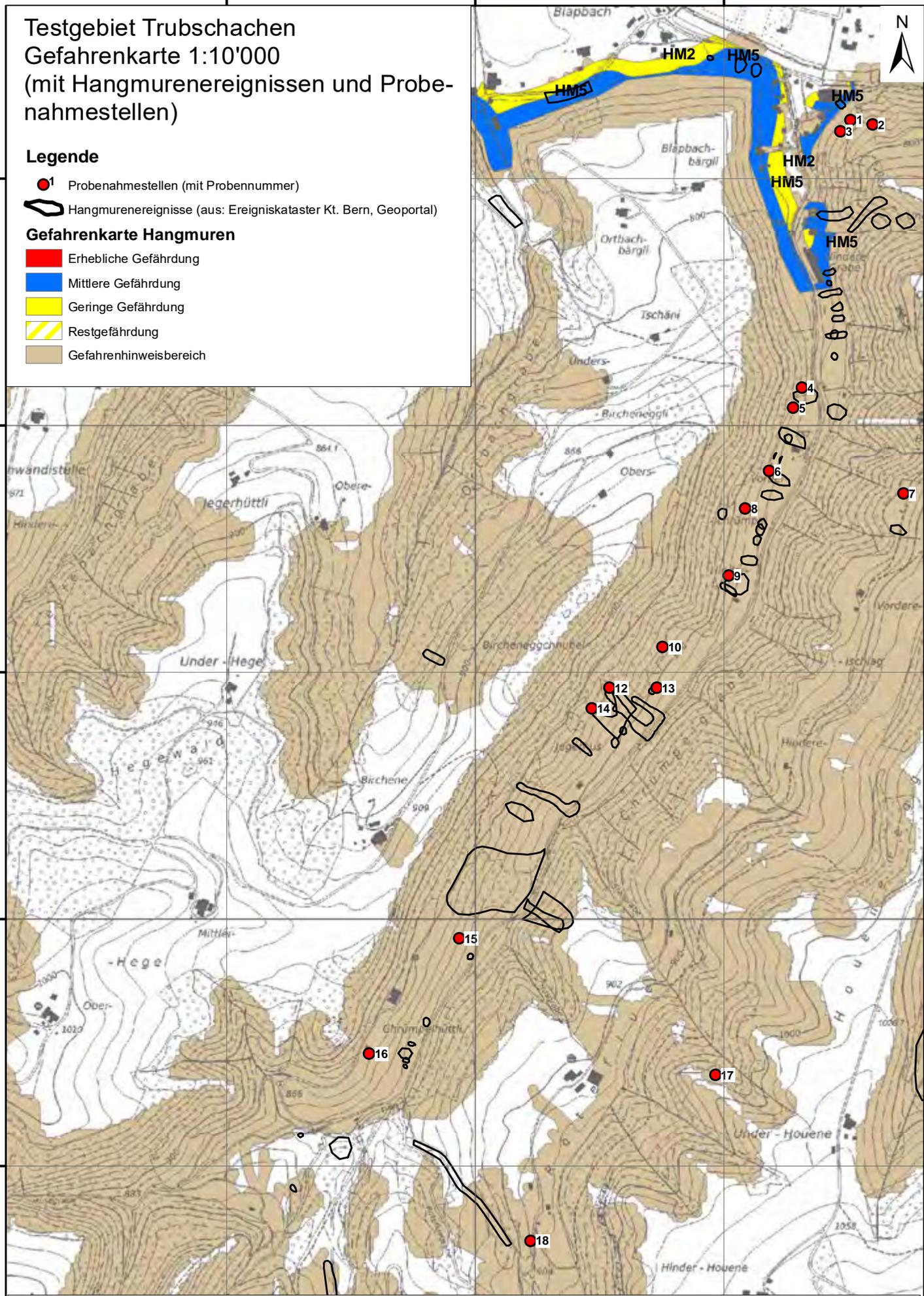
194500

194500

629500

630000

630500



Testgebiet Trubschachen

Tabellarische Zusammenstellung der Ergebnisse der Probenanalyse

Probenr.	X Koor.	Y Koor.	Sand, in %	Feinsand, in %	Ton u. Silt, in %	IP	Bohrtiefe, in m	Bemerkung (Geologie/Probenahmestelle)
1	630756	196620	12	14	74	24	0.70	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Probenahmestelle: 1 m unterhalb eines Anrisses ◦ Lithologie: Gehängelehm und wenig mächtige Moräne ◦ Matrix: erhöhter Kohäsion ◦ Komponenten: Kies, wenige Steine (gerundet)
2	630800	196610	8	10	82	21	0.30	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Probenahmestelle: Neben Hangmure ◦ Lithologie: Gehängelehm ◦ Komponenten: viele Steine (gerundet)
3	630736	196596	9	16	75	26	0.60	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Probenahmestelle: Anriss ◦ Lithologie: Moräne ◦ Matrix: Matrixgestützt ◦ Komponenten: Kalkkies (kantig), Durchmesser im cm-Bereich
4	630658	196077	13	16	71	18	0.80	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Probenahmestelle: Anriss ◦ Lithologie: Gehängelehm ◦ Komponenten: Steine (gerundet) ◦ Hydrogeologie: Quelle 1 m oberhalb der Anrissstelle ◦ Festgestein: Sandstein
5	630641	196036	3	8	89	24	0.40	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Probenahmestelle: Anriss ◦ Lithologie: Gehängelehm ◦ Hydrogeologie: Quelle in der Anrisszone
6	630592	195908	0	8	92	25	0.80	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Probenahmestelle: Neben Hangmure ◦ Lithologie: Gehängelehm
7	630862	195862	17	28	55	26	0.60	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Probenahmestelle: Neben Hangmure ◦ Lithologie: Moräne ◦ Matrix: Matrixgestützt ◦ Komponenten: Kies
8	630544	195832	0	14	86	31	0.50	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Probenahmestelle: Anriss ◦ Lithologie: Gehängelehm
9	630511	195695	4	10	86	22	0.80	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Probenahmestelle: Direkt neben einem Anriss ◦ Lithologie: Gehängelehm ◦ Komponenten: viele Steine (gerundet)
10	630378	195551	0	12	88	32	0.50	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Probenahmestelle: 1 m oberhalb eines Anrisses ◦ Lithologie: Gehängelehm
11	630965	195595	26	26	48	14	0.80	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Probenahmestelle: Neben Hangmure ◦ Lithologie: Gehängelehm, evtl. Moräne ◦ Matrix: Matrixgestützt, niedrige Kohäsion ◦ Komponenten: wenig Kies und Steine (gerundet)
12	630270	195469	3	12	85	26	0.60	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Probenahmestelle: Neben Hangmure ◦ Lithologie: Gehängelehm ◦ Komponenten: viele Steine (gerundet)
13	630366	195468	2	12	86	23	0.50	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Probenahmestelle: Neben Hangmure ◦ Lithologie: Murgangablagerung ◦ Komponenten: Steine im dm-Bereich, gerundet ◦ Matrix: Matrixgestützt
14	630235	195426	0	4	96	24	0.50	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Probenahmestelle: Anriss ◦ Lithologie: Gehängelehm ◦ Komponenten: viele Steine (gerundet)
15	629968	194961	5	14	81	27	0.60	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Probenahmestelle: Anriss ◦ Lithologie: Gehängelehm ◦ Hydrogeologie: Feuchte Zone ◦ Festgestein: Sandstein
16	629788	194727	6	10	84	23	0.40	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Probenahmestelle: Anriss ◦ Lithologie: Moräne? Evtl. künstliche Aufschüttung ◦ Komponenten: viel Kies (kantig)
17	630484	194684	11	32	57	21	0.40	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Probenahmestelle: Neben Hangmure ◦ Lithologie: Moräne ◦ Matrix: Matrixgestützt ◦ Komponenten: Kalkkies, kantig, im cm-Bereich
18	630112	194348	14	24	62	19	0.80	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Probenahmestelle: Neben Hangmure ◦ Lithologie: Gehängeschutt ◦ Komponenten: Steine (gerundet) ◦ Matrix: wenig Matrix, kohäsiv

*grob- und mittelkörnig

**IP: Plastizitätsindex

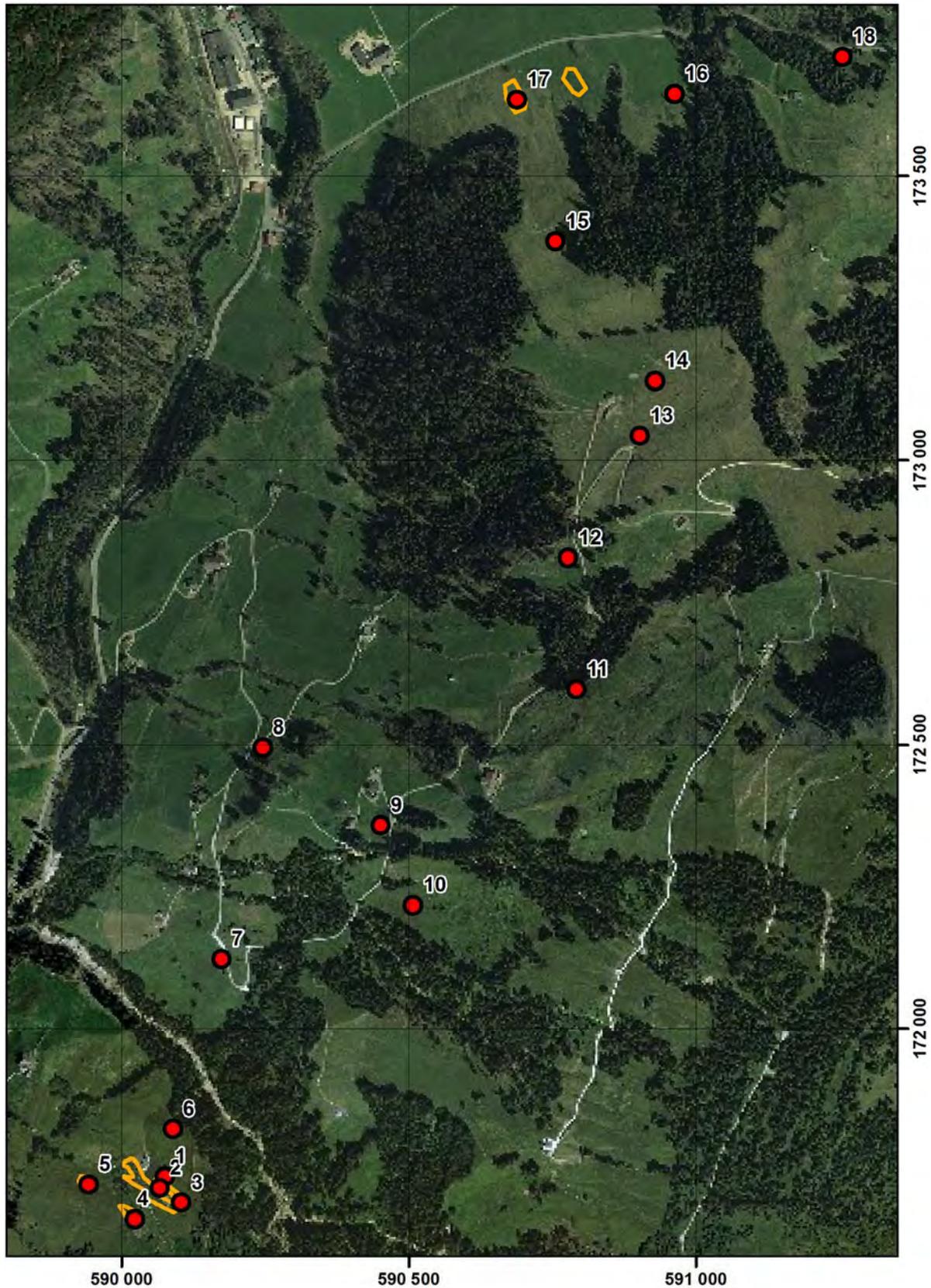
Eltschingera

Orthophoto 1:10'000

(mit Hangmurenereignissen und Probenahmestellen)

Legende :

- ¹ Probenahmestellen (mit Probennummer)
- Hangmurenereignisse (aus: Ereigniskataster Kt. Freiburg und Feldarbeit)



AGN-Projekt

Verbesserung der Hangmurenbeurteilung

Eltschingera

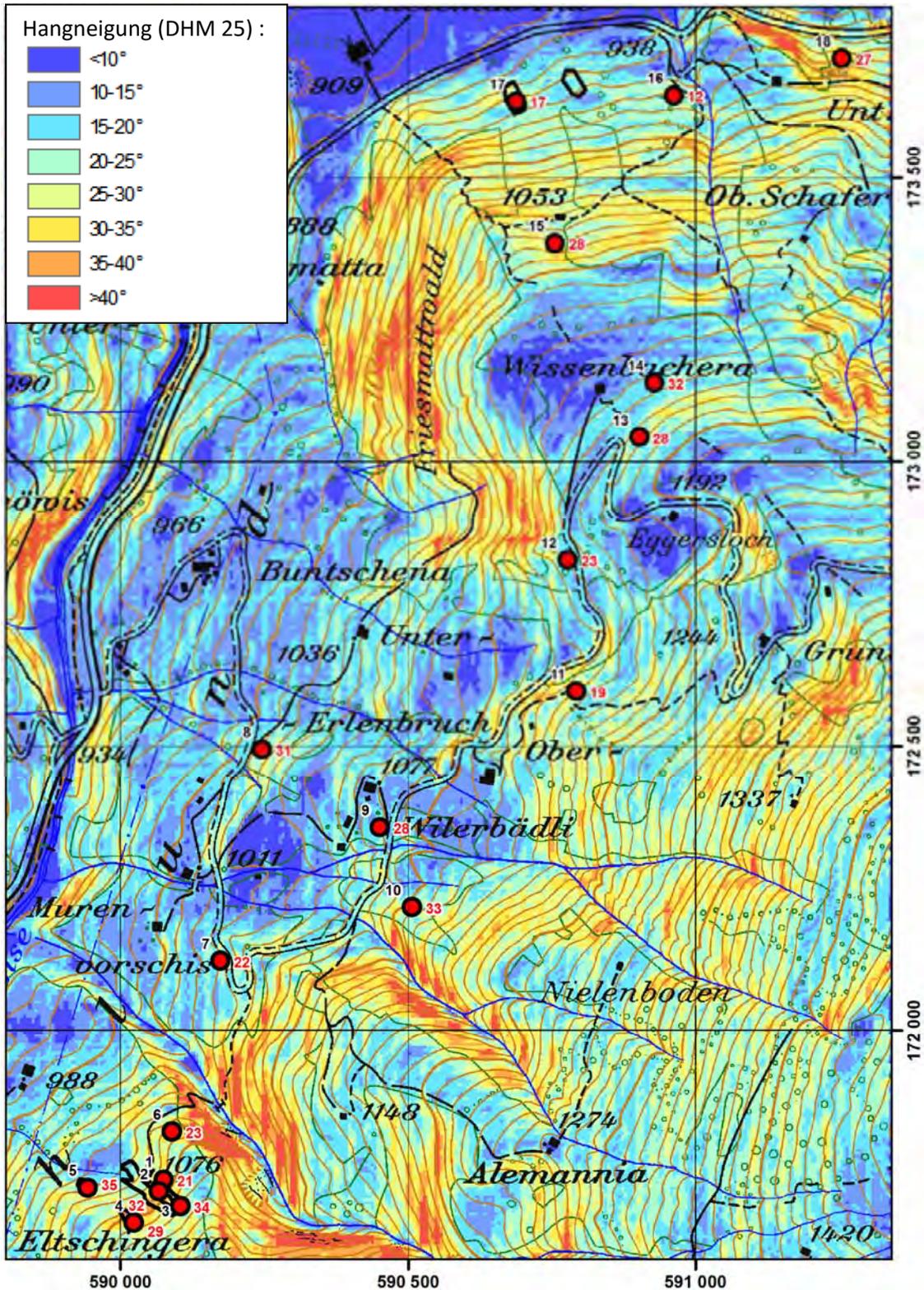
Hangneigungskarte 1:10'000

(mit Hangmurenereignissen und Probenahmestellen)

Legende :

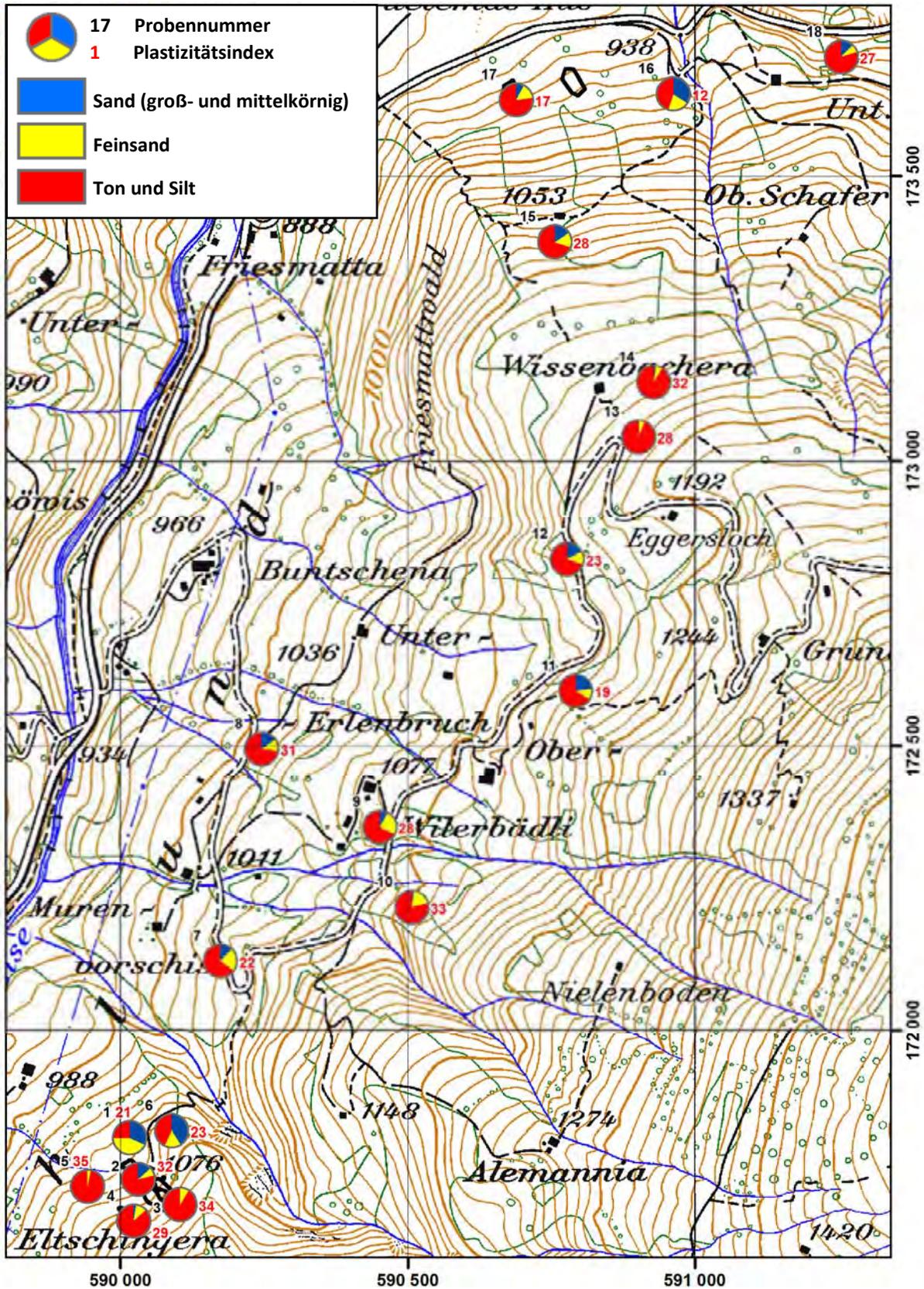
 Probenahmestelle (mit Probennummer und Plastizitätsindex)

 Hangmurenereignisse (aus: Ereigniskataster Kt. Freiburg und Feldarbeit)



Eltschingera

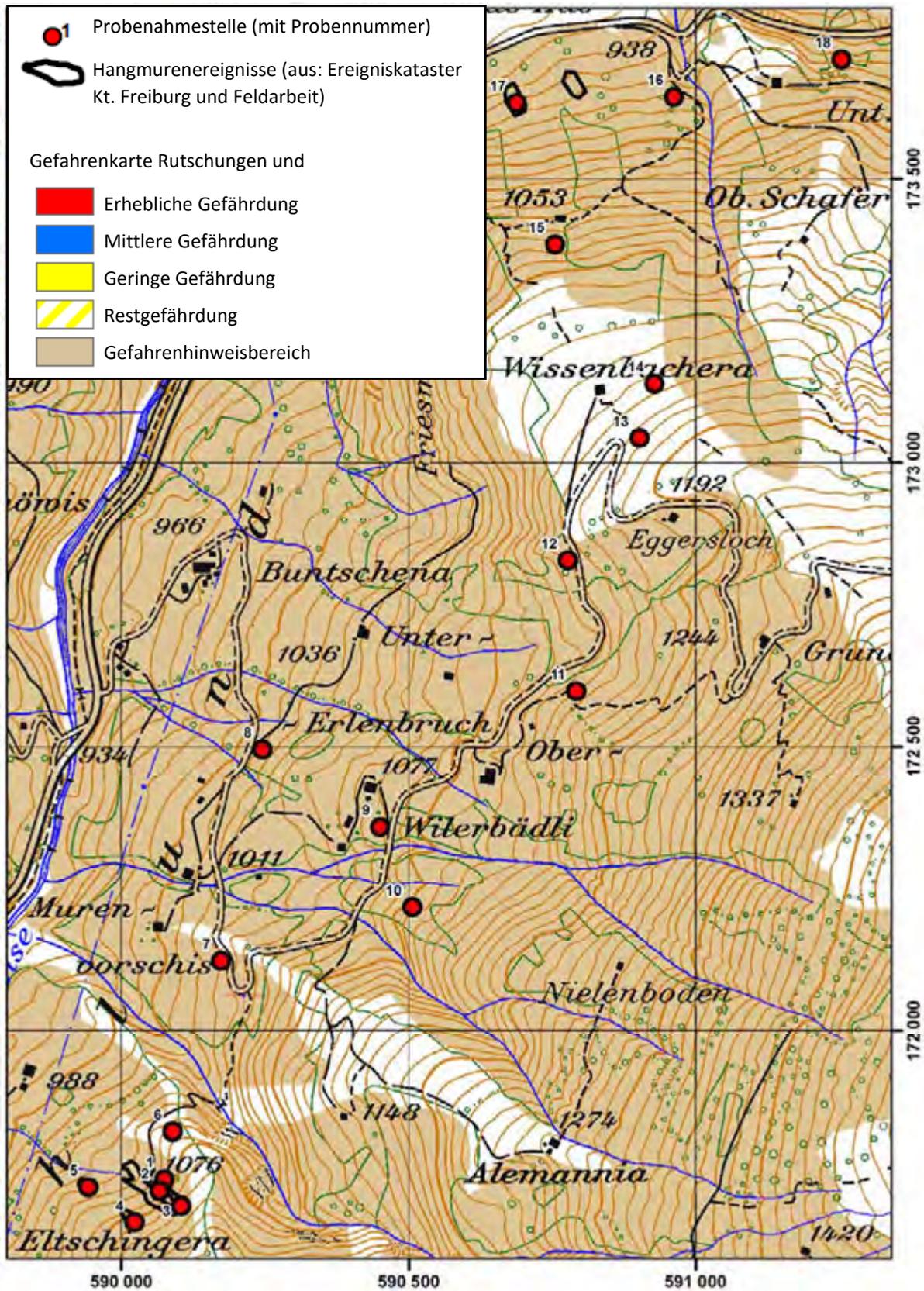
Karte 1:10'000 mit Zusammenstellung der Korngrößenanalysen und der Plastizitätsindizes



Eltchingera

Gefahrenkarte 1:10'000

(mit Hangmurenereignissen und Probenahmestellen)



Eltschingera: Tabellarische Zusammenstellung der Ergebnisse der Probenanalyse

Probenr.	X Koor.	Y Koor.	Sand, in % *	Feinsand, in %	Ton u. Silt, in %	IP**	Bohrtiefe, in m	Bemerkung (Geologie/Probenahmestelle)
1	590075	171740	32	43	25	21	0,60	Flysch altéré très cohésif, à l'aval d'une niche
2	590066	171720	13	8	79	32	0,45	Flysch altéré, échantillon pris dans la niche de 2005
3	590104	171694	0	9	91	34	0,60	Flysch altéré, échantillon pris dans la niche de 2006
4	590023	171665	2	11	87	29	0,60	Flysch altéré, échantillon pris dans une niche en cours d'ouverture; venue d'eau en provenance des grès affleurants
5	589943	171726	0	3	97	35	0,50	Flysch altéré, échantillon pris dans une niche en cours d'ouverture; venue d'eau en provenance des grès affleurants
6	590089	171823	41	16	43	23	0,30	Eboulis peu profonds, grès sub affleurants
7	590174	172123	12	23	65	22	0,80	Eboulis, blocs de grès (pl. dm) dans matrice très cohésive, en glissement lent
8	590246	172495	15	12	73	31	0,60	Eboulis, blocs de grès (pl. dm) dans matrice très cohésive, en glissement lent
9	590451	172357	8	24	68	28	0,80	Eboulis, blocs de grès (pl. dm) dans matrice très cohésive, en glissement lent
10	590507	172217	2	19	79	33	0,80	Eboulis, blocs de grès (pl. dm) dans matrice très cohésive, en glissement lent
11	590792	172597	23	11	66	19	0,80	Eboulis, blocs de grès (pl. dm) dans matrice très cohésive, en glissement lent
12	590777	172827	17	13	70	23	0,80	Eboulis, blocs de grès (pl. dm) dans matrice très cohésive, zone très tourmentée, beaucoup de fissures et d'eau
13	590901	173043	0	6	94	28	0,80	Grosse épaisseur de flysch altéré en glissement, extrêmement cohésif, quasiment que des fines, terrain gorgé d'eau
14	590928	173139	2	7	91	32	0,80	Grosse épaisseur de flysch altéré en glissement, extrêmement cohésif, quasiment que des fines, terrain gorgé d'eau
15	590755	173385	16	14	70	28	0,80	Flysch en glissement avec quelques blocs (autochtone? Petit chantier juste à l'amont)
16	590962	173644	34	21	45	12	0,60	Dépôts de pentes sableux bruns orangés peu cohésifs reposant sur banc de grès; venue d'eau dans les grès mais matériaux superficiels secs.
17	590688	173634	8	15	77	17	0,50	Dépôts de pente grossiers sur moraine assez cohésive, beaucoup de cailloutis calcaires blancs; échantillon pris dans une niche d'arrachement végétalisée; venue d'eau
18	591254	173709	12	8	80	27	0,60	Moraine très cohésive + quelques blocs de grès: autochtone? (aménagements ruraux tout autour)

*groß- und mittelkörnig

**IP: Plastizitätsindex

AGN-Projekt

Verbesserung der Hangmurenbeurteilung

Testgebiet ALPNACHSTAD, AGN Hangmurenprojekt

Bodenproben mit vergangenen Ereignissen
Massstab 1:2000

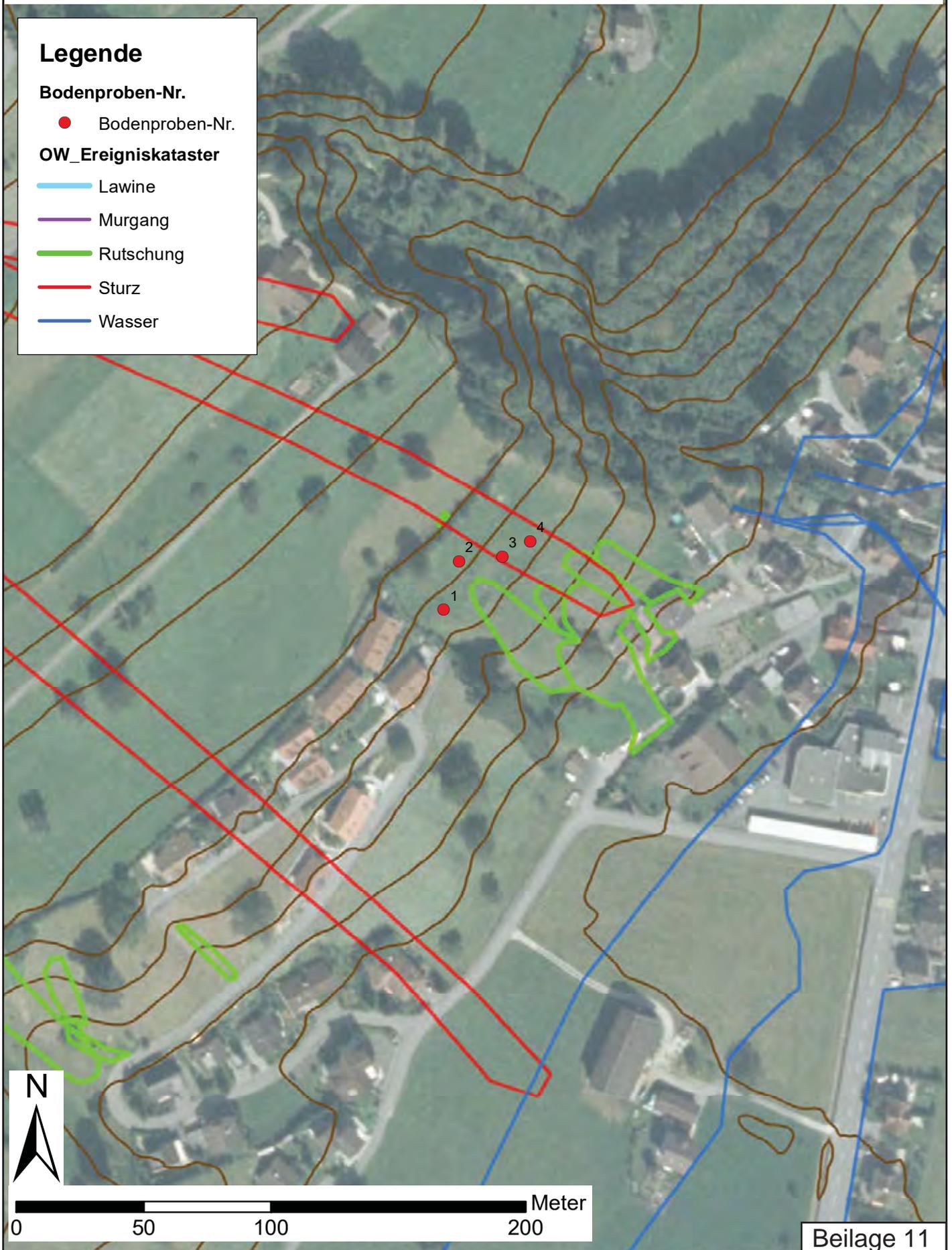
Legende

Bodenproben-Nr.

- Bodenproben-Nr.

OW_Ereigniskataster

- Lawine
- Murgang
- Rutschung
- Sturz
- Wasser



Testgebiet ALPNACHSTAD, AGN Hangmurenprojekt

Bodenproben mit Hangneigung
Massstab 1:2000

Legende

Bodenproben-Nr.

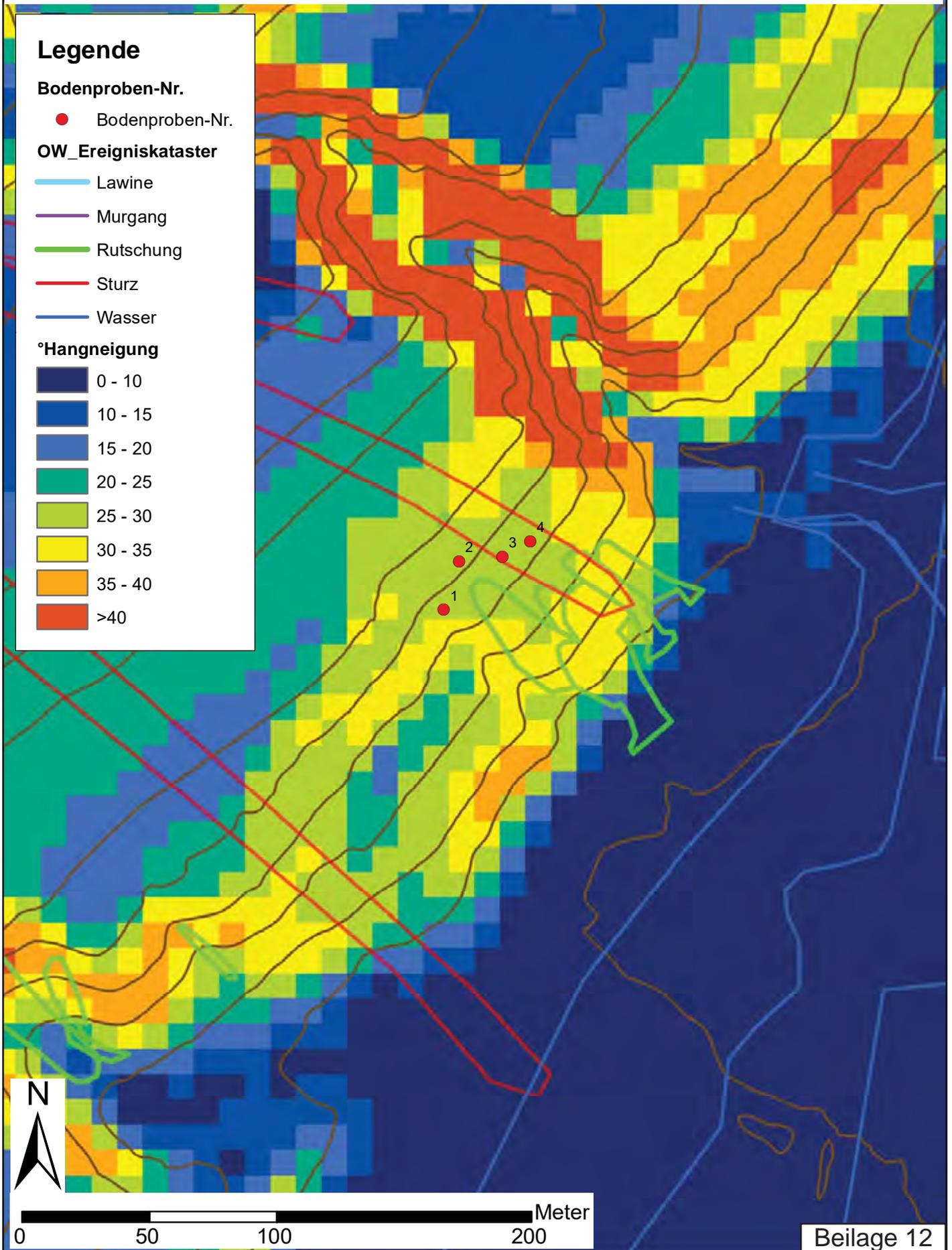
- Bodenproben-Nr.

OW_Ereigniskataster

- Lawine
- Murgang
- Rutschung
- Sturz
- Wasser

°Hangneigung

- 0 - 10
- 10 - 15
- 15 - 20
- 20 - 25
- 25 - 30
- 30 - 35
- 35 - 40
- >40



Testgebiet ALPNACHSTAD, AGN Hangmurenprojekt

Bodenproben mit Details und IP-Werte
Massstab 1:2000

Legende

0 IP-Wert

Bodenproben mit Details



■ % Mittel- bis Grobsand

■ % Feinsand

■ % Silt und Ton

OW_Ereigniskataster

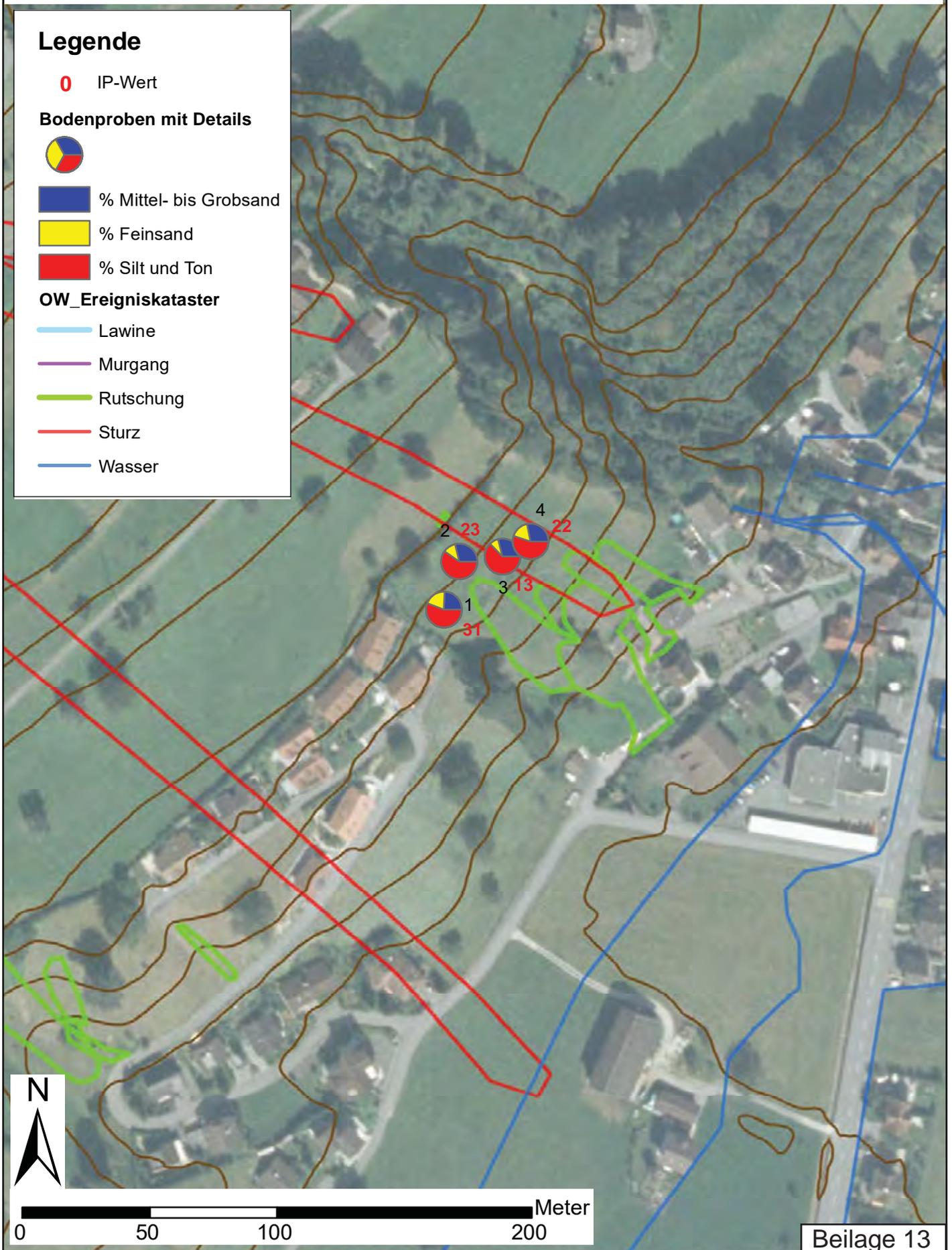
— Lawine

— Murgang

— Rutschung

— Sturz

— Wasser



Testgebiet ALPNACHSTAD, AGN Hangmurenprojekt

Bodenproben mit Gefahrenkarte
Massstab 1:2000

Legende

Bodenproben-Nr.

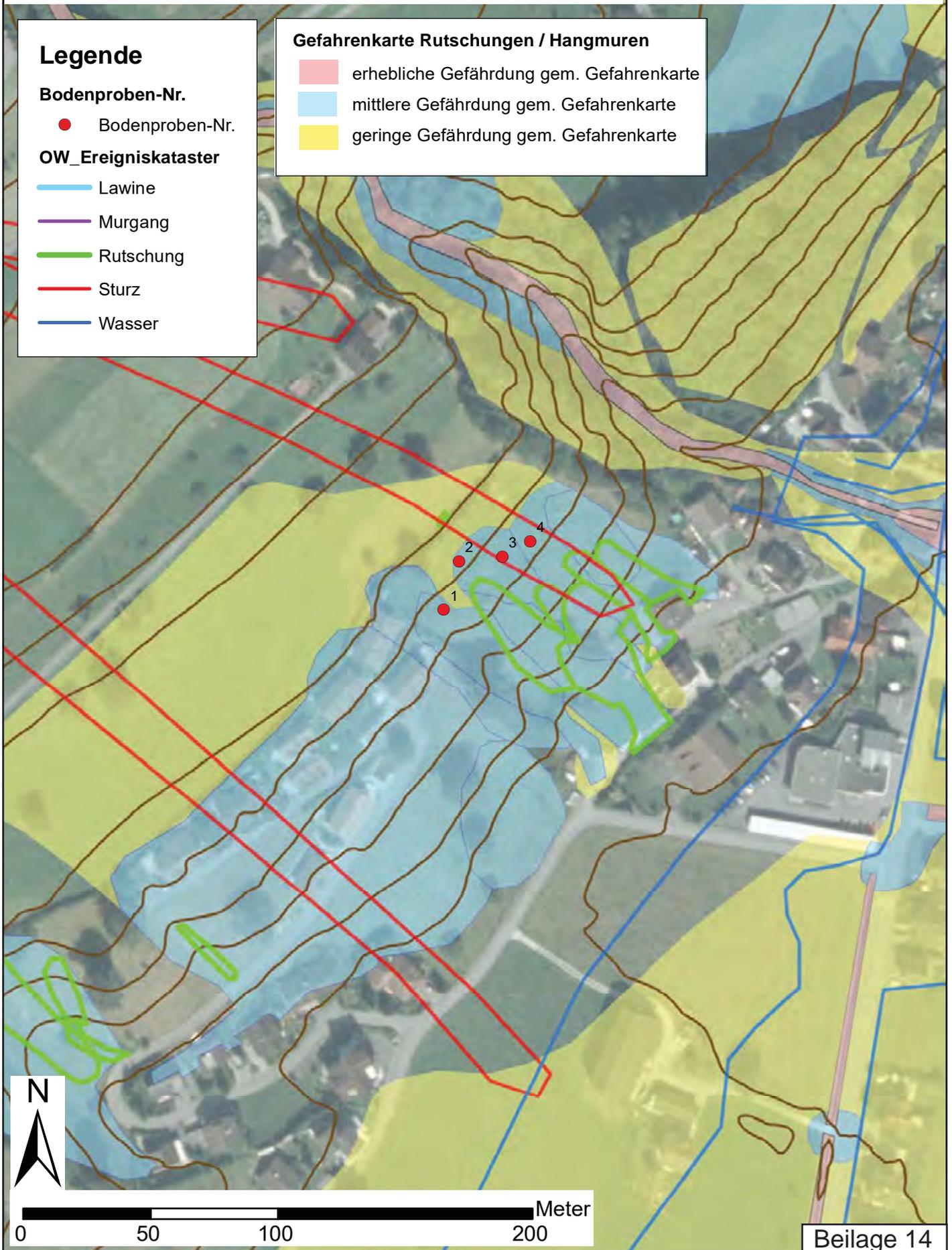
● Bodenproben-Nr.

OW_Ereigniskataster

- Lawine
- Murgang
- Rutschung
- Sturz
- Wasser

Gefahrenkarte Rutschungen / Hangmuren

- erhebliche Gefährdung gem. Gefahrenkarte
- mittlere Gefährdung gem. Gefahrenkarte
- geringe Gefährdung gem. Gefahrenkarte



Resultate Alpnachstad

N°	X-Koord	Y-Koord	% Mittel- bis Grobsand	% Feinsand	% Silt und Ton	IP	Sondiertiefe m	Bemerkungen	°Hangneigung
1	663547	200583	25	20	56	31	0.30		27.9
2	663553	200602	29	12	60	23	0.45		29.3
3	663570	200604	29	8	63	13	0.85		28.4
4	663581	200610	28	17	55	22	0.80		29.5

Testgebiet ENNETBÜRGEN, AGN Hangmurenprojekt

Bodenproben mit vergangenen Ereignissen
Masstab 1:2000

Legende

● Bodenproben-Nr.

Hangmuren 2013

■ Ablagerung

■ Anriss

Hangmuren 2005

■ Ablagerung

■ Anriss

Hangmuren 1934

■ Anriss vermutet

205250

205250

205000

205000

Hinter Lussmani

Vorder Lussmani



675500

Testgebiet ENNETBÜRGEN, AGN Hangmurenprojekt

Bodenproben mit Hangneigung
Massstab 1:2000

Legende

Bodenproben-Nr.

● Bodenproben-Nr.

°Hangneigung

- 0 - 10
- 10 - 15
- 15 - 20
- 20 - 25
- 25 - 30
- 30 - 35
- 35 - 40
- >40

205250

205250

Hinter Lussmani

Vorder Lussmani

205000

205000



Beilage 17

675500

Testgebiet ENNETBÜRGEN, AGN Hangmurenprojekt

Bodenproben mit Details und IP-Werte
Massstab 1:2000

Legende

0 IP-Werte

Bodenproben, Details



Mittel- bis Grobsand

Feinsand

Silt und Ton

Hangmuren 2013

Ablagerung

Anriss

Hangmuren 2005

Ablagerung

Anriss

Hangmuren 1934

Anriss vermutet

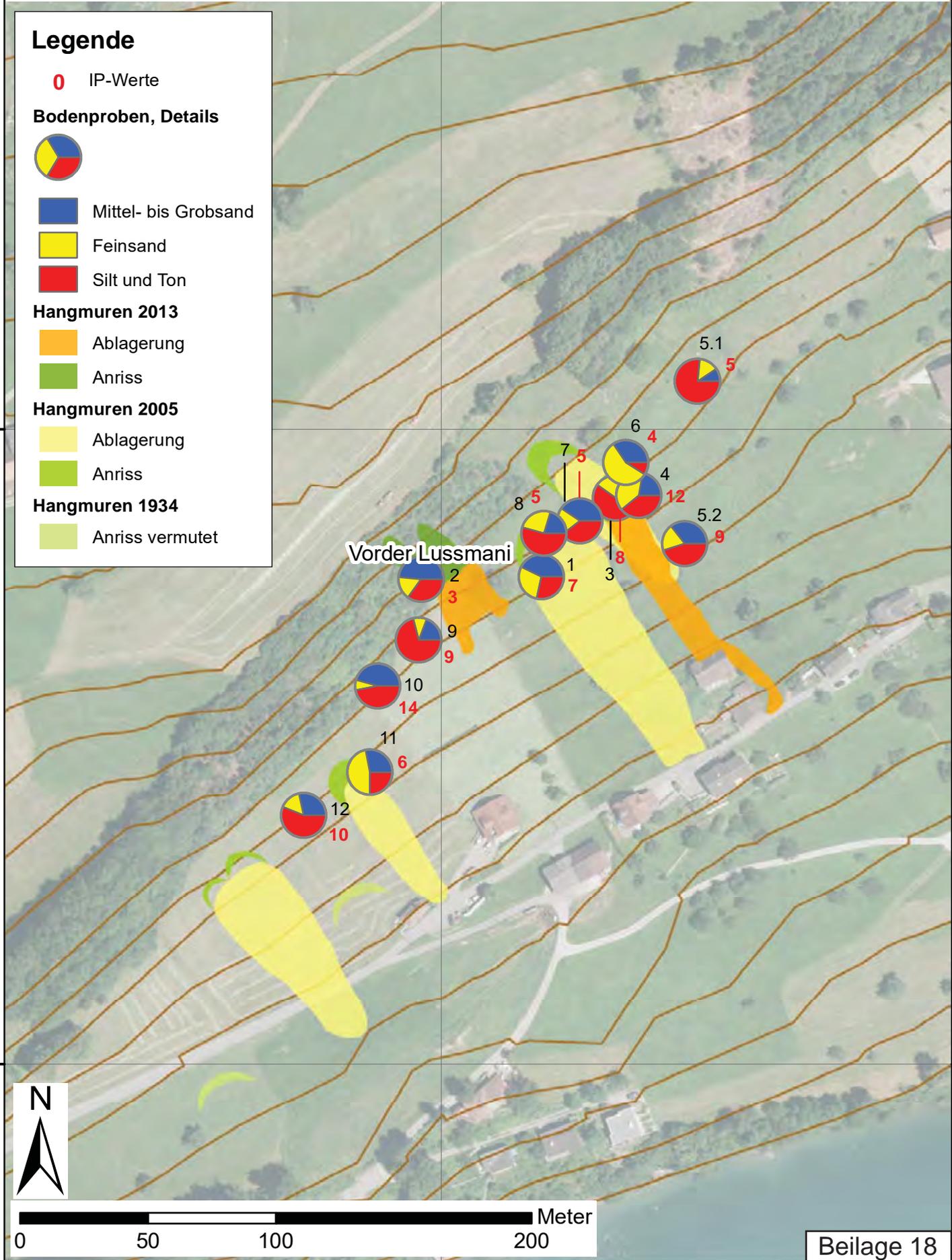
205250

205250

205000

205000

Vorder Lussmani



Testgebiet ENNETBÜRGEN, AGN Hangmurenprojekt

Bodenproben mit Gefahrenkarte
Massstab 1:2000

Legende

Bodenproben-Nr.

● Bodenproben-Nr.

Hangmuren 2013

□ Ablagerung

■ Anriss

Hangmuren 2005

□ Ablagerung

■ Anriss

Hangmuren 1934

■ Anriss vermutet

Gefahrenkarte Rutschungen / Hangmuren

■ erhebliche Gefährdung gem. Gefahrenkarte

■ mittlere Gefährdung gem. Gefahrenkarte

■ geringe Gefährdung gem. Gefahrenkarte

205250

205250

Hinter Lussmani

Vorder Lussmani

205000

205000



Resultate Ennetbürgen

N°	X-Koord	Y-Koord	% Mittel- bis Grobsand	% Feinsand	% Silt und Ton	IP	Sondiertiefe m	Bemerkungen	°Hangneigung
1	675539	205192	43	29	28	7	0.50		28.2
2	675492	205191	49	16	35	3	0.20	felsnah, Karst	40.4
3	675568	205223	18	22	60	8	0.50		29.2
4	675577	205224	22	39	39	12	0.50		27.0
5.1	675600	205269	9	14	77	5	0.40	felsnah	23.6
5.2	675595	205205	36	19	45	9	0.50	wieso keine HM?	24.5
6	675572	205237	34	56	9	4	0.55	wieso keine HM?	25.3
7	675554	205214	41	20	39	5	0.55		29.0
8	675540	205209	20	25	54	5	0.50		26.4
9	675491	205167	19	10	71	9	0.45	felsnah	20.9
10	675475	205149	46	7	47	14	0.40	felsnah	45.0
11	675472	205115	28	47	25	6	0.55	ev. Sanierte Stelle	22.4
12	675446	205098	28	16	56	10	0.35	wieso keine HM?	29.2

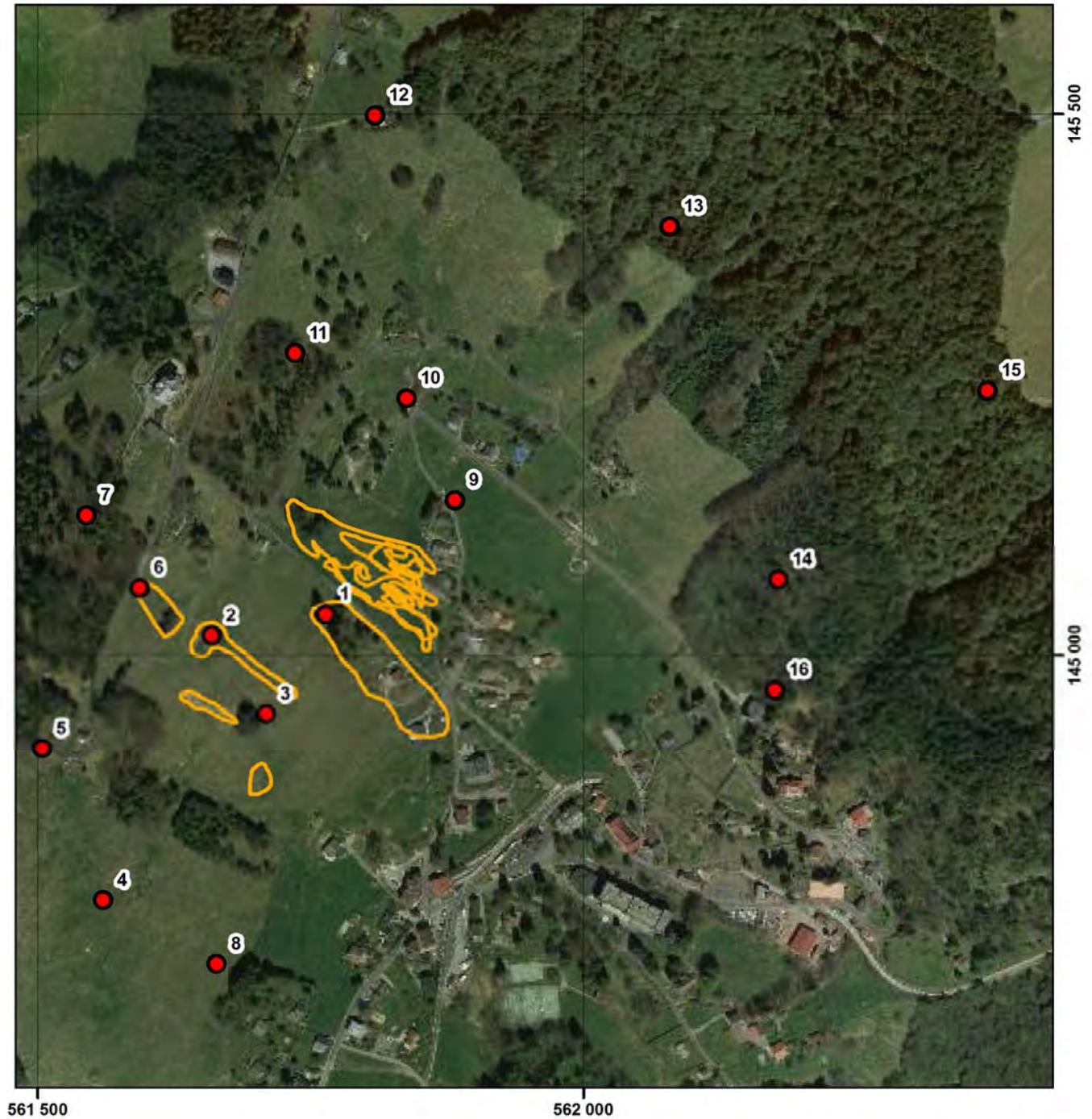
Les Avants

Orthophoto 1:10'000

(mit Hangmurenergebnissen und Probenahmestellen)

Legende :

- ¹ Probenahmestellen (mit Probennummer)
- Hangmurenergebnisse (aus: Ereigniskataster Kt. Waadt)



Les Avants

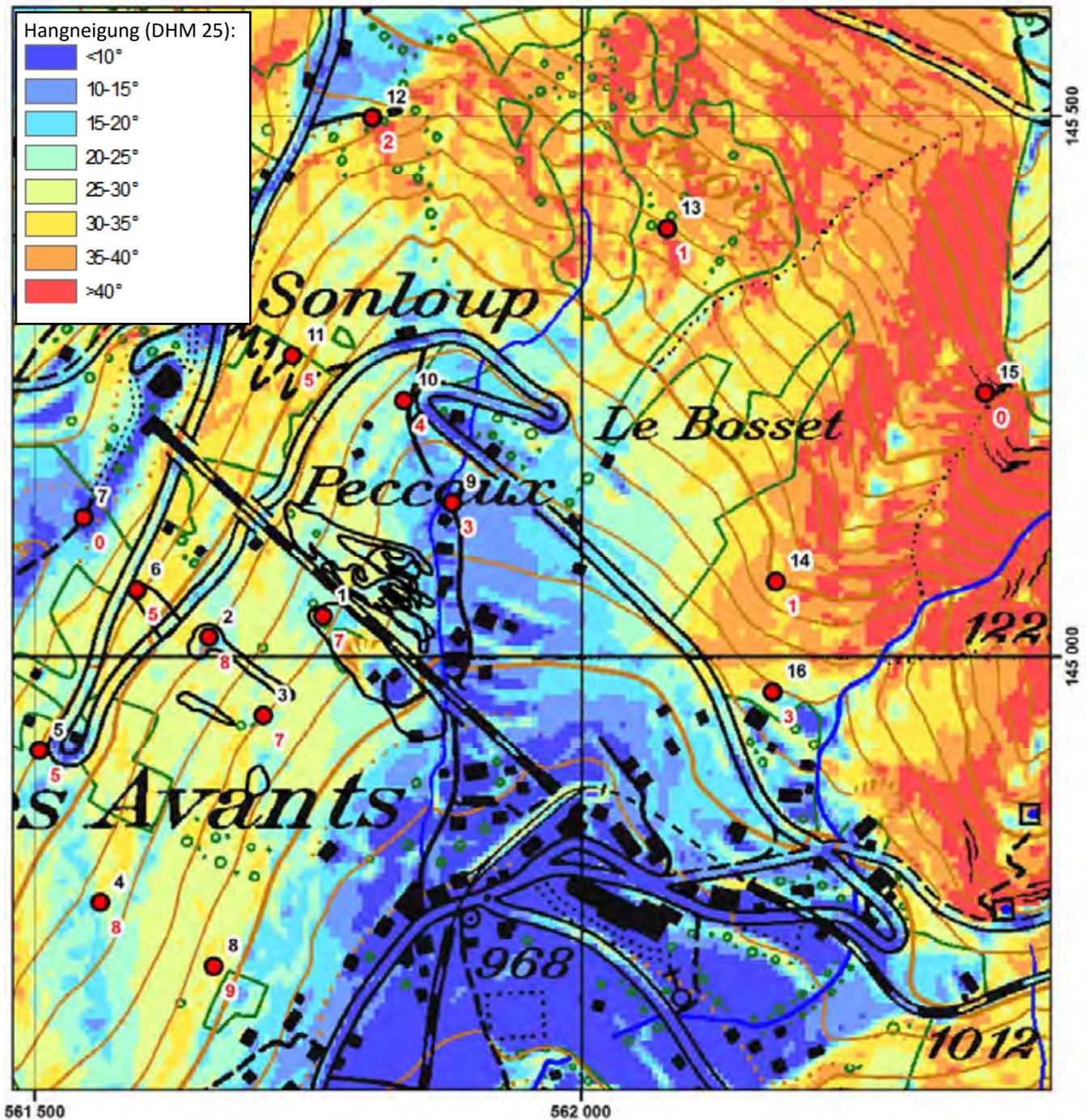
Hangneigungskarte 1:5'000

(mit Hangmurenereignissen und Probenahmestellen)

Legende :

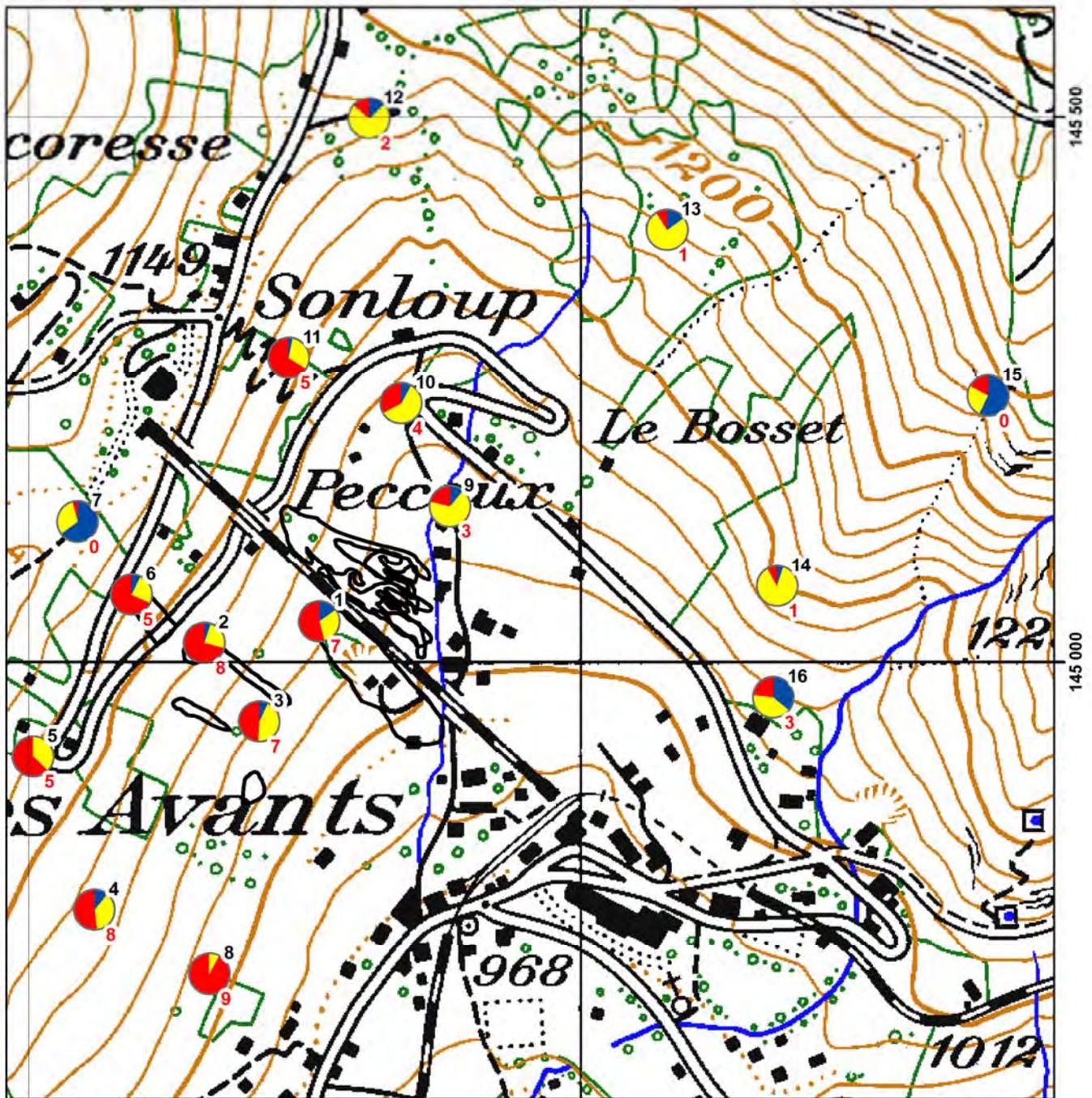
 Probenahmestelle (mit Probennummer und Plastizitätsindex)

 Hangmurenereignisse (aus: Ereigniskataster Kt. Waadt)



Les Avants
 Karte 1:5'000 mit Zusammenstellung der
 Korngrößenanalysen und der Plastizitätsindizes

Legende :



Les Avants

Gefahrenkarte 1:5'000

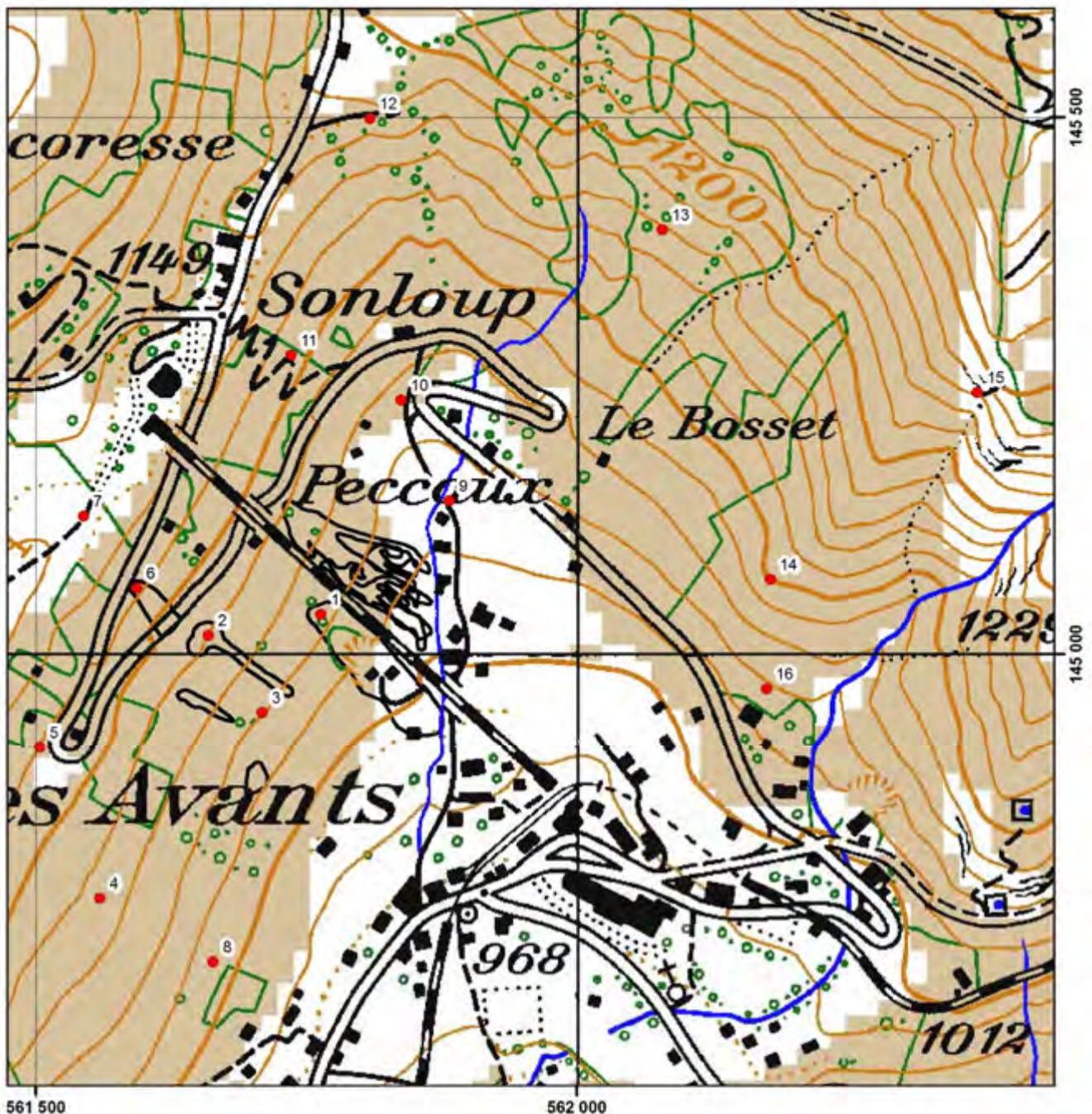
(mit Hangmurenereignissen und Probenahmestellen)

Legende :

-  Probenahmestelle (mit Probennummer)
-  Hangmurenereignisse (aus: Ereigniskataster Kt. Waadt)

Gefahrenkarte Hangmuren:

-  Erhebliche Gefährdung
-  Mittlere Gefährdung
-  Geringe Gefährdung
-  Restgefährdung
-  Gefahrenhinweisbereich



Les Avants: tabellarische Zusammenstellung der Ergebnisse der Probenanalyse

Probenr.	X Koor.	Y Koor.	Sand, in % *	Feinsand, in %	Ton u. Silt, in %	IP**	Bohrtiefe, in m	Bemerkung (Geologie/Probenahmestelle)
1	561764	145037	15	31	54	7	0,40	Moraine Echantillon pris immédiatement à l'amont d'une niche
2	561659	145018	5	24	71	8	0,40	Moraine très cohésive; calcaires à l'affleurement. Niche d'arrachement
3	561709	144946	7	44	49	7	0,40	Moraine Echantillon pris hors coulée
4	561560	144773	11	37	52	8	0,40	Moraine; zone humide Echantillon pris hors coulée
5	561504	144913	0	37	63	5	0,40	Moraine très riche en cailloutis; autochtone? Echantillon pris hors coulée
6	561593	145062	7	25	68	5	0,60	Moraine Niche d'arrachement
7	561545	145129	65	31	4	0	0,20	Dépôts de pente, calcaires sub-affleurant
8	561664	144714	0	8	92	9	0,40	Moraine très cohésive; zone humide Echantillon pris hors coulée
9	561882	145143	11	68	21	3	0,80	Dépôts de lave torrentielle, pierres et quelques fines, puis moraine à ca. 30 cm. Hors coulée
10	561838	145237	8	59	33	4	0,80	Moraine riche en pierres; forte épaisseur (> 1m) Echantillon pris hors coulée
11	561736	145279	3	31	66	5	0,40	Moraine riche en pierres; forte épaisseur (> 1m) Echantillon pris hors coulée
12	561809	145499	13	73	14	2	0,30	Eboulis avec matrice sablo-limoneuse, très peu cohésive Echantillon pris en zone sans coulée Matière organique
13	562079	145396	15	76	9	1	0,60	Eboulis avec matrice sablo-limoneuse, très peu cohésive Echantillon pris en zone sans coulée
14	562179	145070	5	87	8	1	0,50	Eboulis avec matrice sablo-limoneuse, très peu cohésive Echantillon pris en zone sans coulée
15	562370	145244	57	26	17	0	0,40	Eboulis avec matrice sablo-limoneuse, très peu cohésive Echantillon pris en zone sans coulée
16	562175	144968	36	41	23	3	0,40	Eboulis avec matrice sablo-limoneuse Echantillon pris en zone sans coulée

*groß- und mittelkörnig

**IP: Plastizitätsindex

AGN-Projekt

Verbesserung der Hangmurenbeurteilung

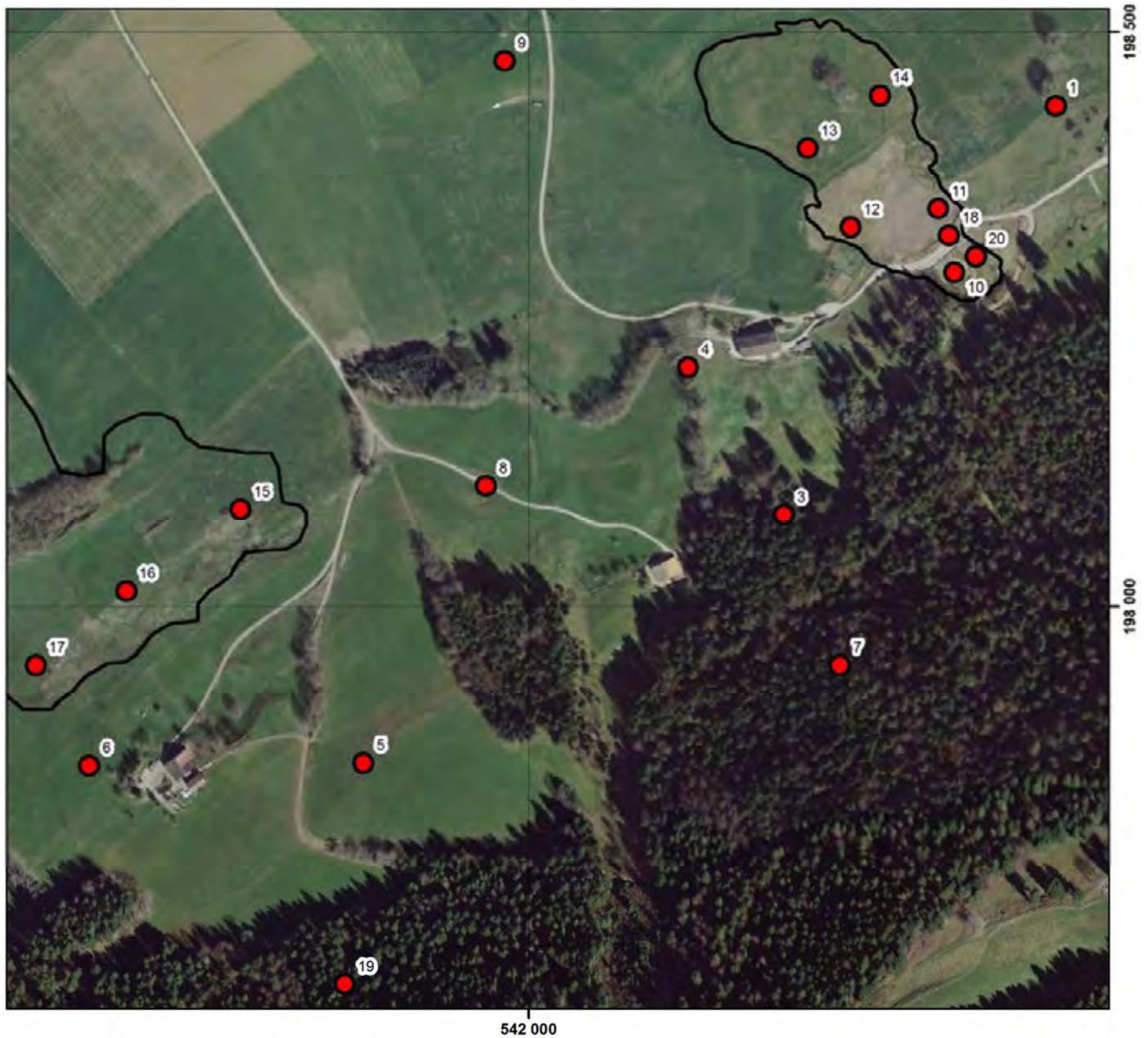
Travers

Orthophoto 1:5'000

(mit Hangmurenereignissen und Probenahmestellen)

Legende :

-  Probenahmestellen (mit Probennummer)
-  Hangmurenereignisse (aus: Ereigniskataster Kt. Neuenburg)



Travers

Hangneigungskarte 1:5'000

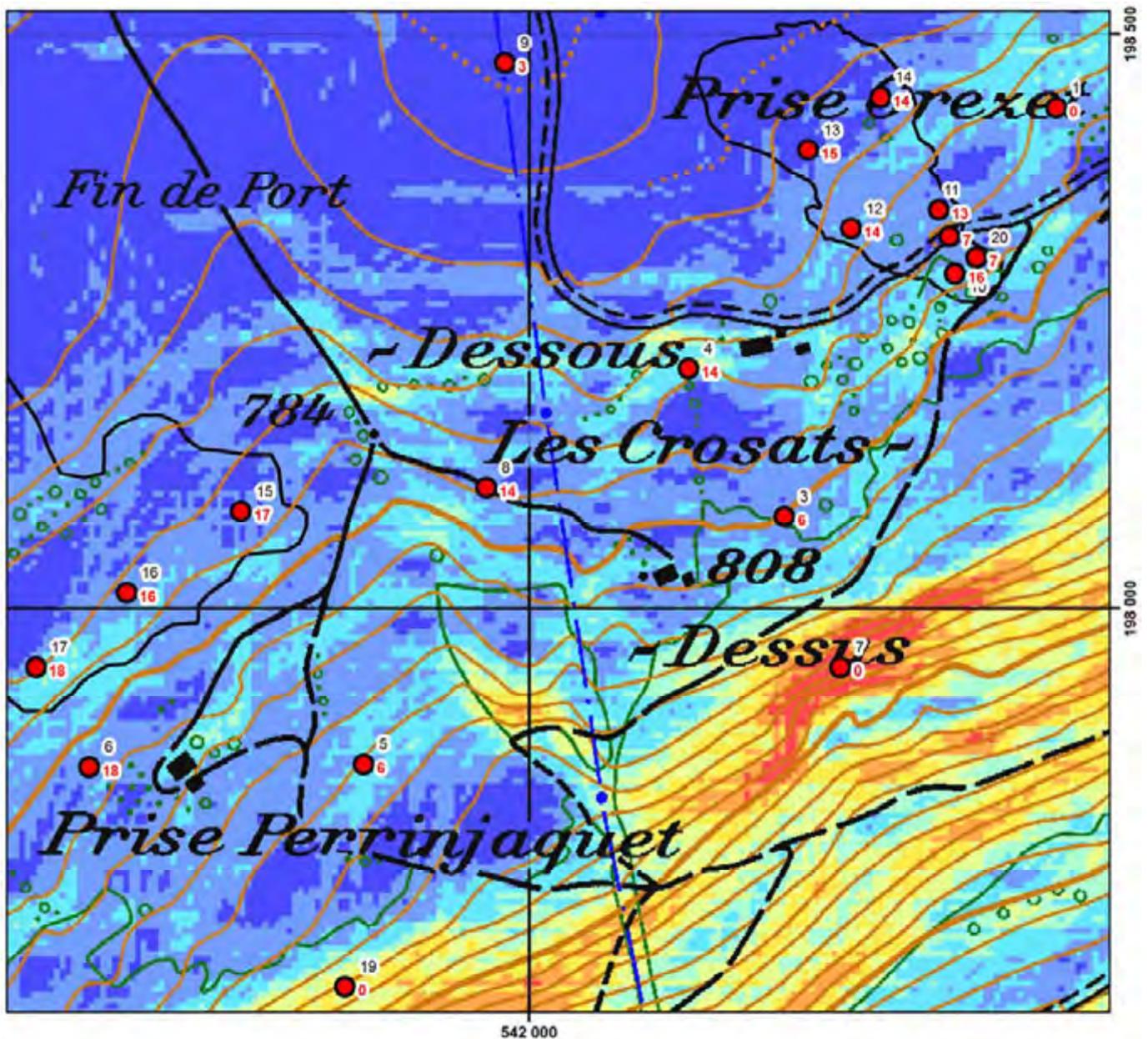
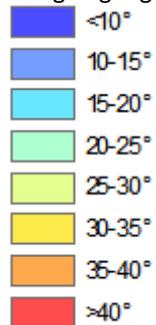
(mit Hangmurenereignissen und Probenahmestellen)

Legende :

 Probenahmestelle (mit Probennummer und Plastizitätsindex)

 Hangmurenereignisse (aus: Ereigniskataster Kt. Neuenburg)

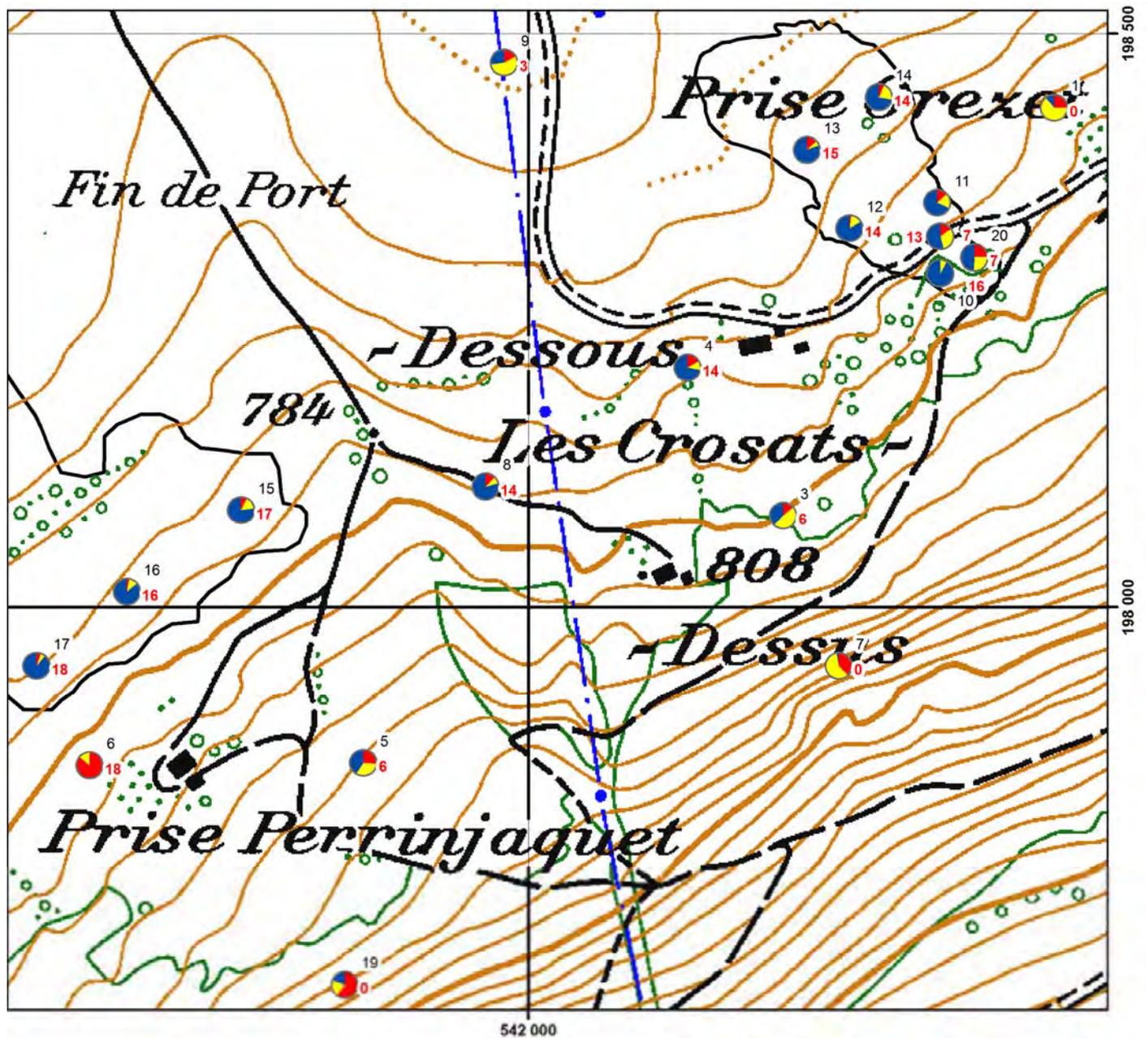
Hangneigung (DHM 25):



Travers

Karte 1:5'000 mit Zusammenstellung der Korngrößenanalysen und der Plastizitätsindizes

Legende :



Gefahrenkarte 1:5'000

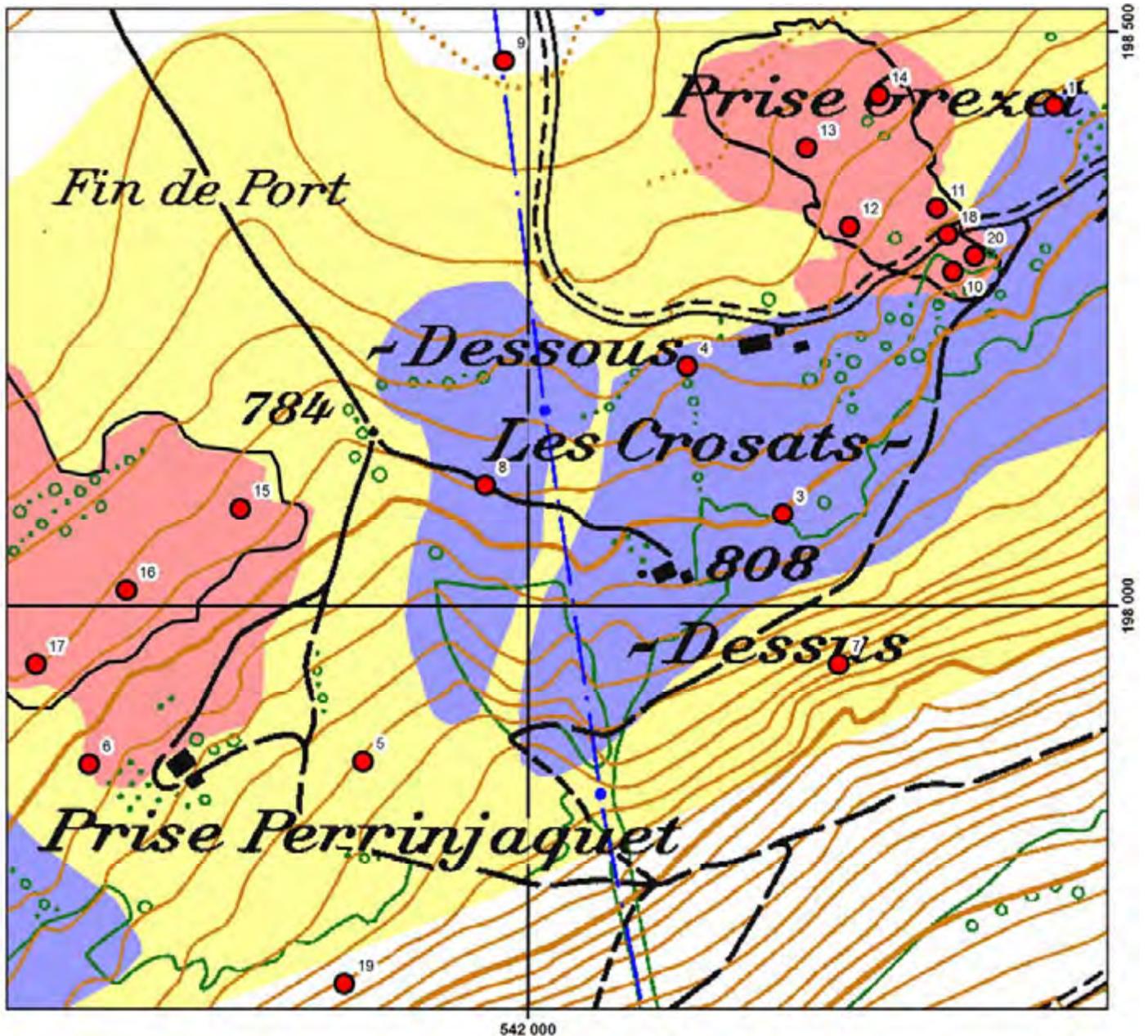
(mit Hangmurenereignissen und Probenahmestellen)

Legende :

-  Probenahmestelle (mit Probennummer)
-  Hangmurenereignisse (aus: Ereigniskataster Kt. Neuenburg)

Gefahrenkarte Rutschungen:

-  Erhebliche Gefährdung
-  Mittlere Gefährdung
-  Geringe Gefährdung
-  Restgefährdung
-  Gefahrenhinweisbereich



Travers: Tabellarische Zusammenstellung der Ergebnisse der Probenanalyse

Probenr.	X Koor.	Y Koor.	Sand, in % *	Feinsand, in %	Ton u. Silt, in %	IP**	Bohrtiefe, in m	Bemerkung (Geologie/Probenahmestelle)
1	542454	198436	25	64	11	0	0,80	Eboulis.
2	542667	198369	12	81	7	0	0,80	Eboulis ; zone stable en amont des coulées
3	542220	198080	14	48	38	6	0,80	Dépôts de pente ; zone stable en amont des coulées
4	542137	198209	17	11	72	14	0,80	Moraine; zone humide Echantillon pris hors coulée
5	541857	197864	26	33	41	6	0,80	Dépôts de pente ; zone stable en amont des coulées
6	541621	197862	86	14	0	18	0,80	Moraine ; zone stable en amont des coulées
7	542268	197949	38	59	3	0	0,20	Eboulis, rocher sub affleurant ; zone stable en amont des coulées
8	541963	198105	12	9	79	14	0,80	Moraine très cohésive; zone humide Echantillon pris hors coulée
9	541979	198475	17	56	27	3	0,80	Alluvions
10	542367	198291	1	8	91	16	0,80	Moraine avec nombreux blocs, matrice argileuse très cohésive; venues d'eau. Echantillon pris dans la niche d'arrachement.
11	542353	198346	13	19	68	13	0,80	Moraine avec nombreux blocs, matrice argileuse très cohésive; venues d'eau. Echantillon pris dans la niche d'arrachement.
12	542277	198330	2	14	84	14	0,80	Dépôts de coulée riches en fines, très cohésifs
13	542240	198399	13	6	81	15	0,80	Dépôts de coulée riches en fines, très cohésifs
14	542302	198445	7	21	72	14	0,80	Dépôts de coulée riches en fines, très cohésifs
15	541752	198085	7	16	77	17	0,80	Matériaux très argileux, peu de blocs; moraine ou dépôts de coulée?
16	541653	198014	3	11	86	16	0,80	Matériaux très argileux, peu de blocs; moraine ou dépôts de coulée?
17	541575	197949	5	6	89	18	0,80	Matériaux très argileux, peu de blocs; moraine ou dépôts de coulée?
18	542362	198323	15	31	54	7	0,80	Molasse altérée; échantillon pris dans la niche d'arrachement; venue d'eau.
19	541841	197672	60	21	19	0	0,30	Eboulis, rocher à l'affleurement ; zone stable en amont des coulées
20	542385	198305	25	26	49	7	0,80	Molasse altérée; échantillon pris dans la niche d'arrachement; venue d'eau.

*groß- und mittelkörnig

**IP: Plastizitätsindex

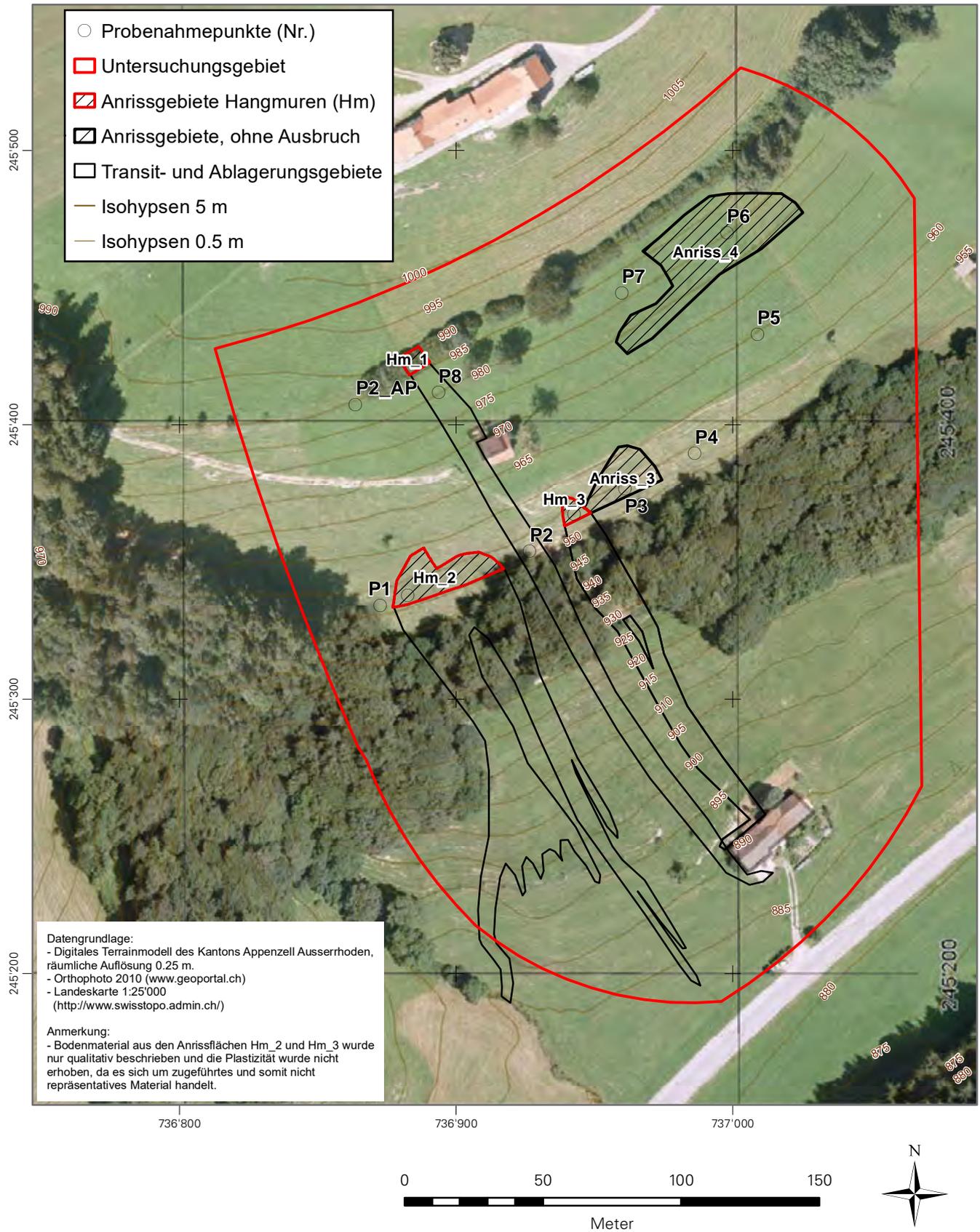
AGN-Projekt

Verbesserung der Hangmurenbeurteilung

Testgebiet Schwellbrunn AR

Übersicht Untersuchungsgebiet

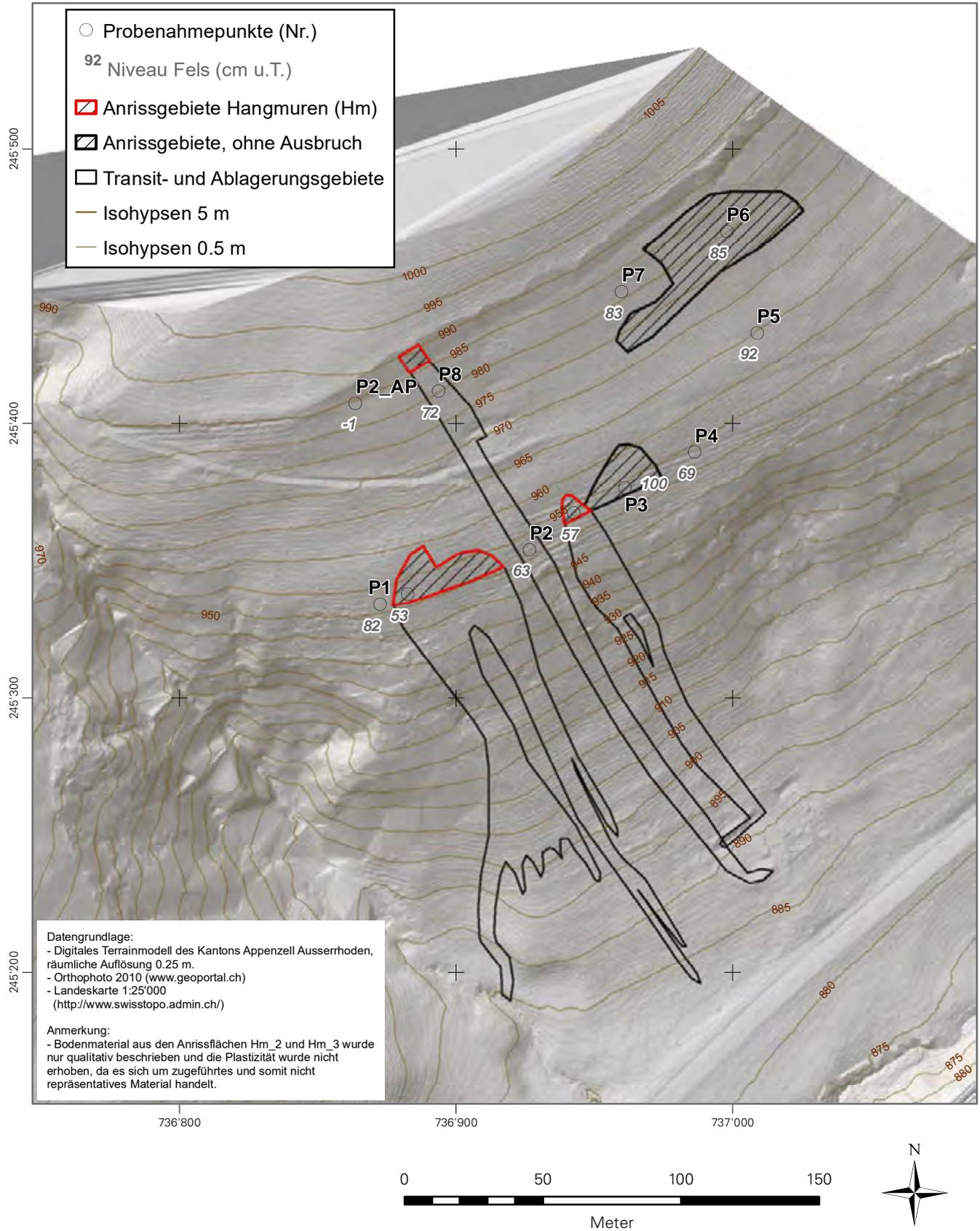
Situation 1:2'000



Testgebiet Schwellbrunn AR

Topographie, Niveau Fels

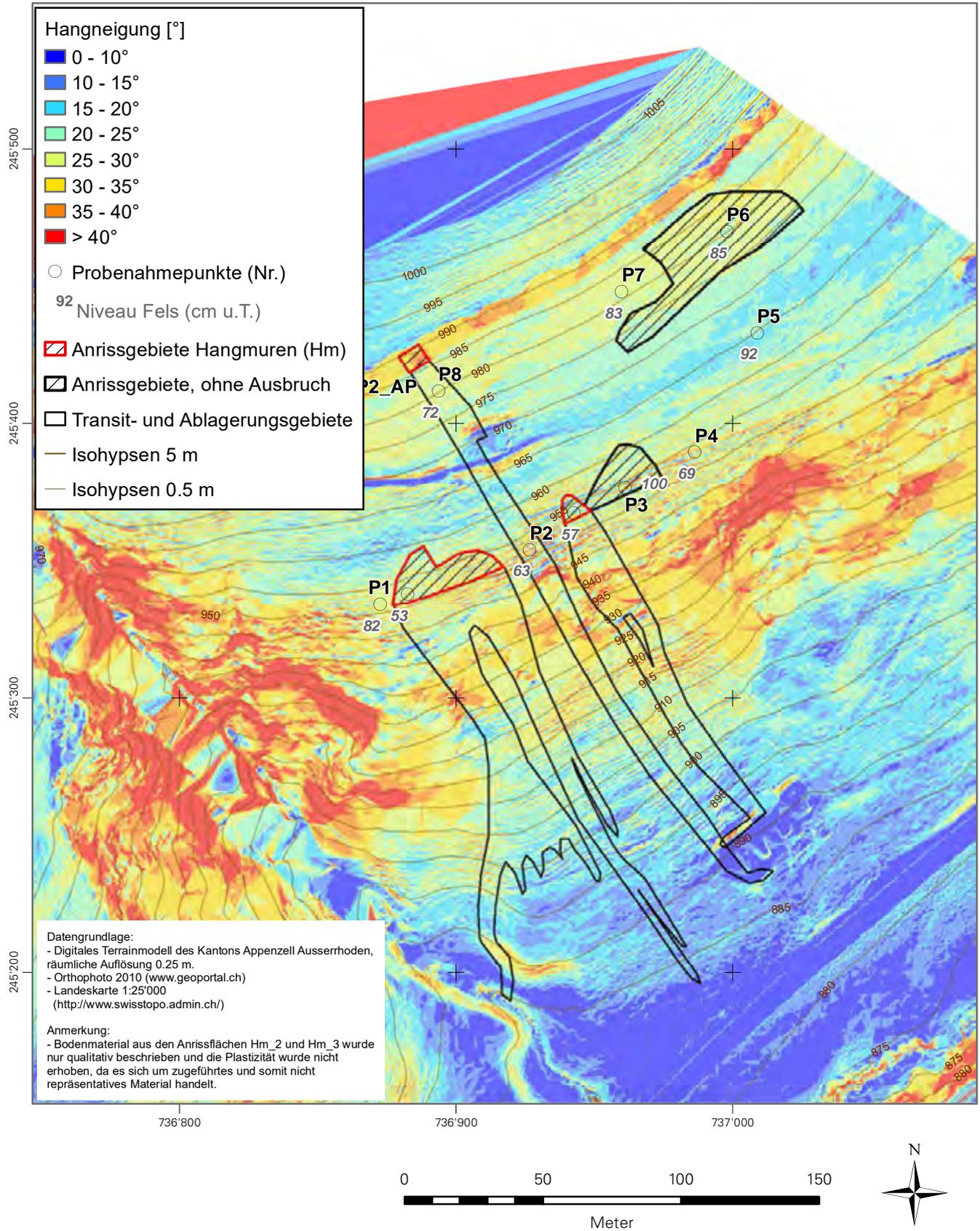
Situation 1:2'000



Testgebiet Schwellbrunn AR

Topographie, Hangneigung

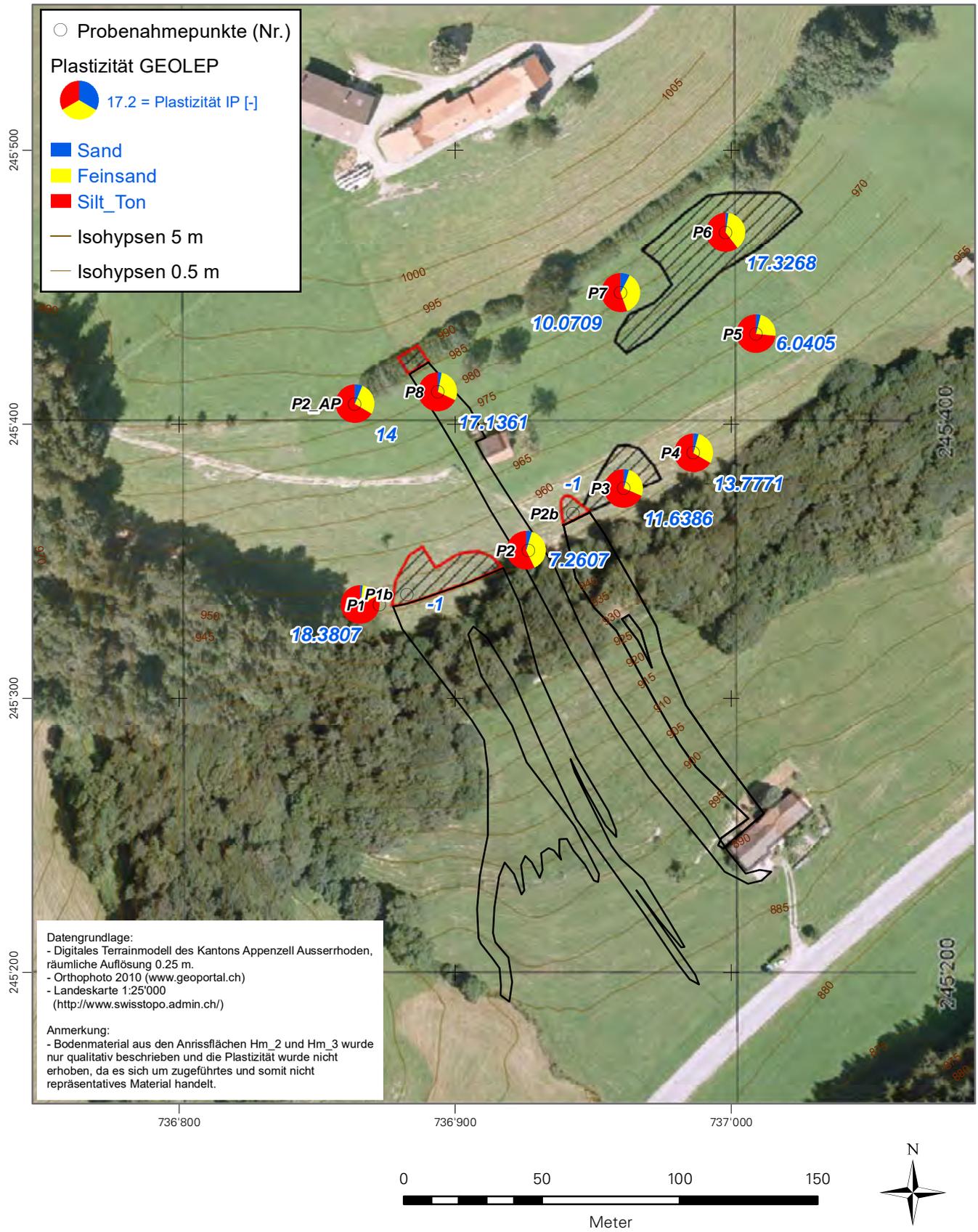
Situation 1:2'000



Testgebiet Schwellbrunn AR

Messwerte Plastizität und Tongehalt

Situation 1:2'000



Ergebnisse der Probenanalysen Schwellbrunn AR

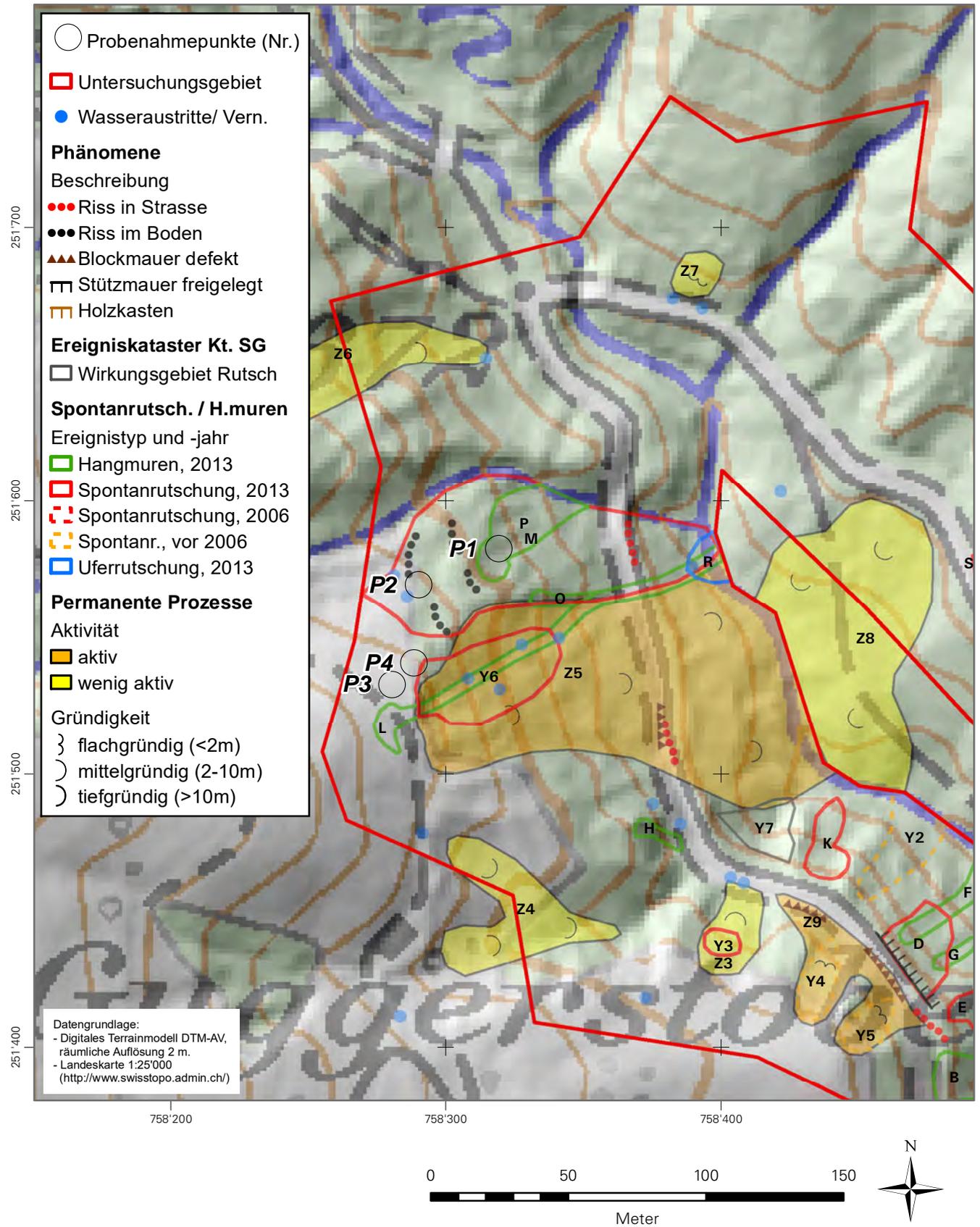
Resultate Schwellbrunn

N°	X-Koord.	Y-Koord.	Mittel- bis Grobsand [%]	Feinsand [%]	Silt und Ton [%]	IP [-]	Sondiertiefe [m]	Bemerkungen	Hang- neigung [°]
1	736'873	245'334	2	15	83	18	0.4	Neben Anrissbereich Hm	28
2	736'927	245'354	5	38	57	7	0.4	Neben Anrissbereich Hm	28
3	736'961	245'377	4	27	69	12	0.3	Im Anrissbereich Spontanrutschung	29
4	736'986	245'390	4	29	67	14	0.35	Neben Anrissbereich Spontanrutschung	29
5	737'009	245'433	4	23	73	6	0.35	Standfest	23
6	736'998	245'470	2	37	60	17	0.35	Im Anrissbereich Spontanrutschung	25
7	736'960	245'448	7	37	55	10	0.3	Standfest	26
8	736'894	245'412	3	29	68	17	0.3	Standfest	24
2_AP	736'864	245'407	6	28	66	14	k.A.	Standfest	36

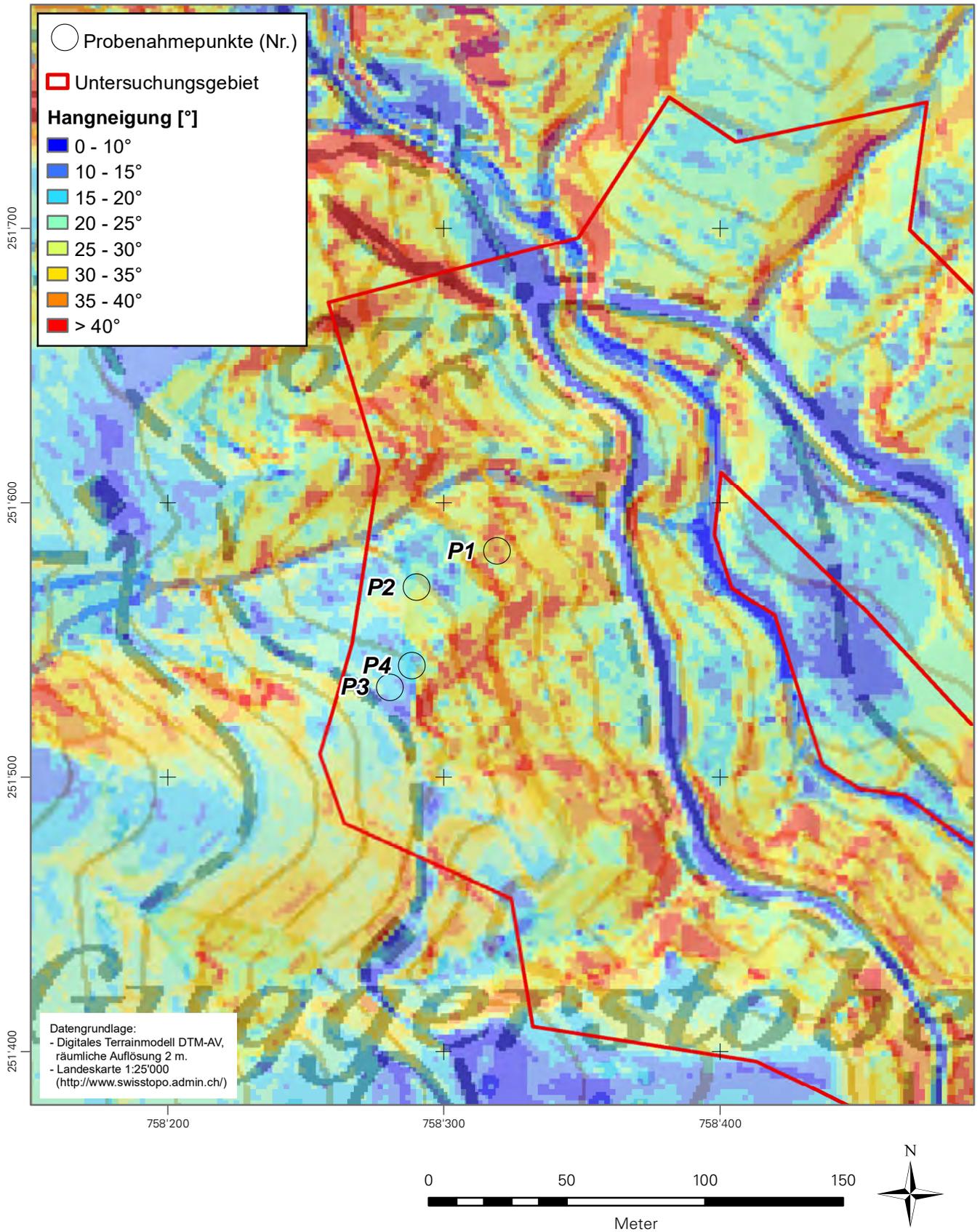
Testgebiet Altstätten SG

Übersicht Untersuchungsgebiet mit Phänomenen und Ereignissen 2013

Situation 1:2'000



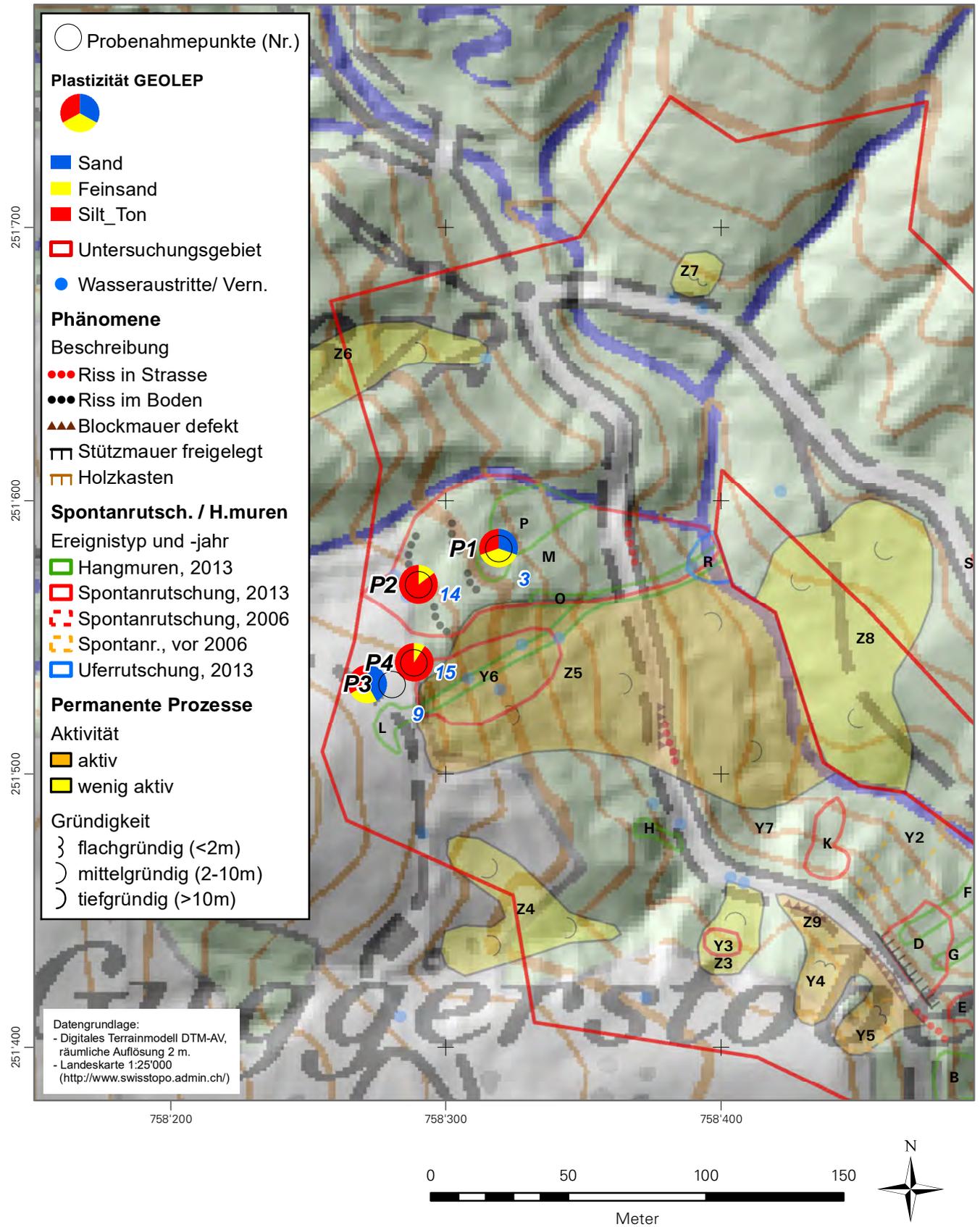
Testgebiet Altstätten SG
Hangneigungskarte
Situation 1:2'000



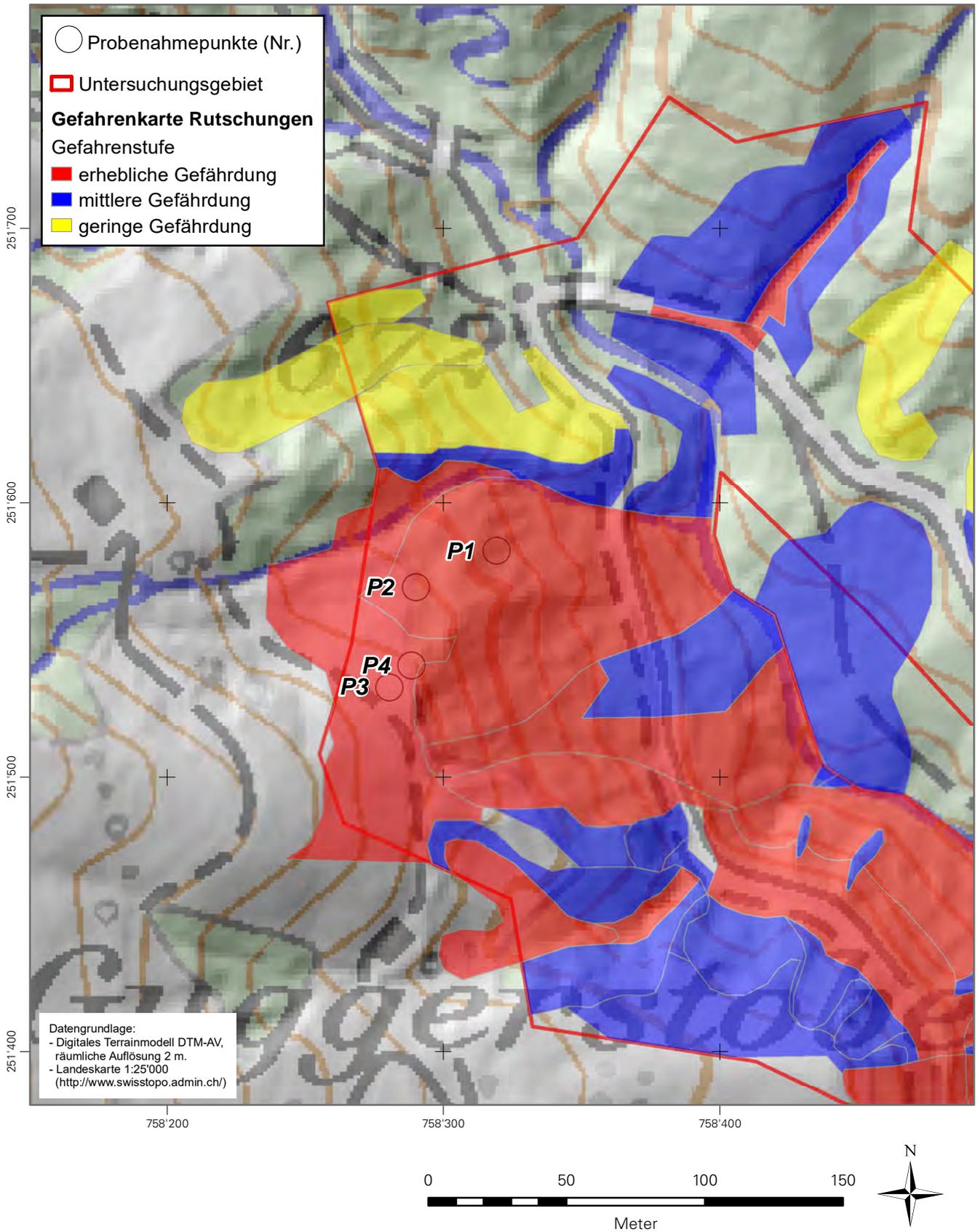
Testgebiet Altstätten SG

Korngrößenanalysen und Plastizitätsindizes

Situation 1:2'000



Testgebiet Altstätten SG
Gefahrenkarte
Situation 1:2'000



Testgebiet Altstätten SG

Ergebnisse der Probenanalysen

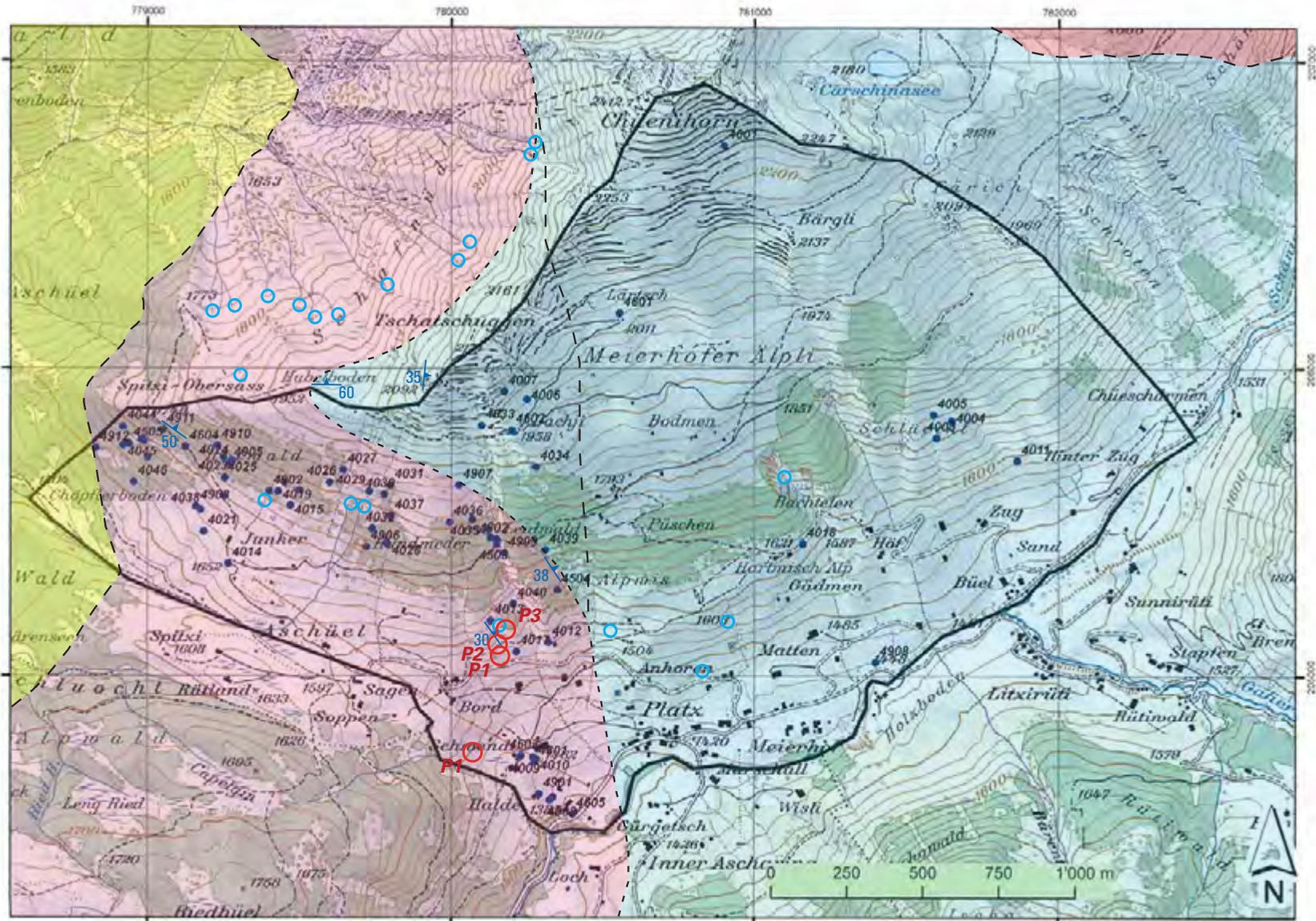
Resultate Altstätten

N°	X-Koord.	Y-Koord.	Mittel- bis Grobsand [%]	Feinsand [%]	Silt und Ton [%]	IP [-]	Sondiertiefe [m]	Bemerkungen	Hang- neigung [°]
1	758'319	251'583	31	38	31	3	k.A.	Im Anrissbereich Hm	39
2	758'290	251'569	0	15	85	14	k.A.	Im Anrissbereich Spontanrutschung	24
3	758'281	251'533	42	25	33	9	k.A.	Standfest	17
4	758'288	251'541	0	9	91	15	k.A.	Neben Anrissbereich Spontanrutschung	17

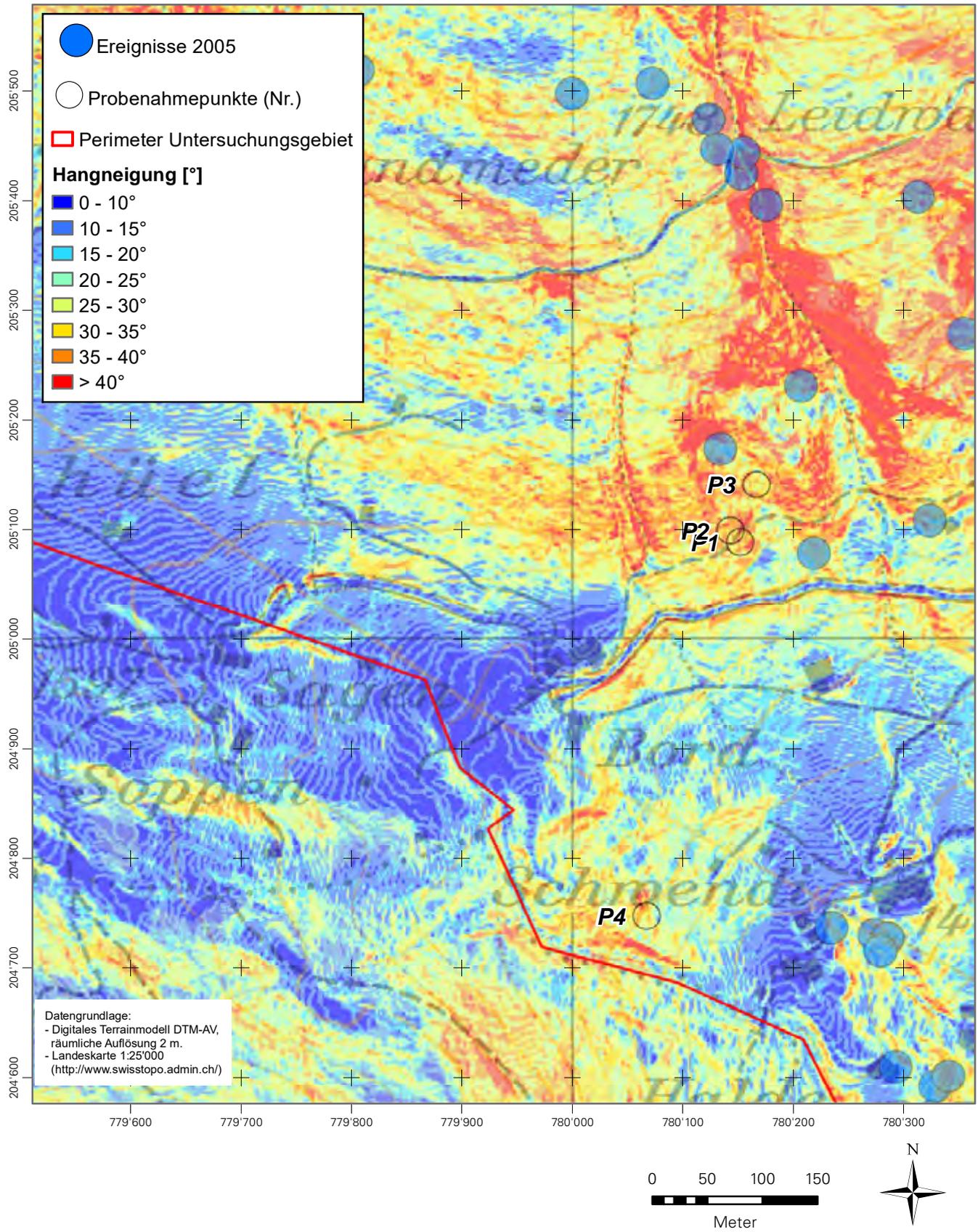
Testgebiet St. Antönien GR
Übersicht Untersuchungsgebiet
 1:20'000

Legende

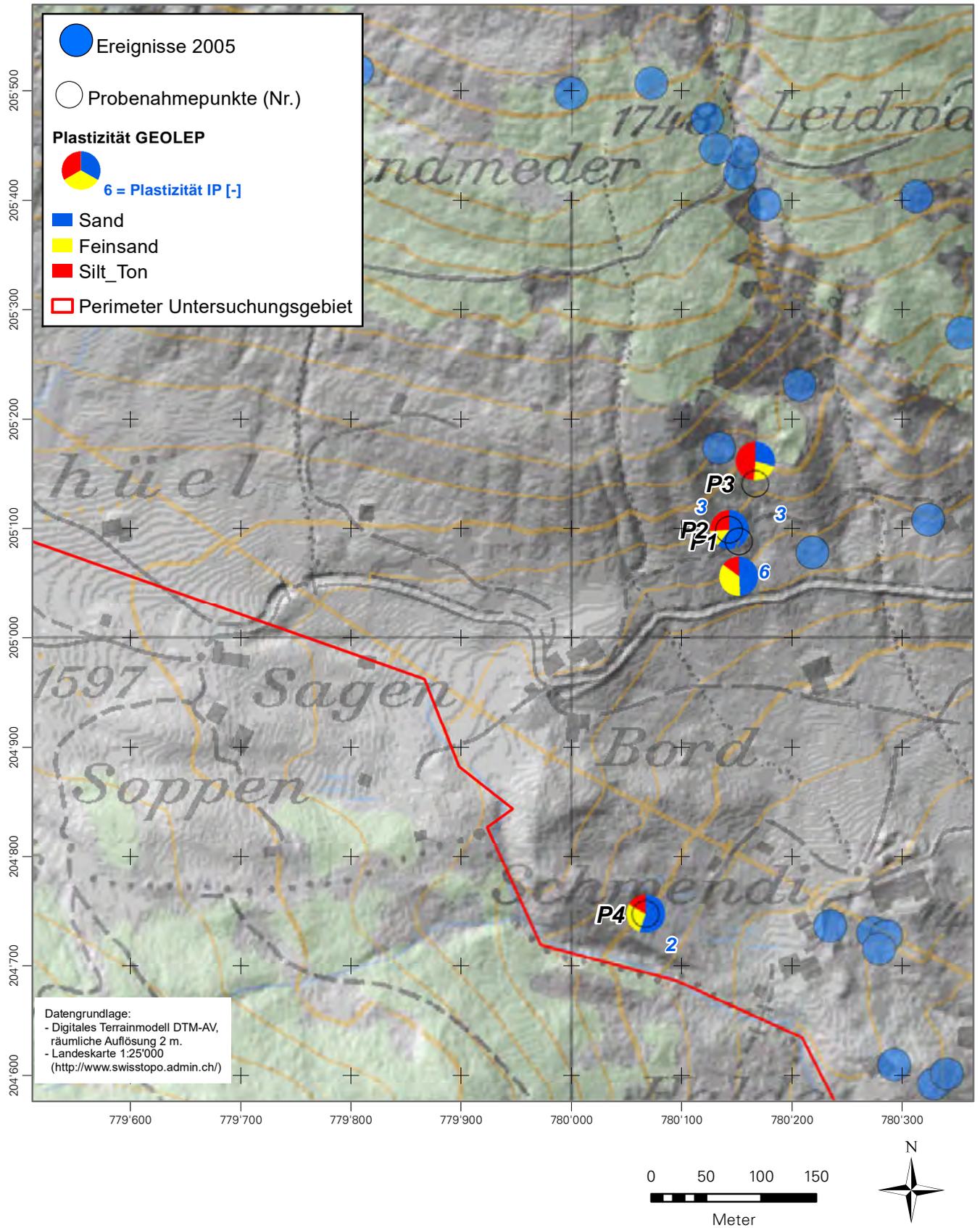
- 4015 Ereignisse 2005 (Nr.)
- Probenahmepunkte (Nr.)
P4
- «Quellen»
- — Lithologische Grenzen nach Nänny, 1948
- - - vermutete lithologische Grenze
- Pfävisgrat-Serie
- Fadura-Serie (mergelige Kalke)
- Gyrenspitz-Serie (polygene Breccie)
- Eggberg-Serie
- ↘ 42 Streichen und Fallen der Schichten bzw. der Schieferung



Testgebiet St. Antönien GR
Hangneigungskarte
 Situation 1:5'000



Testgebiet St. Antönien GR
Korngrößenanalysen und Plastizitätsindizes
 Situation 1:5'000



Testgebiet St. Antönien GR

Ergebnisse der Probenanalysen

Resultate St. Antönien

N°	X-Koord.	Y-Koord.	Mittel- bis Grobsand [%]	Feinsand [%]	Silt und Ton [%]	IP [-]	Sondiertiefe [m]	Bemerkungen	Hang- neigung [°]
1	780'152	205'088	49	36	15	6	k.A.		36
2	780'143	205'099	60	13	26	3	k.A.		35
3	780'167	205'141	30	22	49	3	k.A.		32
4	780'067	204'747	56	28	17	2	k.A.		30

ANHÄNGE

Anhang 1: Prozessbeeinflussende Faktoren von Hangmuren.

Anhang 2: Essai de caractérisation *in situ* des formations (Essai de terrain).

Prozessbeeinflussende Faktoren von Hangmuren: Zusammenstellung der spezifischen Förderfaktoren (mit Hinweis auf die Grunddisposition bzw. eine variable Disposition)

	Grunddisposition	Variable Disposition
1) Topografisch/hydrologische Faktoren		
a) Gibt es eine steile, weit hinaufreichende Hangpartie? → Zufluss von Oberflächenwasser und Hangwasser aus den oberen Hangpartien.	x	x
b) Gibt es ausgeprägte rinnenförmige Vertiefungen? → Konzentration von Oberflächenwasser; alte Erosionsrinnen aus unterirdischen Wasseraustritten.	x	x
c) Gibt es spezielle Geländeformen? → Terrassenkante mit Sickerströmung. Somit möglicher Anstieg des Wasserspiegels im Hangfuss (Auftrieb bzw. Hangfussentlastung).	x	x
d) Gibt es Vernässungen oder sogar Quellaustritte im Gelände (aktiv erkennbar oder wegen des Bewuchses)? → Hinweis für Destabilisierung im Ereignisfall.		x
2) Geologische und hydrogeologische Faktoren		
a) Ist der Fels untief (< 0.5 m bis ca. 1.5 m)? Wie verläuft die Felsoberfläche? → Fels bedeutet i.d.R. Stauer; Begünstigung eines Abgleitens oberflächennaher Schichten (bei geringer Mächtigkeit des Lockergesteins evtl. auch nur geringere Intensität).	x	
b) Gibt es Hinweise, z.B. auf einer geologischen Karte, auf stark wasserführende Felsschichten im Untergrund (Karst, Gips) oder tektonische Brüche u.ä.? → Konzentrierter unterirdischer Wassereintrag in den Hang ist denkbar.	x	x
c) Gibt es Hinweise auf markante Stauerhorizonte im Felsuntergrund? Gibt es diesbezüglich Anzeichen für periodische, oberirdische Quellaustritte? → Potenzielle Quellaustritte in den Hang bei hohem Bergwasserspiegel möglich.	x	x
d) Gibt es Hinweise über spezielle wasserführende Lockergesteinsschichten (Kiesrinnen) bzw. über unterschiedliche (geschichtete) Durchlässigkeiten im Untergrund? → Potenzielle Wasseraustritte in den Hang.	x	x
e) Ist der Fels evtl. aus Flysch oder Gestein mit erhöhten Schieferanteilen? → Leichte Verwitterbarkeit, weil ein hoher Feinanteil im Untergrund die Rutschanfälligkeit vergrößern kann.	x	x
f) Gibt es Anzeichen von einer alten (tiefer liegenden) Rutschbewegung im Untergrund? → Hinweis für eine generelle Hanginstabilität.	x	x
3) Biologische Faktoren		
a) Gibt es Viehgangeln? → Evtl. ungünstige Auswirkung auf Hangstabilität (erhöhte Wasserinfiltration in den Untergrund).		x
b) Gibt es Wald in der Hangpartie? → Stabilisierender Effekt.		x
c) Gibt es Waldschaden? → Destabilisierender Effekt infolge erhöhter Infiltration von Wasser bzw. des Fehlens der stabilisierenden Wirkung der Wurzeln.		x
4) Menschliche Faktoren		
a) Gibt es allfällige anthropogene Einflüsse (z.B. Strasse oben im Hang, die über Schulter entwässert)? → Erhöhte Wasserführung in den Hang.		x
b) Gibt es Drainagen im Hang? Alter/Zustand? → Hinweis auf Wasservorkommen im Hang. Bei defekter Drainage evtl. konzentrierter Wasseraustritt in Hang.		x
c) Gibt es Quellen bzw. Schächte (Brunnstuben) und evtl. auch Leitungen im Hang? → Hinweis auf Wasservorkommen im Hang.		x
d) Gibt es weitere anthropogene Einflüsse im Hang: Z. B. Rohre, die in den Hang entwässern etc.? → Erhöhter Wasserfluss.		x

ESSAI DE CARACTÉRISATION *IN SITU* DES FORMATIONS (ESSAI DE TERRAIN)

1 PRINCIPE

L'essai de caractérisation *in situ* des formations superficielles meubles vise à obtenir d'une part des informations sur leur granulométrie et d'autre part une évaluation de leur argilosité.

1.1 Granulométrie

L'importance relative des différentes fractions granulométriques est calculée par le biais d'un essai de sédimentométrie simplifié proche de la méthode d'Andreasen; il consiste à mesurer le volume de matériel sédimenté au fond d'une éprouvette à des intervalles de temps déterminés. Ceux-ci sont définis au moyen de la loi de Stokes et sont fonctions de la classe granulométrique considérée ainsi que de la géométrie de l'éprouvette utilisée pour le test:

$$t = \frac{36 \times \eta \times h}{2 \times d^2 \times g \times (\rho_p - \rho_f)}$$

Avec t : temps au bout duquel les particules de diamètre supérieur ou égal à d auront sédimenté [s];

η : viscosité dynamique du fluide [kg/m.s]; pour l'eau: $\eta = 1.10^{-3}$ kg/m.s;

h : hauteur de chute de la particule [m]; on considèrera la distance entre le fond de l'éprouvette et la surface du liquide dans celle-ci;

d : diamètre de la particule pour laquelle on cherche à connaître t [m];

g : accélération de la pesanteur, soit 9.81 m²/s;

ρ_p : masse volumique de la particule [kg/m³]; on considèrera par défaut une masse volumique de 2'670 kg/m³;

ρ_f : masse volumique du fluide [kg/m³]; pour l'eau, $\rho_f = 1'000$ kg/m³.

1.2 Argilosité

L'argilosité d'une formation meuble est un bon indicateur du comportement de celle-ci en fonction de sa teneur en eau. Elle est traditionnellement renseignée grâce à la détermination en laboratoire des limites d'Atterberg et de l'indice de plasticité ou encore par un essai d'absorption du bleu de méthylène.

Beaulieu (Beaulieu, 1979) et Pantet *et al.* (Pantet, Parriaux, & Thelin, 2007) ont montré qu'il existe une corrélation entre la valeur de bleu de méthylène et la limite de liquidité ainsi que l'indice de plasticité des formations argileuses; l'essai de

terrain utilisé dans le cadre de cette étude consiste ainsi à introduire un échantillon de masse connue dans une solution de bleu de méthylène et de mesurer la masse de bleu adsorbée par celui-ci. Les équations suivantes ont été retenues:

$$IP = \frac{(0,042 \times VB^2) + (0,16 * VB)}{100}$$

$$w_L = \frac{(17,8 \times VB) + 6}{100}$$

Avec *IP*: indice de plasticité [-] ;

w_L: limite de liquidité [-] ;

VB: valeur de bleu, correspondant à la masse de bleu de méthylène adsorbée par kilogramme de matériaux de granulométrie inférieure ou égale à 2 millimètres [g/kg].

2 MÉTHODE

2.1 Déroulement de l'essai

Les proportions des différentes fractions granulométriques ainsi que la valeur de bleu de méthylène peuvent être déterminées sur le terrain en environ 15 minutes par le biais d'un essai mis au point par le laboratoire GEOLEP de l'EPFL, et dont le déroulement est détaillé ci-dessous (le protocole, les valeurs numériques ainsi que les équations ci-dessous ne sont valables qu'en relation avec le matériel préconisé pour cet essai et listé en Table 1; l'utilisation d'autres outils nécessite une adaptation de ces valeurs):

Tarière à main
Tamis maille 2mm
Eau déminéralisée
Bleu de méthylène (10 g/litre)
Tubes à centrifuger gradués 15 ml
Balance de poche
Seringue 100 ml
Photomètre HI96769 (Hannah Instruments)
Chronomètre
Pointes à filtre 100 µl
Micropipette
Seringue 20 ml
Pots 1dl refermables

Table 1: Matériel nécessaire aux essais in situ.



Prélever un échantillon dans les formations superficielles meubles, si possible suffisamment en profondeur pour éviter la présence de matière organique.



Tamiser cet échantillon à 2 mm et y ajouter de l'eau jusqu'à ce que sa consistance soit pâteuse.



Mettre environ 1 cm³ d'échantillon tamisé dans un tube contenant 10 ml de solution de bleu de méthylène à 10 g/l.



Mesurer m_{BF} (masse du tube, de son contenu en bleu de méthylène et de l'échantillon introduit, [g]).



Mesurer v_{BF} (volume occupé par le bleu de méthylène et l'échantillon dans le tube, [ml]).



Agiter fortement le tube.



Laisser reposer la solution pendant 5 minutes.



Pendant ce temps, mettre environ 2 cm³ d'échantillon tamisé dans un tube contenant 5 ml d'eau désionisée.



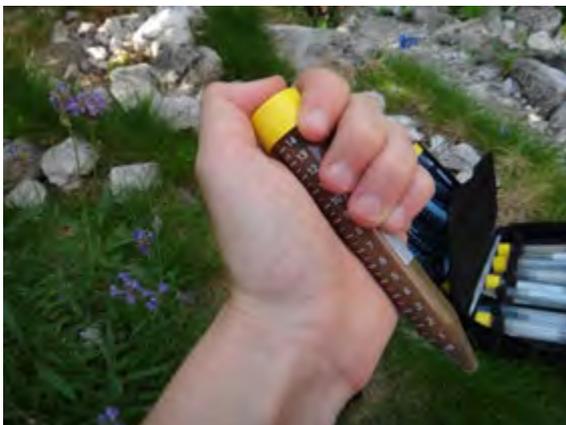
Mesurer m_{vf} (masse du tube, de son contenu en eau désionisée et de l'échantillon introduit, [g]).



Mesurer v_{vf} (volume occupé par l'eau désionisée et l'échantillon dans le tube, [ml]).



Compléter avec de l'eau déminéralisée jusqu'à 14 ml.



Agiter jusqu'à ce que les agrégats aient disparu.



Mesurer:

- le volume sédimenté V_{Sm+g} à $t_1 = 2''$ (sables moyens et grossiers, [ml]) ;
- le volume sédimenté V_{Sf} à $t_2 = 10''$ (sables fins, [ml]);
- le volume sédimenté V_{Lg} à $t_3 = 1'$ (limons grossiers, [ml]);
- Mesurer le volume sédimenté V_{Lm} à $t_4 = 4'$ (limons moyens, [ml]).



Mettre 1 dl d'eau désionisée dans un pot.



Prélever $100 \mu\text{l}$ de solution dans le tube contenant le bleu de méthylène avec une pointe filtrante.



Les déposer dans le pot de 1 dl et homogénéiser la solution.



Rincer la cuve du photomètre avec la solution du pot de 1dl.



Remplir la cuve du photomètre et faire la mesure.



Noter la concentration mesurée C_{dil} (, [mg/l]).

2.2 Calculs

Suite à la mise en œuvre du test, les valeurs suivantes peuvent être calculées:

$$\text{Pourcentage de sables moyens et grossiers} = \%_{Sm+g} = \frac{V_{Sm+g} \times 0.6 \times (\rho_p - \rho_f)}{m_{Vf} - 12 - V_{Vf} + 5}$$

$$\text{Pourcentage de sables fins} = \%_{Sf} = \frac{(V_{Sf} - V_{Sm+g}) \times 0.6 \times (\rho_p - \rho_f)}{m_{Vf} - 12 - V_{Vf} + 5}$$

$$\text{Pourcentage de limons grossiers} = \%_{Lg} = \frac{(V_{Lg} - V_{Sf}) \times 0.6 \times (\rho_p - \rho_f)}{m_{Vf} - 12 - V_{Vf} + 5}$$

$$\text{Pourcentage de limons moyens} = \%_{Lm} = \frac{(V_{Lm} - V_{Lg}) \times 0.6 \times (\rho_p - \rho_f)}{m_{Vf} - 12 - V_{Vf} + 5}$$

$$\text{Pourcentage de limons fins et argiles} = \%_{Lf+A} = 1 - (\%_{Sm+g} + \%_{Sf} + \%_{Lg} + \%_{Lm})$$

$$\text{Valeur de bleu de méthylène} = VB = \frac{(\rho_p - \rho_f) \times 1000 \times (0,1 - (50 \times C_{dil} \times 0,003))}{(\rho_p - \rho_f) \times (m_{Bf} - 17 - (0,025 \times (v_{Bf} - 10))) + 0,01}$$

Un outil de calcul et de visualisation en ligne de ces valeurs a par ailleurs été mis en place, permettant de consulter les résultats sur le terrain et ainsi d'optimiser la prise d'échantillons: on peut ainsi densifier les mesures dans les zones de forte hétérogénéité ou au contraire les espacer là où les paramètres varient peu.

Site: Les Avants

Echantillon: ✓

Lieu: ✓

Position GPS: Latitude: 46.455776
Longitude: 6.9408

Remarques: ✓

Essai au bleu:

Masse avec échantillon (g.): ✓

Volume avec échantillon (ml): ✓

Validation: OK; vous pouvez continuer.

Concentration diluée: ✓

Valeur de bleu: 0

Indice de plasticité: 0 %

Site: Les Avants

Echantillon	Limons Argiles	Plasticité
1	100 %	7 %
10	100 %	4 %
11	100 %	5 %
12	14 %	2 %
13	100 %	1 %
14	8 %	1 %

