

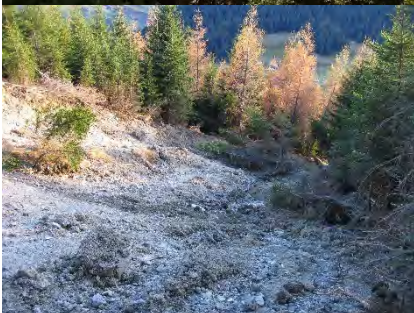
Abschlussbericht «Weiterentwicklung NaiS-Profil Rutschungen»



Eidgenössische Forschungsanstalt für
Wald, Schnee und Landschaft WSL



Frank Graf
Alexander Bast
Peter Bebi
Christian Rickli



Berner Fachhochschule
Hochschule für Agrar-, Forst- und
Lebensmittelwissenschaften HAFL



Massimiliano Schwarz
Jean-Jacques Thormann
Luuk Dorren



im Auftrag von:

Bundesamt für Umwelt BAFU

Verantwortlich für den fachlichen Inhalt des Vorschlags im Rahmen der «Weiterentwicklung des NaiS-Profiles Rutschungen» ...

Projektgruppe:

Frank Graf^{1,2}, Alexander Bast, Peter Bebi

WSL-Institut für Schnee und Lawinenforschung SLF; Flüelastrasse 11, 7260 Davos Dorf

Christian Rickli

Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL; Zürcherstrasse
111, 8903 Birmensdorf

Massimiliano Schwarz, Jean-Jacques Thormann, Luuk Dorren

Berner Fachhochschule, Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften
HAFL, Fachbereich Waldwissenschaften; Länggasse 85, 3052 Zollikofen

Auftraggeber/Begleitgruppe BAFU:

Benjamin Lange, Stéphane Losey

BAFU, Sektion Rutschungen, Lawinen und Schutzwald; Worblentalstrasse 68, 3063 Ittigen

¹ Verfasser des Berichts; graf@slf.ch

² Projektverantwortlicher; graf@slf.ch

Inhaltsverzeichnis

Ausgangslage und Einführung	4
NaiS-Profil «Rutschungen»: Kenntnisstand ausgewählter Grundlagen	6
a) Waldmanagement	6
b) Topographie, Bodenmorphotypen → siehe a) «Waldmanagement» und d) «Hangneigungswinkel α » (Waldzustand)	7
c) Störungen.....	7
d) Hangneigungswinkel α (Waldzustand)	8
e) Bestandescode (Waldstruktur, -zustand)	9
f) Geotechnik (Reibungswinkel und Kohäsion)	10
g) Geologie vs Geotechnik [siehe auch unter d) «Hangneigungswinkel α (Waldzustand)» und f) «Geotechnik»].....	10
h) Lücken und Ränder	11
i) Evapo-Transpiration, hydraulische Leitfähigkeit [siehe auch unter c) «Störungen»].....	12
j) Klimaveränderung	13
k) Stabilitätsträger (Bestandesstabilität)	14
l) Förderfaktoren (Geologie).....	14
m) Niederschlag (Einfluss Struktur/Waldzustand auf Auslösung).....	15
n) Transit- und Ablagerung von Hangmuren	15
o) Wurzelverstärkung	16
Literaturverzeichnis	18
Anhang	21

Ausgangslage und Einführung

Im Rahmen der Weiterentwicklung des NaiS Profils «Rutschungen» soll im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU, der Wissensstand hinsichtlich der Funktionen und Effekte des Waldes bezüglich des Schutzes vor flachgründigen Rutschungen aufgearbeitet werden.

In diesem Zusammenhang wurden die «Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL», zusammen mit der «Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL», beauftragt, eine Synthese der aktuellen Forschung zu erarbeiten sowie darauf basierend ein entsprechendes «Nais-Profil» für das «Anrissgebiet» flachgründiger Rutschungen vorzuschlagen.

Neben der durch WSL und HAFL gemeinsamen Aufarbeitung des Kenntnisstandes zu ausgewählten Grundlagen bezüglich des Potentials von Wäldern zum Schutz vor flachgründigen Rutschungen, wurden für die «NaiS-Profil Tabelle» zwei alternative Vorschläge ausgearbeitet. Diese unterscheiden sich vornehmlich bezüglich Schwellenwerten beim Kronendeckungsgrad und der damit zusammenhängenden Gewichtung ökologischer Aspekte der Verjüngung. Gemeinsamkeiten respektive nur minimale Abweichungen ergaben sich hinsichtlich der Wichtigkeit von Lückenlänge, Deckungsgrad, Hangneigung und Stabilitätsträger sowie der Förderung spezifischer Baumarten – namentlich auch unter Berücksichtigung der Klimaveränderung.

Weltweit und namentlich in der Schweiz verursachen flachgründige Rutschungen direkt und indirekt grosse Schäden an Infrastruktur sowie Verkehrswegen und nicht selten sind auch Todesopfer zu beklagen (Badoux *et al.* 2016, Bezzola & Hegg 2007, 2008). Im Wissen um die Klimaveränderung muss aufgrund fast aller Szenarien mit einer Zunahme solcher Ereignisse gerechnet und somit davon ausgegangen werden, dass in Zukunft Unwetterereignisse, welche zur Auslösung flachgründiger Rutschungen führen, zunehmen (Brönnimann *et al.* 2018, Gariano & Guzzetti 2016).

Schutzwälder üben im Rahmen ihrer Schutzwirkung gegen flachgründige Rutschungen essentielle Funktionen aus und beeinflussen dadurch zu unterschiedlichen Zeiten in unterschiedlicher Zusammensetzung auf unterschiedlichen Ebenen unterschiedliche Prozesse. Zu den Schlüsselrollen zählen die hydrologische Regulierung des Bodenwasserhaushaltes, einerseits mittels Interzeption durch das Kronendach (Loshali & Sing 1992, Liu 1997, Park 2000, Price & Carlyle-Moses 2003, Deguchi *et al.* 2006) und andererseits, im Zusammenspiel mit den Wurzeln, über die (Evapo-)Transpiration und hydraulische Leitfähigkeit. Dazu kommt die Boden- und Hangstabilisierung durch den Armierungseffekt der Wurzeln – die sogenannte Wurzelverstärkung (Schwarz 2019) – sowie die chemisch-biologische Zementierung von Aggregaten, gemeinsam mit ihren Symbiosepartnern, den Mykorrhizapilzen (Graf & Frei 2013, Bast *et al.* 2016).

Die daraus resultierende Veränderung der Bodenstruktur führt zu einer Erhöhung der Rückhaltekapazität von Wasser und Nährstoffen, was sich wiederum positiv auf das Pflanzenwachstum auswirkt. Die damit einhergehende Förderung der sogenannten «dreidimensionalen Diversität» (Graf *et al.* 2017) – oberirdisch, unterirdisch und bezüglich Sukzession (zeitliche Diversität) – erhöht nicht nur die Anpassungsfähigkeit und Widerstandskraft des gesamten Bestandes. Auch dessen Selbstregulierung wird massgeblich gefördert. Entsprechende Schutzwälder weisen demzufolge eine gebührende ober- und unterirdische Vielfalt auf, insbesondere bezüglich Arten, Alter, horizontaler und vertikaler Struktur, Baumartenmischung sowie Durchwurzelung und Wurzelarchitektur.

Im Sinne einer nachhaltigen Schutzfunktion vor flachgründigen Rutschungen sollten entsprechend Eingriffe wo immer möglich, das Nebeneinander verschiedener Sukzessions- und Entwicklungsstufen in kleinräumig ausgewogener Verteilung fördern. Dabei spielen neben Höhenlage, Exposition, Topographie, Bodenwasserhaushalt und Neigung insbesondere auch die Waldgesellschaft (Sukzessionsstadium, Artenzusammensetzung, Verjüngung) sowie (mikro-)klimatische Faktoren und die Klimaveränderung eine massgebliche Rolle, wie dies teilweise bereits im NaiS-Profil «Rutschungen, Erosion, Murgänge» (Frehner *et al.* 2005) sowie für die Rotten- und Jungwaldpflege (Gruppenplenterung) im Gebirgs- und Schutzwald empfohlen wird (Spies *et al.* 2018, Glanzmann *et al.* 2019; [Praxishilfe für die Jungwaldpflege im Gebirgs- und Schutzwald](#)). Auf diesem Fundament sind im Hinblick auf die «Weiterentwicklung des NaiS-Profiles Rutschungen» für effizientes und nachhaltiges Schutzwaldmanagement aus Sicht von WSL und HAFL unter anderem nachfolgende Kriterien massgebend und sollten im neuen Profil in der Tabelle sowie im Begleittext Eingang finden:

- Topographie und Hangneigung α
- Lückenlänge
- Förderung von Baumarten mit hydrologischer Wirksamkeit und hoher Wurzelverstärkung
- Kleine und mit Vorsicht durchgeführte waldbauliche Eingriffe, falls möglich räumlich und zeitlich versetzt
- Empfehlung für maximalen Deckungsgrad der dominanten Oberschicht, der aus Nachhaltigkeitsgründen nicht überschritten werden soll (Zustandsdiagramme)
- Mögliche Aufteilung des NaiS-Profiles «Rutschungen» in Infiltrations-, Anriss-, Transit- und Ablagerungsgebiet

Nachfolgend ist hinsichtlich massgebender Gesichtspunkte der wissenschaftliche Kenntnisstand bezüglich Waldfunktionen im Rahmen der Schutzwirkung gegen flachgründige Rutschungen dargelegt und erläutert. Darauf basierend sind eine Empfehlung für die «NaiS-Profil Tabelle» sowie Vorschläge ausgewählter Themenbereiche für tiefergründige Informationen und Erklärungen im Rahmen des Begleittextes aufgeführt. Ziel soll es sein, einfache Kriterien und Leitlinien zur Verfügung zu stellen, einerseits für die Praxis, um einen nachhaltig wirksamen Schutzwald mit möglichst minimalem Aufwand zu gewährleisten sowie andererseits für die Behörde ein Instrument zum effizienten Einsatz der öffentlichen Mittel.

NaiS-Profil «Rutschungen»: Kenntnisstand ausgewählter Grundlagen

Nachfolgend werden basierend auf aktuellem Kenntnisstand Informationen zu wichtigen Grundlagen im Rahmen der Waldwirkungen hinsichtlich des Schutzes vor flachgründigen Rutschungen aufgeführt und erläutert. Es handelt sich dabei nicht um eine umfassende Auswertung aktueller wissenschaftlicher Literatur, sondern widerspiegelt insbesondere auch Erfahrungen aus der Praxis sowie unveröffentlichte Resultate rezenter und sich in Bearbeitung befindender Projekte, die sich mit der Thematik «Waldstruktur – Wasserhaushalt – Rutschungen» befassen ([WHFF](#), [SlimForest](#), [WaWaRu](#)).

Am Schluss des Dokumentes befinden sich zwei Vorschläge (WSL, HAFL) für eine NaiS-Tabelle «Rutschung» für das Anrissgebiet. Der WSL-Vorschlag stützt sich dabei auf den im Rahmen der Neugestaltung des NaiS-Profiles «Gerinneprozesse» (Zone 2). In den nachfolgenden Kapiteln [a) Waldmanagement bis o) Wurzelverstärkung] ist der aktuelle Kenntnisstand zu ausgewählten Grundlagen dargestellt und nimmt Bezug auf die einzelnen Parameter und Kriterien des zu überarbeitenden NaiS-Anforderungsprofils «Rutschungen, Erosion und Murgänge» [d.h. insbesondere i) Gefüge horizontal mit Deckungsgrad und Lückengrößen, ii) Verjüngung und iii) Stabilitätsträger].

a) Waldmanagement

Im Hinblick auf eine nachhaltige Gewährleistung der Schutzfunktion des Waldes gegen flachgründige Rutschungen sollen Eingriffe möglichst kleinräumig und, falls zielführend, mit kürzeren Eingriffsintervallen durchgeführt werden. Dabei sollen Unterholz und Gebüschvegetation möglichst intakt bleiben (Dhakal & Sidle 2003, O'Hara 2006, Sakals *et al.* 2006). Dieser Massnahme ist insbesondere im Hinblick auf die Abnahme der Wurzelverstärkung aufgrund entnommener Bäume Rechnung zu tragen. Die mechanische Bodenstabilisierung durch Wurzeln nimmt nach Holzernnte oder Absterben der Bäume aufgrund natürlicher Störungen (Feuer, Windwurf, Pilze, Borkenkäfer) in den ersten 5 Jahren über die Hälfte ab und liegt nach 10 Jahren bei ca. 5% und ist nach ca. 15 Jahren nicht mehr nachweisbar. Derweil erreichen Gebüschvegetation sowie einsetzende Verjüngung nach 15 Jahren ca. 30% der ursprünglichen Kapazität an Wurzelverstärkung³ eines ungestörten Bestandes (Vergani *et al.* 2016, Dazio *et al.* 2018). Die Erholung der Wurzelverstärkung dauert meistens mehrere Jahrzehnte, je nach Standort und Baumart (Flepp *et al.* 2021, Schwarz & May 2021).

Zudem sind in besonders instabilem Gelände, bspw. Hänge mit Neigungswinkeln $\alpha > 40^\circ$, Morphotypen mit hoher Auslösungswahrscheinlichkeit oder stark vernässten Bereichen, «Schutzzonen» auszuscheiden, in welchen die spezifischen Risiken «punktuell» vermindert werden, z.B. Beibehaltung von Sukzessionsstadien mit hoher Transpirationsrate zur Entwässerung (Rickli 2001, Schmalz *et al.* 2017). Dabei gilt es jedoch zu beachten, dass sich «heikle» Bereiche gebietsweise stark unterscheiden können. Im Falle von Sachseln (1997) waren insbesondere die Morphotypen M2 und M5 betroffen (Abb. 1), während in anderen Gebieten auch M6, M8 und M9 hohe Anfälligkeit auf flachgründige Rutschungen zeigten (Rickli *et al.* 2008).

Es ist namentlich darauf zu achten das Nebeneinander verschiedener Sukzessions- und Entwicklungsstufen in kleinräumig ausgewogener Verteilung zu fördern. Dabei spielen neben Höhenlage, Exposition, Topographie, Bodenwasserhaushalt und Neigung auch die Waldgesellschaft (Sukzessionsstadium, Artenzusammensetzung,

³ Aggregatstabilität ist in diesem Zusammenhang ein wichtiger Indikator und Voraussetzung für die Wiederherstellung einer stabilisierenden Pflanzendecke, namentlich durch Wald → bspw. mit ingenieurbioologischen Massnahmen (Bast *et al.* 2022).

Verjüngung) sowie (mikro-)klimatische Faktoren und Klimaveränderung eine maßgebliche Rolle, wie dies teilweise einerseits im NaiS-Profil «Rutschungen, Erosion, Murgänge» (Frehner *et al.* 2005) und für die Rotten- und Jungwaldpflege (Gruppenplenterung) im Gebirgs- und Schutzwald empfohlen wird (Glanzmann *et al.* 2019; [Praxishilfe für die Jungwaldpflege im Gebirgs- und Schutzwald](#)). Vorteilhaft sind schlitzförmige Öffnungen mit situationsbedingten Lückenlängen von ca. 15-50m oder in Abhängigkeit der Waldgesellschaft mit 1/2 bis 1 1/2-facher Baumlänge. Es ist jedoch fallweise abzuklären, inwiefern der statistisch basierte Grenzwert zur Auslösung flachgründiger Rutschungen von ~25m (ideal) / ~40m (minimal) überschritten werden soll (Moos *et al.* 2016) [siehe auch unter h) «[Lücken und Ränder](#)»].

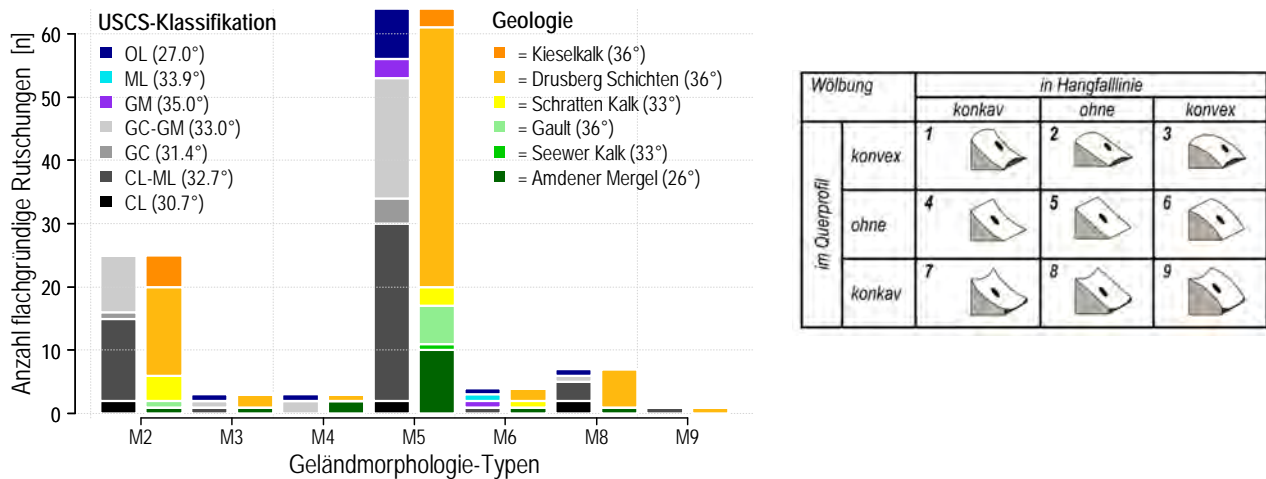


Abbildung 1: Links: Zuordnung flachgründiger Rutschungen im Falle von Sachseln (1997) zu Geländemorphologie-Typen (M1-M9) nach Rickli (2001) in Abhängigkeit der geologischen Schichten und geotechnischen Klassifizierung nach SN 670 010 b (2011)
Rechts: Illustration der Morphotypen (Rickli 2001)

b) Topographie, Bodenmorphotypen → siehe a) «[Waldmanagement](#)» und d) «[Hangneigungswinkel \$\alpha\$](#) » (Waldzustand)

c) Störungen

Im Zusammenhang mit natürlichen Störungen wie Feuer, Borkenkäfer- und Pilzkalamitäten (Holdenrieder *et al.* 2004) sowie Windwurf, werden wichtige stabilitätsfördernde Funktionen des Waldes hinsichtlich des Schutzes vor flachgründigen Rutschungen beeinträchtigt. Dazu gehören namentlich der Verlust an Interzeption, Transpiration und hydraulischer Leitfähigkeit durch Kronendach und Wurzeln sowie die mechanische und chemische Verfestigung (Wurzelverstärkung, Bodenaggregation) mittels Wurzelwerks und dem damit verbundenen Mykorrhizapilznetz.

- i. Feuer: Nach Waldbränden ist die Boden-/Hangstabilität und damit verbunden der Schutz vor flachgründigen Rutschungen insbesondere durch den Rückgang der Wurzelverstärkung betroffen (Gehring *et al.* 2019). Nach Vergani *et al.* (2017 b) reduziert sich diese mechanische Verfestigung des Bodenmaterials 4 Jahre nach dem Ereignis um bis zu 3/4 des ursprünglichen Potentials in einem ungestörten Bestand. Erhöhte Hydrophobie des Oberbodens kann zudem zu einer Zunahme von Oberflächenabfluss und somit der Erosionsanfälligkeit führen (Wohlgemuth *et al.* 2012).
- ii. Borkenkäfer: Drei bis vier Jahre nach einer Borkenkäferkalamität kommt es in betroffenen Einzugsgebieten zu einem Anstieg des Abflusses von 30±15%.

Durch den Nadelverlust kommt es zu einer markanten Reduktion der Transpirationsrate, welche nicht (oder erst zeitlich verzögert) durch die gleichzeitige Erhöhung der Evaporation wett gemacht werden kann. Zwar steigt diese an der Bodenoberfläche aufgrund der Zunahme an direkter Sonneneinstrahlung sinkt jedoch insgesamt, da die «Interzeptions-Verdunstung» am lückigen Kronendach stärker abfällt. Damit verbleibt mehr Wasser im Boden, was einen Anstieg des Grundwasserspiegels zur Folge hat und mit einem erhöhten Eintrag von Wasser in die Gerinne einhergeht (Bearup *et al.* 2014).

- iii. Sturm: Hinsichtlich Wurzelverstärkung verhält es sich ähnlich wie bei einem Kahlschlag [siehe auch unter a) «[Waldmanagement](#)»], wobei die Abnahme in Abhängigkeit des Verhältnisses von Stammbruch zu geworfenen Bäumen (Wurzelteller) stark beschleunigt sein kann. Bei vorwiegenden Stammbrüchen nimmt die Wurzelverstärkung wie bei der Holzernte kontinuierlich, bei vorwiegend geworfenen Bäumen jedoch sehr abrupt ab (Dhakal & Sidle 2003, Vergani *et al.* 2017 b, Wohlgemuth *et al.* 2017). Bei Windwurf kann auch die Bodenhydrologie beeinträchtigt sein und zu erhöhtem Bodenversagen führen.

d) Hangneigungswinkel α (Waldzustand)

Die Auswertungen der Ereignisse von Sachseln (1997), Appenzell (2002) und St. Antönien (2005) haben gezeigt, dass die Wahrscheinlichkeit der Auslösung flachgründiger Rutschungen in einem gut strukturierten Wald mit $P < 5\%$ beziffert werden kann (Tab. 1). Im Falle von Sachseln (1997) ergab ein auf Normalverteilung basierender statistischer Ansatz einen Grenzneigungswinkel von $\alpha_{lim} \leq 38^\circ$. In St. Antönien wurde mittels Klassifikations-Baum ein solcher von 36° und für Appenzell mit robusten Paarweis-Vergleichen von 35° ermittelt (Moos *et al.* 2016, Graf & Grunder 2017, Graf *et al.* 2017, 2020).

In diesen Analysen wurden alle betroffenen Bodentypen nach USCS-Klassifikation (SN670010b 2011) berücksichtigt. In der weiteren Anwendung des vorgeschlagenen Grenzneigungswinkels $\alpha_{lim} = 35^\circ$ kann somit die Charakterisierung von Waldbeständen hinsichtlich ihrer Gefährdung durch flachgründige Rutschungen unabhängig der geotechnischen Eigenschaften des Bodens vorgenommen werden. Diese beträchtliche Vereinfachung ermöglicht es eine flächendeckende Beurteilung von Waldbeständen hinsichtlich ihres Schutzpotentials ausschliesslich basierend auf dem Bestandescode mittels Fernerkundung durchzuführen. Voraussetzung dafür sind aktuelle und hochaufgelöste Terrain- und Vegetations-Höhenmodelle – für die geotechnischen Parameter ist dies nicht der Fall.

Tabelle 1: Anteile [n, %] von flachgründigen Rutschungen in den Untersuchungsgebieten Sachseln (1997), Appenzell (2002) und St. Antönien (2005) an Hängen mit einem Neigungswinkel $\alpha \leq 35^\circ$ in Abhängigkeit des Waldzustandes.

	Waldzustand		Summe Σ [n, %]	alle Rutschungen [n, %]	
	gut	schlecht		gut	schlecht
Sachseln 1997	n=2, 10.0%	n=17, 90.0%	n=19, 100%	14 / 12.8%	95 / 87.2%
Appenzell 2002	n=1, 5.0%	n=20, 95.0%	n=21, 100%	1 / 3.1%	31 / 96.9%
St. Antönien 2005	n=1, 5.9%	n=16, 94.9%	n=17, 100%	1 / 4.5%	22 / 95.5%
$\Sigma_{Total} n$	4	53	57	16	148
%-Anteil	7	93	100	9.8	90.2

Alternativ können Auswirkungen verschiedener Zustände des Waldes (BHD, Anzahl Bäume/ha, dominierende Baumarten) sowie unterschiedliche Bodentypen und Rutschmächtigkeiten mit dem Tool «SlideforNET» (<https://www.ecorisq.org/slide-for-net-en>, Schwarz *et al.* 2014) berechnet und damit probabilistisch die Grenzneigungswinkel definiert werden.

e) Bestandescode (Waldstruktur, -zustand)

Nachfolgend sind empfohlene Grenzwerte für die Bestandescode-Parameter eines «optimalen Schutzwaldes» aufgeführt. Die «Entwicklungsstufe»⁴ beinhaltet Stangenholz und ältere Bestände, die «Mischung» wo immer möglich (Höhenstufe) einen Nadelholzanteil <80%, die «Schichtung» sollte mehrschichtig oder stufig sein sowie der «Deckungsgrad» in Abhängigkeit der Höhenstufe und Schichtung Werte von mehr als (40%) 60% und weniger als 80% (90%) aufweisen. So kann in der subalpinen Stufe auch ein minimaler Deckungsgrad von 40% ausreichend sein, falls der Gesamtdeckungsgrad (gesamte Vegetation) ≥80% ist (Graf *et al.* 2020).

Ein sehr hoher Deckungsgrad (>80%), kann sich jedoch 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 (Tab. 2). Beim Deckungsgrad sollte im Zusammenhang mit der Bewirtschaftung ferner die Topographie (Morphotypen) berücksichtigt und in ausgesprochen rutschanfälligen «Schutzzonen» Risiko spezifisch eingegriffen werden [siehe auch unter a) «Waldmanagement»].

Tabelle 2: Bestandescode-Parameter nach Rickli *et al.* (2008) mit zusammengefassten Faktorstufen (weisse Zahlen).

- 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 mit ungenügendem Schutz vor flachgründigen Rutschungen
- Olive:** Stufen in Abhängigkeit der Höhenlage und Schichtung mit «optimalem» respektive ungenügendem Schutz vor flachgründigen Rutschungen (siehe im vorhergehenden Text)

Schichtung		Entwicklungsstufe	
0xxx	unbestockt	x0xx	unbestockt
1xxx	1 einschichtig	x1xx	1 Jungwuchs / Dichtung
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%)

⁴ Anstelle der Entwicklungsstufe sind Informationen zu Sukzessionsstadien aussagekräftiger → [3^D-Diversität](#)

f) Geotechnik (Reibungswinkel und Kohäsion)

Über 90% der flachgründigen Rutschungen in Sachseln (1997), Appenzell (2002) und St. Antönien (2005) an Hängen mit einem Neigungswinkel $\alpha \leq 35^\circ$ fanden in schlecht strukturierten Wäldern und unabhängig vom geotechnischen Bodentyp statt. Ebenfalls mehr als 90% dieser flachgründigen Rutschungen ereigneten sich in Böden, deren Stabilität (vorwiegend) durch die Saugspannung (S) beeinflusst wird⁵. Im Hinblick auf die Scherparameter ist die Kohäsion c' entsprechend hoch und relevant. Der Anteil an reinen Reibungsböden (R), bei welchen für die Sicherheit gegen Abgleiten insbesondere der Reibungswinkel Φ' massgebend ist, beläuft sich auf <2%. Zudem waren nur 7% der gut strukturieren Wälder von flachgründigen Rutschungen mit $\alpha \leq 35^\circ$ betroffen (Tab. 3).

Tabelle 3: Anteile [n, %] flachgründiger Rutschungen in den Gebieten Sachseln (1997), Appenzell (2002) und St. Antönien (2005) an Hängen mit einem Neigungswinkel $\alpha \leq 35^\circ$ in Abhängigkeit der dominierenden Kräfte gegen Abgleiten, namentlich Reibung (R), Saugspannung (S) sowie Reibung+Saugspannung (R/S).

	Reibung [R]	Saugspannung [S]	Kombination [R/S]	alle [n/%]	$\alpha \leq 35^\circ$ [n/%]
Sachseln 1997	n=0, 0.0%	n=73, 67.0%	n=36, 33.0%	109 / 100	*19 / 17.4
Appenzell 2002	n=2, 6.2%	n=29, 90.6%	n=1, 3.1%	32 / 100	*21 / 65.6
St. Antönien 2005	n=1, 4.3%	n=17, 73.9%	n=5, 21.7%	23 / 100	*17 / 73.9
$\Sigma_{\text{Total n}}$	3	119	42	164	54
%-Anteil	1.8	72.6	25.6	100	32.9

*: in gut strukturierten Wäldern fanden davon ($\alpha \leq 35^\circ$) statt:

- Sachseln 1997: 2 von 19 \equiv 10.5% \Rightarrow 1.8% von allen Rutschungen (109)
- Appenzell 2002: 1 von 21 \equiv 4.8% \Rightarrow 3.1% von allen Rutschungen (32)
- St. Antönien 2005: 1 von 17 \equiv 5.9% \Rightarrow 4.3% von allen Rutschungen (23)
- alle Gebiete: 4 von 57 \equiv 7.0% \Rightarrow 2.4% von allen Rutschungen (164)

g) Geologie vs Geotechnik [siehe auch unter d) «[Hangneigungswinkel \$\alpha\$ \(Waldzustand\)](#)» und f) «[Geotechnik](#)»]

Die pauschale Verknüpfung geotechnischer Kennwerte, insbesondere von Scherparametern (Φ' , c') mit geologischen Einheiten gestaltet sich nach wie vor problematisch. Im Falle der Unwetter von Sachseln (1997) hat sich gezeigt, dass die fixe Zuordnung eines Reibungswinkels Φ' zu den von flachgründigen Rutschungen betroffenen geologischen Schichten mit grossen Fehlern behaftet ist (Abb. 2). So lag zum Beispiel der Median der in den Bodenproben ermittelten Reibungswinkel Φ' in den Schichten Amdener Mergel, Gault, Drusberg Kieselkalk bei ca. 33° (Abb. 2), während die fixen Werte für Amdener Mergel mit 26° und für die anderen Schichten mit 36° angenommen wird (Liener 2000).

⁵ Die Boden-Klassifikation fand nur stichprobenhaft mit exakten Labormethoden statt. Grösstenteils wurde diese gutachtlich im Felde durchgeführt. Entsprechend können gewisse Fehlzuordnungen nicht ausgeschlossen werden.

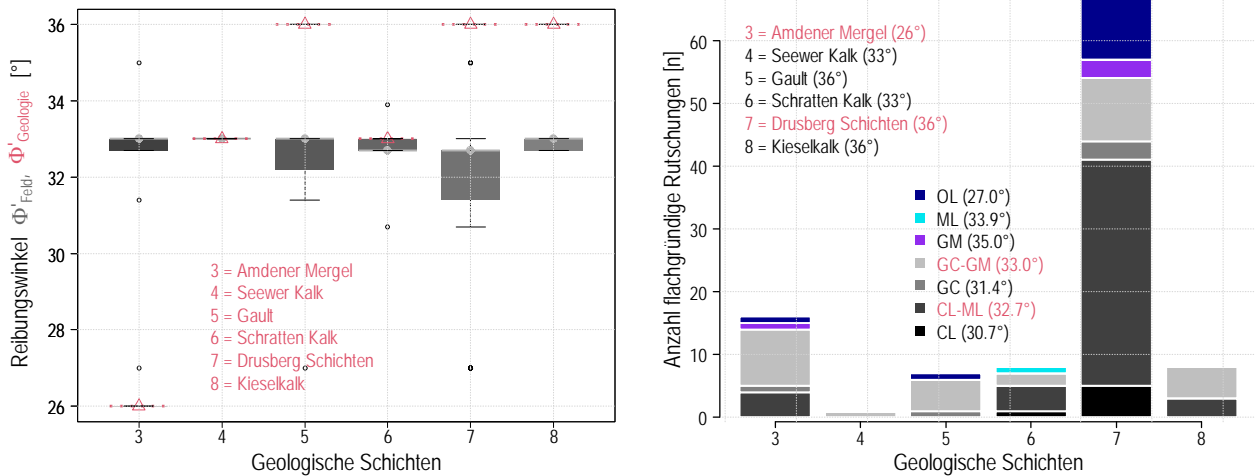


Abbildung 2: Links: Zuordnung von **fixen Reibungswinkeln Φ'** zu geologischen Schichten (Liener 2001) im Falle des Ereignisses von Sachseln (1997) sowie die Streuung der effektiven Φ' (Boxplots) der durch Laborversuche und Feldansprachen ermittelten Werte flachgründiger Rutschungen in den entsprechenden Schichten (Rickli 2001).

Rechts⁶: Verteilung der verschiedenen, durch flachgründige Rutschungen betroffenen Bodentypen nach USCS (SN 670 010 b 2011) in den entsprechenden geologischen Schichten sowie **Schichten (Amdener Mergel, Drusberg Schichten) mit den grössten Abweichungen im Vergleich zu den dominierenden USCS Bodentypen (GC-GM, CL-ML).**

Die Zuordnung eines fixen Φ' -Wertes respektive geotechnischer Bodentypen zu geologischen Einheiten steht somit auf wackligen Füßen. Folglich nehmen Boden-Stabilitäts-Modelle wie beispielsweise SliDisp⁺ (Tobler *et al.* 2013) grosse Unsicherheiten in Kauf (siehe bspw. Margottini *et al.* 2013).

Da die notwendigen geotechnischen Informationen nicht in der erforderlichen Auflösung vorhanden sind, ist es nicht möglich, wissenschaftlich abgesichert einen entsprechenden Grenzhangneigungswinkel α_{lim} zu definieren [siehe auch unter **e)** «[Bestandescode](#)»].

Allerdings können probabilistisch basierte Modelle wie «SlideforMAP» (Van Zadelhoff *et al.* 2021) einen Teil der Unsicherheit in den Berechnungen berücksichtigen.

h) Lücken und Ränder

- i. Lücken: Die Untersuchungen von Moos *et al.* (2016) zeigten, dass von den 46 in St. Antönien untersuchten, flachgründigen Rutschungen die Hälfte in Waldlücken in unzureichend strukturierten Beständen mit einer Länge in Falllinie von $L > 40m$ stattfanden und 43 ($\approx 94\%$) mit $L > 20m$. In den stabilen Kontrollflächen wiesen 6 Lücken (13%) eine Länge von $L > 40m$ auf und die Hälfte eine solche von $L > 20m$. Wird diesem Umstand Rechnung getragen und die zulässige Lückenzlänge mit $L \leq 40m$ festgelegt, sollte die Hangneigung α als nächster Entscheidungsparameter mit $\alpha \leq 36^\circ$, respektive unter Berücksichtigung geotechnischer Auswertungen mit $\alpha \leq 35^\circ$, gewählt werden, um in gut strukturierten Wäldern nach wie vor eine möglichst hohe Sicherheit gegen Abgleiten gewährleisten zu können. Die Untersuchung hat ebenso gezeigt, dass die Lückenbreite keinen signifikanten Einfluss hat. Entsprechend sollen Pflege- und Unterhalts-Eingriffe geplant und durchgeführt werden. Im Falle natürlich entstandener Lücken, beispielsweise durch Sturmschäden oder Pilz-/Borkenkäfer-Kalamitäten, sind umgehend Massnahmen zu treffen, mittels Aufforstungen und/oder Ingenieurbiologie (Bast *et al.* 2022), unter

⁶ Siehe Anhang Abbildung 3

Berücksichtigung spezifischer Auswirkungen der Klimaveränderung [siehe auch unter **j**) «Klimaveränderung»].

Eine kritische Lückenlänge als Abstand zwischen Baumstämmen kann beispielsweise mit dem Tool «SlideforNET» (Schwarz *et al.* 2014) berechnet werden.

- ii. Ränder: Abrupte (gradlinige) Übergänge zwischen und innerhalb von Vegetationstypen (z. B. Waldlücken) und entlang von Geländeübergängen (Kanten) sollen möglichst vermieden werden. Dagegen sind überlappende, mosaikförmige und verzahnte Strukturen bei Pflegeeingriffen nach Möglichkeit zu fördern, sowohl horizontal als auch vertikal (Wurzelraum). Dabei soll auf eine möglichst heterogene Geländemorphologie geachtet werden mit variablem Mikorelief auch im oberflächennahen Bodenbereich.

j) Evapo-Transpiration, hydraulische Leitfähigkeit [siehe auch unter c) «Störungen»]

- i. Evapo-Transpiration: Die Evapo-Transpiration ist eng an die Interzeption gekoppelt. Sie wird einerseits durch abiotische Faktoren wie Strahlung, Feuchtigkeit, Temperatur und Wind beeinflusst sowie andererseits durch den Deckungsgrad der Vegetation, die Artenzusammensetzung und deren Entwicklungsstand. Was die Pflanzen spezifischen Faktoren betrifft, existiert wiederum eine positive Beziehung zwischen der transportierten Wassermenge und der Biomasse, widerspiegelt durch Wurzeln und Spross, wobei letzterer die dominierende Triebkraft ist.
- ii. Hydraulische Leitfähigkeit (Konduktivität): Ein weiterer von der Biomasse und insbesondere Wurzellänge abhängiger Prozess im Rahmen des Wassertransports ist die hydraulische Leitfähigkeit. Die dadurch partielle Erhöhung der Bodenfeuchtigkeit oberflächennaher, trockenerer Bodenbereiche gewährleistet damit insbesondere während niederschlagsarmen Perioden die Funktionalität von Feinwurzeln und Mikroorganismen. Ebenso dient dieser Feuchtigkeitpuffer als zusätzliche Quelle für die Transpiration. Zudem verbessert das in den Oberboden verlagerte Wasser die Verfügbarkeit wasserlöslicher Nährstoffe, welche dort reichlich vorhanden sind. Damit einhergehend werden sowohl Wachstum und Überleben der Pflanzen als auch der assoziierten Organismen erhöht (Querejeta *et al.* 2008, Bauerle *et al.* 2008).
Zusätzlich kann eine Erhöhung der hydraulischen Leitfähigkeit zur Hangstabilität beitragen, wenn dadurch der Porenwasserdruck an potentiellen Scherflächen reduziert wird (Stokes *et al.* 2014).

Im Hinblick auf die Bodenentwässerung ergänzen sich diese von der Biomasse abhängigen Prozesse und steigern die Effizienz mit fortschreitender Sukzession im Sinne einer positiven Rückkopplungs-Beziehung. Auf bewachsenem Boden ist die gesamte Verdunstung nach Niederschlag aufgrund der Interzeptionsverdunstung relativ hoch, während Trockenphasen aufgrund der gehemmten Bodenverdunstung jedoch gering. Die oberirdische Biomasse übernimmt, zusammen mit der Streuschicht, also eine zusätzliche Pufferfunktion für die Bodenfeuchtigkeit (Gigon 1975).

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, insbesondere bei

trockenen Verhältnissen, zu einem bedeutenden Anstieg der Saugspannung, was wiederum die Boden- und Hangstabilität erhöht (Yildiz *et al.* 2019). 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. Dabei soll die Auswahl und Förderung von Laubgehölzen hinsichtlich des Einflusses der Klimaveränderung vollzogen werden.

j) Klimaveränderung

Im Rahmen der Auslösung flachgründiger Rutschungen sind durch das sich ändernde Klima, mit steigenden Temperaturen sowie Auswirkungen auf das Niederschlagsregime, insbesondere Bodenhydrologie und Vegetation betroffen. In Abhängigkeit der Wasserverfügbarkeit können namentlich Laubgehölze in höhere Lagen vordringen. Damit kann, im Rahmen der Bestrebungen gut strukturierte Bestände zu fördern, für den Waldzustand einerseits der Bestandescode-Parameter «Mischung» und andererseits die chemisch-mechanische Boden-Stabilisierung sowie -Entwässerung verbessert werden [siehe auch unter i) «[Evapo-Transpiration, hydroaulische Leitfähigkeit](#)»].

Kritischen Phasen unkontrollierter Ablösung⁷ nicht resistenter Arten (bspw. Fichte) kann durch gezielte, kleinräumige Pflegeeingriffe mit nachfolgenden Aufforstungs-Intervallen, respektive ingenieurbioologischen Massnahmen entgegengewirkt werden (Bast *et al.* 2022).

- i. Vegetation, Baumarten:
 - Laubgehölze in Höhenlagen in Abhängigkeit der Klimaauswirkungen, Wurzelmorphologie (Tief-, Herzwurzler) und Phänologie (frühaustreibende Arten) fördern \leftrightarrow Wasserverfügbarkeit!!!
 - Mögliche Zielbaumarten können unter anderen Bergahorn, Traubenkirsche und Vogelbeere sein sowie die Tanne
 - Trockenheit fördert die Entwicklung von Schädlingen und reduziert Widerstandskraft der Bäume (bspw. Buche)
 - Durch die Veränderung des Baumartenspektrums ändert sich auch die Mykoflora, sowohl was die Symbionten (Mykorrhiza) als auch die Saproben betrifft. Letztere sind essentiell für Holzabbau und somit massgeblich für die Zusammensetzung der Nährstoffe im Boden verantwortlich.

- ii. Bodenhydrologie:
 - steigende Temperaturen erhöhen generell die Verdunstung, mit lokalen Unterschieden je nach Wasserverfügbarkeit (BAFU 2021).
 - abnehmende Niederschläge in Kombination mit steigender Verdunstung in den Sommermonaten führen zu trockeneren Böden
 - Förderung der Wasserrückhaltekapazität \rightarrow bei Pflegeeingriffen (Aufforstung, Ingenieurbioologie) auf Aggregatstabilität fokussieren (Wurzellänge, Mykorrhiza-Hyphennetzwerk)

⁷ Kontinuierliche und langanhaltende sowie episodische und plötzliche Prozesse.

-Wasserspeicherungspotential hängt von zahlreichen Bodeneigenschaften ab, wird aber hauptsächlich durch die Durchwurzelungsdichte bestimmt → je höher desto höher das Wasserspeichervermögen (Lange *et al.* 2012)

k) Stabilitätsträger (Bestandesstabilität)

Es existieren zahlreiche Hinweise/Quellen, dass nach Waldschäden (Sturm, Borkenkäfer, Hagel, Nasseschnee, etc.) vermehrt Rutschungen auftreten (z.B. Phillips *et al.* 2021, Bebi *et al.* 2019, Rickli *et al.* 2019). Im Entstehungsgebiet von flachgründigen Rutschungen sind deshalb stabile Bestandeselemente (Stabilitätsträger) wie Gerüstbäume, Kleinkollektive oder Rotten (Ott *et al.* 1997, Frehner *et al.* 2005) sehr wichtig für die Gewährleistung einer ausreichenden Bestandesstabilität, namentlich hinsichtlich Windwurf und Nasseschnee. Im derzeit gültigen Anforderungsprofil «Rutschungen, Erosion, Murgänge» steht für das Entstehungsgebiet bei den Anforderungen «minimal» nichts zu den Stabilitätsträgern; bei den Anforderungen ideal «keine schweren und windwurfgefährdeten Bäume». Hier könnte allenfalls «schwer» gestrichen werden, da das Gewicht der Bäume an und für sich (nicht mehr) als rutschungsfördernd erachtet wird (Schwarz *et al.* 2018). Zudem könnte sowohl für die Anforderungen «minimal» als auch «ideal» ergänzt werden: «Anforderungen (bez. Stabilitätsträger) aufgrund des Standortstyps erfüllt».

Bei den Anforderungen aufgrund des Standortes sind in der Regel die Kriterien Kronenlänge, Schlankheitsgrad und Stand/Verankerung zu beurteilen. Je nach Anforderungen («minimal», respektive «ideal») sind dabei in den verschiedenen Standortstypen andere (Grenz)Werte zu erfüllen.

l) Förderfaktoren (Geologie)

Bei der Beurteilung der Gefahr durch spontane flachgründige Rutschungen und Hangmuren (z.B. für Gefahrenkarten oder Gutachten) wird der Wald bzw. die Vegetation bei den sogenannten «Förderfaktor(en)» aufgeführt (BAFU 2016, Loup & Wohlwend 2020, Wyss *et al.* 2019, FAN-Praxiskurs 2019 «Modul Rutschungen»). Gemäss BAFU (2016) gehören zu den Förderfaktoren unter anderem die Geländeform, Durchlässigkeits-Diskontinuitäten (im Bodenprofil), die hydrogeologischen Verhältnisse (z.B. Vernässungen, Hang- und Bergwasseraustritte etc.), die Landnutzung wie Wald und Freiland, resp. der Zustand des Waldes (z.B. Waldschäden durch Sturm oder Borkenkäfer) sowie anthropogene Einflüsse (z.B. defekte Drainagen, übersteile Hanganschnitte, Strassen, etc.).

Bei der Bestimmung der Wahrscheinlichkeit von flachgründigen Rutschungen sind nach BAFU (2016) einerseits die Hangneigungen dokumentierter Rutschungen (Inventare, Geländespuren) wichtig (vgl. auch Wyss *et al.* 2019). Andererseits fließen auch die oben erwähnten Förderfaktoren ein, zum Beispiel eben auch der Zustand des Waldes. Bis zum jetzigen Zeitpunkt ist jedoch nicht klar und nachvollziehbar festgelegt, wie und in welchem Ausmass diese Förderfaktoren einfließen sollen. Die entsprechende Diskussion ist immer noch im Gange (vgl. z.B. Loup & Wohlwend 2020 in FAN-Agenda 2/2020 oder auch Workshop FAN AG «Hangmurenbeurteilung» vom 2.6.2022 in Bern).

m) Niederschlag (Einfluss Struktur/Waldzustand auf Auslösung)

Vorbemerkung: nachfolgend wird nur der Einfluss des Waldzustandes auf die Infiltration (nach Abzug der Interzeption) und auf die Boden-Wasserflüsse betrachtet. Der Einfluss der Waldstruktur auf die Evapotranspiration wird in Kapitel i) Evapotranspiration, hydraulische Leitfähigkeit behandelt.

Basierend auf Ereignis- und Niederschlagsdaten konnten in der Vergangenheit sogenannte Niederschlagsschwellenwerte für die Auslösung von Hangprozessen hergeleitet werden (z.B. Guzzetti *et al.* 2007, Leonarduzzi *et al.* 2017, 2021). Dabei wurden auch Schwellenwerte für unterschiedliche Prozesse (Rutschungen, Murgänge) und Regionen (Europa, Italien, Asien, weltweit, ...) erarbeitet. Im Gegensatz dazu liegen für unterschiedliche Bodenbedeckungen und Vegetationstypen keine spezifischen Schwellenwerte vor. Allgemein sind Niederschlags-Schwellenwerte für Gefahrenbeurteilungen und Warnungen nur beschränkt nutzbar (zu viele Fehlalarme). Aus diesem Grund wird bei der Entwicklung von Warnsystemen vor Rutschungen aktuell ein anderer Ansatz verfolgt: Überwachung der Bodenfeuchtigkeit und deren Nutzung bei Warnungen vor Rutschungen (z.B. Wicki *et al.* 2020 und 2021).

In Masi *et al.* (2021) sind Hinweise zu den hydrologischen Einflüssen von Pflanzen auf die Hangstabilität aufgeführt: Beeinflussung der Saugspannungen (Evapotranspiration), Interzeption, Infiltration von Niederschlagswasser sowie der Wasserflüsse im Boden. Im Fokus sind nachfolgend der Einfluss der Waldstruktur auf die Interzeption, die Infiltration und die Wasserflüsse im Boden. Der Einfluss von verschiedenen Waldzuständen auf die Evapotranspiration ist in einem separaten Kapitel dargestellt [vgl. i) «Evapo-Transpiration, hydraulische Leitfähigkeit»].

In Masi *et al.* (2021) werden auch der Zusammenhang zwischen der Waldstruktur und dem Porensystem des Bodens erwähnt. Beschrieben wird im Weiteren der Einfluss von Waldschäden (Vermorschung Wurzeln, alte Wurzelkanäle) auf die Wasserflüsse im Boden. Literatur dazu findet sich im fachlichen Schlussbericht zum WHFF-Projekt (Graf *et al.* 2022). Weitere Aspekte zum Einfluss der Durchwurzelung, resp. des Waldzustandes auf den Wasserhaushalt sind in den Arbeiten von B. Lange aufgeführt (z.B. Lange *et al.* 2012).

Die hydrologische Wirkung der Vegetation ist unbestritten (Arnone *et al.* 2016, Gonzalez-Ollauri 2017). Zu deren räumlich-zeitlichen Ausdehnung sowie Intensität liegen allerdings nach wie vor nur spärliche Informationen vor.

n) Transit- und Ablagerung von Hangmuren

In den Anforderungsprofilen werden der potentielle Beitrag des Waldes sowie die Anforderungen «minimal» und «ideal» für die verschiedenen Orte spezifiziert, für die das Anforderungsprofil gelten soll. Dabei wird beim Profil «Rutschungen, Erosion und Murgänge» nach Entstehungs- und Infiltrationsgebiet unterschieden, beim Profil «Steinschlag» zwischen Entstehungs- sowie Transit-, Auslauf- und Ablagerungsgebiet.

Im neuen Profil «Gerinneprozesse» wird nach Abflussbereich und Gerinneeinhang differenziert. Im Zusammenhang mit flachgründigen Rutschungen und Hangmuren wirkt sich der Wald nicht nur auf die Entstehung, sondern bis zu einem gewissen Grad auch auf den Ablauf und die Ablagerung aus (Zuidema *et al.* 2021). Diesbezüglich konnten Dorren *et al.* (2022) kürzlich zeigen, dass für eine effektive Wirkung

beispielsweise eine Kombination von minimalem DG (>50%) und BHD (>20cm) der Bäume wirkungsvoll sind.

Inwieweit diese Prozesse in Transit- und Ablagerungszone in das NaiS-Profil «Rutschungen» integriert werden können – z.B. über die Waldstruktur (Bestandescodex-Parameter), respektive andere für das NaiS-Profil «Rutschungen» geeignete Parameter – sollte in weiteren Untersuchungen abgeklärt werden.

o) Wurzelverstärkung

Die Wurzelverstärkung im Entstehungsgebiet flachgründiger Rutschungen ist ein dominierender Vegetationseffekte (Simon & Collison 2002, Sidle & Ochiai 2006, Stokes *et al.* 2014, McGuire *et al.* 2016, Kim *et al.* 2017, Liu *et al.* 2021, Masi *et al.* 2021, van Zadelhoff *et al.* 2022). Ein Grund dafür ist die Dokumentation aus der Literatur, dass flachgründige Rutschungen vor allem bei gesättigten Bedingungen des Bodens bei der Scherfläche stattfinden (Sidle & Ochai 2006, Askarinejad *et al.* 2012, Lehmann 2013, Askarinejad *et al.* 2018, Bordoni *et al.* 2015). Ein grosser Beitrag des Wasserzuflusses ist in den meisten Fällen durch den lateralen Zwischen- oder Oberflächenabfluss der hydrologisch beitragenden Flächen hangaufwärts gegeben (Leonarduzzi *et al.* 2021). Die räumliche Verteilung dieser Zonen ist auf der Hinweiskarte des Oberflächenabflusses abgebildet (map.geo.admin.ch). Da exakte räumlich-zeitliche Informationen zukünftiger Rutschungen unbekannt sind, ist die Abgrenzung zwischen «Infiltrations-» und «Anrissgebiet» äusserst schwierig. Entsprechend sind weitere stabilisierende Prozesse zu berücksichtigen namentlich (boden-)hydrologische wie Interzeption, Evapo-Transpiration und hydraulische Leitfähigkeit (Sidle *et al.* 2006, Sidle & Bogaard 2016, Gonzalez-Ollauri 2017).

Einen ausführlichen Überblick zum Wissensstand bezüglich Wurzelverstärkung ist in nachfolgenden Publikationen zu finden:

- Zusammenfassung: Schwarz 2019,
- Entwicklung und Validierung des Wurzelverstärkungsmodells RBM: Schwarz *et al.* 2011, Giadrossich *et al.* 2012, Schwarz *et al.* 2013, Giadrossich *et al.* 2019
- Quantifizierung der Wurzelverstärkung unter Druck: Schwarz *et al.* 2015
- Räumliche Modellierung der Wurzelverstärkung: Schwarz *et al.* 2012, Vergani *et al.* 2016, van Zadelhoff *et al.* 2021
- Zeitliche Dynamik der Wurzelverstärkung: Vergani *et al.* 2014, Vergani *et al.* 2017 (a,b), Gehring *et al.* 2019, Flepp *et al.* 2021
- Quantifizierung der Wurzelverstärkung für verschiedene Baumarten: Vergani *et al.* 2014, Vergani *et al.* 2017 (a), Dazio *et al.* 2018, Gehring *et al.* 2019.
- Implementierung der Wurzelverstärkung in Hangstabilitätsmodelle: Schwarz *et al.* 2014, Cohen und Schwarz 2017, van Zadelhoff *et al.* 2021

Durchwurzelung und Wurzelverstärkung sind stark von den Baumdimensionen auf Bestandesebene abhängig (Cohen & Schwarz 2017). Als Grundlage für die Formulierung der Anforderungsprofile dienten Berechnungen mit dem Modell «SlideforNET» (Schwarz *et al.* 2014). Damit kann beispielsweise die notwendige Wurzelverstärkung je nach Hangneigung α für eine Stabilisierung (SF=1) bei einem Deckungsgrad 50% (Minimalprofil) und 90% (Idealprofil) für alle möglichen Kombinationen von Rutschungen der «[WSL Hangmuren Datenbank](#)» berechnet werden (Tabelle 4; siehe auch HAFL-Bericht «Vorschlag für ein neues Nais-Profil Rutschungen»). Dadurch können Minimal- und Idealprofile quantitativ formuliert werden, wodurch die waldbaulichen Empfehlungen besser nachvollziehbar sind als bei rein gutachtlichen Grundlagen.

Tabelle 4: Empfohlene Baumdimensionen für eine genügende Stabilisierung je nach Hangneigung.

Neigung (°)	Minimaler BHD (cm) – DG (%) > 50%	Idealer BHD (cm) – DG (%) > 70%
<25	>10	>10
25-30	>15	>20
30-35	>20	>47
35-40	>25	>55
>40	>35	>55

Literaturverzeichnis

- Amone E, Caracciolo D, Noto LV, Preti F, Bras LR (2016) Modeling the hydrological and mechanical effect of roots on shallow landslides. *Water Resources Research*, 52: 8590-8612, [doi:10.1002/2015WR018227](https://doi.org/10.1002/2015WR018227)
- Badoux A, Andres N, Techel F, Hegg C (2016) Natural hazard fatalities in Switzerland from 1946 to 2015. *Natural Hazards and Earth System Science*, 16: 2747-2768. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-2747-2016>
- BAFU (2016) Schutz vor Massenbewegungsgefahren. Vollzugshilfe für das Gefahrenmanagement von Rutschungen, Steinschlag und Hangmuren. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1608, 98 S.
- BAFU (2021) Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer. Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 2101, 134 S.
- Bast A, Graf F, Gärtner H (2022) Das Arieschtobel: Ein Freiluftlabor für den ingenieurbioologischen Hangverbau. *Ingenieurbiologie* 3: 29-38.
- Bast A, Wilcke W, Graf F, Lüscher P, Gärtner H (2016) Does mycorrhizal inoculation improve plant survival, aggregate stability, and fine root development on a coarse-grained soil in an alpine eco-engineering field experiment? *Journal of Geophysical Research G: Biogeosciences*, 8: 2158-2171, <https://doi.org/10.1002/2016JG003422>
- 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.
- Bezzola GR, Hegg C Ed (2008) Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2 - Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrendrundlagen. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0825, 429 S.
- Askarinejad A, Casini F, Bischof P, Beck A, Springman SM (2012) Rainfall induced instabilities: a field experiment on a silty sand slope in northern Switzerland, *rivista italiana di geotecnica*, 12: 50-71, <http://www.associazionegeotecnica.it/rig/archivio> (last access: 20 April 2021)
- Askarinejad A, Akca D, Springman SM (2018) Precursors of instability in a natural slope due to rainfall: a full-scale experiment, *Landslides*, 15: 1745-1759, <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0994-0>
- Bast A, Graf F, Gärtner H (2022) Der Arieschtobel: Ein Freiluftlabor für den ingenieurbioologischen Hangverbau. *Ingenieurbiologie*, *Ingenieurbiologie* 2: 29-38.
- Bauerle TL, Richards JH, Smart DR, Eissenstat DM (2008) Importance of internal hydraulic redistribution for prolonging the lifespan of roots in dry soil. *Plant, Cell and Environment* 31: 177-186.
- Bearup LA, Maxwell RM, Clow DW, McCray JE (2014) Hydrological effects of forest transpiration loss in bark beetle-impacted watersheds. *Nature Climate Change* 4: 481-486, www.nature.com/natureclimatechange
- 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.
- Begemann W, Schiechl M (1994) *Ingenieurbiologie - Handbuch zum ökologischen Wasser- und Erdbau*. Bauverlag GmbH, Wiesbaden, Berlin, 203 S.
- Böll A, Graf F (2001) Nachweis von Vegetationswirkungen bei oberflächennahen Bodenbewegungen - Grundlagen eines neuen Ansatzes. *Schweiz. Z. Forstwes.* 152: 1-11.
- Bordoni M, Meisina C, Valentino R, Lu N, Bittelli M, Chersich S (2015) Hydrological factors affecting rainfall induced shallow landslides: From the field monitoring to a simplified slope stability analysis, *Eng. Geol.* 19.
- Brönnimann S, Rajczak J, Fischer EM, Raible CC, Röhrer M, Schär C (2018) Changing seasonality of moderate and extreme precipitation events in the Alps. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 18: 2047-2056. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2047-2018>
- Cohen D, Schwarz M (2017) Tree-roots control of shallow landslides. *Earth Surf. Dynam.* 5: 451-477.
- Dazio EM, Conedera M, Schwarz M (2018) Impact of different chestnut coppice managements on root reinforcement and shallow landslide susceptibility. *For. Ecol. and Manag.* 417: 63-76.
- Deguchi A, Hattori, Park HT (2006) The influence of seasonal changes in canopy structure on interception loss: Application of the revised Gash model. *J. Hydrol.* 318: 80-102.
- Dhakal AS, Sidle RC (2003) Long-term Modelling of Landslides for different Forest Management Practices. *Earth Surface Processes and Landforms* 28: 853-868, [DOI: 10.1002/esp.499](https://doi.org/10.1002/esp.499)
- Dorren L, Albaba A, Hollard N, Moos C (2022) Wald als Hangmurenbrecher - Quantifizierung der Wirkung verschiedener Waldstrukturen im Transit- und Ablagerungsgebiet von Hangmuren als Grundlage für NaiS. Schlussbericht WHFF. BFH - HAFL, Zollikofen
- FAN Praxiskurs (2019) Modul «Rutschungen»
- Flepp G, Robyr R, Scotti F, Giadrossich F, Conedera M, Vacchiano G, Fischer C, Ammann P, May D, Schwarz M (2021) Temporal Dynamics of Root Reinforcement in European Spruce Forests. *Forests*, 12(6):815.
- 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.
- Gariano S, Guzzetti F (2016) Landslides in a changing climate. *Earth-Science Reviews* 162: 227-252. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.011>
- Gehring E. M., Conedera, J., Maringer, F., Giadrossich, E., Guastini, M., Schwarz (2019). Shallow landslide disposition in burnt European beech (*Fagus sylvatica* L.) forests. *Nature - Scientific reports*, 1: 1-11.
- Giadrossich, F. M., Schwarz, F., Preti, D., Or (2012). Mechanical interaction between neighboring roots during pullout tests. *Plant and Soil*, 367 (1-2): 391-406.
- Giadrossich F, Cohen D, Schwarz M, Ganga A, Marrosu R, Pirastru M, Capra GF (2019) Large roots dominate the contribution of trees to slope stability. *ESPL*, 44: 1602-1609.
- Gigon A (1975) Über das Wirken der Standortsfaktoren; kausale und korrelative Beziehungen in jungen und in reifen Stadien der Sukzession. In: *Mitt. der eidg. Anst. für forstl. Versuchswesen*, Bd. 51: 25-36.

- Glanzmann L, Schwitter R, Zürcher S (2019) Jungwaldpflege im Gebirgs- und Schutzwald. *Wald und Holz* 9: 22-25.
- Glanzmann L, Zürcher S, Amman P, Thormann JJ (2022) Waldbau in buchendominierten Schutzwäldern. Praxishilfe Fachstelle für Gebirgswaldpflege, 16 S. https://www.gebirgswald.ch/tl_files/gebirgswald/de/01_Dokumente_GWP/Praxishilfe_Buchen-SW_2022/Praxishilfe-Waldbau-d-web.pdf
- Gonzalez-Ollauri A, Mickovski SB (2017) Hydrological effect of vegetation against rainfall-induced landslides. *Journal of Hydrology*, 549: 374-387, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.014>
- Graf F, Bebi P, Braschler U, De Cesare G, Frei M *et al.* (2017) Pflanzenwirkungen zum Schutz vor flachgründigen Rutschungen. *WSL Bericht*, 56. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, pp. 42.
- Graf F, Bast A, Rickli C, Bebi P (2020) Schutz – Wald – Struktur: Einfluss auf flachgründige Rutschungen. *Ingenieurbiologie* 3: 14-20.
- Graf *et al.* (2022) WHFF-CH Projekt 2017.19: Schützen gut strukturierte und gepflegte Wälder besser? Interaktive Karten zur Wirkung gegen flachgründige Rutschungen. Unveröffentlichter «Fachlicher Abschlussbericht», 32 S.
- 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, Grunder K (2017) Shallow landslides: lessons from Sachseln 1997. *Geophysical Research Abstracts* Vol. 19, EGU General Assembly 2017, <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2017/EGU2017-2719.pdf> / http://www.nfp68.ch/SiteCollectionDocuments/poster_egu17_graf_grunder.pdf
- Guzzetti F, Peruccacci S, Rossi M, Stark CP (2007) Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorol Atmos Phys* 98: 239-267, [DOI 10.1007/s00703-007-0262-7](https://doi.org/10.1007/s00703-007-0262-7)
- Holdenrieder O, Pautasso M, Weisberg PJ, Lonsdale D (2004) Tree diseases and landscape processes: the challenge of landscape pathology. *TRENDS in Ecology and Evolution* 8: 446-452, [doi:10.1016/j.tree.2004.06.003](https://doi.org/10.1016/j.tree.2004.06.003) | [Elsevier Enhanced Reader](#)
- Kim J, *et al.* (2017) Vegetation as a driver of temporal variations in slope stability: The impact of hydrological processes, *Geophys. Res. Lett.* 44 . 4897-4907, <https://doi.org/10.1002/2017GL073174>
- Lange B, Lüscher P, Germann F (2012) Wurzeln erhöhen das Wasserspeichervermögen. *Wald und Holz* 12: 23-25
- Lehmann P, Gambazzi F, Suski B, Baron L, Askarinejad A, Springman SM, Holliger K, Or, D (2013) Evolution of soil wetting patterns preceding a hydrologically induced landslide inferred from electrical resistivity survey and point measurements of volumetric water content and pore water pressure, *Water Resour. Res.* 49: 7992-8004, <https://doi.org/10.1002/2013WR014560>
- Leonarduzzi E, Molnar P, McArdell BW (2017) Predictive performance of rainfall thresholds for shallow landslides in Switzerland from gridded daily data. *Water Resources Research* 53: 6612-6625, <https://doi.org/10.1002/2017WR021044>
- Leonarduzzi E, Maxwell RM, Mirus BB, Molnar P (2021) Numerical analysis of the effect of subgrid variability in a physically based hydrological model on runoff, soil moisture, and slope stability. *Water Resources Research* 57: 1-16 pp, <https://doi.org/10.1029/2020WR027326>
- Liener S (2000) Zur Feststofflieferung in Wildbaeichen. Dissertation, Geographica Bernensia, Bern
- Liu S (1997) A new model for the prediction of rainfall interception in forest canopies. *Ecological Modelling*, 99: 151-159.
- Loshali DC, Singh RP (1992) Partitioning of rainfall by three Central Himalayan forests. *Forest Ecology and Management*, 53: 99-105.
- Loup B, Wohlwend S (2020) Umgang mit spontanen Rutschungen und Hangmuren - Wo stehen wir? Wo besteht Handlungsbedarf? Fazit des Herbstkurses 2019, FAN-Fachleute Naturgefahren, 12 S.
- Margottini C, Canuti P, Sassa K (2013) *Landslide Science and Practice*, Vol. 3 Spatial Analysis and Modelling, pp. 440
- Masi B. E, Segoni S, Tofani V (2021) Root Reinforcement in Slope Stability Models: A Review. *Geosciences*, 212: 1-24, <https://doi.org/10.3390/geosciences11050212>
- 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 Surface Processes and Landforms*. [doi/full/10.1002/esp.3887](https://doi.org/10.1002/esp.3887)
- O'Hara KL (2006) Multiaged forest stands for protection forests: concepts and applications. *For. Snow. Landsc. Res.* 1: 45-55.
- Ott E, Frehner M, Frey HU, Lüscher P (1997) Gebirgsnadelwälder. Ein praxisorientierter Leitfaden für eine standortgerechte Waldbehandlung. Bern, Paul Haupt Verlag, 287 S.
- Park H (2000) Physical characteristics of heat and water exchange processes between vegetation and the atmosphere in a deciduous broad-leaved forest. Nagoya University.
- Price AG, Carlyle-Moses DE (2003) Measurement and modelling of growing-season canopy water fluxes in a mature mixed deciduous forest stand, southern Ontario, Canada. *Agricultural and Forest Meteorology*, 119: 69-85.
- Phillips C, Hales T, Smith H, Basher L (2021) Shallow landslides and vegetation at the catchment scale: A perspective. *Ecological Engineering* 173: 1-14, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106436>
- Polomski J, Kuhn N (1998) *Wurzelsysteme*. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. Bern, Stuttgart, Wien; Haupt, 290 S.
- Querejeta JI, Egerton-Warburton LM, Allen MF (2008) Hydraulic lift may buffer rhizosphere hyphae against the negative effects of severe soil drying in a California Oak savanna. *Soil Biology & Biochemistry*, 39: 409-417.

- Rickli C (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, Raetzo H, McArdeell B, Presler J (2008) Hanginstabilitäten. In: Bezzola GR, Hegg C (eds) Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 2 - Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahregrundlagen. Bern, Bundesamt für Umwelt BAFU, Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, 97-116.
- Sakals ME, Innes JL, Wilford DJ, Sidle RC, Grant GE (2006) The role of forests in reducing hydrogeomorphic hazards. *For. Snow. Landsc. Res.* 1: 11-22.
- Schiechl H, Stern R (1992) Handbuch für naturnahen Erdbau. Österreichischer Agrarverlag, Wien, 153 S.
- Schwarz M, Cohen D, Or D (2011) Pullout tests of root analogs and natural root bundles in soil - experiments and modeling. *JGR: Earth Surface*, 116, F02007.
- Schwarz M, Cohen D, Or D (2012). Spatial characterization of lateral root reinforcement. *Geomorphology*, 171-172: 190-200.
- Schwarz MF, Giadrossich F, Cohen D (2013). Modeling root reinforcement using root-failure Weibull survival function. *HESS*, 17: 4367-4377.
- Schwarz M, Dorren L, Thormann JJ (2014) SlideForNet. International conference «Analysis and Management of Changing Risks for natural Hazards», 18-19.11.2014, Padua, Italy.
- Schwarz M, Cohen D, Giadrossich F, *et al.* (2015) Quantification of Compressed rooted soil. *JGR: Earth Surface*, 10: 2103-2120.
- Schwarz M (2019) Wurzelverstärkung und Hangstabilitätsberechnungen: Eine Übersicht. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*. 6: 292-302.
- Schwarz M, Poesen J, Rey F, Hölbling D, Phillips C (2020) Bio-physical performance of erosion and sediment control/mitigation techniques—an international comparison to common practices in New Zealand.
- Schwarz M, May D (2021) Zwischenbericht Waldbrand Management Nordalpen. BFH Bericht.
- Schwarz M, Thormann JJ, Brühwiler V, Hollard N (2022) Priorisierung der Schutzwaldpflege unter Berücksichtigung der Schutzwaldwirkung in rutschgefährdeten Hängen Fallstudie Bressonaz. HAFL-BFH Projektbericht.
- Sidle RC, Bogaard TA (2016) Dynamic earth system and ecological controls of rainfall-initiated landslides. *Earth-Science Reviews*, 159: 275-291, <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.05.013>
- Sidle RC, Ochiai H (2006) Landslides: Processes, Prediction, and Land Use. *Am. Geophys. Union Water Resour. Monogr. Vol. 18.* American Geophysical Union, Washington, D.C. pp. 312.
- SN 670 010 b (2011) Geotechnische Erkundung und Untersuchung / Geotechnische Kenngrößen. Schweizer Norm (SN), Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS) Zürich, pp. 19.
- Spies TA, Stine PA, Gravenmier R, Long JW, Reilly MJ, tech. coords. (2018) Volume 2 – Synthesis of science to inform land management within the Northwest Forest Plan area. *Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-966.* Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station: 371-624. Vol 2.
- Stokes AG, Douglas T, Fourcaud F *et al.* (2014). Ecological mitigation of hillslope instability: ten key issues facing researchers and practitioners. *Plant and Soil*, 377:1-23.
- Tobler D, Riner R, Pfeifer R (2013) Runout Modelling of Shallow Landslides Over Large Areas with SliDepot. In: C. Margottini *et al.* (eds.), *Landslide Science and Practice*, Vol. 3, [DOI 10.1007/978-3-642-31310-3_32](https://doi.org/10.1007/978-3-642-31310-3_32)
- van Zadelhoff FB, Albaba A, Cohen D, Phillips C, Schaeffli B, Dorren L, 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*, 1-33.
- Vergani C, Schwarz M, Soldati M, Corda A, Giadrossich F, Chiaradia EA, Morando P, Bassanelli C (2016) Root reinforcement dynamics in subalpine spruce forests following timber harvest: a case study in Canton Schwyz, Switzerland. *Catena* 143: 275-288, <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.03.038>
- Vergani C, Giadrossich F, Buckley P *et al.* (2017 a) Root reinforcement dynamics of European coppice woodlands and their effect on shallow landslides: A review. *Earth Science Reviews*, 167: 88-102.
- Vergani C, Werlen M, Conedera M, Cohen D, Schwarz M (2017 b). Investigation of root reinforcement decay after a forest fire in a Scots pine (*Pinus sylvestris*) protection forest. *For. Ecol. and Manag.* 400: 339-352.
- Wicki A, Lehmann P, Hauck C, Seneviratne SI, Waldner P, Stähli M (2020) Assessing the potential of soil moisture measurements for regional landslide early warning. *Landslides*, 17: 1881-1896, [doi: 10.1007/s10346-020-01400-y](https://doi.org/10.1007/s10346-020-01400-y)
- Wicki A, Jansson P, Lehmann P, Hauck C, Stähli M (2021) Simulated or measured soil moisture: which one is adding more value to regional landslide early warning? *Hydrology and Earth System Sciences*, 25: 4585-4610, [doi: 10.5194/hess-25-4585-2021](https://doi.org/10.5194/hess-25-4585-2021)
- Wohlgemuth T, Brigger A, Gerold P, Laranjeiro L, Moretti M, Moser M, Rebetez M, Schmatz D, Schneiter G, Sicacca S, Sierro A, Weibel P, Zumbrennen T, Conedera M (2012) Leben mit Waldbrand am Beispiel von Leuk (VS) 2003. Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich, 157: 97-106.
- Wohlgemuth T, Schwittr R, Bebi P, Sutter F, Bran P (2017) Post-windthrow management in protection forests of the Swiss Alps. *European Journal of Forest Research*, 136: 1029-1040, [DOI 10.1007/s10342-017-1031-x](https://doi.org/10.1007/s10342-017-1031-x)
- Wyss R, Stricker B, Gruner U, Liniger M (2019) Untersuchungen zur Verbesserung der Hangmurenbeurteilung. FAN Herbstkurs 2019, S. 31-40.
- 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.
- Zuidema A, Rickli C, Frehner M (2021) Modellierung von Hangmuren in bewaldetem Gebiet mit dem Simulationsprogramm RAMMS. *FAN-Agenda*, 2: 4-8.

Anhang

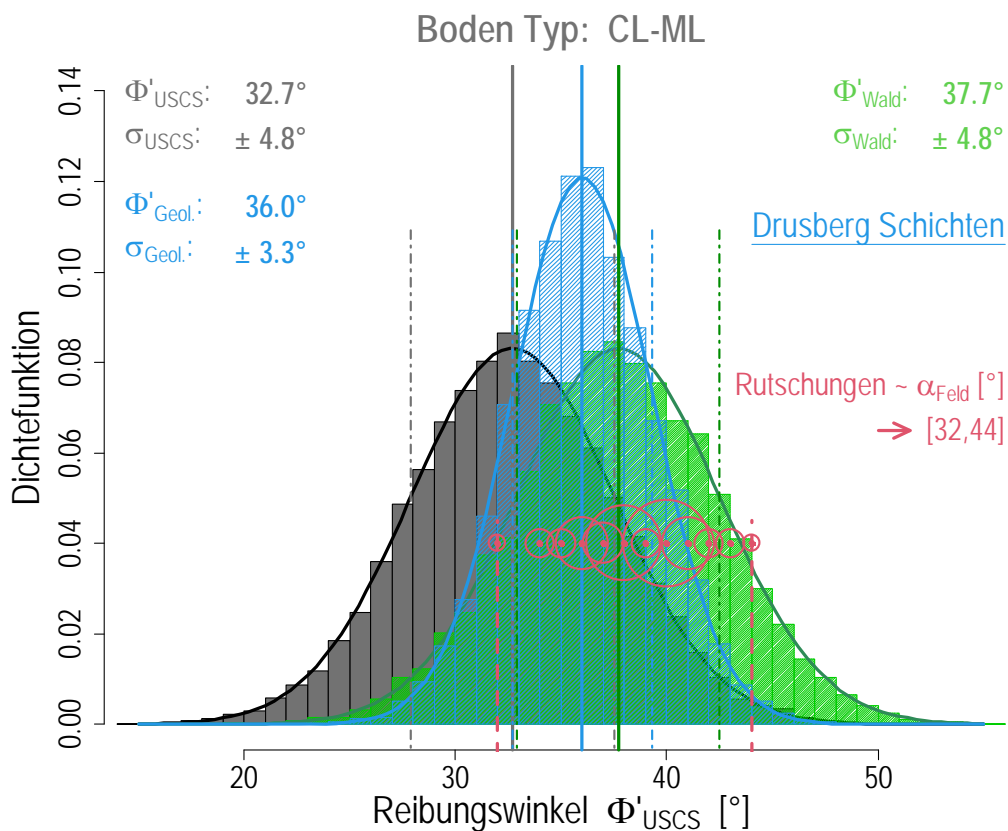
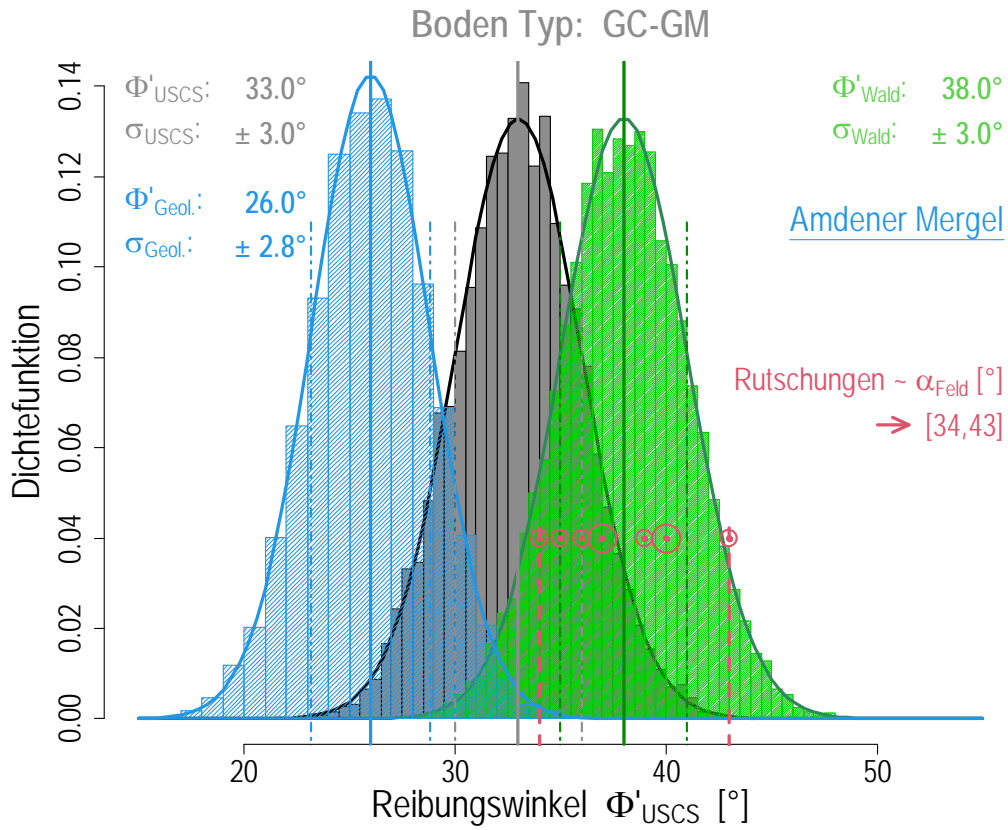


Abbildung 3: Dichtefunktionen (Normalverteilung \mathcal{N}) der Reibungswinkel Φ' in den am stärksten betroffenen geologischen Schichten Amdener Mergel und Drusberg Schichten (Liener 2001), USCS-Bodentypen GC-GM, CL-ML (SN 670 010 b 2011) sowie unter Annahme der Schutzfunktion eines gut strukturierten Waldbestandes mit $\Phi'_{Wald} = \Phi'_{USCS} + 5^\circ$ (Böll & Graf 2001) für die Rutschungen in Sachseln 1997. Anzahl Rutschungen (Kreise) und Bereich (gestrichelte Linie) der Hangneigung α_{Feld} (Rickli 2001).