



Aufskalierung von Bodenkennwerten für die Hangmurenmodellierung (Pilotprojekt Diemtigen Kt. BE)

Kissling+Zbinden: Ch. Wüthrich, M. Rüdy,

HAFL: S. Burgos, M. Schwarz, V. Kern, A. Schmidhauser , R. Tuchschnid

LANAT: A. Chervet, T. Keller, L. Ramseier

Inhaltsübersicht

- ▶ Einführung und Ablauf des Projekts
- ▶ Aufnahme von neuen oder zusätzlichen Erhebungsgrössen und Anwendung von neuen Methoden
- ▶ Erfahrungen Feldarbeit
- ▶ Sampling Design und Modellierung Bodenkarte
- ▶ Fokus Modellierung Hangmuren und Diskussion der Ergebnisse
- ▶ Fazit

1. Einführung und Ablauf des Projekts



BGS-Online-Kolloquium

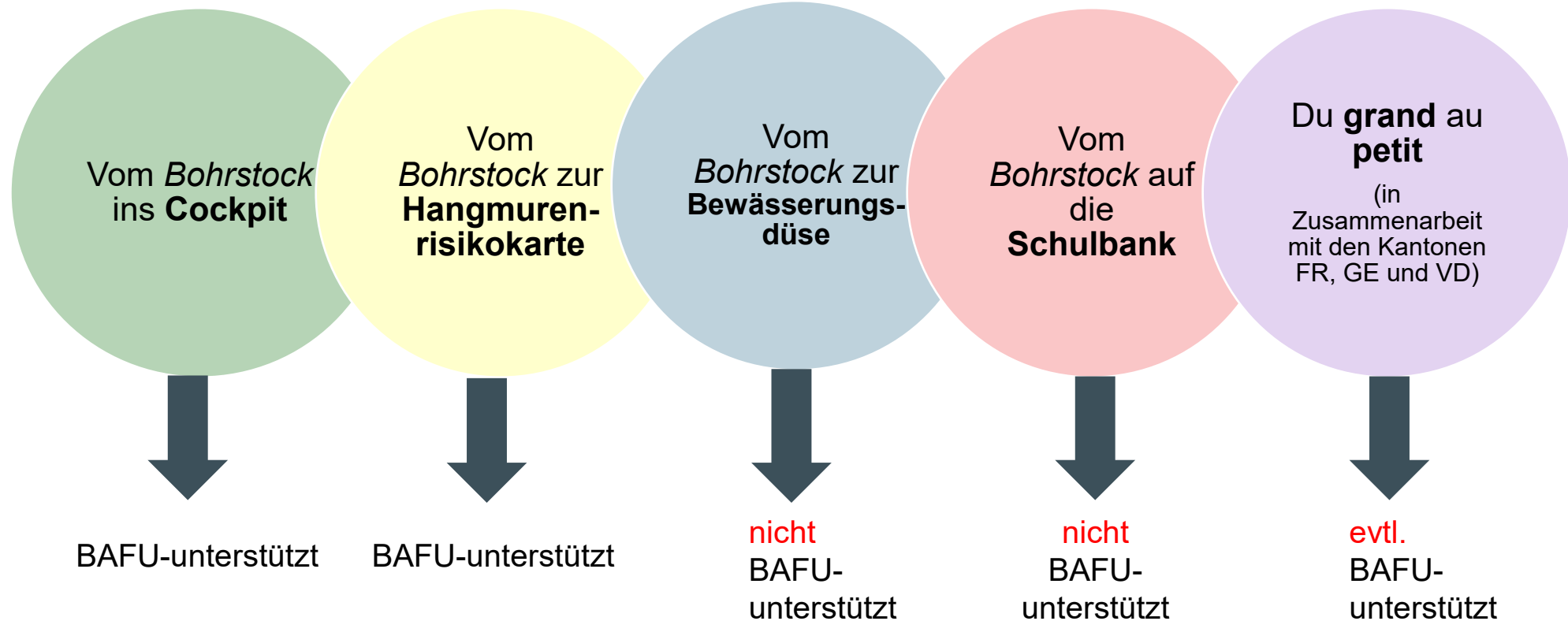
Berner Projekte im Vorfeld der schweizweiten Bodenkartierung

09. Dezember 2025

Thomas Keller, Zena Avilé und Andreas Chervet
Fachstelle Boden Kanton Bern

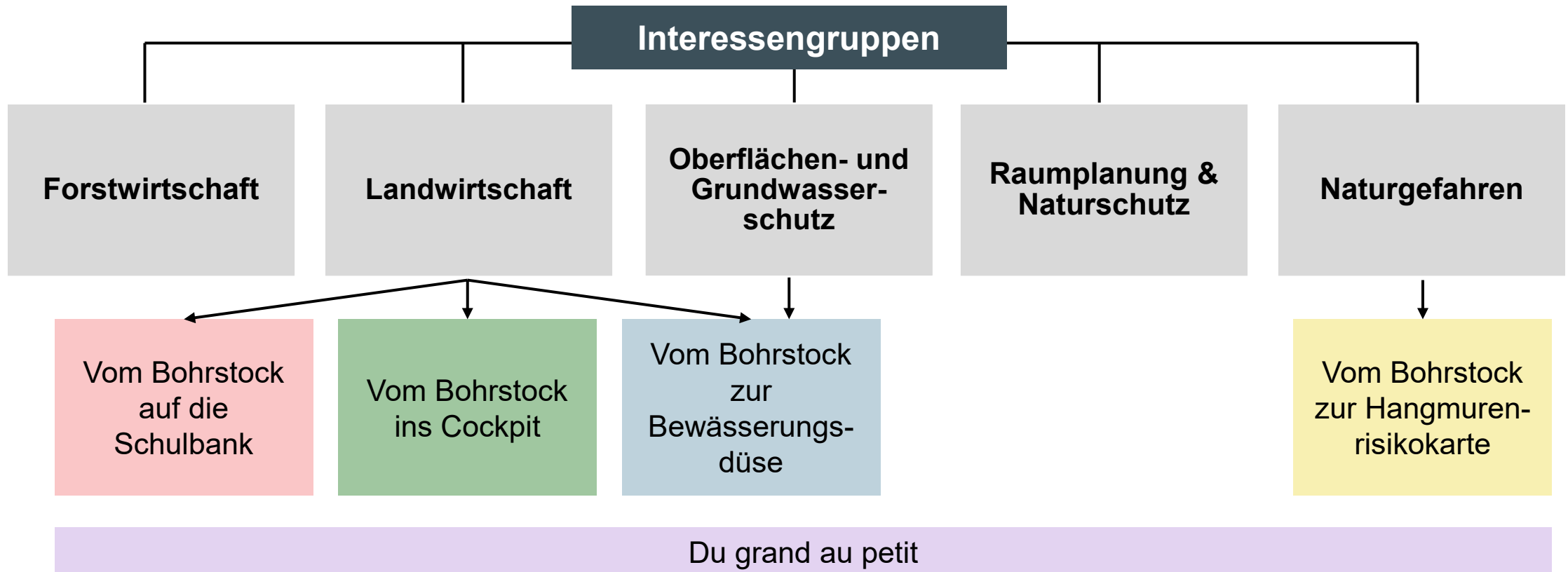
Die fünf Projekte im Kanton Bern ...

... und ihre Finanzierung



Leitfrage der fünf Projekte

Wie können **Bodendaten** von den jeweiligen **Interessengruppen** (Stakeholder) für verschiedene **Problemstellungen** am **besten** genutzt werden?



Vom Bohrstock ins Cockpit

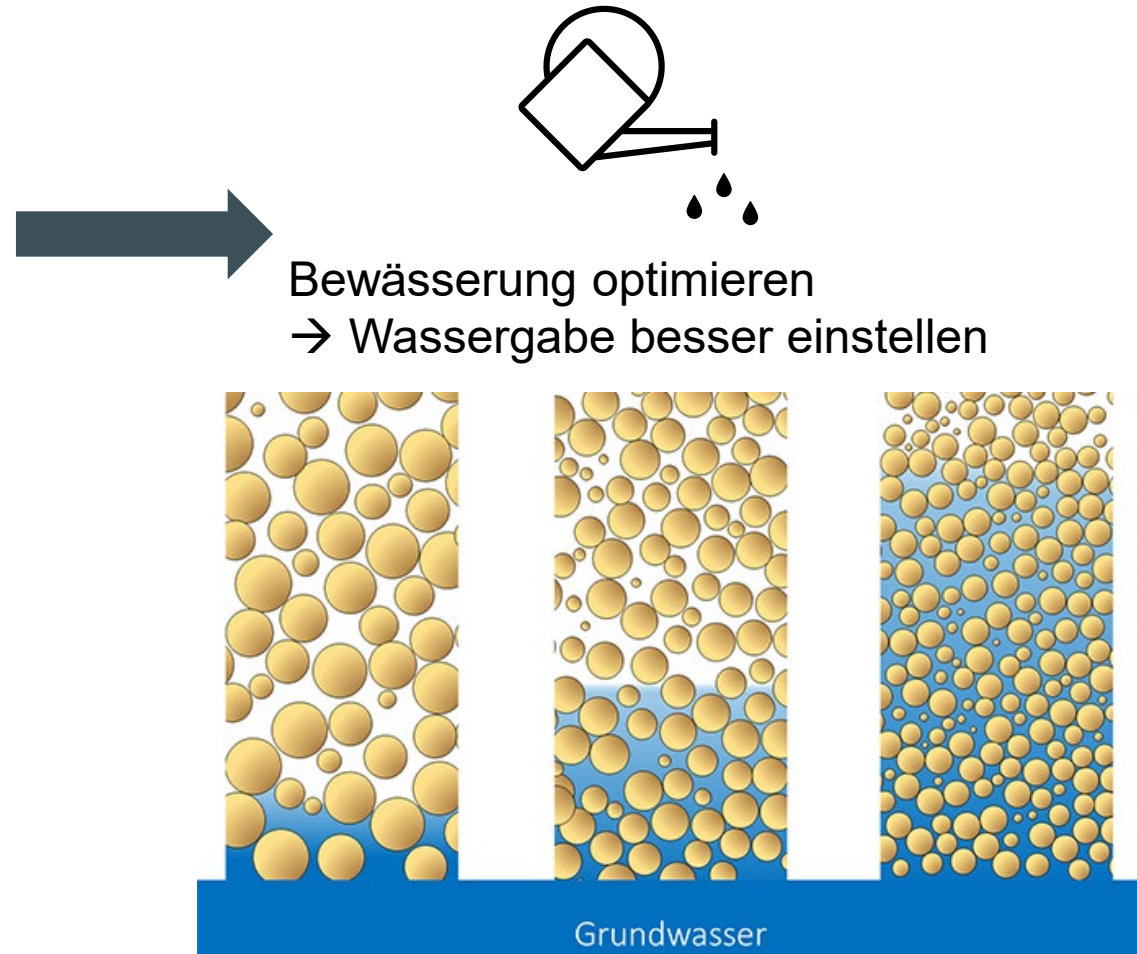


Vom Bohrstock zur Bewässerungsdüse

Zielsetzung: Inwertsetzung Bodeninformationen für Wassermanagement im Berner Mittelland



Bewässerungsbedürftige Kulturen
(vor allem Kartoffeln)



Vom Bohrstock auf die Schulbank

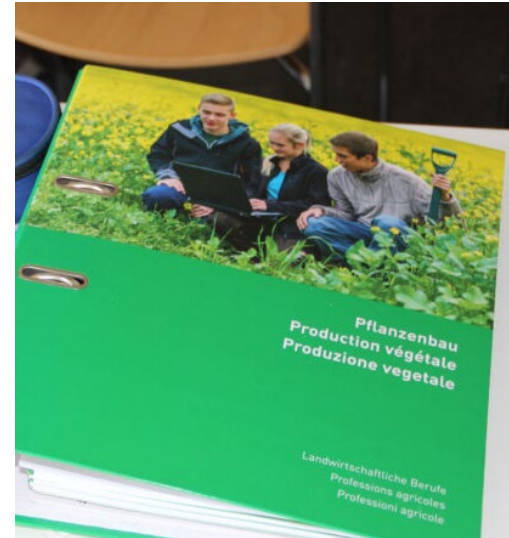
Zielsetzung:



Bodeninformationen



Auszubildende
und Beratende



Landwirtschaftliche
Bildung



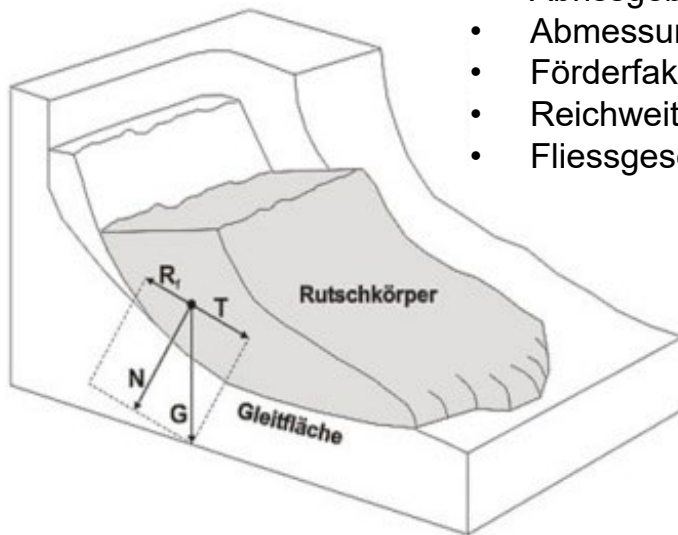
Inwertsetzung
Bodendaten auf
Betrieb

Du grand au petit

- Ein Kartierprojekt der Kantone Bern, Freiburg, Genf und Waadt
- Projektgebiet erstreckt sich über die Gesamtfläche aller vier Kantone (kleine Schweiz)
- Vorgehen: Der Kartiermassstab wird iterativ in mehreren aufeinanderfolgenden Schritten vom Grossräumigen ins Kleinräumige verfeinert
- Von Prozessschritt zu Prozessschritt erfolgt eine Priorisierung der Flächen

Vom Bohrstock zur Hangmurenrisikokarte

Problematik:



Variablen:

- Abrissgebiet
- Abmessung
- Förderfaktoren
- Reichweiten
- Fliessgeschwindigkeiten



Methodische Unsicherheit bei
der Auswahl von Bodenparametern
für die **Risikobeurteilung** von
Hangmuren



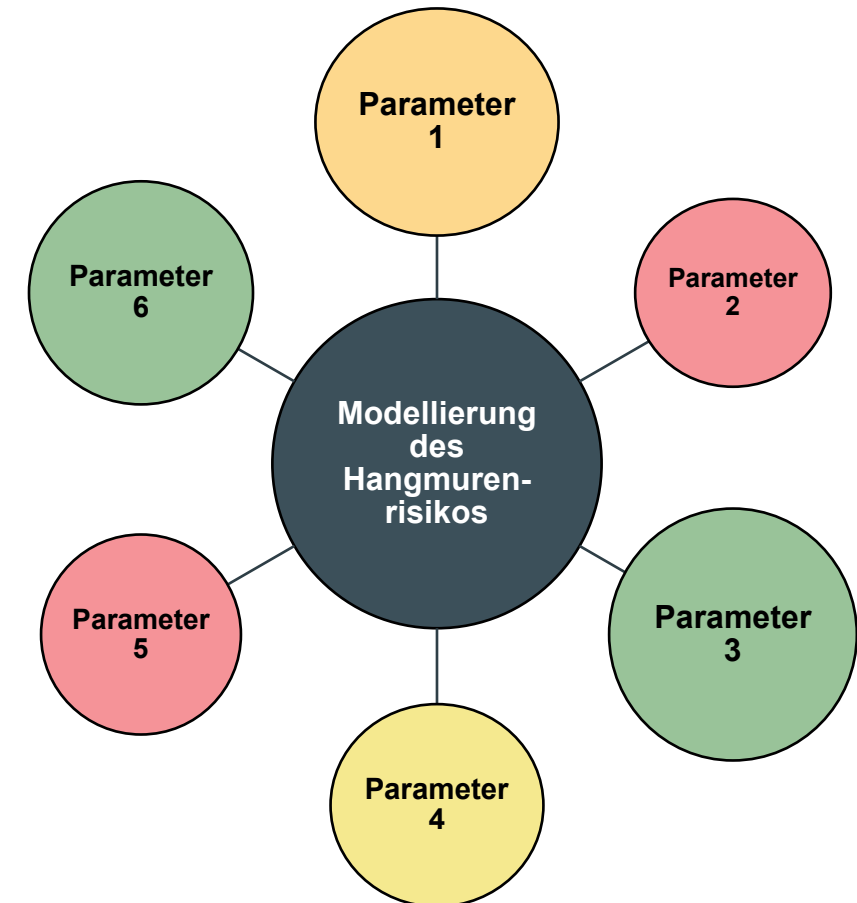
Versteckte Gefahren: Rutschungen und Hangmuren - BFW

Hangmure | Zürich Schweiz

Vom Bohrstock zur Hangmurenrisikokarte

Zielsetzung:

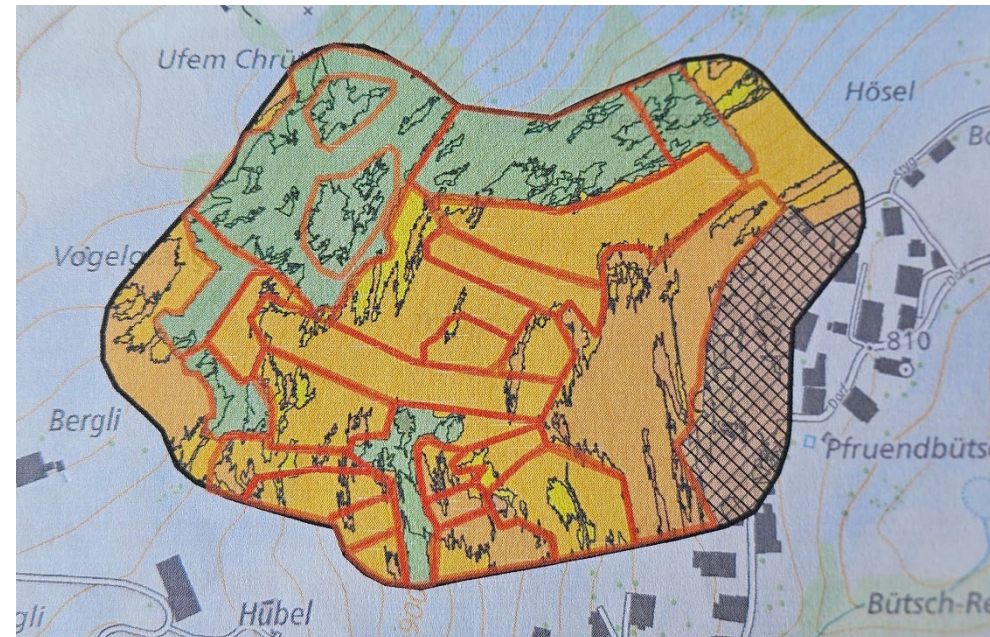
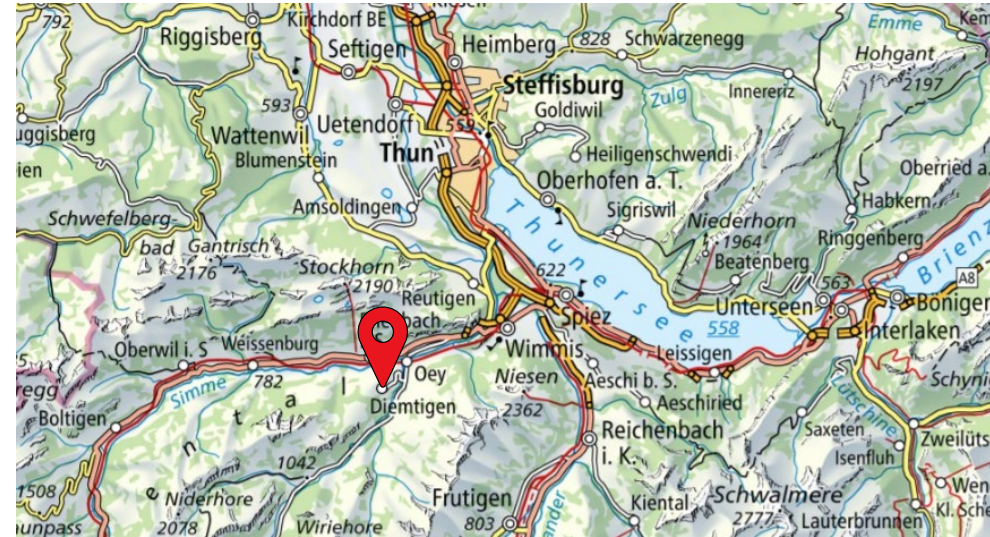
- Welche Bodenparameter eignen sich für die Modellierung des Hangmurenrisikos?
- Kann mit geeigneten Bodendaten die Risikoabschätzung verbessert werden?
 - Verringerung Unsicherheiten bei Hangmurenrisikobeurteilung
 - Erhöhung vom Verständnis für Hangmuren beim Kartierpersonal



Vom Bohrstock zur Hangmurenrisikokarte

Perimeter:

- Diemtigen (Berner Voralpen)
- Steilhang (Neigungen bis zu über 50%)
- Perimeter: 15 ha → vorwiegend Dauergrünland (20% Wald)
- 1 Bodenprofil und 3 Handbohrungen pro Hektar



2. Hangmuren – was ist das genau und welche Bodenparameter sind erforderlich für deren Modellierung?

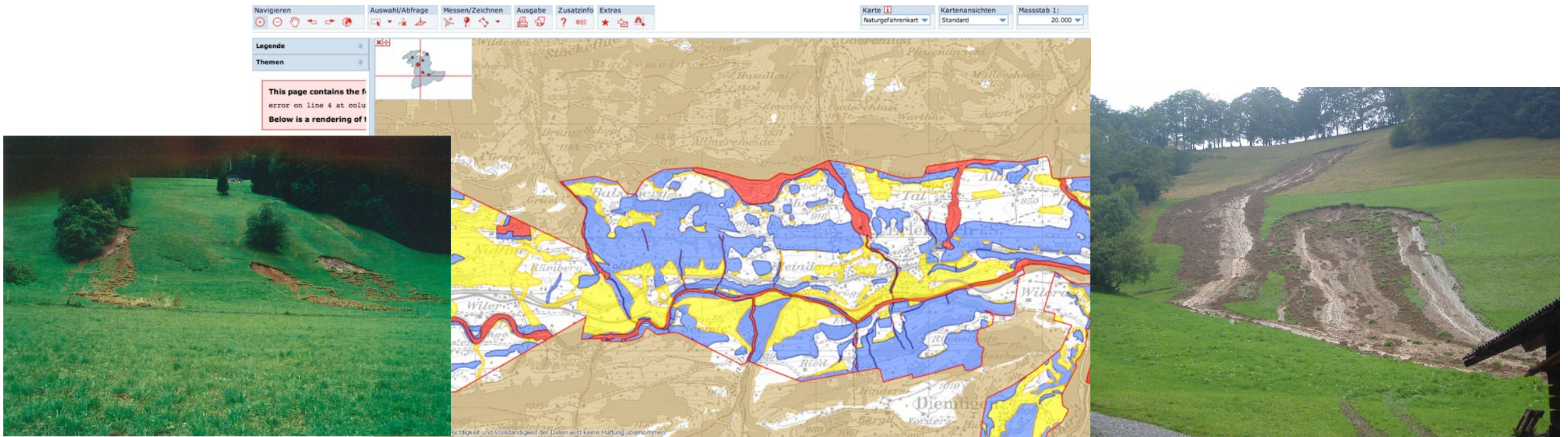
Hangmuren & Boden

- ▶ Hangmuren Hangmuren bzw. flachgründige Rutschungen sind sehr schnelle Massenbewegungen mit einer **durchschnittlichen Mächtigkeit von etwa 0.6 m** (maximal ca. 2 m) und typischen Volumen von rund 100–300 m³.
- ▶ Aufgrund ihrer hohen Geschwindigkeit können sie im Auslaufgebiet grosse Drücke erzeugen und erhebliche Schäden verursachen. Diese Prozesse werden auch in den synoptischen Gefahrenkarten der Schweiz berücksichtigt.



Hangmuren und Boden: Gefahrenkarten

- ▶ Die **synoptischen Gefahrenkarten** der Schweiz berücksichtigen auch diese Art von Prozessen. Für ihre Erstellung bilden **Bodenkennwerte** eine zentrale Grundlage. In diesem Projekt wurde eine Vielzahl bodenkundlicher Parameter erhoben, von denen jedoch nur ein Teil für die eigentliche Gefahrenbeurteilung relevant ist. Diese Parameter sind auch – wenn auch nicht ausschliesslich – für die **Modellierungen** von Bedeutung.



Hangmuren und Boden: wichtigste Parametern

Die Resultate der Modellierungen stellen wichtige, quantitative und nachvollziehbare Grundlagen für die Gefahrenbeurteilung dar. Sie reagieren besonders sensibel auf die Werte einiger **zentraler Bodenparameter**. Dazu gehören (in der Reihenfolge ihrer Bedeutung):

- ▶ Bodenmächtigkeit
- ▶ Bodenkohäsion
- ▶ Wurzelverstärkung
- ▶ Reibungswinkel
- ▶ Wasserleitfähigkeit
- ▶ Bodendichte

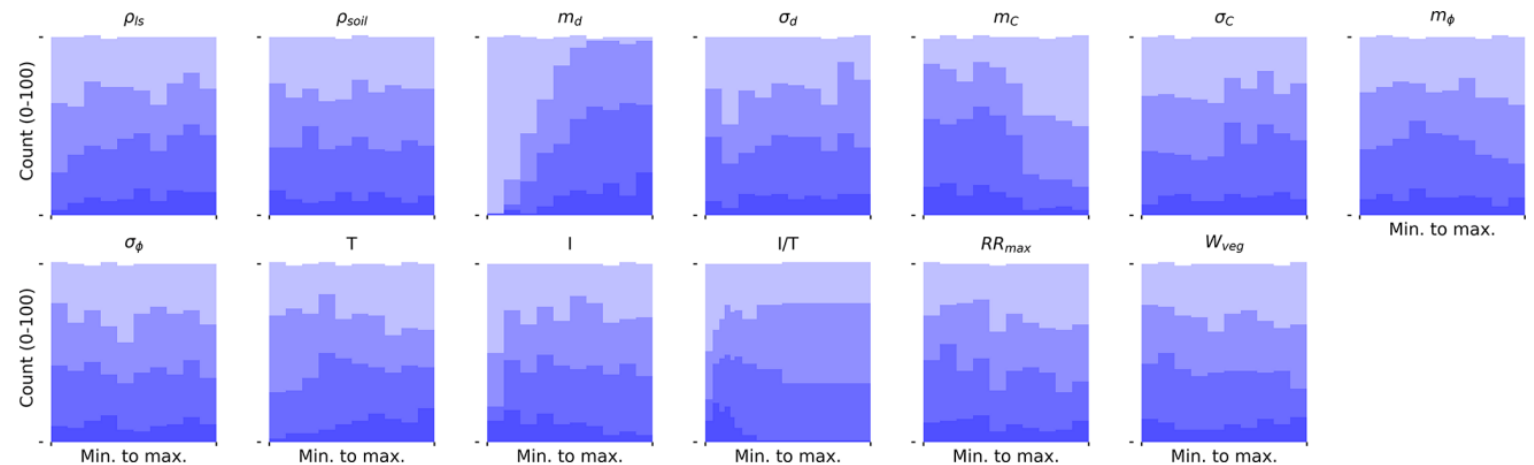


Figure 5. Histograms of different subsamples of the LHS parameter sets for the Trub study area. The shading (from light to dark) corresponds to subsamples retaining only the x % highest parameter sets in terms of the AUC; the fractions shown are as follows: 1, 0.7, 0.4 and 0.1.

(van Zadelhoff et al., 2021, nhes)

Erhebungsmethode

Zentrale Fragen zur Methoden im Pilotprojekt:

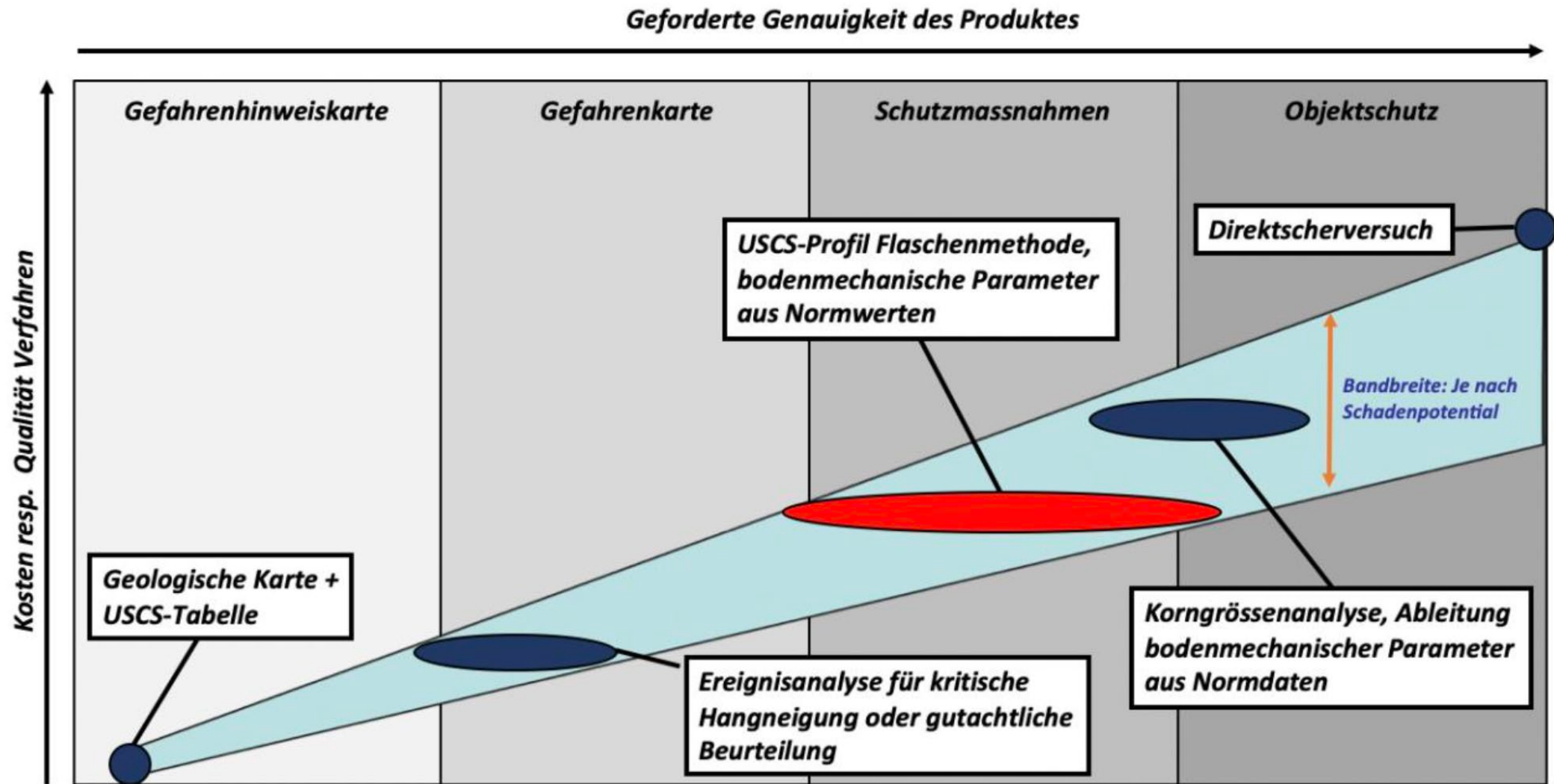
- ▶ Werden diese Parameter in üblichen Bodenkartierungen erfasst? Wie?
- ▶ Mit welchen Methoden können diese Parameter gemessen werden?
- ▶ Welche Parameter lassen sich zuverlässig aus anderen Daten ableiten?
- ▶ Welche Methoden und Anwendungen sind wirtschaftlich?
- ▶ Welche Methoden sind repräsentativ und aufskalierbar?
- ▶ Welche Methoden können auch in bewaldeten und steilen Gebieten eingesetzt werden?

- ▶ Bodenmächtigkeit (M)
- ▶ **Bodenkohäsion (c')**
- ▶ Wurzelverstärkung (c_R)
- ▶ **Reibungswinkel (Φ' , ϕ')**
- ▶ Wasserleitfähigkeit (K_s)
- ▶ Bodendichte (ρ)

Parameter	Versuche	Prüfnormen
Zusammensetzung	- Mineralogie - organische & lösliche Anteile	- VSS 70 115
physikalische Parameter	- Wassergehalt - Korngrößenverteilung - Dichte - Fließ- und Ausrollgrenze (Konsistenzgrenzen) - Durchlässigkeitsbeiwert (k-Wert) - optimaler Wassergehalt und maximale Trockendichte (Proctor-Versuch) - Geotechnische Klassifikation	- SN EN 1097-5 / SN EN ISO 17892-1 - SN EN ISO 17892-4 und SN 670 816 - SN EN 1097-3 - VSS 70 345b / SN EN ISO 17892-12 - DIN 18130-1 / SN EN ISO 17892-11 - SN EN 13286-2 - SN EN ISO 14688-1 & -2
bodenmechanische Eigenschaften	- Ödometerversuch - Triaxialversuch - Direktscherversuch	- SN EN ISO 17892-5 - DIN 18137-2 / SN EN ISO 17892-8 & -9 - DIN 18137-3 / SN EN ISO 17892-10

(BFH, 2025a)

Erhebungsmethode: Geotechnik-> c' und Φ'



Erhebungsmethode

Zusätzlichen/neue Erhebungsgrössen und -methoden an Profilen und Handsondierungen:

- ▶ **Profile:**

- ▶ Ks (gesättigte Leitfähigkeit) -> „Single Ring“ (SR) infiltrationsversuche
- ▶ Lagerungsdichte -> Flaschenmethode
- ▶ Bodenart -> Flaschenmethode
- ▶ Bestimmung Kiesfraktion -> Siebung im Feld
- ▶ Wurzelverteilung -> Zählung im Feld

- ▶ **Bohrungen:**

- ▶ Ks (gesättigte Leitfähigkeit) -> Darcy im Feld

Ks (gesättigte Leitfähigkeit): Single-Ring Infiltrrometer

Ponded Infiltration From a Single Ring: I. Analysis of Steady Flow

W. D. Reynolds,* and D. E. Elrick

(Reynolds & Elrick, 1990;
Di Prima et al., 2019;
Nickl, 2025;)

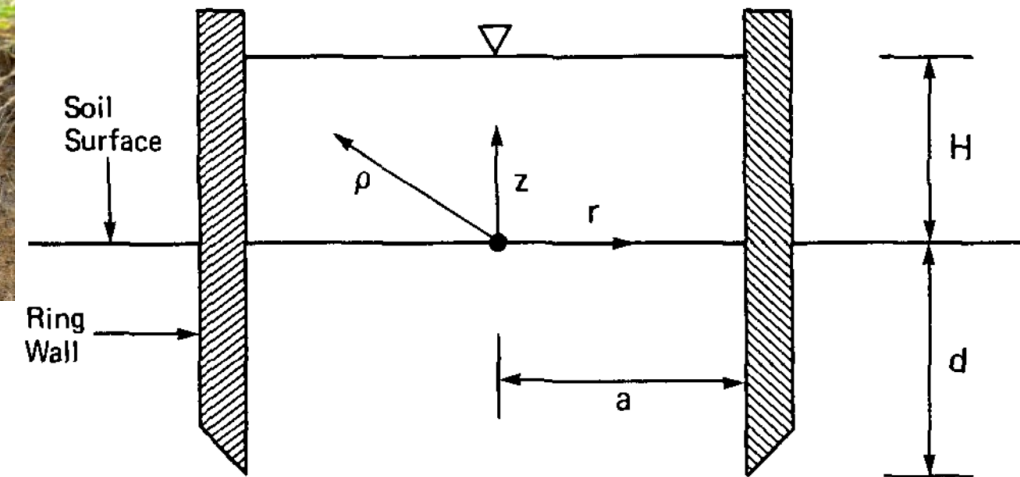
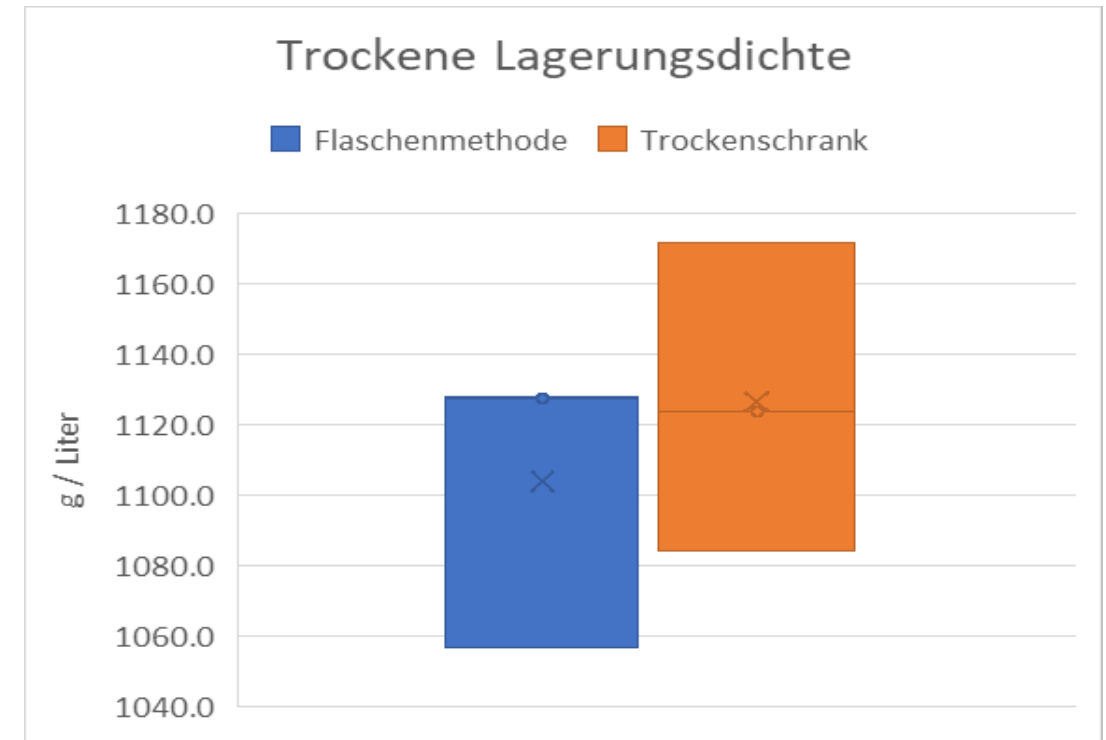
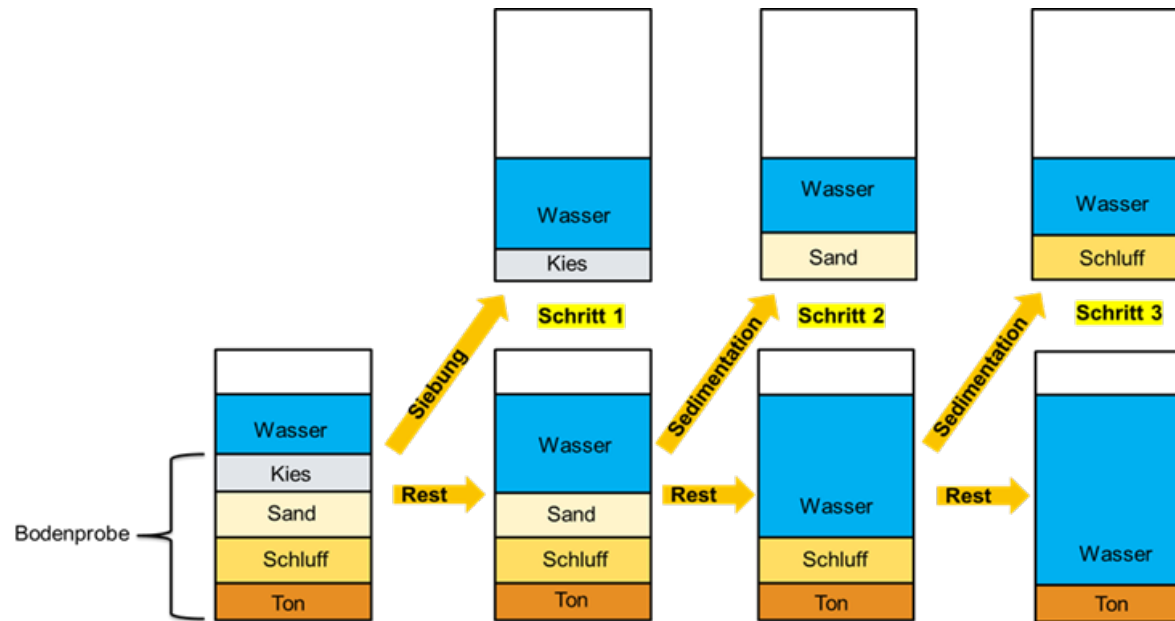


Fig. 1. Schematic of ponded flow from within a ring (r, z = cylindrical coordinate directions, ρ = spherical coordinate direction, a = ring radius, d = depth of ring insertion, H = steady depth of water ponding in the ring).

- Zeitaufwand: 10 Min pro Messung

Lagerungsdichte: Flaschenmethode

(von Wattenwyl & Schwarz, 2024)



- Vergleich der trockenen Lagerungsdichte eines siltigen Bodens zwischen Flaschenmethode und Trockenschrank, je 3 Proben à 400g, Annahme einer Feststoffdichte von 2600 [kg/m³].

Bodenart und Geotechnische Parametern

► Ableitung geotechnische Parametern



Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute
Union des professionnels suisses de la route
Unione dei professionisti svizzeri della strada
Association of Swiss Road and Traffic Engineers

Schweizer Norm
Norme Suisse
Norma Svizzera
Swiss Standard

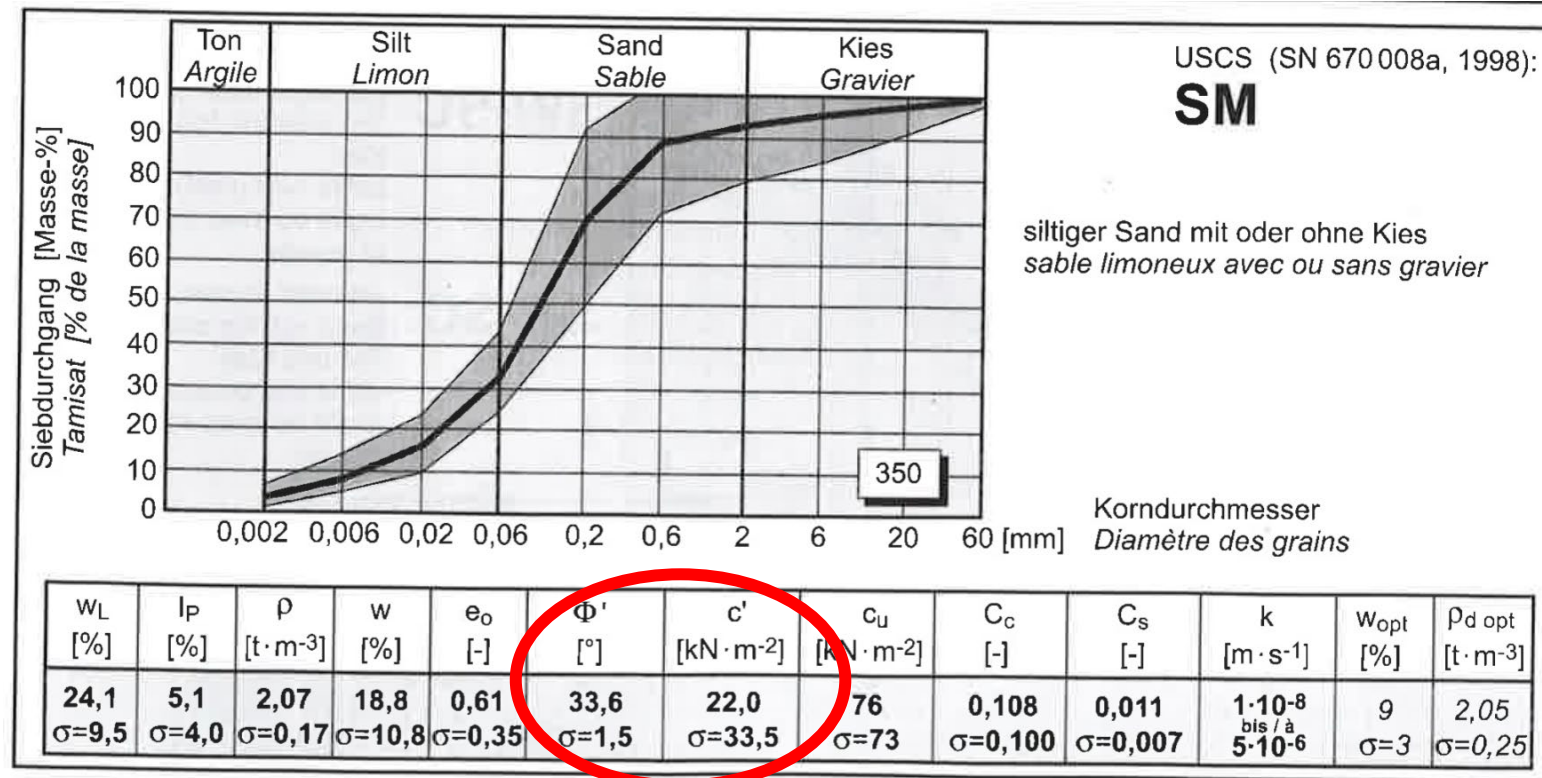


670 010b

EINGETRAGENE NORM DER SCHWEIZERISCHEN NORMEN-VEREINIGUNG

SNV

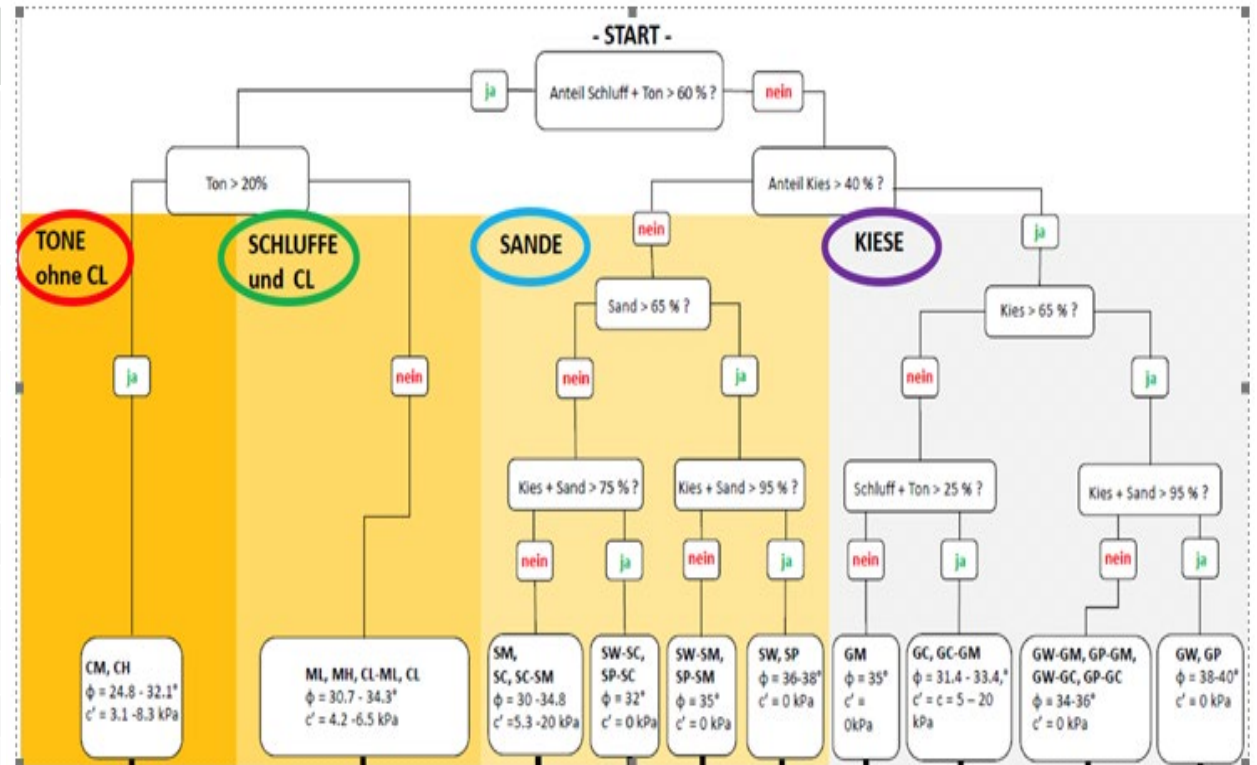
NORME ENREGISTRÉE DE L'ASSOCIATION SUISSE DE NORMALISATION



Bodenart und Geotechnische Parametern

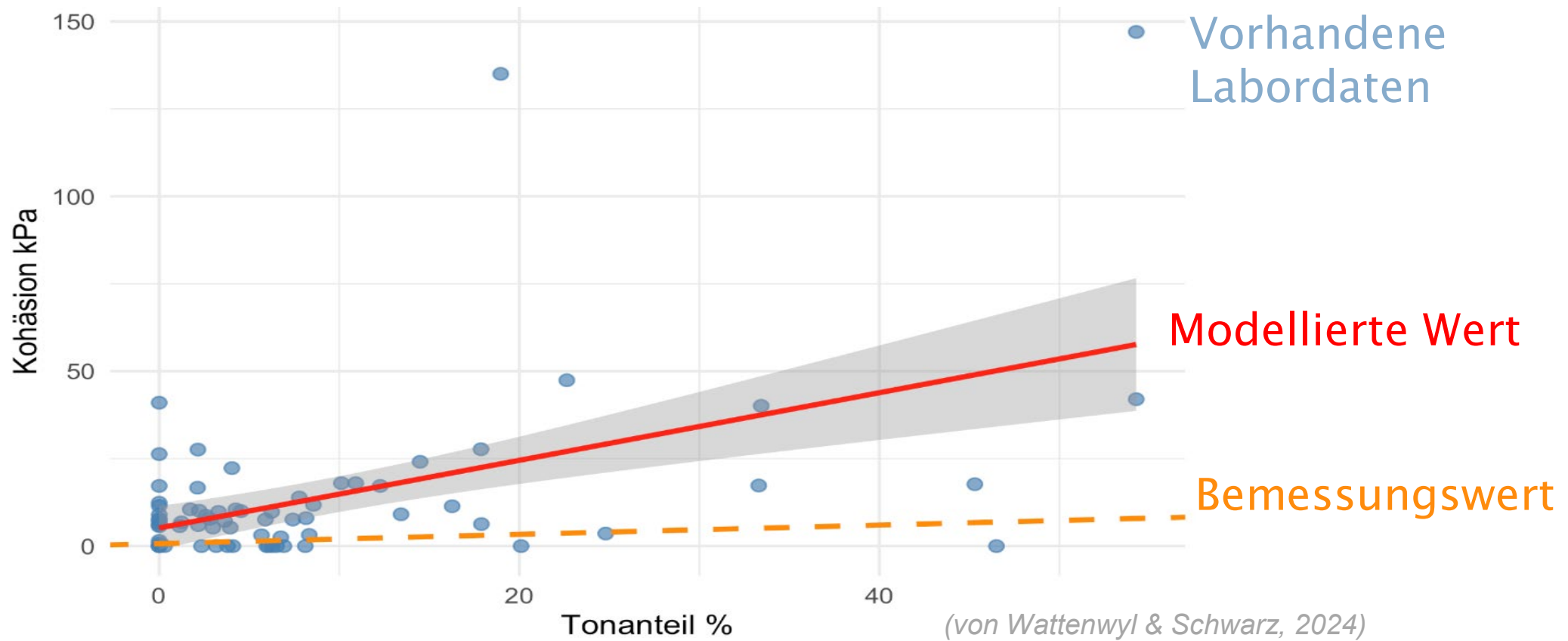
► Bestimmung Bodenart

Boden	USCS	I_p [%]	ϕ [°]	c [kPa]	M_E [MPa]
gebrochener Fels	-	-	47 ± 7	0	200 - 400
Kies, sauber	GW	0	40 ± 5	0	50 - 300
siltiger Kies	GM	2 - 6	36 ± 4	ca. 0	40 - 300
toniger Kies	GC	7 - 12	34 ± 4	ca. 0	20 - 200
gut abgestufter Sand	SW	0	40 ± 4	0	30 - 100
schlecht abgestufter Sand	SP	0	36 ± 6	0	20 - 80
siltiger Sand	SM	2 - 6	34 ± 3	ca. 0	30 - 100
toniger Sand	SC	6 - 12	32 ± 3	ca. 0	20 - 80
siltiger bis toniger Sand	SC-SM	9 - 15	27 ± 3	5 ± 5	10 - 50
Silt	ML	2 - 6	33 ± 4	ca. 0	6 - 20
toniger Silt	CL-ML	4 - 10	30 ± 4	15 ± 10	3 - 20
siltiger Ton	CL	12 - 18	27 ± 4	20 ± 10	2 - 10
Ton	CH	ca. 20	20 ± 4	20 ± 10	1 - 4
	CH	ca. 40	15 ± 4	25 ± 10	0.7 - 2
	CH	ca. 60	11 ± 4	f(Ton)	0.5 - 1
	CH	> 100	< 8	f(Ton)	< 1



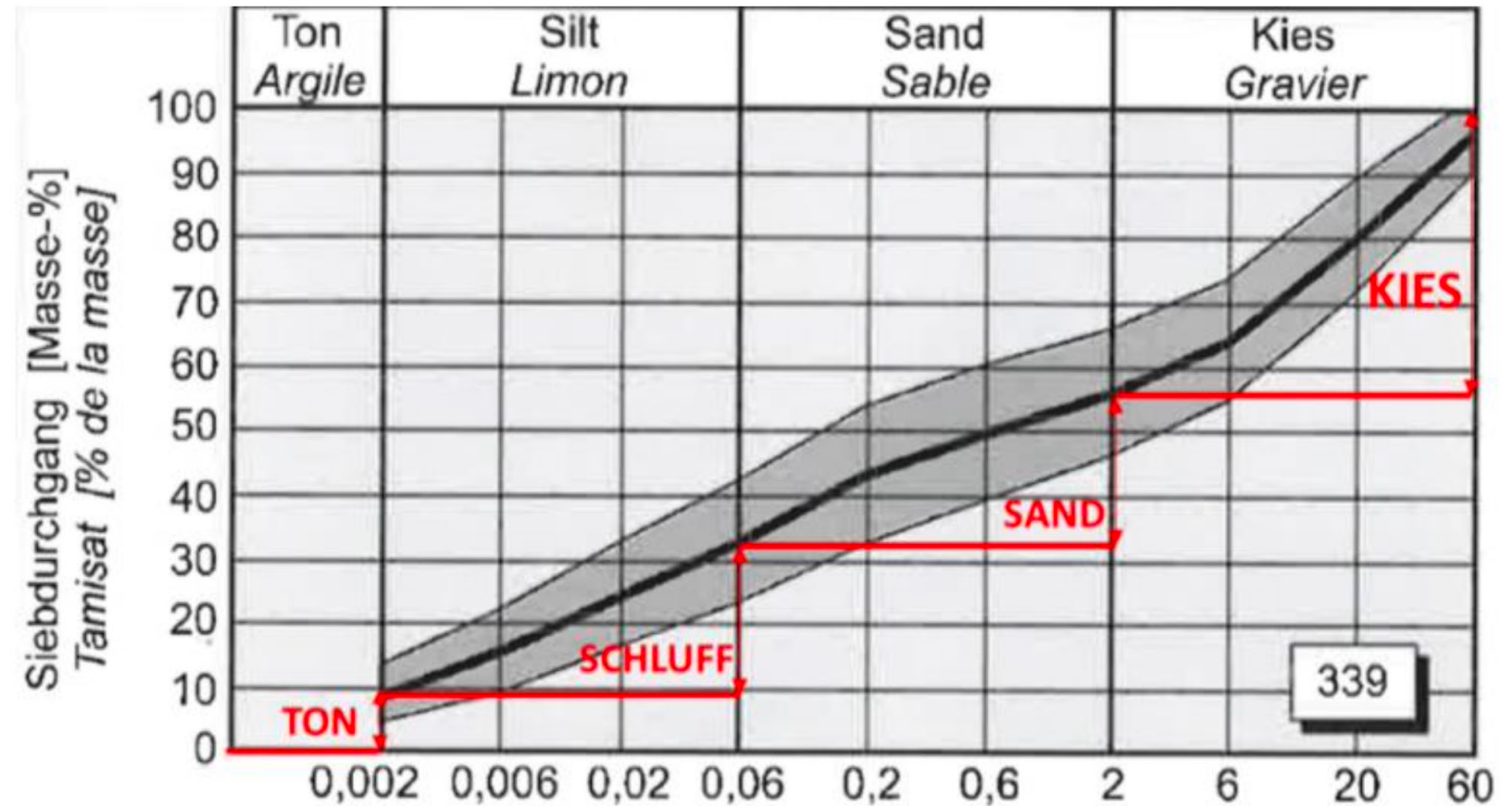
Bodenart und Geotechnische Parametern

► Ableitung geotechnische Parametern: Kohäsion, c'



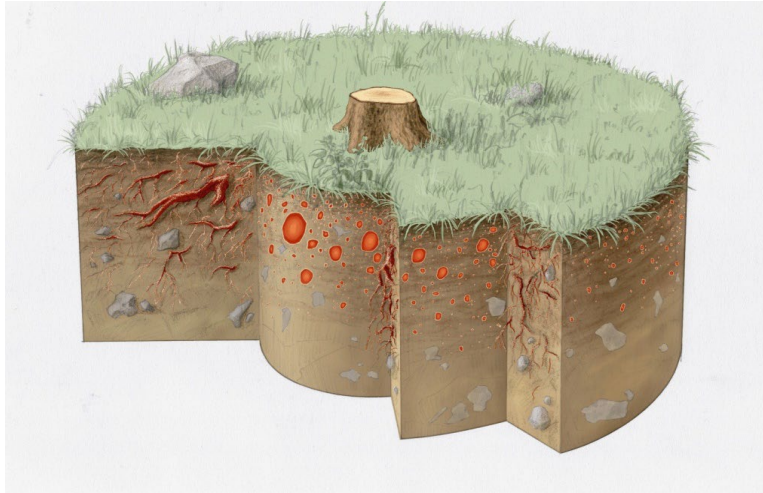
Kiesfraktion ($20 < d < 60$ mm): Siebung im Feld

► Bestimmung Kiesfraktion



Wurzelverteilung

(Schwarz et al., 2012)



Profil: 07

Datum: 1.11.24

Aufnahme erfolgt durch: M. SCHWARZ

AUFNAHME AUF 1 m BREITE

ZEIT 9:05 - 9:55

18.058 / Vom Bohrstock zur Hangmurenrisikokarte

Wurzelverteilung

Durchmesserklasse	0 - 15 cm Tiefe	15 - 30 cm	30 - 45 cm	45 - 60 cm	60 - 75 cm	75 - 90 cm
1 (0 - 1.49 mm)						
2 (1.5 - 2.49 mm)						
3 (2.5 - 3.49 mm)						
4 (3.5 - 4.49 mm)						
5						
6						

Wurzelverteilung



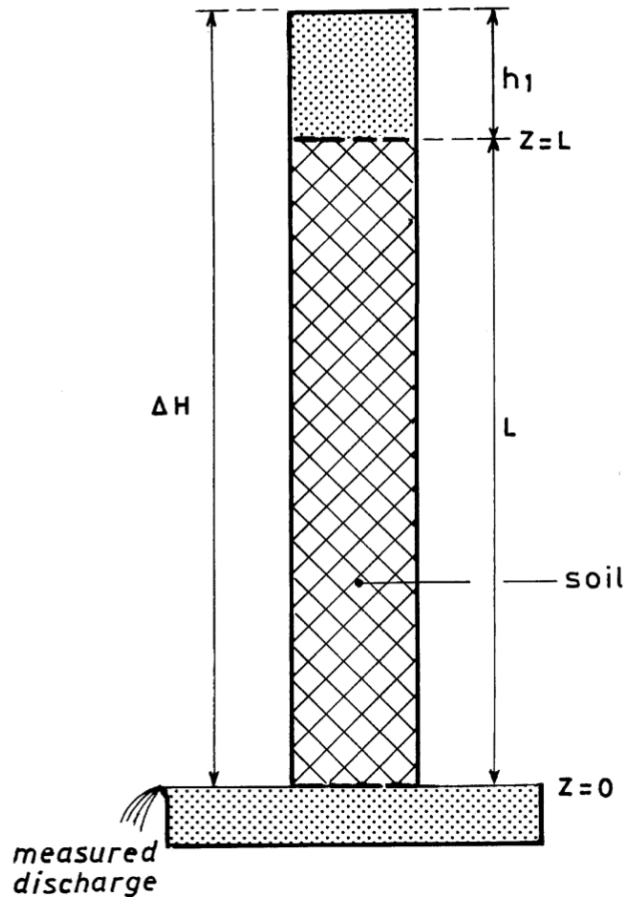
K_s (gesättigte Leitfähigkeit): Darcy im Feld

- ▶ Zeitaufwand: 10 Min pro Messung



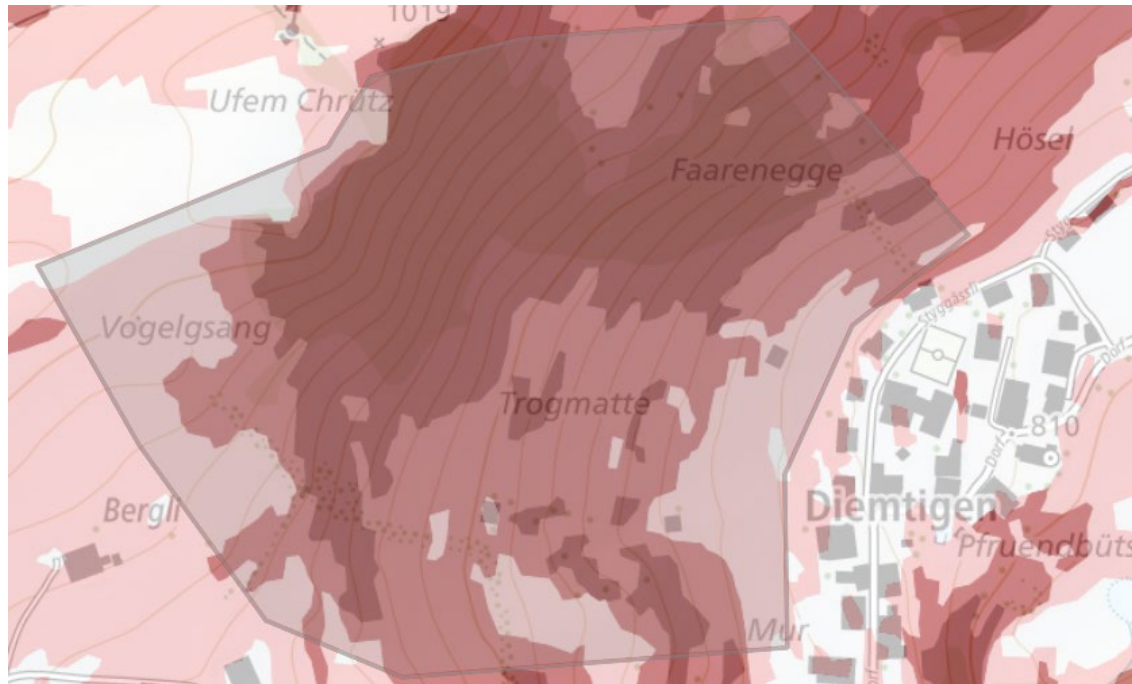
Darcy im Feld.

- ▶ Zeitaufwand: 20 Min pro Messung



3. Erfahrungen Feldarbeit

Erfahrungen Feldarbeit – Aufnahmen im sehr steilen Gelände



Legende

- Hangneigung < 18%
- Hangneigung 18 - 35%
- Hangneigung > 35 - 50%
- Hangneigung > 50%



Aufnahmen: Handbohrungen / offene Profile /
Kies sieben / Infiltration / (Wurzelverteilung)

Punkteichung an Profilen



Profilaufnahmen

P07

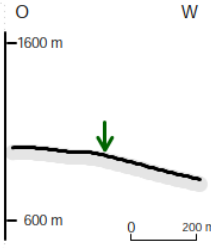


P03



Beispiel P07 – Saure Braunerde

Bodenprofil P07 (25199), Diemtigen



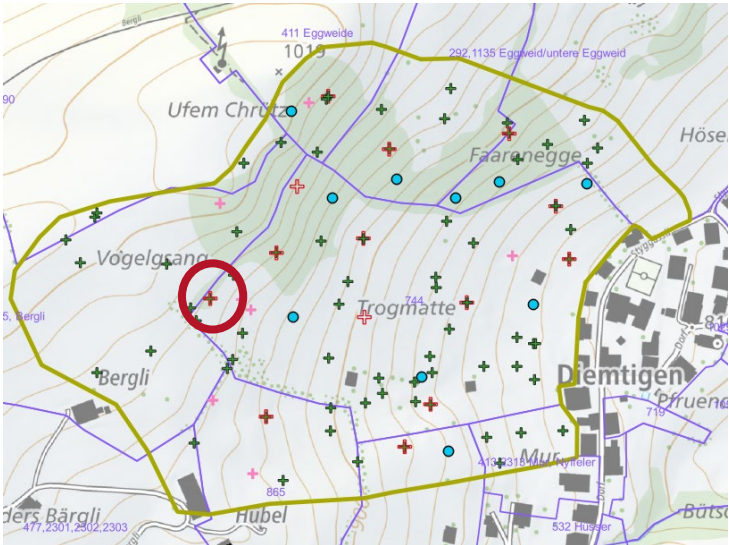
Standort	25176	Lage	967.2	Stammdaten	25199
ID Standort	P07	Höhe	0	ID Beobachtung	P
personliche ID	2609265	Kleinrelief	0	Profilart	BOK Diemtigen – Trogmatte
X-Koordinate	1166507	Landschaftselement	HX	Projekt	2024-10-16
Y-Koordinate	0.5	Neigung [%]	44	Datum	wuc
Genauigkeit Koord.	762	Exposition	120	Kartiert durch	keth
Gemeinde-Nr.	BE	Geländeform	D5-6	Erfasst durch	ja
Kanton	WE	Klimaeignungszone	0	QS Labor	6
Beschreibung	43	Nutzungsgebiet	1	QS Feld	6
Vegetation	d	Skelett UB	7	Anzahl Proben	
Flurabstand [cm]	E	Textur OB	7	Dokumente	
Kalkgrenze [cm]		Textur UB	7		
Wasserh.gruppe		PNG geschätzt [cm]	44		
Bodentyp		PNG berechnet [cm]			
Untertypen	E3,L2,I1,VF,VU	Eignungsklasse			

Feldbeobachtung

Nr. (27)	Tiefe von [cm] (28)	Tiefe bis [cm] (28)	Horizont (29)	Horizontoberg. unten	Bodenbereich (ff)	Ausgangsmat. Geologie (62)	Kalkklasse (44)	pH Hellgelb (46)	OS-Feld [%] (33)	Zersetzungsgrad (cc)	Ton (35/36)	Schluff (37/38)	Sand (39/40)	Kies (41)	Steine (42)	Gesteinstyp (ee)	Technogenes Substrat (fh)	Feuchtigkeit (dd)	Gefügestr./-größe (31/32)	Porosität (kk)	Bewurzelung (bb)	Wurmlängigkeit (gg)	Ernterückstände (mm)	PNC-Faktor Boden	Farbe Matrix	Farbe Flecken
1	0	3	Ah1	OB	HL	0	4.0	7			18	40	42	3	0			fe	Kr		W5		1.0		10YR 4/ 4	
2	3	12	Ah2	OB	HL	0	4.0	3			18	40	42	3	0			fe	Sp 2/Sp 3		W5		1.0		10YR 4/ 4	
3	12	43	II Bw(x)	UB	HS	0	4.5	1			18	45	37	7	0			tr	Sp 3		W4		1.0		10YR 4/ 6	
4	43	76	III Rz / II BCgx	UG	HS	0	4.0	0			27	40	33	60	20			tr	Po 4/Po 5		W2		0.5		10YR 4/ 4	
5	76	118	III Rz	UG	HS	0									100								0.0			

Labormessungen

Tiefe von [cm]	Tiefe bis [cm]	Humus [%]	Kalk [%]	pH-Calc2 [-]	Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]
0	12	6.8	0.5	5.2	37.5	36.6	19.1
12	43	2.3	0.3	4.5	31.1	34.3	32.3
43	76	1	0.5	4.7	28.4	21.6	49



Wasserhaushaltsuntergruppe d - ziemlich flachgründig

Bodentyp E - Saure Braunerde

Untertyp(en)

- E3 - sauer (4.3 - 5.0)
- L2 - verdichtet
- I1 - schwach pseudogleyig
- VF - auf Fels (10 - 60 cm u.T.)
- VU - kluftig

PNG 44 cm

Handbohrungen



4. Sampling Design und Modellierung Bodenkarte

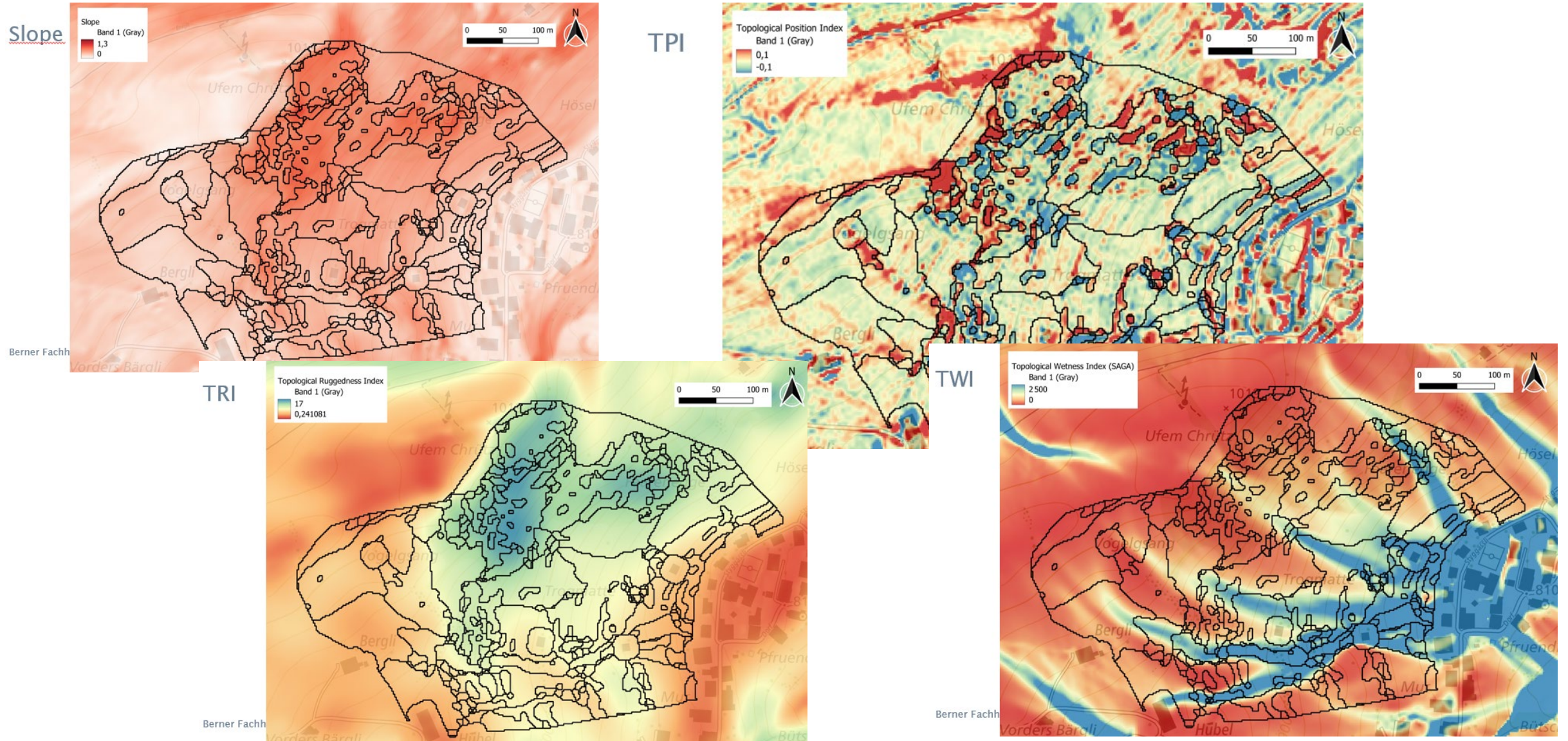
Wahl der Variable für clustering

Variables	Explications
curv4m_resampled	<i>General Curvature</i> donne le taux de variation d'une pente. La valeur obtenue exprime si la pente est convexe, concave.
mrvmf4m_resampled	<i>Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness</i> évalue la planéité et la dépression du terrain à plusieurs échelles et résolutions de DEM afin d'identifier les fonds de vallée, qui représentent des zones planes à plusieurs échelles et qui restent basses par rapport au relief environnant à des échelles plus grossières.
slope4m.perc_resampled	Calcule la pente d'un terrain à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT ou <i>Digital Elevation Model</i> DEM). La pente est une mesure de l'inclinaison du terrain en un point donné, généralement exprimée en degrés ou en pourcentage.
swissAlti3D_4m_DIEM_resampled	<i>Digital Elevation Model</i> (DEM) est une représentation numérique de la topographie d'une surface terrestre sous forme d'une grille de valeurs d'altitude.
tpi_4m_resampled	<i>Topological Position Index</i> (TPI) compare la valeur de chaque cellule d'un DEM à la valeur moyenne de son voisinage. Les valeurs positives indiquent des zones d'altitude relativement élevée, comme les crêtes. Les valeurs négatives indiquent des zones relativement basses, comme les vallées. Les valeurs proches de zéro indiquent des zones de pente constante.
tri4m.10_resampled	<i>Terrain Ruggedness Index</i> (TRI) utilisé pour quantifier la rugosité ou la variabilité d'une surface topographique. Il permet d'évaluer à quel point un terrain est accidenté, en analysant les variations d'altitude dans un voisinage donné de 10 pixels.
TWlcatchmod4m_resampled	<i>Topographic Wetness Index</i> (TWI) de SAGA est une mesure pour comprendre où l'eau est susceptible de s'accumuler sur des terrains présentant des variations d'altitude.

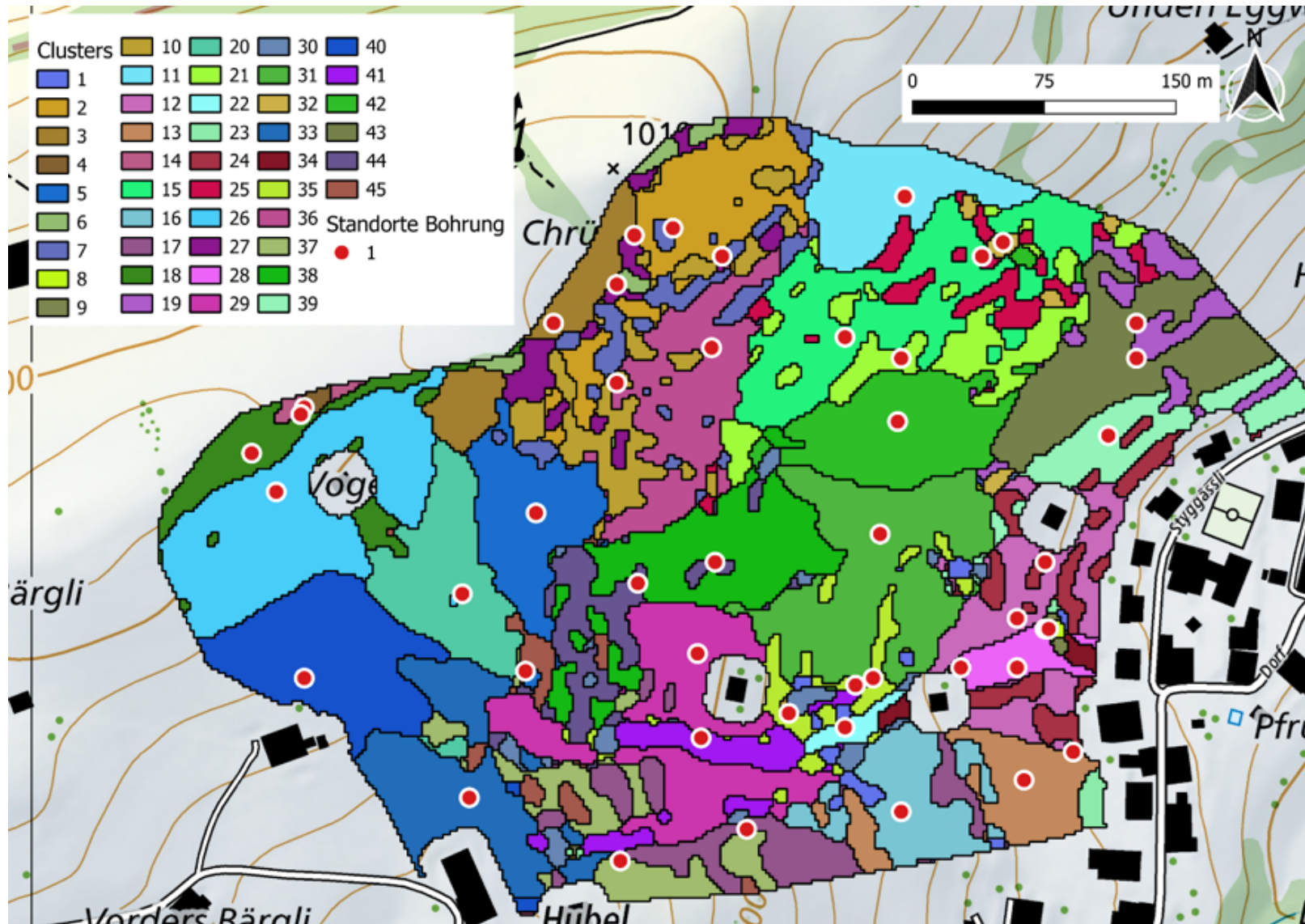


Kmeans-clustering mit 45 clusters

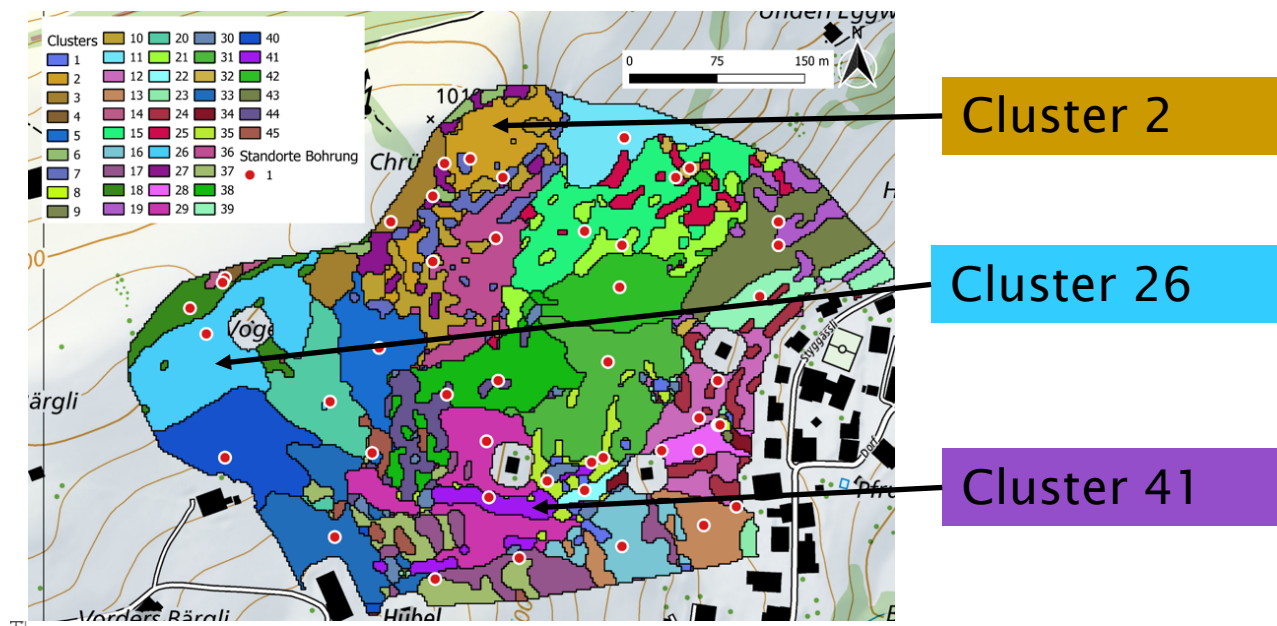
Variables for the clustering



Vorstellung der Cluster mit repräsentativsten Punkte



Vorstellung der Cluster, Beschreibungstabelle



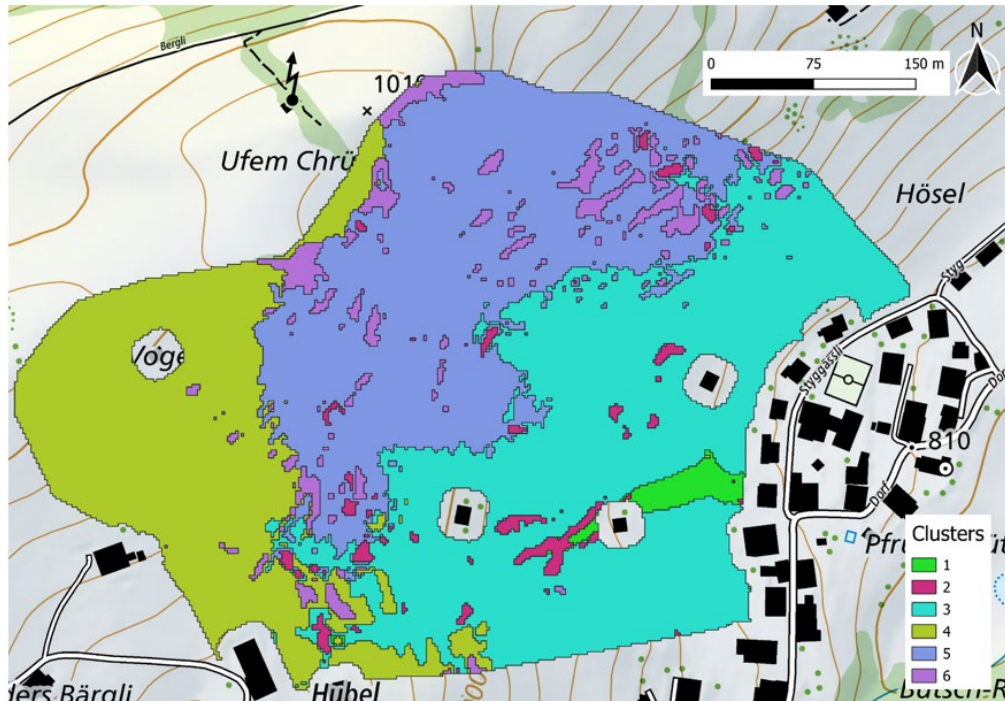
Cluster	curv4m_resampled	slope4m.perc_resampled	TWlcatchmod4m_resampled
1	0,041	0,394	1413,178
2	-0,002	0,633	221,797
26	-0,004	0,288	312,165
27	0,046	0,570	155,396
40	0,001	0,220	655,198
41	-0,012	0,353	3963,028
42	-0,003	0,492	1403,503
43	-0,005	0,463	1153,559

Leicht Konkav, 63% Neigung, sehr wenig Wassersammlung

Leicht Konkav, 28% Neigung, sehr wenig Wassersammlung

Konkav, 35% Neigung, viel Wassersammlung

Vorstellung der Cluster, Beschreibungstabelle



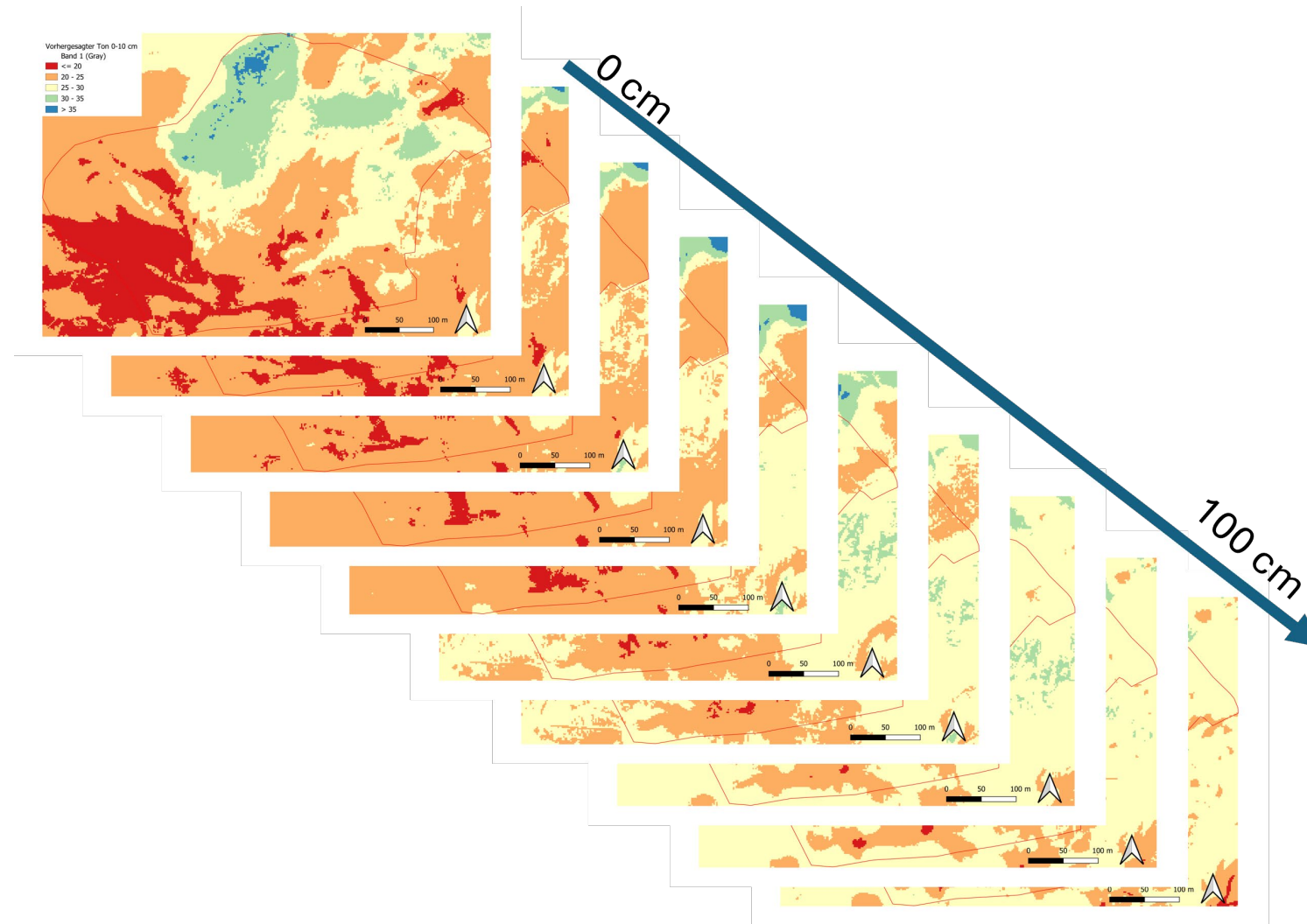
clust.hcpc	cluster	curv4m_resampled	slope4m.perc_resampled	TWlcatchmod4m_resampled
1	8,9,28,34	-0,011	0,190	12409,128
2	22,30,32	-0,061	0,452	5131,675
3	1,12,13,16,17,19,23,24,29,31,35,39,41,42,43	0,001	0,370	1652,677
4	3,4,14,18,20,26,33,37,40	0,004	0,264	461,321
5	2,5,7,10,11,15,21,36,38,44	-0,006	0,556	628,224
6	6,25,27,45	0,050	0,504	308,610

Schlussfolgerung sampling design

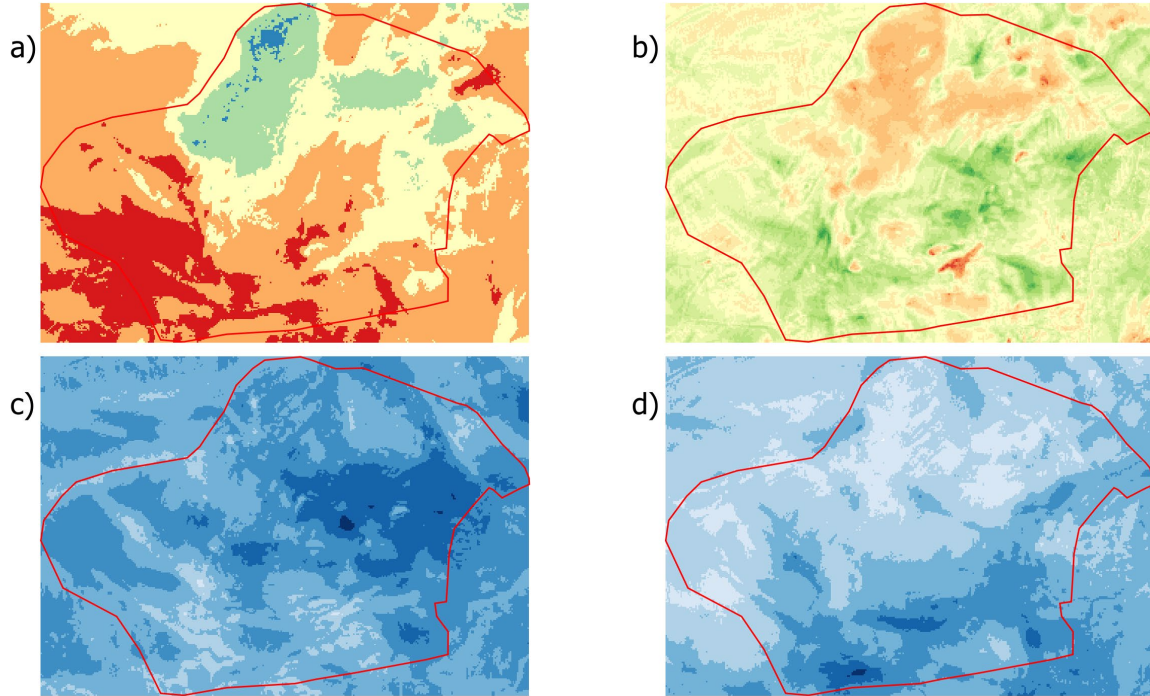
- ▶ Die Segmentierung der Landschaft ist realistisch (nach eigen Feldbegehung)
- ▶ Die Patterns im Wald sind mozaicartig da der DHM nicht so genau ist
- ▶ Die variabilität ist gut gedeckt, entspricht die ersten Profilwahl

Carte de prédiction de la teneur en argile

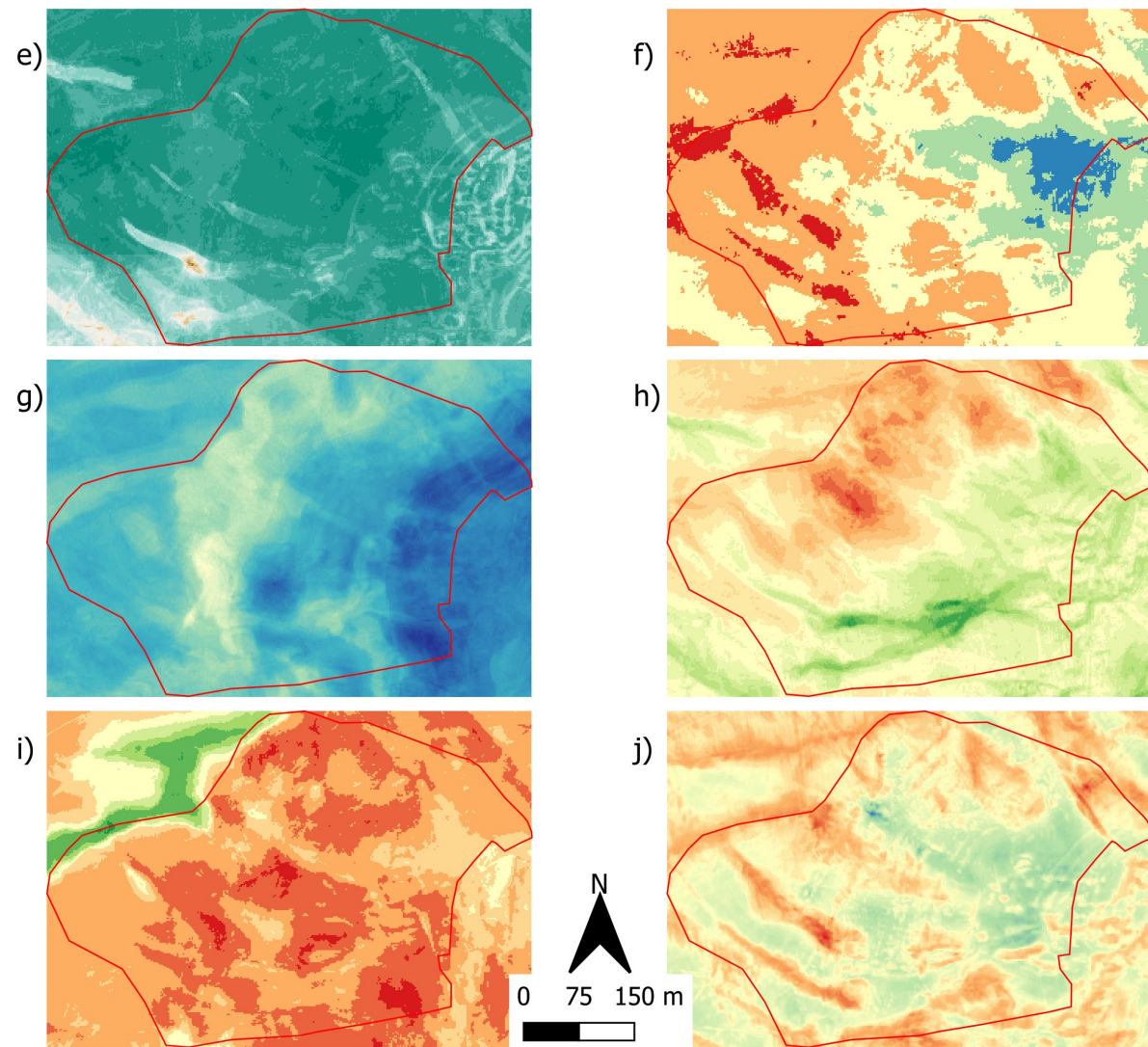
Karte zur Prädiktion des Tonanteils



Différentes cartes prédictives *Verschiedene prädiktive Karten*



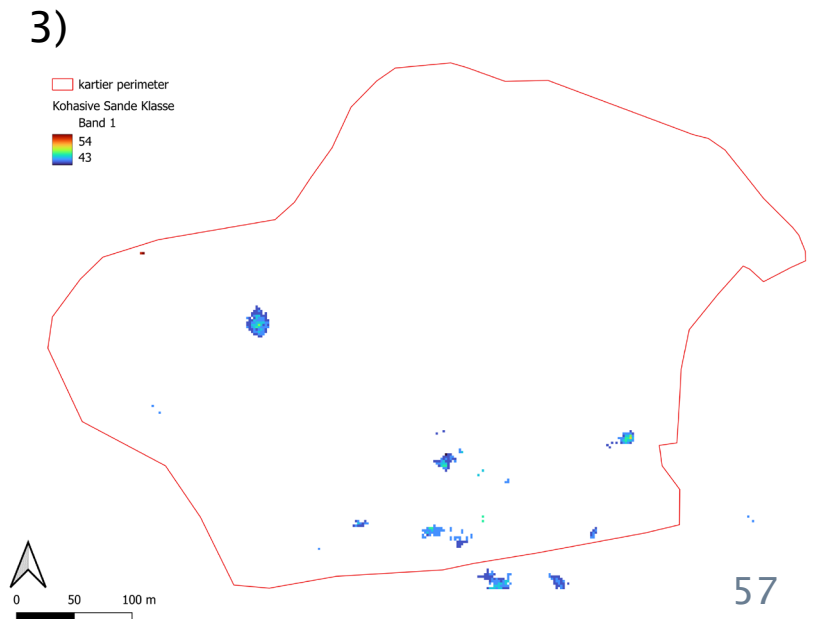
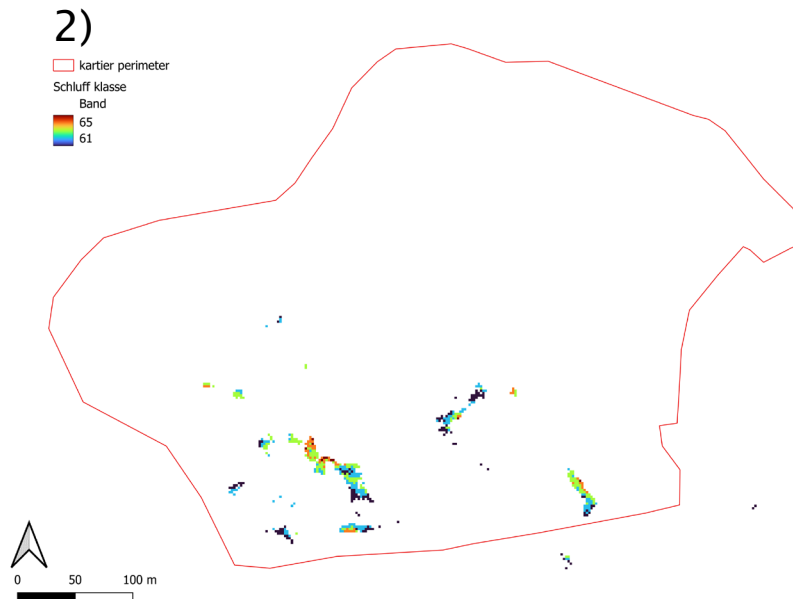
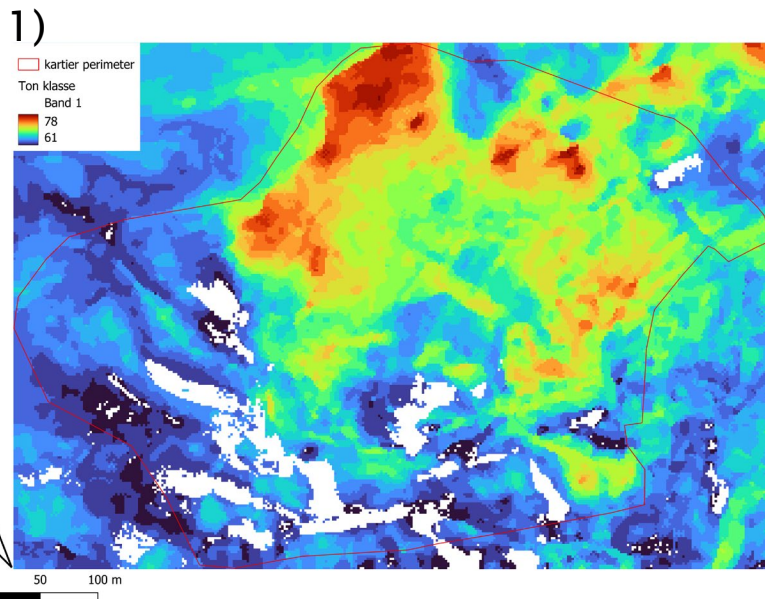
a) carte de l'argile ; b) carte du silt ; c) carte de la PNG ;
d) carte de la NFK ; e) carte de la teneur en humus ;
f) carte de la limite de la profondeur du sous-sol ;
g) carte de la profondeur d'apparition du gg ;
h) carte du pH CaCl_2 ; i) carte du pourcentage de
squelette ; j) carte de la profondeur maximale du sol



a) Tonkarte; b) Schluffkarte; c) PNG-Karte;
d) Karte der NFK; e) Karte des Humusgehalts; f) Karte der
Grenze der Untergrundtiefe; g) Karte der Auftrittstiefe des
gg; h) Karte des pH-Werts CaCl_2 ; i) Karte des Skelettanteils;
j) Karte der maximalen Bodentiefe

Produits dérivés pour la classification des risques

- ▶ 1) Schluff+Ton>60% & Ton> 20% —> Tone
- ▶ 2) Schluff+Ton>60% & Ton< 20% —> Schluffe
- ▶ 3) Schluff+Ton<60% & Kies< 40% & Sand < 65% & Kies+Sand< 75% —> Kohäsive Sande
- ▶ 4) Schluff+Ton<60% & Kies< 40% & Sand < 65% & Kies+Sand> 75% —> Kiesige Sande
- ▶ 5) Schluff+Ton<60% & Kies< 40% & Sand > 65% —> Sande
- ▶ 6) Schluff+Ton<60% & Kies> 40% —> Kiese



Conclusions pour la modélisation / Schlussfolgerungen

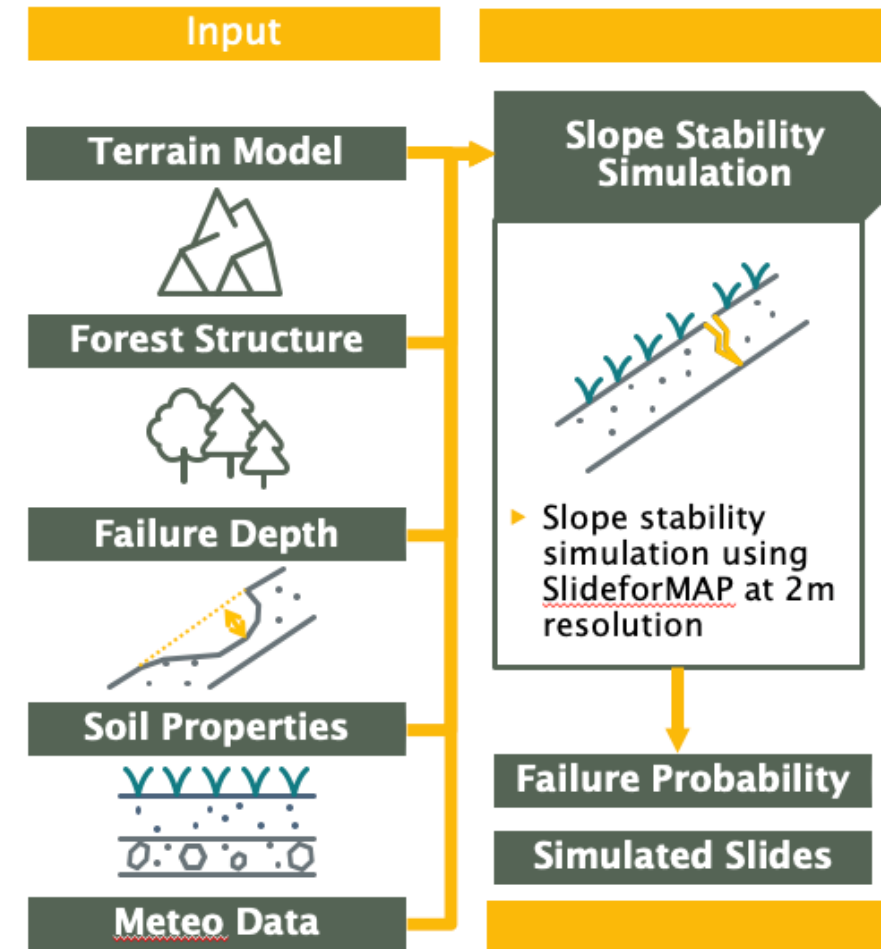
- ▶ Les produits standards issus des données de base modélisées ont été réalisés
Die Standardprodukte aus den modellierten Stammdaten wurden realisiert.
- ▶ L'aggrégation de ces cartes de base ont permis le calcul des variables nécessaires pour les glissements de terrain
Die Zusammenführung dieser Basiskarten ermöglichte die Berechnung der für Hangrutschungen erforderlichen Variablen.
- ▶ Le nombre de points ne permet pas une validation statistique des modèles
Die Anzahl der Punkte erlaubt keine statistische Validierung der Modelle.
- ▶ L'allure générale est plausible
Das allgemeine Erscheinungsbild ist plausibel.

5. Fokus Modellierung Hangmuren

5. Fokus Modellierung Hangmuren

Hangmurenmodellierung: SlideforMAP (EcorisQ.org)

- ▶ Die Simulation der Rutschungswahrscheinlichkeit erfolgte mit dem probabilistischen, physikbasierten Modell **SlideforMAP** (van Zadelhoff et al. 2021). SlideforMAP generiert eine grosse Anzahl hypothetischer Rutschungen elliptischer Form, für die die Stabilität mit einem Grenzgleichgewichtsansatz berechnet wird.
- ▶ Als stabilisierende Komponenten werden die Scherfestigkeit des Bodens (**Reibungswiderstand und Kohäsion**) sowie die **Wurzelverstärkung** eines allfälligen Baumbestands (basal und lateral) berücksichtigt. Als destabilisierende Komponente wird der **Porenwasserdruck** modelliert. Dabei dienen die Niederschlagsrate eines potenziellen Ereignisses, die Topographie des Einzugsgebiets (beitragende Fläche pro Rasterzelle) sowie Parameter zur Beschreibung der **Wasserleitfähigkeit** im Boden als Eingangsgrössen.



(Schaller et al., 2024)

Resultate Hangmurenmodellierung

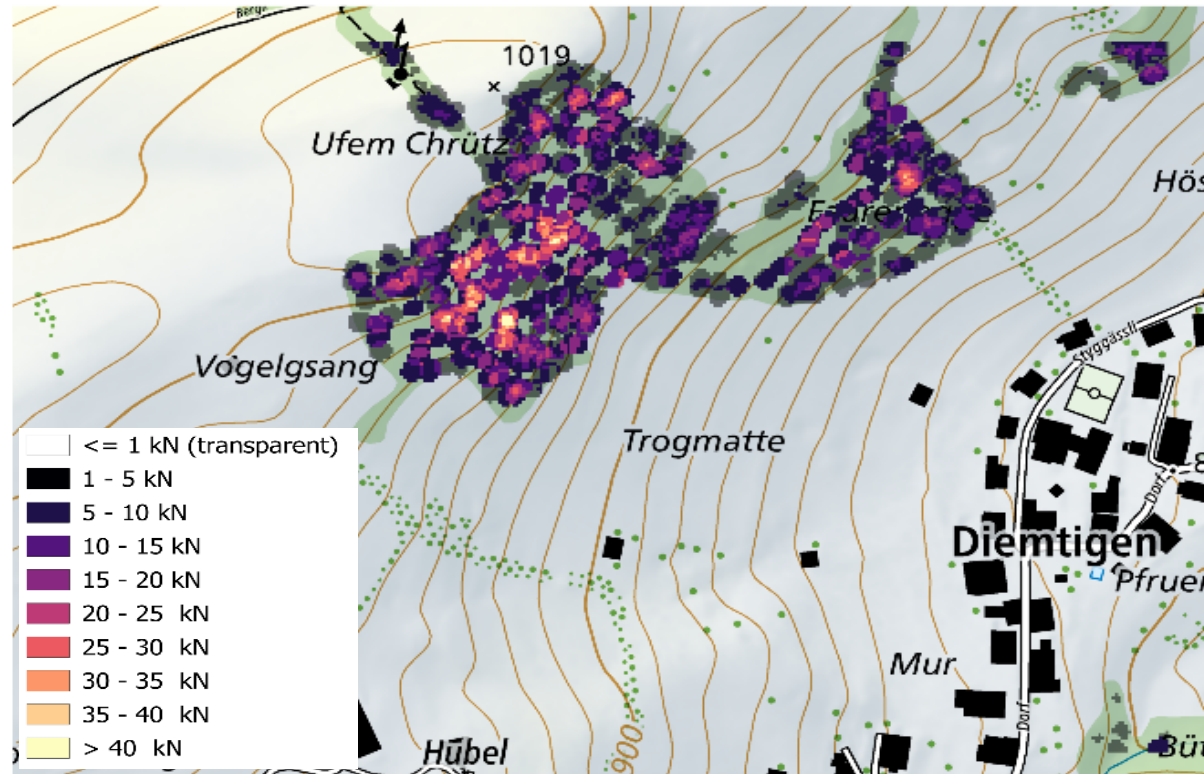
Um den Einfluss räumlich aufgelöster Bodenparameter aufzuzeigen, wurde die Rutschungswahrscheinlichkeit für **4 unterschiedliche Detaillierungsgrade** der Bodenparameter simuliert.

- ▶ **1)** Anhand von 1 USCS-Profil wurden **Scherparameter aus der Norm SN 670 010 b** abgeleitet und räumlich **homogen** verwendet. Es wurde **keine Bodentiefenkarte** verwendet, sondern die Bodentiefe mit dem in SlideforMAP integrierten Algorithmus berechnet .
- ▶ **2)** Die Scherparameter für **1 Bodenprobe** wurden **mittels Laborversuche** bestimmt und räumlich homogen verwendet. Es wurde **keine Bodentiefenkarte** verwendet, die Bodentiefe wurde wie bei Variante 1 berechnet.
- ▶ **3)** Auf Basis der durchgeführten **Texturanalysen** wurden **räumlich aufgelöste Karten erstellt**. Dabei wurden die Böden in Texturklassen gruppiert (60-110 cm Tiefe), für die jeweils Scherparameter aus Normwerten aus SN 670 010 b verwendet wurden. Für diese Simulation wurde die **neu modellierte Bodentiefenkarte** verwendet.
- ▶ **4)** Im Vergleich zum Detaillierungsgrad 3 wurde **zusätzlich eine Unterteilung des Tongehaltes** vorgenommen. Die Kohäsion wurde in Abhängigkeit des Tongehaltes bestimmt, dieser Zusammenhang wurde anhand von Labordatenbanken ermittelt. Für diese Simulation wurde die **neu modellierte Bodentiefenkarte** verwendet.

Resultate Hangmurenmodellierung

► Wurzelverstärkung

Potenzielle laterale Wurzelverstärkung für Szenarien mit Wald



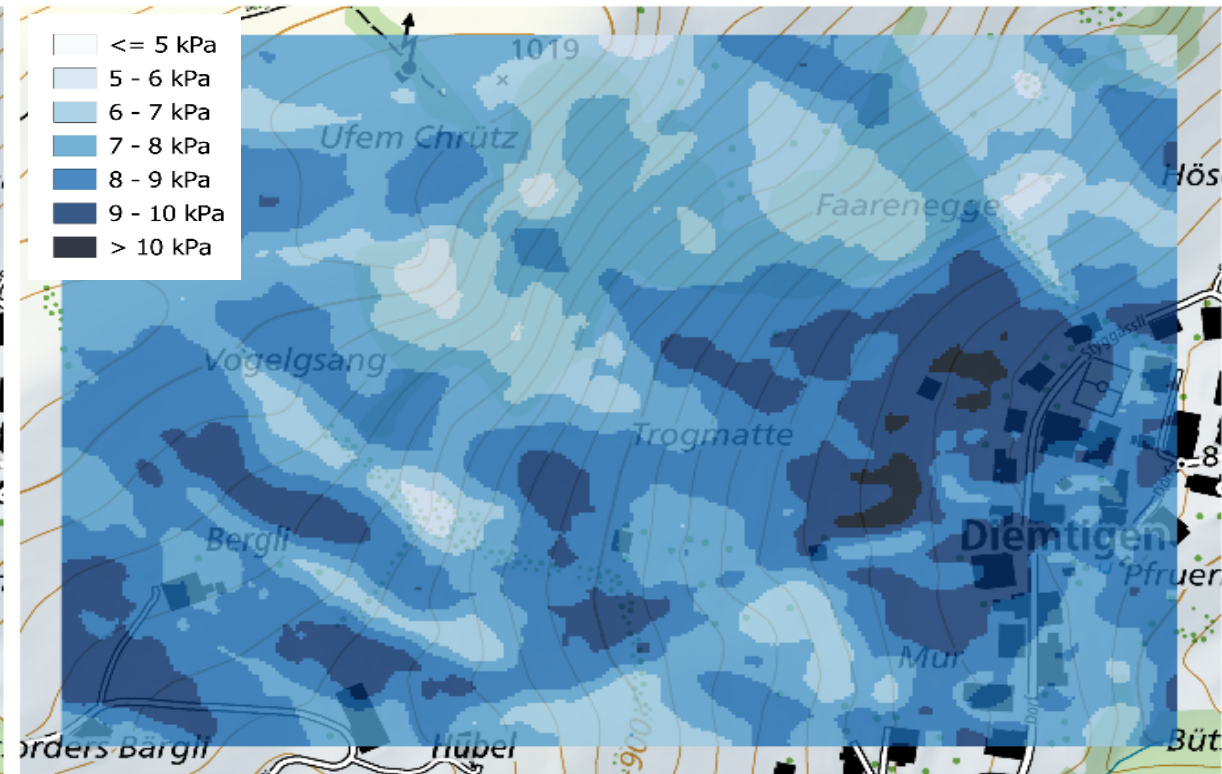
Potenzielle laterale Wurzelverstärkung

0 75 150 m



► Porenwasserdruck <- Funktion von Ks

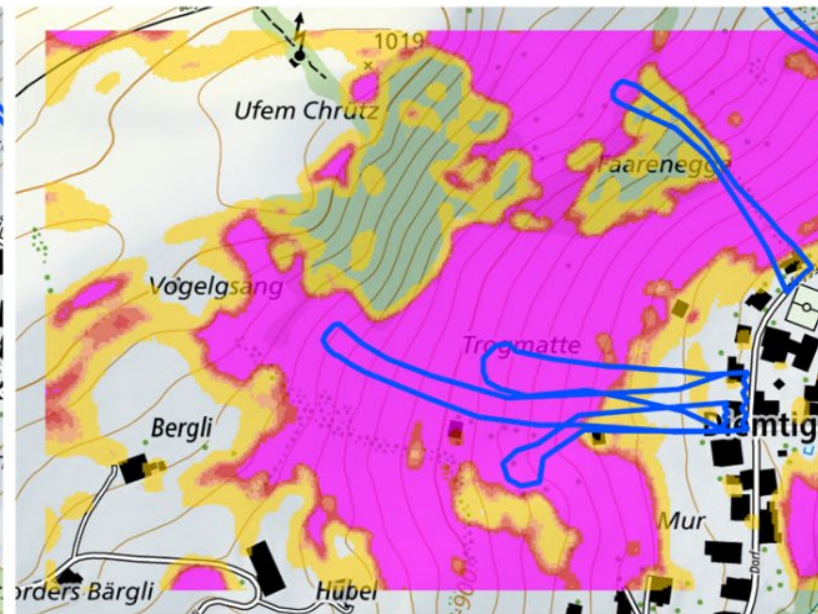
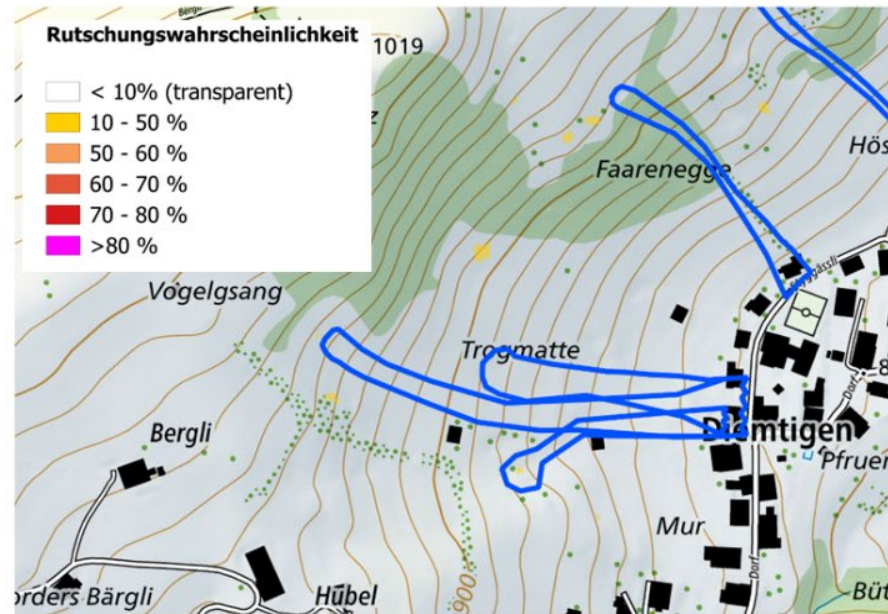
Detaillierungsgrad 4: Porenwasserdruck



Porenwasserdruck

Detaillierungsgrad 1: Scherparameter aus USCS-Profil mit Kohäsion

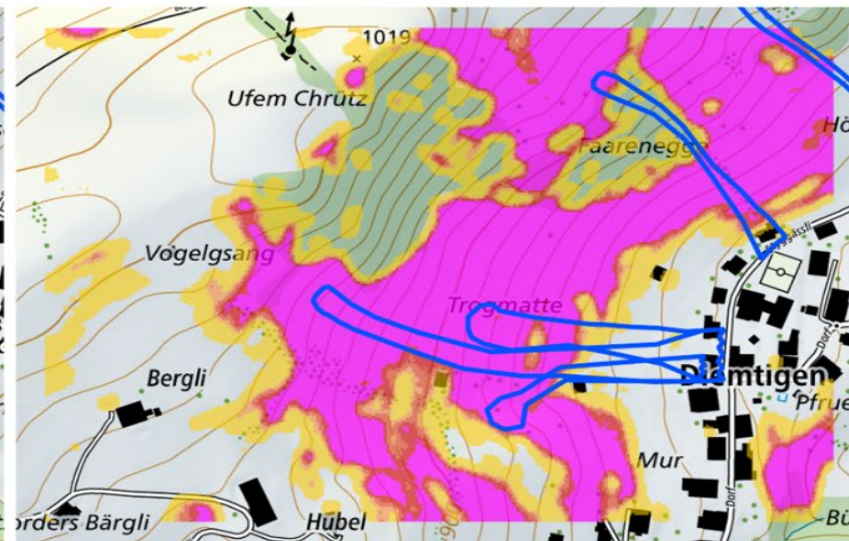
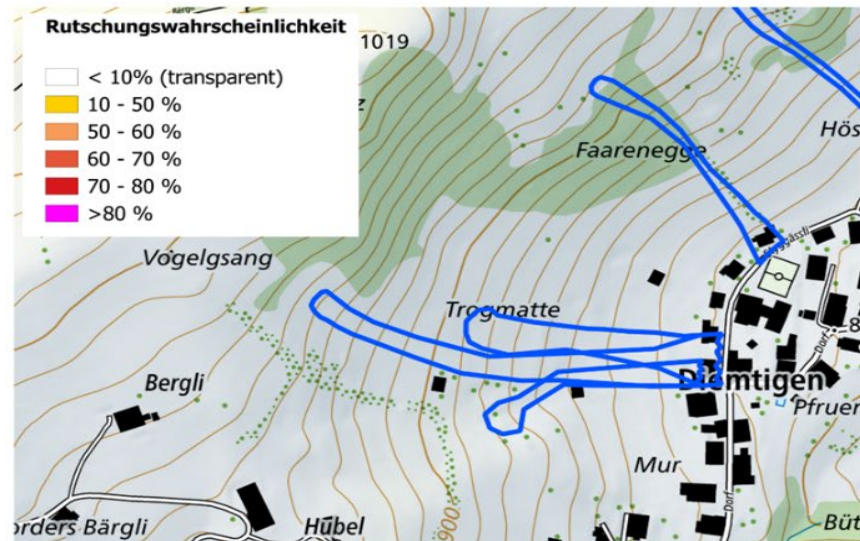
Detaillierungsgrad 1: Scherparameter aus USCS-Profil ohne Kohäsion



► **DG 1** – mit und ohne Kohäsion

Detaillierungsgrad 2: Scherversuche für 1 Probe, Kohäsion aus Versuch

Detaillierungsgrad 2: Scherversuche aus 1 Probe, ohne Kohäsion



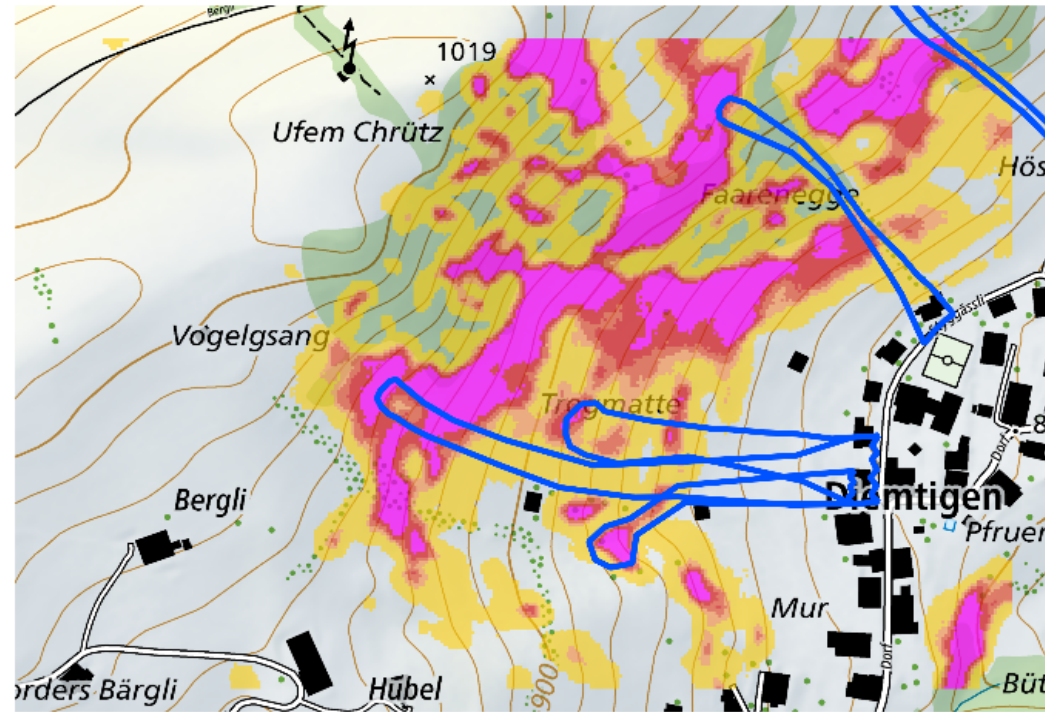
► **DG 2** – mit und ohne Kohäsion

□ Rutschungsreignisse August 2005

0 75 150 m

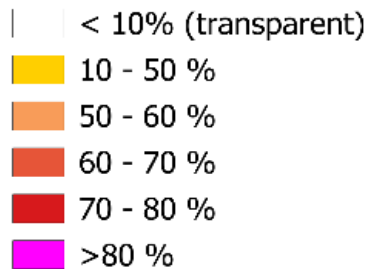


Detaillierungsgrad 3: Räumliche Bodenparameter ohne Tonklassen

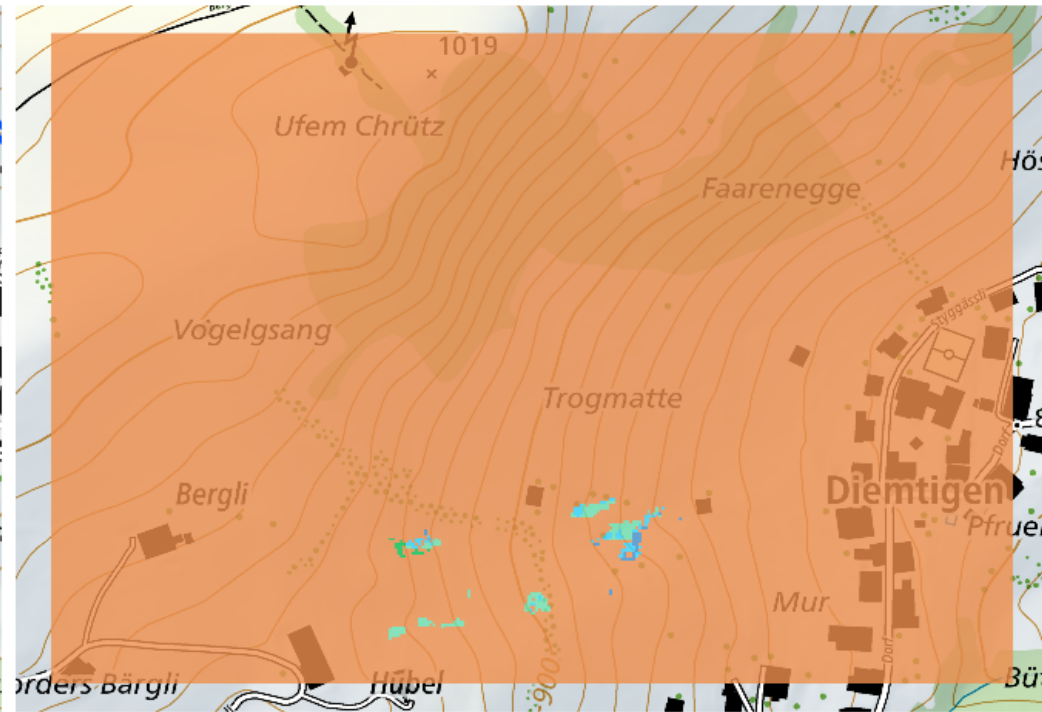


Rutschungsreignisse August 2005

Rutschungswahrscheinlichkeit



Detaillierungsgrad 3: Bodenkarte

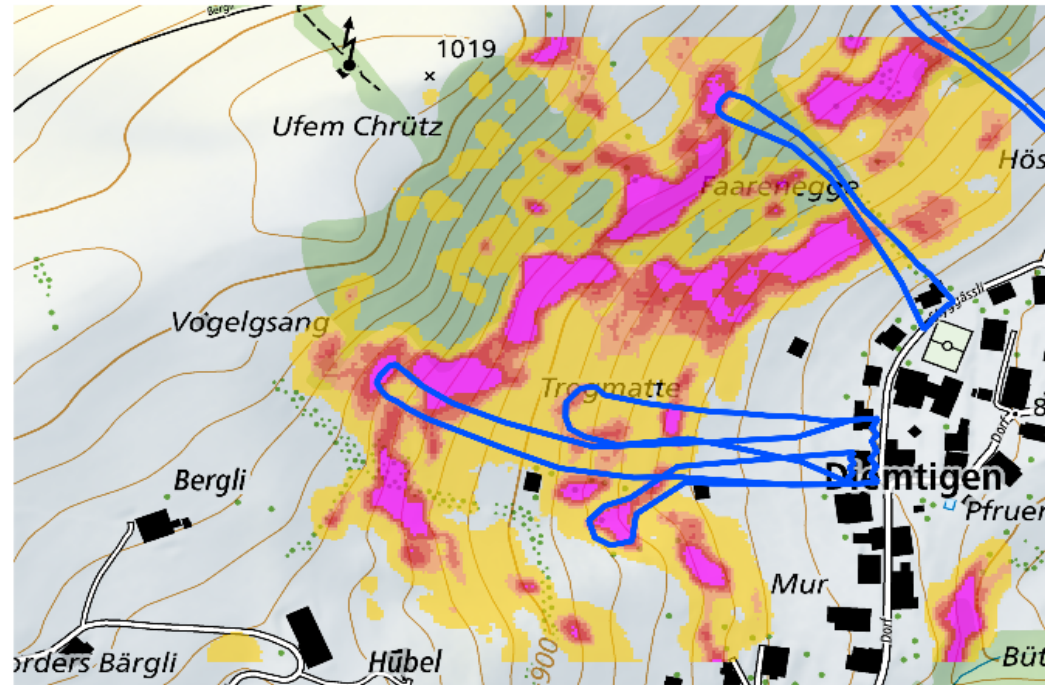


Bodenklassen



► **DG 3** – mit 1 Klasse Tone

Detaillierungsgrad 4: Räumliche Bodenparameter mit Tonklassen



Rutschungsreignisse August 2005

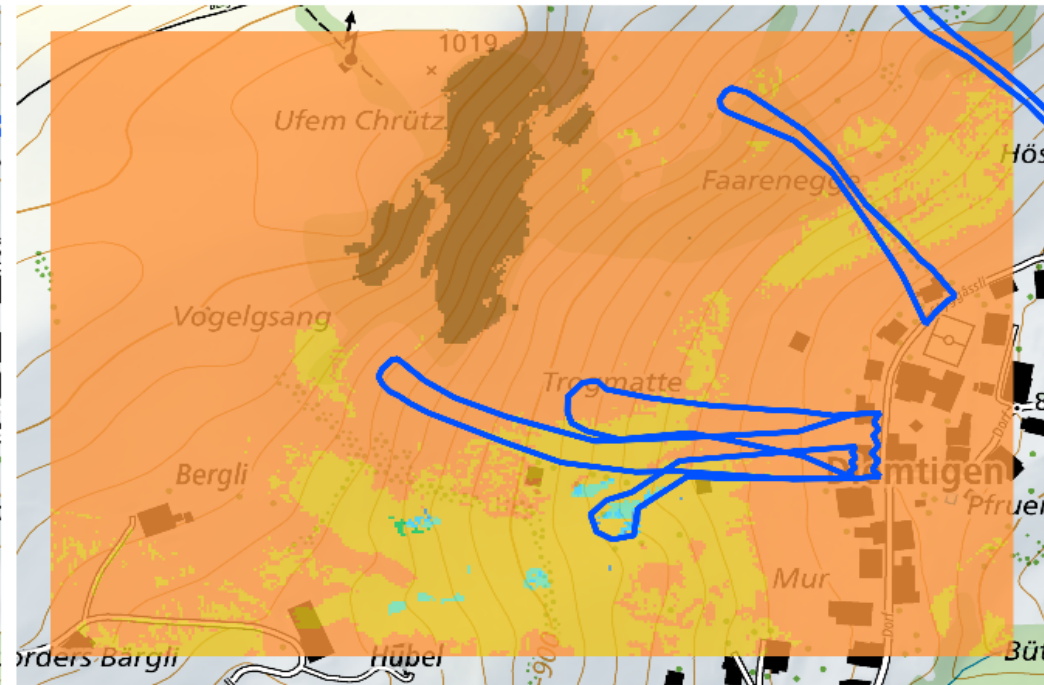
Rutschungswahrscheinlichkeit

- < 10% (transparent)
- 10 - 50 %
- 50 - 60 %
- 60 - 70 %
- 70 - 80 %
- >80 %

0 75 150 m



Detaillierungsgrad 4: Bodenkarte



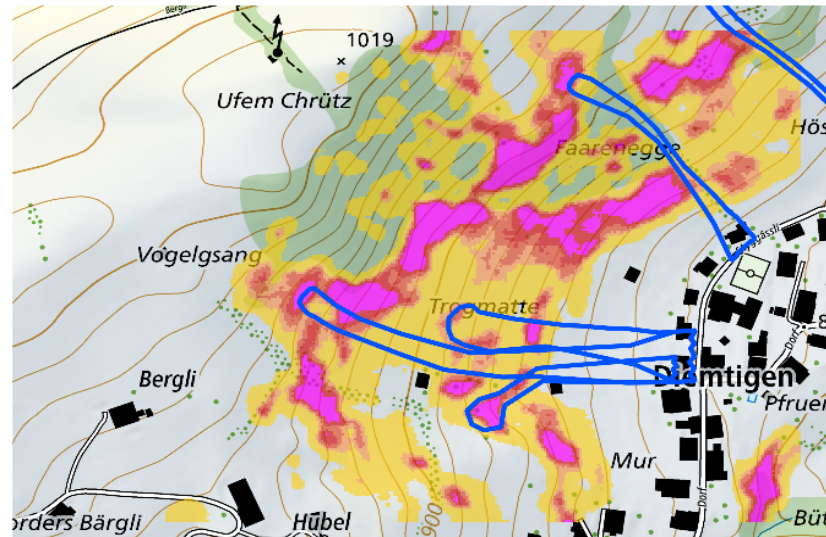
Bodenklassen

- Ton < 25%
- Ton 25 - 35 %
- Ton > 35 %
- Schluffe
- Kohäsive Sande
- Sande
- Kiesige Sande
- Kiese

► **DG 4** – mit 3 Klassen der Tone

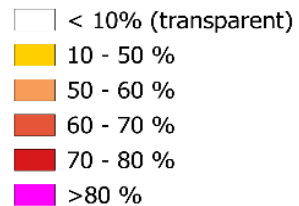
Quantifizierung Wirkung der Wurzelverstärkung

Detaillierungsgrad 4: Räumliche Bodenparameter mit Tonklassen



■ Rutschungsreignisse August 2005

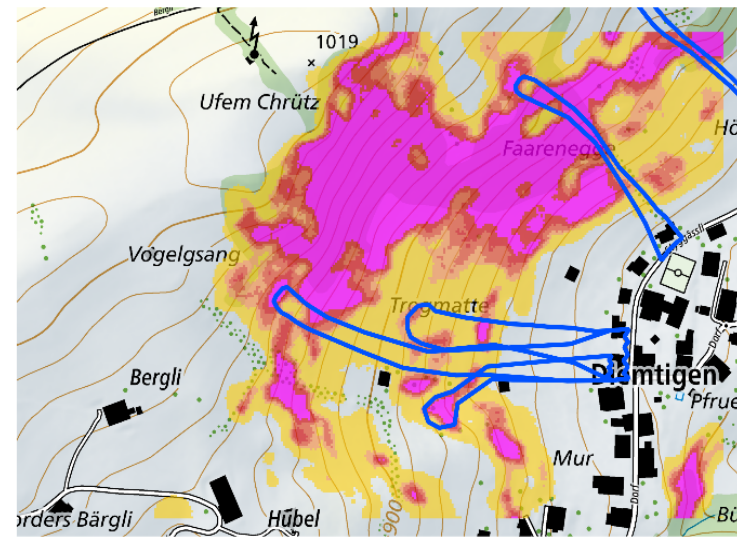
Rutschungswahrscheinlichkeit



0 75 150 m

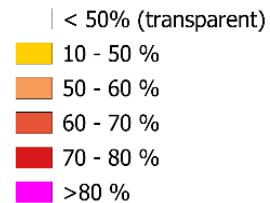


Detaillierungsgrad 4: Räuml. Bodenparameter mit Tonklassen ohne Wald



■ Rutschungsreignisse August 2005

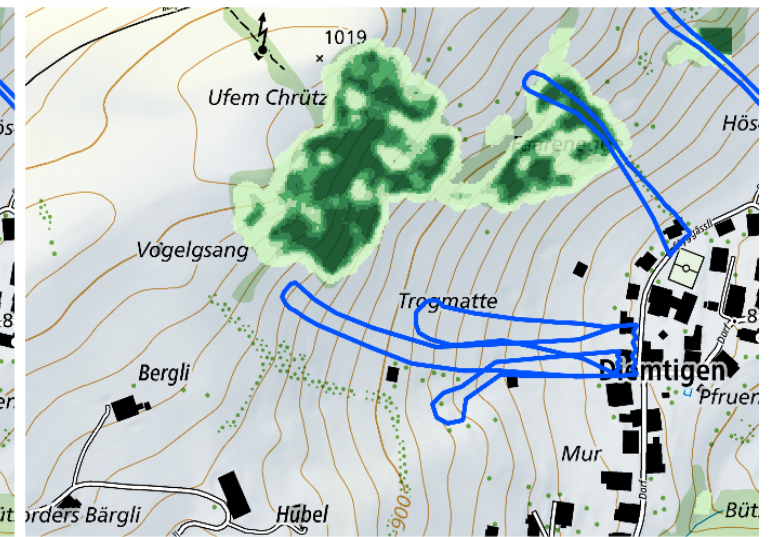
Rutschungswahrscheinlichkeit



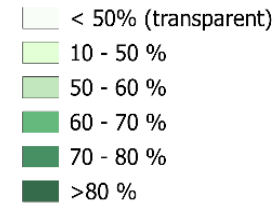
0 75 150 m



Detaillierungsgrad 4: Differenz ohne Wald - mit Wald



Reduktion der Rutschungswahrscheinlichkeit durch Wald



6. Diskussion der Ergebnisse und Fazit

Ergänzung Aufnahmen und Aufwand

Zusätzlichen/neue Erhebungsgrössen und -methoden an Profilen und Handsondierungen:

► **Profile:**

- **Ks** (gesättigte Leitfähigkeit) -> 5+5 Min pro Messung
- Lagerungsdichte -> 5 Min Feld + 15 Min. Lab pro Messung
- **Bodenart** -> 5 Min Feld + 35 Min. Lab pro Messung
- Bestimmung Kiesfraktion -> 20 Min Feld pro Messung
- **Wurzelverteilung** -> 15-30 Min Feld pro Profil

► **Bohrungen:**

- Ks (gesättigte Leitfähigkeit) -> 10 Min pro Messung

Ergänzung Aufnahmen und Mehrwert für Hangmurenbeurteilung

Zusätzlichen/neue Erhebungsgrössen und -methoden an Profilen und Handsondierungen:

► **Profile:**

- Ks (gesättigte Leitfähigkeit) -> **Sehr Gross**
- Lagerungsdichte -> Gering
- Bodenart -> **Sehr Gross**
- Bestimmung Kiesfraktion -> Gross
- Wurzelverteilung -> **Sehr Gross**

► **Bohrungen:**

- Ks (gesättigte Leitfähigkeit) -> Gross

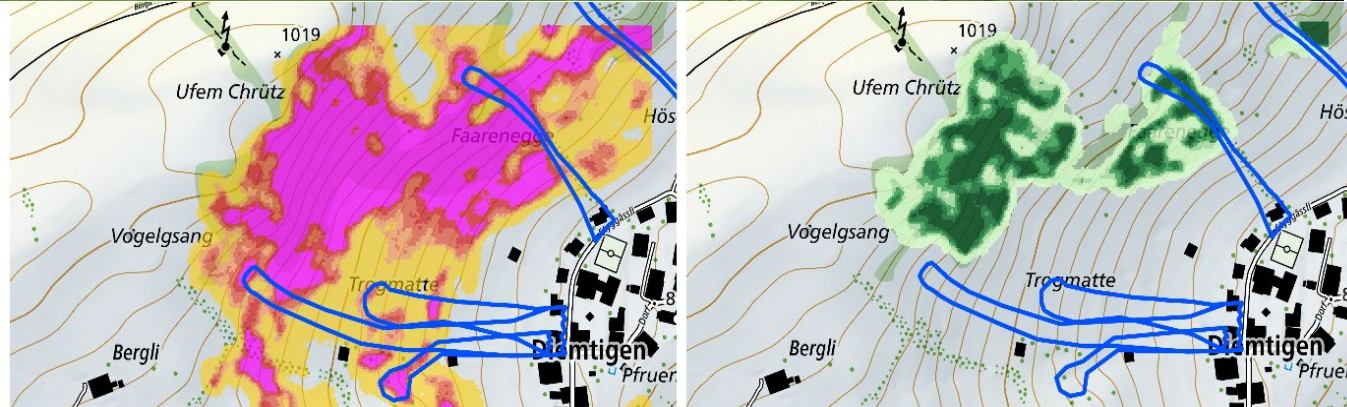
Fazit

- ▶ **Detaillierte Bodenkarten** mit ergänzenden Parametern bieten einen grossen Mehrwert für die Beurteilung von Hangmurengefahren und deren Modellierung auf verschiedenen Detaillierungsstufen (Hinweiskarten, Gefahrenkarten, Objektschutzprojekte). Bereits die **DG 3** ist dafür sehr gut geeignet (6 Bodenklassen statt 24 gemäss Norm). Z.B. Karte mit 100 m² und 15-50 cm Tiefe Auflösung.
- ▶ **Ks:** Es besteht ein starkes Bedürfnis, eine Strategie zur Erhebung dieser Parameter weiterzuentwickeln. Grosse Potential für viele Anwendungen.
- ▶ **Körngrössenanalyse:** Es braucht dringend eine Harmonisierung sowie eine Erweiterung der Kenntnisse zur Analyse der Schluff- und Tonfraktionen zwischen den verschiedenen Laboren (Geotechnik, Agronomie, Forstwissenschaften, ...).
- ▶ **Wurzelverteilung:** Es wäre sehr hilfreich, die Wurzelverteilung in ausgewählte Waldbodenprofilen systematisch zu erfassen.
- ▶ **Bodentiefe:** Die systematische Bestimmung der Bodentiefe und die Erstellung einer CH-weiten Bodentiefe-Karte wären für viele Anwendungen sehr wertvoll.

Fazit

- ▶ Grosser Mehrwert dieses Pilotprojekts war die direkte Konfrontation und der fachliche **Austausch zwischen unterschiedlichen Disziplinen** (Waldwissenschaft, Geotechnik, Agronomie, Naturgefahren, ...).
- ▶ **Im Rahmen dieses kleinen Projekts konnten verschiedene Methoden und Ansätze getestet werden.** Validierungen sind nötig, um eine konsequente Umsetzung in der Bodenkartierung zu planen.
- ▶ **Das Projekt hat aufgezeigt, wo die grössten Potenziale** für eine Erweiterung und Optimierung der Verfahren in der CH-Bodenkartierung liegen: Bodentiefe, Ks, Wurzelverteilung, Textur, Beurteilung der Kiesfraktion, Aufskalierungsmodelle, Laborverfahren,....

Danke für die Aufmerksamkeit!



Referenzen

- ▶ BFH-HAFL (2025). Vorlesung BSs Waldwissenschaft: “Grundlagen Ingenieurwesen: Bodenmechanik”
- ▶ Cohen, D., & Schwarz, M. (2017). Tree-root control of shallow landslides. *Earth Surface Dynamics*, 5(3), 451-477.
- ▶ Di Prima, S., Castellini, M., Abou Najm, M. R., Stewart, R. D., Angulo-Jaramillo, R., Winiarski, T., & Lassabatere, L. (2019). Experimental assessment of a new comprehensive model for single ring infiltration data. *Journal of Hydrology*, 573, 937-951.
- ▶ Durner, W., Iden, S. C., & von Unold, G. (2017). The integral suspension pressure method (ISP) for precise particle-size analysis by gravitational sedimentation. *Water Resources Research*, 53(1), 33-48.
- ▶ International Organization for Standardization. (2016). Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 4: Determination of particle size distribution (ISO Standard No. 17892-4:2016). ISO.
- ▶ Liu, T. K., Odell, R. T., Etter, W., & Thornburn, T. H. (1966). A Comparison of Clay Contents Determined by Hydrometer and Pipette Methods Using Reduced Major Axis Analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 1966-11-01.

Referenzen

- ▶ Nickl, J. (2025). Comparison of infiltration measurement methods for runoff estimation (Master's thesis). Bern University of Applied Sciences, School of Agricultural, Forest and Food Sciences HAFL.
- ▶ Reynolds, W. D., & Elrick, D. E. (1990). Ponded infiltration from a single ring: I. Analysis of steady flow. *Soil Science Society of America Journal*, 54(5), 1233-1241.
- ▶ Schwarz, M., Lehmann, P., & Or, D. (2010). Quantifying lateral root reinforcement in steep slopes—from a bundle of roots to tree stands. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 35(3), 354-367.
- ▶ Schwarz, M., Giadrossich, F., & Cohen, D. (2013). Modeling root reinforcement using a root-failure Weibull survival function. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(11), 4367-4377.
- ▶ Schwarz, M., Rist, A., Cohen, D., Giadrossich, F., Egorov, P., Büttner, D., ... & Thormann, J. J. (2015). Root reinforcement of soils under compression. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 120(10), 2103-2120.

Referenzen

- ▶ Schwarz, M. (2019). Wurzelverstärkung und Hangstabilitätsberechnungen: ein Überblick. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 170(6), 292-302.
- ▶ Schwarz, M., Frossard, A., May, D., Hollard, N., von Wattenwyl, K. (2025). Studie zur Bestimmung des künftigen Handlungsbedarfs Brienzer Wildbäche, Schlussbericht. Berner Fachhochschule - Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften. <https://www.bfh.ch/.documents/ris/2023-997.180.946/BFHID-1615516928-1/Brienzer-Wildbaeche-Bericht-2025-4-15.pdf>
- ▶ SN 670 010b, Coefficients caractéristiques des sols, Swiss Standard, 2007.
- ▶ van Zadelhoff, F. B., Albaba, A., Cohen, D., Phillips, C.,.... & Schwarz, M. (2021). Introducing SlideforMap; a probabilistic finite slope approach for modelling shallow landslide probability in forested situations. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 2021, 1-33.
- ▶ Von Wattenwyl, K., Schwarz, M., (2024). Standardverfahren zur Bodenanalyse für Gefahrenbeurteilungen. Projektbericht BFH-HAFL, S. 38.