



# INGENIEURBIOLOGIE GÉNIE BIOLOGIQUE INGEGNERIA NATURALISTICA INSCHENIERA BIOLOGICA



SPONTANE RUTSCHUNGEN  
UND HANGMUREN

GLISSEMENTS DE TERRAIN  
SPONTANÉS ET LAVES  
TORRENTIELLES

FRANE SPONTANEE E COLATE  
DETTRITICHE

# Schutz – Wald – Struktur: Einfluss auf flachgründige Rutschungen

---

Frank Graf  
Alexander Bast  
Christian Rickli  
Peter Bebi

## Zusammenfassung

Pflanzen übernehmen wichtige Funktionen in der Bodenstabilisierung sowie zur Regulierung des Wasserhaushalts und erhöhen so auch die Wasserspeicherkapazität, welche für die Verhinderung flachgründiger Rutschungen entscheidend ist. Ein 3-Stufen-Filter und eine Multi Faktor Analyse mit Aspekten der Bodenmechanik, Vegetation und Topographie konnten von über 200 Rutschungen mehr als 90% erklären. Hinsichtlich der Verhinderung flachgründiger Rutschungen erhöht eine gute Waldstruktur nicht nur die Bodenstabilität, sondern beeinflusst auch den Bodenwasserhaushalt positiv. Diesbezüglich «optimale» Wälder weisen eine hohe 3<sup>D</sup>-Diversität auf: ober- und unterirdische Vielfalt an Arten, Alter, horizontaler und vertikaler Struktur sowie Durchwurzelung und Wurzelarchitektur in unterschiedlichen Sukzessions- und Entwicklungsstufen.

## Keywords

Waldstruktur, Pflanzenfunktionen, flachgründige Rutschungen, multivariate Statistik, 3<sup>D</sup>-Diversität

## **Protection – forêt – structure: influence sur les glissements de terrain peu profonds**

## Résumé

Les plantes remplissent des fonctions importantes dans la stabilisation des sols et la régulation du bilan hydrique. Elles augmentent ainsi la capacité de stockage de l'eau, cruciale afin de prévenir les glissements de terrain peu profonds. Un filtre sur trois niveaux et une analyse multifactorielle avec des aspects de mécanique des sols, de végétation et de topographie ont pu expliquer plus de 90% d'un ensemble de plus de 200 glissements survenus. En ce qui concerne la prévention des glissements de terrain peu profonds, une bonne structure forestière augmente non seulement la stabilité du sol mais a également une influence positive sur le bilan hydrique du sol. À cet égard, les forêts «optimales» présentent une grande diversité 3<sup>D</sup>: diversité des espèces au-dessus et au-dessous du sol, âge, structure horizontale et verticale ainsi qu'un enracinement et une architecture des racines à différents stades de succession et de développement.

## Mots-clés

Structure des forêts, fonctions des plantes, glissements de terrain peu profonds, statistiques multivariées, diversité 3<sup>D</sup>.

## HINWEIS:

Dieser Artikel wurde für die Kursunterlagen zum FAN-Herbstkurs 2019 mit Thema «Umgang mit flachgründigen Rutschungen und Hangmuren» verfasst und steht nun in überarbeiteter Form für das Mitteilungsblatt des Vereins für Ingenieurbiologie zur Verfügung.

## Protezione – bosco – struttura: influenza sugli scivolamenti superficiali

### Riassunto

Le piante svolgono importanti funzioni di stabilizzazione del suolo e di regolazione del bilancio idrico. Di conseguenza, aumentano anche la capacità di accumulo dell'acqua, che è fondamentale per evitare scivolamenti superficiali. Un filtro a 3 fasi e un'analisi multifattoriale con aspetti di meccanica del suolo, vegetazione e topografia hanno potuto spiegare oltre il 90% di oltre 200 smottamenti. Per quanto riguarda la prevenzione di scivolamenti superficiali, una buona struttura forestale non solo aumenta la stabilità del suolo, ma ha anche un'influenza positiva sul suo bilancio idrico. A questo proposito le foreste «ottimali» mostrano un'elevata diversità in tre dimensioni: diversità di specie sopra e sottoterra, età, struttura orizzontale e verticale, nonché radicamento in diverse fasi di successione e sviluppo.

### Parole chiave

Struttura del bosco, funzioni delle piante, scivolamenti superficiali, statistica multifattoriale, diversità tridimensionale

### Einleitung

In den letzten Jahren verursachten flachgründige Rutschungen nicht selten grossen Schaden, im Wert von über Fr. 100 Millionen durch einzelne Unwetter und haben auch Menschenleben gefordert [Bezzola & Hegg 2007]. Die Verbesserung bestehender sowie die Errichtung neuer Schutzmassnahmen ist daher unbestritten und wird aufgrund der Klimaveränderung in Zukunft immer wichtiger. In diesem Rahmen spielt die Vegetation allgemein und der Wald im Speziellen eine tragende Rolle. Die Schutzfunktionen intakter Waldbestände zur Verhinderung flachgründiger Rutschungen sind seit alters her bekannt und Grundlagen sowie Empfehlungen zur Pflege von Schutzwäldern gut dokumentiert, wie beispielsweise in der Wegleitung «Nachhaltigkeit im Schutzwald, NaiS» [Frehner et al. 2005]. Neuere Untersuchungen haben gezeigt, dass insbesondere die Struktur des Waldes und deren massgebliche Auswirkung auf stabilitiesrelevante Pflanzenfunktionen sowie das Bodengefüge das Schutspotential vor flachgründigen Rutschungen entscheidend beeinflussen können. Im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms 68 ([www.nfp68.ch/de](http://www.nfp68.ch/de)) konnte mit dem Projekt SOSTANAH ([www.nfp68.ch/de/projekte/themenschwerpunkt-4-bodeninformation-und-steuerung/bodenstabilitaet](http://www.nfp68.ch/de/projekte/themenschwerpunkt-4-bodeninformation-und-steuerung/bodenstabilitaet)) gezeigt werden, dass gut gepflegte und strukturierte Wälder besser vor flachgründigen Rutschungen schützen [Moos et al. 2016,

Graf et al. 2017, Bebi et al. 2019]. Als Basis für die Untersuchungen diente unter anderem der Bestandescode, welcher die vier Parameter Deckungsgrad, Entwicklungsstufe, Schichtung und Mischung beinhaltet und in der Praxis zur Beschreibung des Waldzustandes verwendet wird. Interzeption, (Evapo-)Transpiration, hydraulische Konduktivität, Wasserspeichervermögen sowie die Bodenarmierung und -aggregierung zählen zu den entscheidenden Pflanzenfunktionen, welche zur Boden- und Hangstabilität beitragen und mit den Parametern des Bestandescodes, respektive der Waldstruktur erfasst werden [Graf et al. 2017]. Pflanzen beeinflussen einerseits als Individuen und andererseits im Verbund als Vegetationsdecke unterschiedliche Prozesse, welche die Hangstabilität erhöhen. Neben der Bodenentwässerung und Regulierung des Wasserhaushalts durch Interzeption und Evapo-Transpiration mit den entsprechenden Auswirkungen auf das Wasserspeichervermögen, sind sie auch an der Bildung stabiler Bodenaggregate beteiligt und nehmen damit Einfluss auf die Bodenstruktur [Graf & Frei 2013]. Pflanzen tragen zudem zur mechanischen Stabilisierung von Bodenmaterial im Rahmen der Wurzelverstärkung bei [Schwarz et al. 2012]. Mit dem Eintrag von organischem Material kurbeln sie zudem den Nährstoffkreislauf an und fördern dadurch Sukzession und Diversität.

Nachfolgend werden die Resultate der Anwendung eines sogenannten 3-Stufen-Filters für die retrospektive Analyse flachgründiger Rutschungen und statistische Auswertungen mittels einer Multi Faktor Analyse (MFA) präsentiert sowie erste Ergebnisse einer Studie zu Waldstruktur und Bodenwasserhaushalt vorgestellt.

### Retrospektive Analyse flachgründiger Rutschungen [3-Stufen-Filter]

Nach wie vor fehlt eine zuverlässige Methode zur Erfassung von Waldwirkungen gegen flachgründige Rutschungen mit einfach zu erhebenden Parametern, welche es erlaubt verlässliche Vorhersagen für die Rutschungswahrscheinlichkeit zu treffen. Für ein besseres Verständnis der Zusammenhänge zwischen Waldstruktur und der Auslösung flachgründiger Rutschungen wurden deshalb im Rahmen des NFP 68 Projekts SOSTANAH 218 Rutschungen, welche während den Unwettern 1997 [Sachsen], 2002 [Napf, Appenzell] und 2005 [Entlebuch, Napf, Prättigau] im Waldgebiet ausgelöst wurden, retrospektiv analysiert. Mit Hilfe eines 3-Stufen-Filters konnten über 95% der Ereignisse erklärt werden. Der Filter berücksichtigt Aspekte der Bodenmechanik (Scherparameter, Hangneigung), Vegetation (NaiS, Bestandescode, Lückenlänge nach Moos et al. 2016) und Topographie (Geländeformen nach Rickli et al. 2008). Mit dem bodenmechanischen Kriterium konnten nahezu 50%, mit jenem der Vegetation weitere 40% und mit der Topographie zusätzlich

7% der Ereignisse erklärt werden [Graf et al. 2017]. Die Grenzwerte für die verschiedenen Kriterien waren:

#### Bodenmechanik:

Hangneigung  $\alpha$  nicht mehr als  $5^\circ$  steiler als der Reibungswinkel  $\Phi'$  [Graf et al. 2009]

#### Topographie:

Geländeform (Falllinien-Horizontal-Profil) ist nicht konvex-flach, flach-konkav oder konvex-konkav [Rickli et al. 2008]

#### Vegetation (Wald):

- Mehrschichtige Bestände; gute Abstufung von Baumhöhe und -alter
- Gesamtdeckungsgrad (gesamte Vegetation) > 60%; Kronendeckung (Bäume > 3 m) > 40%; nachfolgend wird die Kronendeckung als Deckungsgrad bezeichnet
- Nadelholzanteil < 80%
- Möglichst artenreiche Bestände in Entwicklungsstufen Stangen- oder Baumholz

Die Informationen zu den verwendeten Parametern stammen aus der WSL Rutschungsdatenbank (<https://hangmuren.wsl.ch/login.html>), in welcher mehr als 700 Ereignisse ausführlich dokumentiert sind. Die Charakterisierung der Vegetation, respektive der betroffenen Waldbestände, basiert auf dem Bestandescode, welcher in Rickli et al. (2008) beschrieben ist. Für die statistischen Auswertungen wurden die Faktorstufen des Bestandescodes angepasst (Tab. 1). Im Rahmen der Abgrenzung von Waldstruktur-Typen für einen «optimalen» Schutz vor flachgründigen Rutschungen nach NaIS [Frehner et al. 2005], Rickli (2001), Rickli et al. (2008) und den Ergebnissen aus dem NFP 68 Projekt «SOSTANAH» [Graf et al. 2017] ist zu beachten, dass die Kronendeckung (nachfolgend als Deckungsgrad bezeichnet) allgemein von der Höhenlage beeinflusst wird. So kann in der subalpinen Stufe auch ein minimaler Deckungsgrad von > 40% ausreichend sein, falls der Gesamtdeckungsgrad (gesamte Vegetation) > 80% ist. Ein sehr hoher Deckungsgrad (> 80%), kann sich insofern negativ auf den Schutz vor flachgründigen Rutschungen auswirken, falls er im Zusammenhang mit einschichtigen, gedrängten Beständen steht, was insbesondere die natürliche Verjüngung und den Bodenwasserhaushalt beeinträchtigt (siehe Abschnitt «Waldstruktur und Bodenwasserhaushalt»). Zudem können aus unserer Perspektive zum aktuellen Zeitpunkt im Zusammenhang mit der Entwicklungsstufe «Jungwuchs» noch keine wissenschaftlich standhaften Resultate präsentiert werden.

In Anlehnung an BUWAL (1996) wurden neben dem Bestandescode im Rahmen der Untersuchungen des Unwetters von Sachseln 1997 drei Waldzustandskategorien definiert [Rickli 2001], mit vereinfachten Abgrenzungskriterien zur Unterscheidung von «gutem» (W1), «mässigem» (W2) und

«schlechtem» (W3) Waldzustand. Dementsprechend sind in einem «guten» Wald wenig Bestandeslücken sowie die Baumarten und das Bestandesgefüge standortsgemäss, wohingegen in einem «mässigen» Wald einige Bestandeslücken vorhanden sowie Baumarten und Bestandesgefüge nicht standortsgemäss sind. Mit «schlechtem» Waldzustand werden ehemalige Schadenflächen und aufgelöste Bestände bezeichnet.

Basierend auf der Bodenklassifikation gemäss USCS (SN670010b 2011) wurden im Hinblick auf das Versagen drei Bodentypen mit Bodenmaterial unterschieden, welches vorwiegend durch i) Reibung (R), ii) Saugspannung (S) oder eine iii) Kombination (K) von beiden stabilisiert wird (siehe Tab. 3).

Aufgrund der Erkenntnisse aus der Anwendung des 3-Stufen-Filters wurden zudem die Kriterien und Grenzwerte für einen «optimalen» Wald zum Schutz vor flachgründigen Rutschungen angepasst, wobei insbesondere die Waldzu-

Schichtung		Entwicklungsstufe	
0xxx	unbestockt	x0xx	unbestockt
1xxx	1 einschichtig	x1xx	1 Jungwuchs / Dickung
2xxx	2 mehrschichtig	x2xx	2 Stangenholz
3xxx	2 gut strukturiert	x3xx	3 Baumholz I (BHD 20-35 cm)
		x4xx	3 Baumholz II (BHD 35-50 cm)
		x5xx	3 Baumholz III BHD >50 cm)
		x6xx	4 gut strukturierter Bestand
Mischung		Deckungsgrad (DG; Kronendeckung)	
xx0x	unbestockt	xxx0	unbestockt
xx1x	1 > 80% Nadelholz	xxx1	1 (2) gedrängt (DG = 90%)
xx2x	2 Mischbestand	xxx2	2 normal (DG = 80%)
xx3x	3 > 80% Laubholz	xxx3	2 locker (DG = 60%)
		xxx4	3 (2) lückig (DG = 40%)
		xxx5	3 aufgelöst (DG = 20%)

Tabelle 1: Bestandescode-Parameter mit den verschiedenen Stufen nach Rickli et al. [2008].

**Grau:** Unbestockte Flächen, in den (statistischen) Auswertungen nicht berücksichtigt

**Grün:** Stufen für «optimalen» Schutz vor flachgründigen Rutschungen gemäss NaIS [Frehner et al. 2005], Rickli (2001), Rickli et al. [2008] und «SOSTANAH» [Graf et al. 2017]

**Braun:** Stufen für unzureichenden Schutz [Graf et al. 2017] → schlecht strukturiertes Wald

**Olive:** In Abhängigkeit von Höhenlage und Schichtung als Stufe für «optimalen» Schutz zulässig (siehe Text)

**Weisse Zahlen:** Für die Analysen verwendeter Bestandescode mit reduzierten Faktorstufen

Tableau 1 : Paramètres des codes du stock avec les différents niveaux selon Rickli et al. [2008].

**Gris:** Zones non peuplées, non prises en compte dans les évaluations (statistiques)

**Vert:** Niveaux pour une protection « optimale » contre les glissements peu profonds selon NaIS [Frehner et al. 2005], Rickli [2001], Rickli et al. [2008] et « SOSTANAH » [Graf et al. 2017]

**Brun :** Niveaux de protection insuffisants [Graf et al. 2017] → Forêt mal structurée

**Olive :** En fonction de l'altitude et de la stratification, autorisé comme niveau de protection « optimale » [cf. texte]

**Chiffres blancs :** Code du stock utilisé pour les analyses avec des niveaux de facteurs réduits

standskategorien [W1–W3] miteinbezogen wurden. Diese erlauben es, zumindest bis zu einem gewissen Grad, auch die Vorgeschichte des Waldes zu integrieren und namentlich Störungen wie Windwurf, Kalamitäten durch Borkenkäfer oder Pilze aber auch Schäden durch Lawinen und andere Naturgefahren zu berücksichtigen. Es hat sich deutlich gezeigt, dass die Störungsgeschichte im Hinblick auf die Auslösung von flachgründigen Rutschungen einen beträchtlichen Einfluss auf die Schutzwirkung von Waldbeständen ausübt [Bebi et al. 2019].

Somit fliesst im angepassten und empfohlenen Kriterienkatalog für einen «optimalen» Schutzwald der Waldzustand mit W1 ein und die Grenzwerte für die «Entwicklungsstufe» beinhalten Stangenholz und ältere Bestände, für die «Mischung» einen Nadelholzanteil < 80%, für die «Schichtung» mehrschichtige oder stufige Bestände sowie für den «Deckungsgrad» in Abhängigkeit der Höhenstufe und Schichtung Werte von mehr als [40%] 60% und weniger als 80% [90%].

### Multi Faktor Analyse (MFA)

Die Multi Faktor Analyse [Husson et al. 2017] der 207 flachgründigen Rutschungen bringt sowohl den Einfluss der Bodenparameter als auch der Waldstruktur unmissverständlich zum Vorschein. Was den Boden betrifft, ist es einerseits von Bedeutung, ob es sich um einen Reibungs- oder durch Saugspannung dominierten Boden handelt. Von den geotechnischen Parametern haben namentlich Wassergehalt, Porenziffer und Feinanteil, mit positiver sowie der Reibungswinkel  $\Phi'$  mit negativer Korrelation den grössten Einfluss. In zweiter Priorität ist es die Kohäsion  $c'$ , die positiv und der Hangneigungswinkel  $\alpha$ , der negativ korreliert [Tab. 2].

Im Rahmen der Waldstruktur, respektive des Bestandescodes, sind es mit abnehmender Effektstärke Entwicklungs-

	Dim1		Dim2			
	[%var]	Korrelation [0,1]	p-Wert [0,1]	[%var]	Korrelation [0,1]	p-Wert [0,1]
Hohe [m ü M]	1.58	0.23	1.0 e-03	36.40	-0.74	19.7 e-38
Hangneigung $\alpha$ [°]	0.01	---	---	7.65	0.34	4.9 e-07
Wassergehalt w [%]	27.87	0.95	7.1 e-108	2.21	0.18	8.2 e-03
Porenziffer $e_0$ [-]	26.53	0.93	1.3 e-90	2.75	0.20	3.2 e-03
Reibungswinkel $\Phi'$ [°]	23.52	-0.88	1.5 e-66	0.09	---	---
Kohäsion $c'$ [kN·m <sup>-2</sup> ]	0.45	---	---	40.74	0.78	6.8 e-45
Feinanteil fc [%]	20.04	0.81	6.1 e-49	10.16	-0.39	4.7 e-09
Total [%var] Dim1, Dim2	100.00			100.00		

Tabelle 2: Signifikante numerische Variablen der Multi Faktor Analyse mit erklärter Varianz, Korrelation und p-Wert für die ersten beiden Dimensionen [Dim1, Dim2]. Die jeweiligen Werte der erklärten Varianz der einzelnen Variablen addieren sich auf 100% und repräsentieren 46.5% für Dim1, respektive 21.7% für Dim2. Die einflussreichsten Werte für erklärte Varianz [%var] und Korrelation [0,1] sind grau hinterlegt. | Tableau 2 : Variables numériques significatives de l'analyse multifactorielle avec variance explicative, corrélation et valeur p pour les deux premières dimensions [Dim1, Dim2]. Les valeurs respectives de la variance explicative de chaque variable s'élèvent à 100% et représentent 46,5% pour Dim1 et 21,7% pour Dim2. Les valeurs les plus influentes de la variance explicative [%var] et de la corrélation [0,1] sont mises en évidence en gris.

stufe, Deckungsgrad, Schichtung und Mischung [Tab. 3]. Zudem üben auch Region, Höhenlage und Unwetterereignis einen signifikanten Einfluss aus. Insgesamt erklären die ersten vier Hauptkomponenten über 90% der Varianz [Dim1: 46.5%, Dim2: 21.7%, Dim3: 14.5%, Dim4: 9.7%].

	Dim1		Dim2		Dim3		Dim4	
	R <sup>2</sup> [0,1]	p-Wert [0,1]	R <sup>2</sup> [0,1]	p-Wert [0,1]	cor // R <sup>2</sup> [0,1]	p-Wert [0,1]	cor // R <sup>2</sup> [0,1]	p-Wert [0,1]
Bodentyp (R, S, K) *	0.58	4.3 e-39	---	---	0.05	3.6 e-03	---	---
Region (Perimeter)	0.16	6.6 e-06	0.56	2.2 e-32	0.36	1.1 e-16	0.35	1.0 e-15
Unwetterereignis	0.12	1.3 e-05	0.46	6.0 e-27	0.30	1.0 e-15	0.07	2.1 e-03
Entwicklungsstufe	0.04	3.5 e-02	---	---	---	---	---	---
Deckungsgrad	---	---	0.06	1.6 e-03	---	---	---	---
Schichtung	---	---	0.02	3.2 e-02	---	---	---	---
Mischung	---	---	---	---	---	---	0.11	8.2 e-06

Tabelle 3: Signifikante kategoriale Variablen der Multi Faktor Analyse mit Korrelation [R<sup>2</sup>] und p-Wert für die ersten vier Dimensionen [Dim1-4]. Hohe Korrelationswerte [0,1] sind grau hinterlegt.

\*: Im Hinblick auf das Versagen wurden 3 Bodentypen unterschieden, mit Bodenmaterial, das vorwiegend durch Reibung (R), Saugspannung (S) oder eine Kombination (K) von beiden stabilisiert wird. | Tableau 3 : Variables catégorielles significative de l'analyse multifactorielle avec corrélation [R<sup>2</sup>] et valeur p pour les quatre premières dimensions [Dim1-4]. Les valeurs de corrélation élevées [0,1] sont en gris.

\* : En ce qui concerne la défaillance, 3 types de sol ont été distingués, avec un matériau de sol qui est principalement stabilisé par friction [R], potentiel matriciel [S] ou une combinaison [K] des deux.

Es hat sich allerdings gezeigt, dass die aktuellen Definitionen für die vier Parameter der Waldstruktur im Hinblick auf die Charakterisierung von Waldbeständen mit «optimaler» Schutzwirkung gegen flachgründige Rutschungen nicht zwingend «ein Stein gemeisselt» sind. In einem ersten Schritt sollten zumindest die Anzahl der Faktorstufen [Tab. 1] und entsprechend deren Grenzwerte überdacht und mit multiplen statistischen Analysen überprüft werden.

### Waldstruktur und Bodenwasserhaushalt

Die Stabilität der Bodenmatrix und somit der Porenstruktur wirkt sich entscheidend auf die hydrologischen Eigenschaften des Bodens aus. Diese spielen wiederum eine massgebende Rolle für die Stabilität von Hängen. Die Auslösung flachgründiger Rutschungen ist unter anderem eng gekoppelt mit dem Prozess der Wassersättigung und dem entsprechenden Anstieg des Porenwasserdrucks im Bodenkörper.

In diesem Kontext sind Voruntersuchungen im Dischmatal [Davos, GR] im Gange. Dort werden seit Herbst 2018 in nächster Nachbarschaft in einem gut und schlecht strukturierten Bestand sowie in einer Lichthaltung der volumetrische Bodenwassergehalt (VWC) und die Bodentemperatur gemessen [Abb. 1].

Es hat sich bereits während des ersten Winterhalbjahrs eine deutliche Differenz zwischen den beiden unterschiedlich strukturierten Waldpartien gezeigt, mit kühle-

ren Temperaturen und geringerem Wassergehalt in der «gut» strukturierten Fläche [Abb. 1d]. Zudem reagiert der Boden im schlecht strukturierten Bestand viel stärker und sprunghaft auf grössere Niederschlagsmengen. Am ausgeprägtesten kommen die Unterschiede im volumetrischen Wassergehalt und somit bezüglich der freien Wasserspeicherkapazität während der Schneeschmelze (März – Juni) zum Vorschein. Diese Zeitspanne birgt in Kombination mit intensivem Niederschlag ein erhöhtes Risiko für die Auslösung flachgründiger Rutschungen. Der Boden des gut strukturierten Bestandes wartet mit einem deutlich höheren Fassungsvermögen auf, womit die Auslösungs-wahrscheinlichkeit flachgründiger Rutschungen beträchtlich reduziert wird.

Es ist zwar allgemein bekannt, dass laubabwerfende Bäume während der Vegetationsruhe weniger transpirieren als Nadelgehölze und immergrüne Bäume. Es hat sich jedoch gezeigt, dass namentlich zu Beginn und während der Schneeschmelze insbesondere früh austreibende Laubhölzer bis zu 25% des zur Verfügung stehenden Schmelzwassers aufnehmen können und somit einen massgeblichen Beitrag zur Bodenentwässerung leisten. Damit einhergehend kommt es zu einem bedeutenden Anstieg der Saugspannung, was wiederum die Boden- und Hangstabilität erhöht (Yildiz et al. 2019).

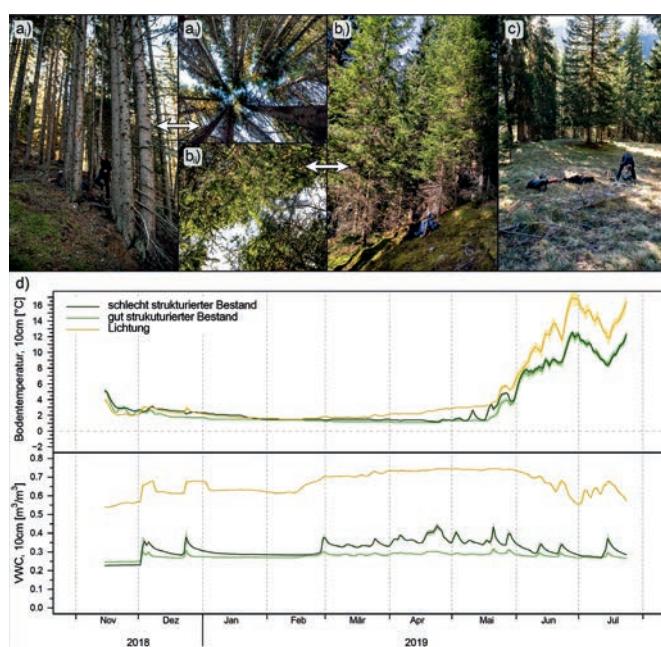


Abb. 1: Verlauf von Bodentemperatur und -feuchtigkeit [volumetrischer Bodenwassergehalt, VWC] in 10 cm Tiefe einer schlecht [ai, aii] und gut strukturierten Waldpartie [bi, bii] sowie einer Lichtung [c] eines subalpinen Fichtenwaldes in Dischmatal in Davos, GR [Fotos: Alexander Bast]. | Fig. 1: Evolution de la température et de l'humidité du sol [teneur volumétrique en eau du sol, VWC] à 10 cm de profondeur d'une zone forestière peu [ai, aii] et bien structurée [bi, bii], ainsi que d'une clairière [c] d'une forêt d'épicéas subalpine dans la vallée de Dischma à Davos, GR [photos : Alexander Bast].

In einem gut strukturierten Wald für «optimalen» Schutz vor flachgründigen Rutschungen ist somit eine hohe Vielfalt nicht nur bezüglich Arten, sondern auch hinsichtlich deren Phänologie wichtig.

### Folgerungen

Sowohl die Auswertungen mit dem 3-Stufen-Filter als auch die Anwendung einer Multi Faktor Analyse haben übereinstimmend die Relevanz der Boden- und Vegetations-, respektive Waldstruktur im Hinblick auf den Schutz vor flachgründigen Rutschungen aufgezeigt. In beiden Fällen konnte ein sehr hoher Anteil (>90%) der über 200 analysierten flachgründigen Rutschungen erklärt werden. Die Tatsache, dass neben den Scherparametern [Reibungswinkel  $\Phi'$ , Kohäsion c'] der Wassergehalt, die Porenziffer sowie der Feinanteil starken Einfluss nehmen, deutet zudem auf die Wichtigkeit der Bodenhydrologie hin. Diese Gegebenheit wird zusätzlich durch die positive Korrelation zwischen erster Hauptkomponente (Dim1) und dem Bodentyp «Saugspannung» im Gegensatz zu «Reibung» und «Kombination» untermauert [Tab. 2, 3; [https://www.wsl.ch/fileadmin/user\\_upload/WSL/Mitarbeitende/graf/Graf\\_Rickli\\_Bast\\_Poster\\_IMC\\_2019.pdf](https://www.wsl.ch/fileadmin/user_upload/WSL/Mitarbeitende/graf/Graf_Rickli_Bast_Poster_IMC_2019.pdf)].

Damit ein Boden der Auslösung flachgründiger Rutschungen optimal entgegenwirken kann, muss unter anderem eine angemessene Wasserrückhaltekapazität nachhaltig gewährleistet sein. Der Aufbau der Bodenstruktur wird einerseits durch rein physikalisch-chemische Prozesse und andererseits durch die Bodenfauna und -flora gesteuert. Zusammen mit dem Edaphon und namentlich im Zusammenspiel mit ihren Pilzpartnern [Mykorrhiza] tragen auch die Pflanzen sowohl aktiv mit den Wurzeln als auch passiv durch den Eintrag von organischem Material über abgestorbene Pflanzenteile zur Entwicklung der Bodenmatrix und Porenstruktur bei. Eine hohe Diversität an Pflanzen, respektive namentlich der Wurzelmorphologie, erhöht dabei die Stabilität des Bodengefüges und fördert somit eine nachhaltige Rückhaltekapazität von Wasser und Nährstoffen. Zudem wird durch eine höhere Vielfalt an Wurzeln auch die Entwässerung positiv beeinflusst.

Die Auswertung erster Daten aus dem Pilotprojekt «Waldstruktur und Bodenwasserhaushalt» im Dischmatal, Davos (GR) verdeutlicht den Einfluss der Waldstruktur auf die Bodenhydrologie (Abb. 1d). Ein gut strukturierter Wald verfügt im Vergleich zu schlecht strukturierten Beständen über eine höhere Wasserspeicherkapazität. Er kann demnach während einem Unwetterereignis über eine längere Zeitspanne die Wassersättigung verzögern oder gar verhindern und wirkt so der Auslösung flachgründiger Rutschungen entscheidend entgegen.

Wälder, deren Aufgabe in erster Linie den Schutz vor flachgründigen Rutschungen beinhaltet, weisen somit bezüglich

Waldstruktur eine gebührende ober- und unterirdische Vielfalt auf, insbesondere bezüglich Arten, Alter, horizontaler und vertikaler Struktur sowie Durchwurzelung und Wurzelarchitektur [Abb. 2].

Wo immer möglich, ist das Nebeneinander verschiedener Sukzessions- und Entwicklungsstufen in kleinräumig ausgewogener Verteilung zu fördern. Durch diese «dreidimensionale Diversität» – oberirdisch, unterirdisch und hinsichtlich Sukzession (zeitliche Diversität) – erhöht sich nicht nur die Anpassungsfähigkeit und Widerstandskraft des gesamten Bestandes. Auch dessen Selbstregulierung wird so massgeblich gefördert. Neben Pflanzen sind deren Partnerorganismen, in erster Linie Mykorrhizapilze, ebenfalls zu berücksichtigen [Abb. 2]. Denn eine vielfältige Myko-Rhizosphäre treibt die Sukzession der Pflanzengesellschaften an und ist ein wichtiger Promotor für die nachhaltige Entwicklung einer schützenden Vegetationsdecke. Deshalb soll auch der unterirdischen Arten- und Strukturvielfalt (Wurzelarchitektur) angemessene Aufmerksamkeit zuteilwerden.

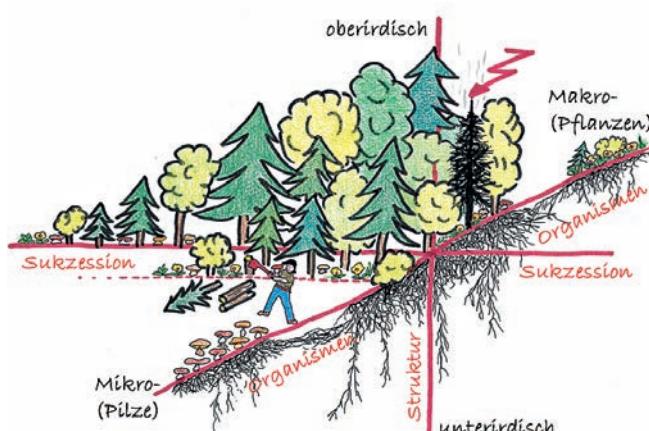


Abb. 2: 3<sup>0</sup>-Diversität unter Berücksichtigung von Mikro- und Makro-Organismen [Pflanzen- und Mykorrhizapilz-Arten], ober- und unterirdischer Struktur sowie Sukzession und deren Regulierung durch anthropogene Eingriffe [Pflege und Unterhalt] und natürliche Störungen wie Windwurf, Borkenkäfer, Feuer, Lawinen, ... [Zeichnung von Véronique Graf-Morgen, 2016]. | Fig. 2: Diversité 3<sup>0</sup> en considérant les micro et macro-organismes [espèces de plantes et de champignons mycorhiziens], la structure du sol et du sous-sol ainsi que la succession et sa régulation par les interventions anthropiques [soins et entretien] et les perturbations naturelles telles que les chablis, les bostryches, le feu, les avalanches etc. [Dessin de Véronique Graf-Morgen, 2016].

## Literatur

- Bebi P, Bast A, Ginzler C, Rickli C, Schöngrunder K, Graf F (2019) Waldentwicklung und flachgründige Rutschungen: eine grossflächige GIS-Analyse, Schweiz. Z. Forstwes. 170, 318–325.
- Bezzola GR, Hegg C, Ed. (2007) Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bern, Bundesamt für Umwelt BAFU, Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, 215 S.

BAFU, Bundesamt für Umwelt, Hrsg. (2008) Handbuch NFA im Umweltbereich. Mitteilung des BAFU als Vollzugsbehörde an Gesuchsteller. Umwelt-Vollzug Nr. 0808. Bundesamt für Umwelt, Bern, 283 S.

Frehner M, Wasser B, Schwitter R (2005) Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion, Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 564 S.

Graf F, Bebi P, Braschler U, De Cesare G, Frei M et al. (2017) Pflanzenwirkungen zum Schutz vor flachgründigen Rutschungen. WSL Berichte, 56. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, 42 p.

Graf F, Frei M (2013) Soil aggregate stability related to soil density, root length, and mycorrhiza using site-specific *Alnus incana* and *Melanogaster variegatus* s.l. Ecol. Eng. 57, 314–323.

Graf F, Frei M, Böll A (2009) Effects of vegetation on the angle of internal friction of a moraine. FOSNOLA 82, 61–78.

Husson F, Lê S, Pagès J (2017) Exploratory Multivariate Analysis by Example Using R. Chapman & Hall/CRC, Computer Science and Data Analysis Series, pp. 248.

Moos C, Bebi P, Graf F, Mattli J, Rickli C, Schwarz M (2016) How does forest structure affect root reinforcement and susceptibility to shallow landslides? Earth Surf. Process. Landforms 41, 951–960.

Rickli C, Red. (2001) Vegetationswirkungen und Rutschungen. Untersuchung zum Einfluss der Vegetation auf oberflächennahe Rutschprozesse anhand der Unwetterereignisse in Sachseln OW am 15. August 1997. Birmensdorf, Bern, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, 97 S.

Rickli C, Bebi P, Graf F, Moos C (2019) Shallow landslides: retrospective analysis of the protective effect of forest and conclusions for prediction. Recent Advances in Geotechnical Research. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering, 175–185.

Schwarz M, Cohen D, Or D (2012) Spatial characterization of root reinforcement at stand scale: Theory and case study. Geomorphology 171/172, 190–200.

SN670010b (2011) Geotechnische Erkundung und Untersuchung / Geotechnische Kenngrößen. Schweizer Norm (SN), Schweizerischer Verband der Straßen- und Verkehrsinfrastrukturoberen Fachleute (VSS) Zürich, pp. 19.

Yildiz A, Graf F, Springman SM (2019) An investigation of plant-induced suction and its implications for slope stability. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering, 172, 520–529.

## Kontaktadressen

Frank Graf

WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF  
Flüelastrasse 11  
7260 Davos Dorf  
Tel: +41 81 417 02 10  
graf@slf.ch



Frank Graf

Alexander Bast

WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF  
Flüelastrasse 11  
7260 Davos Dorf  
Tel: +41 81 417 02 78  
bast@slf.ch



Alexander Bast

Christian Rickli

Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und  
Landschaft WSL  
Zürcherstrasse 111  
8903 Birmensdorf  
Tel: +41 44 739 24 03  
christian.rickli@wsl.ch



Christian Rickli

Peter Bebi

WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF  
Flüelastrasse 11  
7260 Davos Dorf  
Tel: +41 81 417 02 73  
bebi@slf.ch

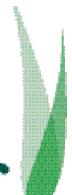


Peter Bebi

Auf die Wurzeln  
kommt es an...



Samen und Pflanzen für die Hangsicherung  
zusammengestellt nach Wurzelprofilen und  
Erosionsschutzwirkung.  
Objektbesichtigung kostenlos  
Lieferung ganze Schweiz und EU



**schutzfilisur**  
**100 Jahre Samen Pflanzen AG**

Schutz Filisur, Samen u. Pflanzen AG, CH-7477 Filisur  
Tel. 081 410 40 00, Fax. 081 410 40 77  
samenvpflanzen@schutzfilisur.ch