Heft 56, 2017

WSL Berichte

ISSN 2296-3448

Pflanzenwirkungen zum Schutz vor flachgründigen Rutschungen

Frank Graf *et al.*

WSL-Institut für Schnee und Lawinenforschung SLF

Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL

Heft 56, 2017
WSL Berichte
ISSN 2296-3456

Pflanzenwirkungen zum Schutz vor flachgründigen Rutschungen

Frank Graf, Peter Bebi, Urs Braschler, Giovanni De Cesare, Martin Frei, Peter Greminger, Karl Grunder, Nils Hählen, Christian Rickli, Christian Rixen, Arthur Sandri, Sarah Marcella Springman, Jean-Jacques Thormann, Nina von Albertini, Anil Yildiz

Herausgeberin
Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL
CH-8903 Birmensdorf

Verantwortlich für die Herausgabe der Schriftenreihe
Prof. Dr. Konrad Steffen, Direktor WSL

Verantwortlich für dieses Heft
Dr. Marco Conedera, Leiter Forschungseinheit Ökologie der Lebensgemeinschaften

Autorenteam
Frank Graf[1] (graf@slf.ch), Peter Bebi[1] (bebi@slf.ch), Urs Braschler[8] (urs.braschler@kfnmail.ch), Giovanni De Cesare[4,a] (giovanni.decesare@epfl.ch), Martin Frei[9,10] (martin.frei@mfrei-infra.ch), Peter Greminger[12] (riskcheck@bluewin.ch), Karl Grunder[11] (karl.grunder@oeko-b.ch), Nils Hählen[7,b] (nils.haehlen@vol.be.ch), Christian Rickli[2] (christian.rickli@wsl.ch), Christian Rixen[1] (rixen@slf.ch), Arthur Sandri[5] (arthur.sandri@bafu.admin.ch), Sarah Marcella Springman[3] (sarah.springman@igt.baug.ethz.ch), Jean-Jacques Thormann[6] (jean-jacques.thormann@bfh.ch), Nina von Albertini[13] (nina.v.albertini@bluewin.ch), Anil Yildiz[1,2,3] (anil.yildiz@slf.ch)

1 WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF
2 Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL
3 Institut für Geotechnik, ETH, Zürich
4 Faculté de l'environnement naturel, architectural et construit ENAC, Laboratoire de constructions hydrauliques LCH, EPFL, Lausanne
5 BAFU, Sektion Rutschungen, Lawinen und Schutzwald, 3003 Bern, BE
6 Berner Fachhochschule HAFL, 3052 Zollikofen, BE
7 Amt für Wald KAWA, Abteilung Naturgefahren, 3800 Interlaken, BE
8 Amt für Wald und Energie, 6371 Stans, NW
9 Amt für Wald und Naturgefahren, 7000 Chur, GR
10 MFrei infra GmbH, 8580 Amriswil, TG
11 oeko-b ag, 6370 Stans, NW
12 RIBADE, 3303 Münchringen, BE
13 Umwelt Boden Bau, 7417 Paspels, GR
a Verein für Ingenieurbiologie VIB, Schweiz
b Fachleute Naturgefahren FAN, Schweiz

Review: Werner Riegger (Bundesamt für Umwelt, BAFU) und Cyril Inderbitzin (arv, Baustoffrecycling Schweiz)
Layout: Jacqueline Annen, WSL

Zitierung
Graf, F.; Bebi, P.; Braschler, U.; De Cesare, G.; Frei, M.; Greminger, P.; Grunder, K.; Hählen, N.; Rickli, C.; Rixen, C.; Sandri, A.; Springman, S.M.; Thormann, J.-J.; von Albertini, N.; Yildiz, A., 2017: Pflanzenwirkungen zum Schutz vor flachgründigen Rutschungen. WSL Ber. 56: 42 S.

PDF Download www.wsl.ch/publikationen/pdf/16428.pdf

ISSN 2296-3448 (Print)
ISSN 2296-3456 (Online)

Fotos Umschlag: 1. Rütipromenade, Klosters (GR); Unwetter 2005 (Frank Graf, SLF). 2. Grosse Runs bei Einsiedeln (SZ); nach dem Unwetter vom 20. Juni 2017 (Martin Ammann, Ammann Ingenieurbüro AG). 3. Oberiberg (SZ); nach dem Unwetter vom 20. Juni 2007 (Christian Rickli, WSL). 4. Lotter-Rutschung, Gangbach, Schächental (UR); Unwetter 2005 (Frank Graf, SLF). 5. Schwandrübi, Dallenwil-Wirzweli (NW); nach dem Unwetter 2005 (Frank Graf, SLF). 6. Schwandrübi, Dallenwil-Wirzweli (NW); vor der Sanierung 1981 (Werner Gerber, WSL).

Die WSL überwacht und erforscht Wald, Landschaft, Biodiversität, Naturgefahren sowie Schnee und Eis. Sie ist ein Forschungsinstitut des Bundes und gehört zum ETH-Bereich. Das WSL-Institut für Schnee und Lawinenforschung SLF ist seit 1989 Teil der WSL.

© Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL
Birmensdorf, 2017

Zusammenfassung

Im Fokus unseres Projekts SOSTANAH (Soil Stability and Natural Hazards), welches im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms «Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden» (NFP 68) durchgeführt wurde, standen biologische Massnahmen zum Schutz vor flachgründigen Rutschungen. Ziel war es, Wirkungen von Pflanzen, insbesondere von Wäldern, auf die Hangstabilität sowie begleitende Effekte von Symbiosepilzen (Mykorrhiza) möglichst zuverlässig zu quantifizieren. Dazu wurden Aspekte der Bodenmechanik, Vegetation sowie der Waldbewirtschaftung und Landnutzung berücksichtigt und der praxistauglichen Umsetzung der Resultate grosse Aufmerksamkeit geschenkt.

Um der biologischen Stabilisierung des Bodens allgemein und den Wurzelwirkungen im Besonderen angemessen Rechnung tragen zu können, wurden Direktscherversuche durchgeführt. Neben den hauptsächlichen bodenmechanischen Kenngrössen für Hangstabilität, den Scherparametern Reibungswinkel (Φ') und Kohäsion (c'), hat sich die Dilatanz (Ψ) als weiterer wichtiger Parameter erwiesen. Dilatanz bezeichnet die Eigenschaft eines Bodenmaterials, sein Volumen unter Einwirkung von Scherkräften durch Auflockerung zu vergrössern. Basierend auf dem mittleren Durchwurzelungswert aus den Direktscherversuchen, wurden Sicherheitsberechnungen gegen Abgleiten durchgeführt. Diese zeigen, dass unter solchen für gut strukturierte Wälder realistischen Annahmen der Durchwurzelung sowie einer Tiefe des Gleithorizonts von 1 m ein Hang auch dann stabil ist, wenn sein Neigungswinkel α um 5° steiler ist als der Reibungswinkel Φ' des Bodenmaterials. Die Analyse von über 200 Waldrutschungen ergab eine mittlere Lage des Gleithorizontes in $\bar{x}$ = 1,3 m Tiefe (Median: $\tilde{x}$ = 1,1 m).

Weiter hat sich gezeigt, dass die Waldstruktur die Anfälligkeit von flachgründigen Rutschungen stark beeinflusst und mit Hilfe einer geeigneten, kleinflächigen Bestandespflege die Schutzfunktion massgebend verbessert werden kann. Rutschungen wurden vor allem in Waldlücken mit einer Länge von über 20 m in der Falllinie ausgelöst. Bei grösseren Lückenlängen erwies sich vorab die Hangneigung als entscheidend.

Von 218 Waldrutschungen konnten mit der Anwendung eines 3-stufigen Ausscheidungsverfahrens (3-Stufen-Filter) mehr als 95 Prozent erklärt werden. Der seriell angewendete Filter berücksichtigt Aspekte der Bodenmechanik (Scherparameter, Hangneigung), Vegetation (Kriterien für optimalen Schutz vor flachgründigen Rutschungen, in Einklang mit Empfehlungen nach NaiS: Nachhaltigkeit im Schutzwald) und Topographie.

Wälder mit ausreichender ober- und unterirdischer Vielfalt bezüglich Arten, Alter, horizontaler und vertikaler Struktur, Baumartenmischung sowie Durchwurzelung und Wurzelarchitektur zeigten das höchste Schutzpotenzial. Intensive landwirtschaftliche Nutzung, die zu Bodenverdichtung und zusätzlichem Nährstoffeintrag führt, reduziert einerseits die Vielfalt von Pflanzen und Mykorrhizapilzen. Andererseits wird auch die Wurzelverstärkung beeinträchtigt sowie weitere, durch die Wurzeln beeinflusste Stabilisierungseffekte, was eine Verminderung der Hangstabilität bewirkt.

Anhand von Untersuchungen ingenieurbiologischer Massnahmen sowie in Laborversuchen konnte nachgewiesen werden, dass Mykorrhizapilze Wachstum, Entwicklung und Überleben ihrer Wirtspflanzen fördern, die Festigkeit von Bodenaggregaten erhöhen und so ebenfalls zur Stabilisierung von Hängen beitragen.

Im Fallbeispiel von Sachseln 1997 konnte gezeigt werden, dass in Abhängigkeit der Preisgrundlage die Kosten für eine optimale Waldschutzpflege im Hinblick auf den Schutz vor flachgründigen Rutschungen im Vergleich zum Schadenpotential des 100-jährigen Ereignisses nur zwischen 10 und 25 Prozent betragen.

Die Bedeutung unserer Resultate und Erkenntnisse ist für Praxis und Forschung dargelegt und in ersten Empfehlungen formuliert und vorgestellt.

Schlüsselwörter: Hangstabilität, Rutschung, retrospektive Analyse, Waldstruktur, Waldpflege, Ingenieurbiologie, Mykorrhiza, 3^D-Diversität

Unser Projekt SOSTANAH (Soil Stability and Natural Hazards) wurde vom Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (SNF) unterstützt und im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms «Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden» (NFP 68) durchgeführt.

Ressource Boden
Nationales Forschungsprogramm NFP 68

FNSNF
Schweizerischer Nationalfonds
zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung

Inhalt

Zusammenfassung 3
Übersicht 6

Was wir bereits wissen … 7
Einleitung 7
Pflanzenfunktionen für stabile Hänge 8
Mykorrhizapilze: Schnittstelle zwischen Pflanzen und Boden 10
Diversität und Landnutzung 13

Was wir gefunden haben … 15
Mykorrhizafunktionen im Dienste der Pflanzen 15
Bodenstabilität dank Pflanzen und Pilzen 19
Hangstabilität aus Sicht der Bodenmechanik 21
Waldstruktur und Landnutzung 25
Rutschungsanalyse mit einem 3-Stufen-Filter 27
Fallbeispiel «Sachseln» 28

Was es für Praxis und Forschung bedeutet … 31
Nützliches für den Praktiker 31
Wissenschaftliche Folgen 31

Was wir daraus schliessen können … 33
Waldbauliche Eingriffe 34
Landnutzung 34
Ingenieurbiologie 34
Konzeptionelle Aspekte 34

Literatur 37

Übersicht

Die in diesem Bericht vorgestellten Resultate sowie die daraus abgeleiteten Folgerungen stammen grösstenteils aus unserem Projekt SOSTANAH (Soil Stability and Natural Hazards), welches im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms «Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden» (NFP 68) durchgeführt wurde.

Das NFP 68 will das Wissen über die Qualität der Böden verbessern, Instrumente für deren Bewertung entwickeln und Strategien zur nachhaltigen Nutzung erarbeiten. Dazu wurden Grundlagen für eine nachhaltige Nutzung des Bodens in der Schweiz erarbeitet. Die Hauptziele waren:

– Verbessertes Wissen über Bodensysteme bereitstellen;
– Instrumente zur Bewertung der Ressource Boden entwickeln;
– Strategien zur nachhaltigen Nutzung von Boden erarbeiten.

Im Mittelpunkt unseres Projekts standen biologische Massnahmen zur Stabilisierung von Boden und Hängen als Schutz vor flachgründigen Rutschungen. Unsere Feld- und Laboruntersuchungen sollten einerseits das Prozessverständnis der Boden-Pflanzen Interaktionen verbessern und andererseits Möglichkeiten aufzeigen, Boden an steilen Hängen mit Hilfe von Vegetation, insbesondere von Wald, nachhaltig zu stabilisieren.

Erosion und Rutschungen verursachen in der Schweiz immer wieder grosse Schäden. Der Schutz vor derartigen Naturgefahren und die Verbesserung der Vorhersage sind daher wichtige Anliegen. Das Ziel unseres Projekts SOSTANAH im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP 68 war, die **Pflanzenwirkungen** auf die Hangstabilität zuverlässiger zu benennen und **quantifizieren.** Dazu wurden biologische Stabilisierungseffekte mit bodenmechanischen Parametern verknüpft, welche zur Berechnung des Sicherheitsfaktors gegen Abgleiten aufgrund flachgründiger Rutschungen massgebend sind. Der Fokus lag auf einer **praxistauglichen Umsetzung** unter Berücksichtigung von Aspekten der Bodenmechanik, Vegetation sowie der Waldbewirtschaftung und Landnutzung. Besonderes Augenmerk kam auch der Untersuchung zum **Einfluss von Mykorrhizapilzen** (Symbionten) auf ihre Pflanzenpartner zuteil.

Eine Datenbank mit über 700 detailliert dokumentierten Rutschungen diente als Grundlage. Im Feld und im Labor wurden ergänzende Untersuchungen durchgeführt: zum Einfluss der Waldstruktur auf Hangstabilität einerseits sowie andererseits zu Bodenscherkräften und zur Aggregatstabilität – wichtige physikalische Kenngrössen. Ein eigens dafür entwickelter neigbarer Scherapparat für grosse Proben ermöglichte **realitätsnahe Versuche**. Damit beabsichtigten wir, **biologische Stabilitätseffekte** angemessen in ein **bodenmechanisches Konzept** einzubinden, das neusten Erkenntnissen genügt. Das Aufdecken der **Einflüsse von Bodeneigenschaften, Vegetation und Landnutzung** auf die Stabilität von Hängen sollte helfen, Indikatoren zu finden, die auf eine erhöhte Rutschgefahr des Bodens hinweisen. Daraus lassen sich **Kriterien für Vegetation mit hohem Schutzpotential gegen flachgründige Rutschungen definieren.** Die Ergebnisse sollen in die Planung von ingenieurbiologischen Massnahmen und Pflegeeingriffen einfliessen sowie Prognosen ermöglichen, respektive deren Qualität verbessern.

Was wir bereits wissen …

Einleitung

Hochwasser, Murgänge, Lawinen, Steinschlag und Rutschungen treten in Gebirgsregionen und steilen Einzugsgebieten immer wieder auf und können extreme Ausmasse annehmen. Solche Ereignisse gefährden Mensch, Gebäude und Verkehrswege und richten vor allem in Siedlungs- und Ballungsräumen erheblichen Schaden an (BEZZOLA und HEGG 2007, 2008). Durch die Zunahme von Wert- und Nutzungsdichte erhöhen sich diese Risiken bei gleichzeitig steigenden Forderungen nach Sicherheit.

Die Situation wird zusätzlich verschärft durch die zunehmende Häufigkeit und Intensität extremer Unwetterereignisse als Folge von Klimaveränderungen, was sich insbesondere auch auf die Häufigkeit flachgründiger Rutschungen auswirkt (SPRINGMAN *et al.* 2003, 2012; BENISTON *et al.* 2011). In den letzten Jahren verursachten solche Rutschungen nicht selten grossen Schaden, im Wert von über 100 Millionen durch ein einzelnes Unwetter, und haben auch Menschleben gefordert (BEZZOLA und HEGG 2007, 2008).

Die Verbesserung bestehender sowie die Errichtung neuer, wirksamer Schutzmassnahmen vor solchen Naturgefahren ist unbestritten und wird in Zukunft immer wichtiger. Da jedoch die Mittel der öffentlichen Hand begrenzt sind, gilt ein besonderes Augenmerk der Prävention von flachgründigen Rutschungen durch effiziente Massnahmen sowie deren Vorhersage mit zuverlässigen Methoden.

Der Stellenwert der Vegetation und insbesondere von Wald als Schutz vor Hangrutschungen und Erosion wurde schon früh erkannt und daraus auch Grundlagen zu Methoden entwickelt, um betroffene Gebiete wieder zu bepflanzen und zu stabilisieren (DUILE 1826; DEMONTZEY 1878). Seit 1991 sind diese Massnahmen in der Schweiz durch den Artikel 19 des Waldgesetzes festgehalten (WAG 1991), wodurch auch ingenieurbiologische Methoden zur Hangstabilisierung gegenüber rein technischen Lösungen massgeblich aufgewertet werden (GRAF *et al.* 2003; GRAF *et al.* 2014; Grunder *et al.* 2014; MARTI *et al.* 2016 a, b). Für die Hochlagen wurden in vorbildlicher Weise entsprechende Richtlinien erarbeitet (LOCHER *et al.* 2008). Diese erlauben bei fachgerechter Umsetzung nicht nur eine standortgerechte Wiederbegrünung, sondern leisten ebenso einen beträchtlichen Beitrag zur Bodenstabilisierung und insbesondere zum Erosionsschutz.

Bereits den alten Griechen waren die Schutzfunktionen der Vegetation, namentlich von Wäldern gegen die zerstörerischen Kräfte des Wassers bekannt (CHLOROS 1891). Folglich wurde Respekt vor Bäumen und Wäldern gelehrt und gelernt (GOULAS und GRAF 2003). Denn, so wurde gesagt, in den Wäldern leben Nymphen als deren Beschützerinnen – Mädchen von himmlischer Schönheit und Charme. Das Wohlergehen dieser göttlichen Wesen war entsprechend oberstes Gebot. Die ausserordentliche Bedeutung der Nymphen widerspiegelt sich in der Tatsache, dass sie unter dem Schutz des Olymp standen. Erisichthon, der die «hohe Eiche» gefällt hatte, in welcher die liebste Nymphe der Göttin Dimitra wohnte, wurde zu unendlichem Hunger verurteilt und war daraufhin dazu verdammt, vor lauter Hunger nicht nur sein ganzes Vermögen, sondern auch seine Körperteile zu verzehren. Die Götter verteilten aber nicht nur Strafen, sondern belohnten jene, welche den Bäumen und Wäldern gut gesinnt waren. So schenkte eine Nymphe ihre ewige Liebe dem Arkan, weil er ihren Baum mit dem Bau eines Dammes vor dem Wildbach rettete (KONTOS 1929; GOULAS und GRAF 2003). Heutzutage sind die Weisheiten der griechischen Sagen allgemeines Wissensgut und der schützende Effekt der Vegetation vor Naturgefahren ist wohlbekannt. Auch der Pflege von Bepflanzungen und Aufforstungen im Hinblick auf die Nachhaltigkeit der biologischen Schutzfunktionen kommt entsprechende Bedeutung zuteil. Nicht unerwartet führten grossflächige Entwaldungen sowie die Vernachlässigung von Beständen in der Vergangenheit vielerorts zu erheblichen Schadenereignissen (LANDOLT 1862; KAISER 1967). Dessen ungeachtet wird heute in der Bevölkerung der Nutzen von Pflegemassnahmen, insbesondere im Zusammenhang mit Kosten, nicht einfach vorbehaltlos anerkannt und mangels an konkreten Angaben auch der stabilisierende Effekt von Pflanzen vermehrt kritisch betrachtet.

Die gesellschaftlichen Veränderungen der letzten Jahre hin zu einem steigenden Bedürfnis nach Sicherheit sowie wirtschaftliche Aspekte verlangen vermehrt konkrete Angaben zu Wirkung und Effizienz der Vegetation. Unter diesen neuen Voraussetzungen lassen sich ingenieurbiologische und auch waldbauliche Massnahmen nicht mehr isoliert betrachten. Es ist daher notwendig, sich weniger einzelnen Verbau-Techniken und Methoden zu widmen. Vielmehr müssen in einem umfassenden Rahmen die spezifischen Pflanzenfunktionen sowie die Entwicklung der gesamten Vegetation unter Berücksichtigung einer höchstmöglichen Sicherheit gegenüber Bodenversagen ins Zentrum gestellt werden. Ungeachtet der zahlreichen Berechnungsansätze zum Nachweis bodenstabilisierender Wirkungen von Pflanzen (Wu 1984; Pollen und Simon 2005; Graf *et al.* 2009; Schwarz *et al.* 2010), fehlen nach wie vor fundierte Grundlagen, um die Wirkungsweise unterschiedlicher Vegetationstypen und Sukzessionsstadien nachhaltig quantifizieren zu können. Das liegt in erster Linie an der Dynamik der Vegetationsentwicklung und damit einhergehend an der stetigen Veränderung des Einflusses auf die Boden- und Hangstabilität.

Pflanzenfunktionen für stabile Hänge

Sowohl als Individuen als auch im Verbund als Vegetationsdecke üben Pflanzen essentielle Funktionen aus und beeinflussen dadurch verschiedene Prozesse, welche sich positiv auf die Hangstabilität auswirken. Schlüsselrollen spielen einerseits die Bodenentwässerung und Regulierung des Wasserhaushalts durch Interzeption und Evapo-Transpiration sowie das Wasserspeichervermögen. Andererseits sind die Bildung und chemische Zementierung von Aggregaten mittels Stoffwechselprodukten, und damit die Veränderung der Bodenstruktur, sowie die mechanische Stabilisierung von Bodenmaterial im Rahmen der Wurzelverstärkung (Armierung) Kernstücke. Durch ihren Eintrag von organischem Material treiben sie zudem den Nährstoffkreislauf an und fördern dadurch Sukzession und Diversität (Abb. 1).

Interzeption: Die Interzeption, also das Zurückhalten von Niederschlag durch das Kronendach eines Waldes, beträgt zwischen 10 und 40 Prozent (Hörmann *et al.* 1996). Allerdings können die Werte räumlich sehr stark variieren und sind abhängig von der Intensität des Regenereignisses sowie von der Waldgesellschaft und deren Struktur. Dazu kommt eine mehr oder weniger stark ausgeprägte saisonale Variabilität. Generell betrachtet ist die Interzeption in Nadelholz dominierten Wäldern höher als in reinen Laubholzbeständen (Loshali und Sing 1992; Liu 1997; Park 2000; Price und Carlyle-Moses 2003; Deguchi *et al.* 2006). Dessen ungeachtet und unabhängig der Baumarten, ist das Interzeptionspotential positiv mit der Blattfläche korreliert (Aston

Abb. 1: Boden stabilisierende Pflanzenfunktionen: Interzeption, Evapo-Transpiration, Wasserspeichervermögen, Wurzelwirkungen.

1979) und somit unabdingbar mit dem Pflanzenwachstum und auch der Sukzession der Pflanzengesellschaften verknüpft. Durch die Zunahme des Deckungsgrads wird zwar die reine Bodenverdunstung vermindert, an ihre Stelle tritt jedoch die Interzeptionsverdunstung an den oberirdischen Pflanzenteilen und der Streuauflage. Während Erstere ganzjährig wirkt, ist Letztere nur nach Niederschlägen aktiv (LICHTENEGGER 1985).

Evapo-Transpiration: Die Evapo-Transpiration ihrerseits ist eng an die Interzeption gekoppelt und bezeichnet den Prozess des Wassertransports in der Pflanze von den Wurzeln zu den Blättern, wo es durch die Stomata als Wasserdampf an die Atmosphäre abgegeben wird. Die Evapo-Transpiration 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.

Hydraulische Konduktivität: Ein weiterer von der Biomasse und insbesondere von der Wurzellänge abhängiger Prozess im Rahmen des Wassertransports ist die hydraulische Konduktivität. Es handelt sich hierbei um eine Wasserverlagerung von Teilen des Wurzelsystems in feuchteren, meist tiefer gelegenen Bodenregionen, zu solchen in trockeneren, meist oberflächennahen Bereichen. Durch diesen aufwärtsgerichteten Fluss werden, meist während der Nacht, beträchtliche Mengen an Wasser verlagert. Die partielle Erhöhung der Bodenfeuchtigkeit oberflächennaher, trockenerer Bodenbereiche gewährleistet damit insbesondere während niederschlagsarmen Perioden die Funktionalität von Feinwurzeln und Mikroorganismen. Ebenso dient dieser Feuchtigkeitspuffer 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).

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 einem 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).

Wasserspeichervermögen: Wie die hydraulische Konduktivität, ist auch das Wasserspeichervermögen von vegetationsbedeckten Böden stark von der Durchwurzelungsdichte abhängig. Untersuchungen in einem voralpinen Heidelbeer-Tannen-Fichtenwald haben gezeigt, dass insbesondere die Feinwurzeln (Ø ≤ 2 mm) in den oberflächennahen Bodenschichten eine herausragende Rolle spielen (LANGE *et al.* 2012). In einem Waldboden kann der Anteil an Baum-Feinwurzeln bis zu 90 Prozent betragen (POLOMSKI und KUHN 1998). Sterben diese ab, hinterlassen sie im Boden ein immenses Hohlraumsystem. Dieses Netzwerk an Makroporen kann über mehrere Meter sowohl vertikal als auch lateral zusammenhängen und dient als Wasserspeicher (COPPOLA *et al.* 2009; BACHMAIR und WEILER 2011). Es erstaunt daher nicht, dass etwa die Hälfte des Wassers bereits in den obersten 20 cm des Bodens gespeichert werden (LANGE *et al.* 2012).

Im Hinblick auf den Schutz vor flachgründigen Rutschungen spielt die Wasserspeicherkapazität eine entscheidende Rolle, da die Auslösung eng mit der Wassersättigung und dem entsprechenden Anstieg des Porenwasserdrucks verknüpft ist. Je höher nun das Fassungsvermögen des Bodens ist, desto geringer wird die Wahrscheinlichkeit der Sättigung über eine kritische Schwelle während eines Unwetters und damit die Auslösung flachgründiger Rutschungen. Das

Wasserspeicherpotential eines Bodens hängt von zahlreichen Bodeneigenschaften ab, wie Gesamtporosität und Bodenart (Anteile Sand, Schluff und Ton), wird jedoch hauptsächlich durch die Wurzeln bestimmt. Entsprechend erhöht sich mit der Durchwurzelungsdichte auch die Hangstabilität. Basierend auf der Arbeit von LANGE *et al.* (2012) ergeben 30 Prozent mehr Wurzeln ein um 7 mm höheres Wasserspeichervermögen, was rund 10 Prozent der Niederschlagsmenge eines einstündigen 100-jährigen Unwetterereignisses entspricht.

Bodenstabilität: Biomasse und insbesondere die Wurzeln haben nicht nur einen bedeutenden Einfluss auf die Hydrologie, sondern beeinflussen auch in entscheidendem Masse die Boden- und Hangstabilität, indem sie einerseits die Bodenstruktur verändern und andererseits potentielle Gleitebenen durchwachsen. Vorab durch das Netzwerk der Feinwurzeln (Ø < 2 mm) wird im Rahmen der Bildung und mechanisch-chemischen Stabilisierung von Aggregaten die Bodenstruktur verstärkt; eine wesentliche Voraussetzung für eine nachhaltig stabile Bodenmatrix und Porenstruktur. Zudem bewirken die gröberen Wurzeln (Ø ≥ 2 mm) einen zusätzlichen Armierungseffekt – häufig als Wurzelverstärkung bezeichnet. In der Kombination tragen diese Wurzelwirkungen durch die hydrologischen, mechanischen und strukturellen Veränderungen im Boden nachhaltig zur oberflächennahen Stabilisierung von Hängen bei.

Die enge Verknüpfung zwischen Durchwurzelungsintensität und Hangstabilität wurde mehrfach und mit unterschiedlichsten Methoden zur Bestimmung der Bodenscherfestigkeit bestätigt. In diesem Rahmen wurden unter anderem die Verfahren des Triax- und Direkt-Scherversuchs angewendet (FREI 2009; GRAF *et al.* 2009; YILDIZ *et al.* 2015) sowie Wurzelauszieh- (SCHWARZ *et al.* 2010) und Aggregatstabilitäts-Tests durchgeführt (BÖLL und GRAF 2001; GRAF und FREI 2013; BAST *et al.* 2014, 2016). Dabei kamen zur Auswertung und Interpretation unterschiedliche Ansätze und Modelle zur Anwendung (WU 1984; POLLEN und SIMON 2005; COHEN *et al.* 2011; BAST *et al.* 2015). Die Erhöhung der Hangstabilität durch adäquate Durchwurzelung eines Bodenkörpers kann über die Parameter der Scherfestigkeit – den Reibungswinkel Φ' (effektiver spannungsabhängiger Teil) und die Kohäsion c' (spannungsunabhängiger Teil) abgebildet werden. Diese definieren im Rahmen des Bruchkriteriums nach Mohr-Coulomb die Bodenscherfestigkeit (WU 1984; FREI *et al.* 2003; CAZZUFFI und GRIPPA 2005; WU 2007; GRAF *et al.* 2009; LANG *et al.* 2011; YILDIZ *et al.* 2015).

Mykorrhizapilze: Schnittstelle zwischen Pflanzen und Boden

All diese für die Boden- und Hangstabilität wichtigen Pflanzenfunktionen verlangen unbestrittene Voraussetzungen: **Wachstum, Entwicklung und Vielfalt!** Was im ersten Moment als selbstverständlich erscheint, entpuppt sich bei genauerer Betrachtung als alles andere als eine triviale Gegebenheit. Gerade unter den extremen Bedingungen auf nacktem Bodenmaterial abgerutschter und erodierter, steiler Hänge ist es selbst für ausgesprochene Pionierpflanzen eine grosse Herausforderung innerhalb angemessener Frist Fuss zu fassen und sich zu behaupten; und es eilt! Die Zeit ist knapp, um einen Hang nachhaltig zu besiedeln. Eine Faustregel für steile Hänge besagt: nur wenn innerhalb weniger als drei Vegetationsperioden ein Deckungsgrad durch die Pflanzen von 70 Prozent und mehr erreicht wird, bestehen intakte Chancen den Wettkampf gegen die Uhr, namentlich gegen Erosions- und Rutschungsprozesse, zu gewinnen (MOSIMANN 1981; MALIN und RIXEN 2016; Abb. 2).

Doch die Natur hat vorgesorgt. Denn genau an diesem heiklen und entscheidenden Punkt kommen die Mykorrhizapilze ins Spiel. Auf diese Symbiosepilze sind fast alle Pflanzen angewiesen, welche natürlicherweise in unseren Breitengraden auf steilen Hängen vorkommen (SMITH und READ 2008).

Pflanzenwachstum: In dieser Pflanze-Pilz-Beziehung profitieren beide Partner voneinander. Während der Pilz seine Wirte mit Wasser und Nährstoffen versorgt – und zwar viel effizienter als Wurzeln allein im Stande sind – erhält er im Austausch Zucker aus dem Photosynthese-Stoff-

kreislauf der Pflanzen. Durch die stark verbesserte Wasser- und Nährstoffversorgung gelingt es den Pflanzen auch unter extrem (Wachstums-) limitierenden Bedingungen zu überdauern. Zahlreiche Studien haben gezeigt, dass Wachstum und Entwicklung mykorrhizierter Pflanzen besser und schneller von statten gehen und auch die Überlebensrate deutlich höher ist, als für Pflanzen ohne ihre Pilzpartner (CAIRNEY und CHAMBERS 1999; SMITH und READ 2008; BAST *et al.* 2016).

Dank den weit ausgedehnten und fein gesponnenen Hyphennetzwerken der Pilze, wird im Rahmen funktioneller Mykorrhiza-Symbiosen sowohl mehr oberirdische Pflanzenbiomasse erzeugt als auch ein viel grösseres und stärker verzweigtes Wurzelwerk ausgebildet (Abb. 3).

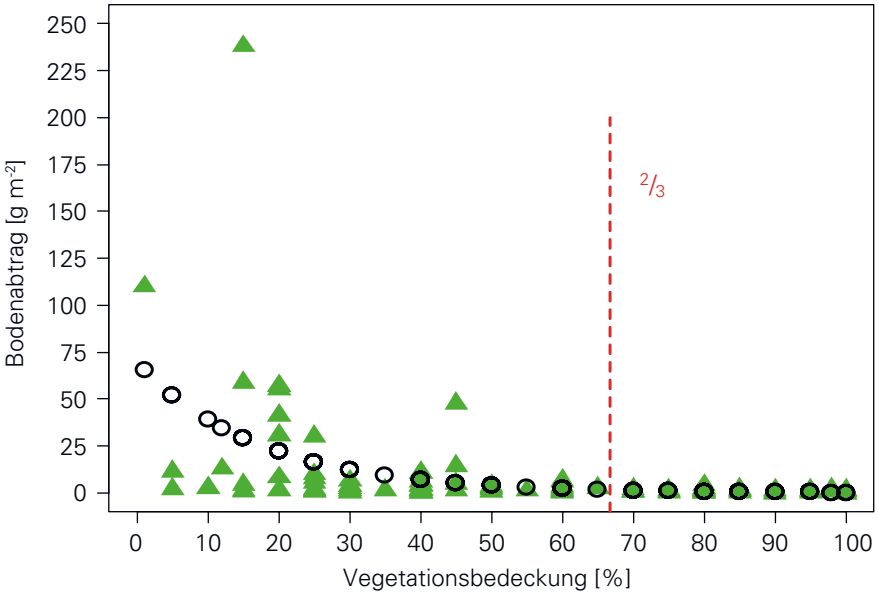

Abb. 2: Exponentieller Zusammenhang zwischen Bodenabtrag und Vegetationsbedeckung auf 20° geneigtem Gelände (MALIN und RIXEN 2016) mit dem Faustregel-Grenzwert von $^{2}/_{3}$ Vegetationsbedeckung für steile Hänge (MOSIMANN 1981).

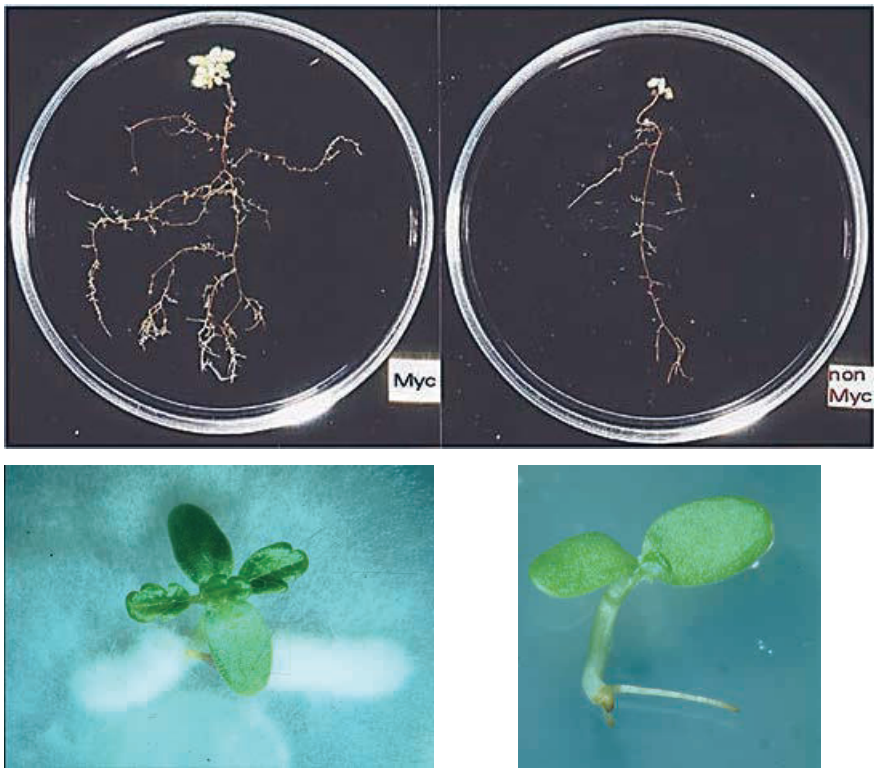

Abb. 3: Wurzeln von 20 Wochen alten Silberwurz-Pflänzchen (*Dryas octopetala* L.) und 2-wöchigen Keimlingen, inokuliert mit dem Mykorrhizapilz *Laccaria bicolor* (Maire) P.D. Orton, mit stark verzweigtem Wurzelwerk, respektive dem wattig weissen Pilzmantel und Myzel (links) sowie die entsprechenden Kontrollen ohne Mykorrhizapilz (rechts).

READ und BOYD (1986) haben in ihren Untersuchungen an Waldföhren (*Pinus sylvestris* L.) 10 bis 80 m Myzel von Ektomykorrhizapilzen gemessen und das für 1 cm mykorrhizierte Feinwurzel. Dieses immense Netzwerk an Pilzhyphen durchdringt den Boden um ein Vielfaches intensiver als Wurzelhaare nicht mykorrhizierter Pflanzen. Zudem hat es dank den kleinen Hyphendurchmessern (2–5 µm) Zugang zu einem viel grösseren Porenvolumen, da selbst ein Teil der Mittelporen (0,2–10 µm) erschlossen werden kann. Diese bleiben den Wurzelhaaren mit Durchmessern von 10 bis 15 µm vollständig verwehrt. Es erstaunt daher nicht, dass durch die Mykorrhizapilze die Absorptionsoberfläche für die Wasser- und Nährstoffaufnahme um bis zu 50-mal grösser ist als bei Pflanzen ohne Symbiosepartner und daher mykorrhizierte Pflanzen besser gedeihen (SANCHEZ-ZABALA *et al.* 2013).

Bodenbildung: Das grossräumige und feinverzweigte Hyphennetzwerk dient jedoch nicht nur der Versorgung von Wirtspflanzen mit Wasser und Nährstoffen, sondern trägt massgeblich und direkt auch zur Bildung stabiler Bodenaggregate bei. Kleinste organische und anorganische Bodenpartikel werden in einem ersten Schritt von den Pilzfäden netzartig umgarnt (mechanische Stabilisierung) und mit Hilfe von klebstoffartigen Stoffwechselprodukten, meist Polysaccharide, zementiert (chemische Stabilisierung). Indirekt, über die Förderung des Wurzelwachstums, unterstützen Mykorrhizapilze auch die Bodenarmierung (Wurzelverstärkung). Zudem dienen die Hyphen als Verbreitungsvektoren weiterer (Mikro-) Organismen, welche ihrerseits an der Aggregatbildung beteiligt sind (BUDI *et al.* 1999; FILION *et al.* 1999; BEZZATE *et al.* 2000; HILDEBRANDT *et al.* 2002; MANSFELD-GIESE *et al.* 2002; RILLIG und MUMMEY 2006).

Stabile Bodenaggregate sind die unverzichtbaren Bausteine zum Aufbau einer beständigen Bodenmatrix und Porenstruktur. Damit sind sie Garant für eine ausreichende Rückhaltekapazität von Wasser- und Nährstoffen und somit essentielle Voraussetzung für eine angemessene Versorgung der Wirtspflanzen durch ihre Pilzpartner (CAESAR-TON THAT *et al.* 2001; TAGU *et al.* 2001; MANKEL *et al.* 2002; RILLIG und MUMMEY 2006).

Vegetationsentwicklung: Auch der Entwicklung der Pflanzen und insbesondere der Pflanzengesellschaften kommt im Hinblick auf Hangstabilität eine wichtige Rolle zu. Im Verlauf der Sukzession von der Start- zur angestrebten Ziel- oder natürlichen Klimaxgesellschaft haben Mykorrhizapilze ebenfalls ein gewichtiges Wort mitzureden. Sie sind sozusagen die Katalysatoren dieses Prozesses und verantwortlich für dessen Dynamik. Das Fehlen geeigneter Pilzpartner kann den «Sukzessions-Motor» arg ins Stottern oder gar ganz zum Erliegen bringen (VAN DER HEIJDEN 1998). Denn es ist zu bedenken, dass nicht jeder Mykorrhizapilz mit jeder Pflanze zu jeder Zeit an jedem Ort unter jeglichen Umweltbedingungen eine funktionelle Symbiose ausbilden kann (PERRY *et al.* 1987). Bei mehrjährigen Pflanzen findet auch im Rahmen der Mykorrhizabildung eine Sukzession statt und entsprechend werden im Jugendstadium andere Pilzpartner beherbergt als im Alter. So finden sich beispielsweise nebst vielen anderen Pilzpartnern der Fichte die Fruchtkörper von Steinpilz, Eierschwamm und Fliegenpilz nur in Waldbeständen fortgeschrittenen Alters.

Unter diesem Gesichtspunkt gilt es auch zu bedenken, dass auf abgerutschten und erodierten Flächen das natürliche Vorkommen von Mykorrhiza-Inokulum drastisch reduziert und die Einwanderung aus intakten Nachbargebieten nicht garantiert ist (BIONDINI *et al.* 1985; AMARANTHUS und TRAPPE 1993). Denn je nach Alter und Typ der angrenzenden Pflanzengesellschaften sind die dort vorhanden Mykorrhizapilze nicht kompatibel mit den Pflanzarten, die in der Rutschungsfläche zur Wiederbesiedlung und Stabilisierung für das Initialstadium verwendet werden.

Eine beträchtliche Verlangsamung oder gar ein Stopp der Pflanzengesellschaftsentwicklung wirkt sich häufig nachteilig auf die Stabilität rutschungsgefährdeter Hänge aus. Umso mehr, wenn es sich bei der aktuellen Sukzessionsphase um einen monotonen Bestand mit einheitlicher Durchwurzelungstiefe handelt, was beispielsweise bei einem stagnierenden Grauerlenbestand (*Alnetum incanae* Lüdi) der Fall ist. Eine frühzeitige Ablösung solcher Bestände ist angebracht und in mehrfacher Hinsicht sinnvoll. So nimmt einerseits die mechanische Stabili-

tätswirkung von Erlenwurzeln (*Alnus incana* (L.) Mönch) mit zunehmendem Alter ab (SCHIECHTL 1973) und andererseits bilden sich unter den gleichförmigen Wurzelhorizonten bevorzugt Gleitschichten für flachgründige Rutschungen aus (VON WYL 1987).

Diversität und Landnutzung

Artenreichtum, respektive Diversität ganz allgemein, ist ein weiterer Schlüssel-Parameter, welcher die Wirkung der Vegetation auf die Hangstabilität massgeblich beeinflusst, deren Quantifizierung jedoch zusätzlich erschwert (GRAF 2009; POHL *et al.* 2012). Im Zusammenhang mit Natur- und Landschaftsschutzdiskussionen wird denn auch die Artenvielfalt der Ausgangsgesellschaft als entscheidende Basis für die natürliche Entwicklung von Pflanzenassoziationen hervorgehoben (LEUZINGER und LACHAT 1995; HACKER *et al.* 1996). Durch die Vielfalt soll die Widerstandsfähigkeit der Initialpflanzung während der heiklen Keimungs- und Anwuchsphase erhöht und dadurch ein möglichst umfassendes Artenspektrum für natürliche Sukzessionsprozesse bereitgestellt werden.

Unter diesem Gesichtspunkt ist die landwirtschaftliche Nutzung sehr beschränkend zu handhaben. Insbesondere sollte möglichst auf Düngung und Beweidung verzichtet werden. Beides kann sich bezüglich Vielfalt nachteilig auf Pflanzen und Mykorrhizapilze auswirken. Eine zu intensive Düngung schränkt nicht nur die Diversität von Pflanzenarten und Wurzelarchitektur ein, sondern auch jene der Pilzpartner (HAUTIER *et al.* 2009; SMITH *et al.* 2015; YANG *et al.* 2015; ZHOU *et al.* 2016). Zudem kommt es zu einer Verschiebung des Spektrums hin zu nährstoffbedürftigen Arten und oberflächennaher Durchwurzelung. Auch die Beweidung kann sich im Hinblick auf nachhaltige Hangstabilisierung negativ auf das Wurzelwachstum auswirken, sowohl durch Bodenverdichtung als auch Frass. Die Wurzeldichte nimmt ab und es werden markant weniger Feinwurzeln ausgebildet was sich wiederum in einer Verarmung der Wurzelarchitektur niederschlägt (LI *et al.* 2015; TRACY *et al.* 2015; ROBERTS 2016).

Im Rahmen der Entwicklung der Pflanzen- und insbesondere der Waldgesellschaften ist deshalb im Hinblick auf einen optimalen Schutz vor flachgründigen Rutschungen der Arten-, Alters- und Bestandesstruktur besonderes Augenmerk zu schenken. Es gilt dabei auch zu beachten, dass die gewünschte Ziel- nicht zwingend mit der natürlichen Klimax-Gesellschaft übereinstimmen muss. Die Anwendung mit Bedacht ausgewählter ingenieurbiologischer Methoden kann unerwünschte Entwicklungen verhindern und diesen entgegenwirken. Gezieltes Wald- und Landnutzungs-Management hilft die Sukzession in die richtigen Bahnen zu lenken, respektive auf dem Weg zur angestrebten Ziel- (Klimax-) Gesellschaft zu halten (GEER 2000; FREHNER *et al.* 2005). Zusätzlich kann mit geeigneten Eingriffen die Strukturvielfalt, welche entscheidend zur Schutzwirkung gegen flachgründige Rutschungen beiträgt, gefördert und reguliert werden (MOOS *et al.* 2016).

Um den unbestritten positiven Funktionen der Vegetation allgemein und speziell jenen des Waldes im Hinblick auf langfristige und nachhaltige Hangstabilisierung gerecht zu werden, ist es unumgänglich die Wirkungen zuverlässiger zu quantifizieren. Es gilt also die verschiedenen biologischen Stabilisierungseffekte mit den massgebenden bodenmechanischen Parametern zur Berechnung des Sicherheitsfaktors gegen Bodenversagen durch flachgründige Rutschungen zu verknüpfen. Dabei soll der Fokus auf eine praxistaugliche Umsetzung gelegt werden. Im Rahmen des Projekts SOSTANAH (Soil Stability and Natural Hazards) vom Nationalen Forschungsprogramm NFP 68 wurden in dieser Hinsicht verschiedene Aspekte der Bodenmechanik, Vegetation sowie der Waldbewirtschaftung und Landnutzung beleuchtet und erfolgversprechende Parameter näher analysiert. Nachfolgend werden wichtige Resultate von Feld- und Laboruntersuchungen sowie daraus abgeleitete Empfehlungen vorgestellt.

Was wir gefunden haben …

Mykorrhizafunktionen im Dienste der Pflanzen

Überleben: Mykorrhizapilze unterstützen ihre Wirtspflanzen insbesondere unter extremen Bedingungen, wie beispielsweise im Rahmen der Bepflanzung einer planierten Skipiste im alpinen Bereich (2550 m ü. M.) mit Stecklingen der Zwergweide *Salix herbacea* L. (Kraut-Weide). Die entsprechenden Untersuchungen haben neben den höheren Überlebensraten mykorrhizierter Pflanzen auch deutliche Unterschiede bezüglich der verwendeten Pilzarten aufgezeigt (Graf 1998; Graf *et al.* 2006). Im Vergleich zu den nicht mykorrhizierten Kontrollpflanzen verhalf *Laccaria bicolor* (Maire) P. D. Orton (Zweifarbiger Lacktrichterling) den Stecklingen von Beginn weg zu besserem Überleben, wobei sich Kultur 2 deutlich besser bewährte als Kultur 1. Die Wirtspflanzen von *Laccaria montana* Singer (Berg-Lacktrichterling) hingegen konnten sich erst nach der dritten Vegetationsperiode gegenüber den Kontrollen behaupten (Abb. 4).

Was für den alpinen Bereich gefunden wurde, hat auch in tieferen Lagen seine Bewandtnis. Die steilen Einhänge im montan-subalpinen Einzugsgebiet des Arieschbach (Fideris, GR) waren im Zusammenhang mit Starkniederschlägen immer wieder Ursprung von zum Teil massiven Schadenereignissen. Schon früh wurde deshalb versucht die grossflächig vegetationslosen Steilhänge mit Hilfe technischer Konstruktionen und Pflanzungen zu stabilisieren. In Anlehnung an diese ingenieurbiologischen Massnahmen wurden im Frühjahr 2010 Untersuchungsflächen eingerichtet, auf welchen neben einer Saatmischung und Heckenbuschlagen auch Mykorrhizapilze eingesetzt wurden. Im Rahmen eines Forschungsprojekts haben Bast *et al.* (2014, 2016) den Einfluss dieser Symbiosepartner auf die Pflanzungen allgemein und im Speziellen auf das Überleben eingehend untersucht (Abb. 5). Als Inokulum wurde das kommerzielle Produkt «Forst» der Firma INOQ (https://inoq.de/) nach deren Empfehlungen verwendet. Dieses Produkt enthält sowohl arbuskuläre (3 Arten) als auch Ekto-Mykorrhizapilze (8 Arten) und deckt somit das Spektrum der verwendeten Pflanzen sehr gut ab. Die Mykorrhiza-Untersuchungen konzentrierten sich auf die Pflanzenarten der Gattungen Erle (*Alnus incana* [L.] Mönch, *A. viridis* [Chaix] DC.) und Weide (*Salix purpurea* L.; *Salix sp.*).

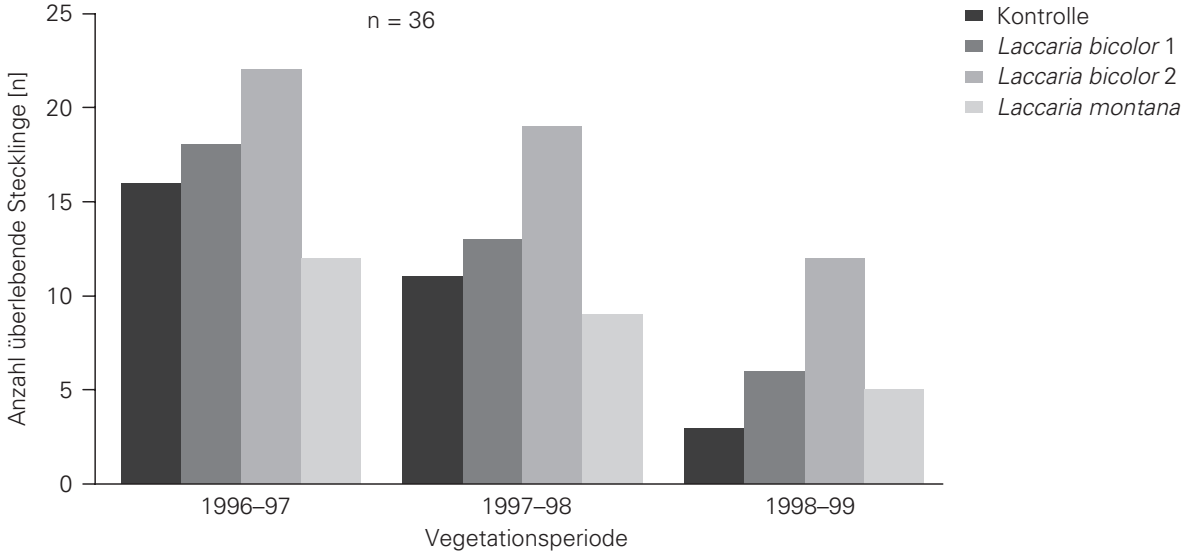

Abb. 4: Überlebensraten auf einer planierten Skipiste im alpinen Bereich von *Salix herbacea* Stecklingen (Kraut-Weide) inokuliert mit den Mykorrhizapilzarten *Laccaria biocolor* und *L. montana* (Gattung Lacktrichterlinge).

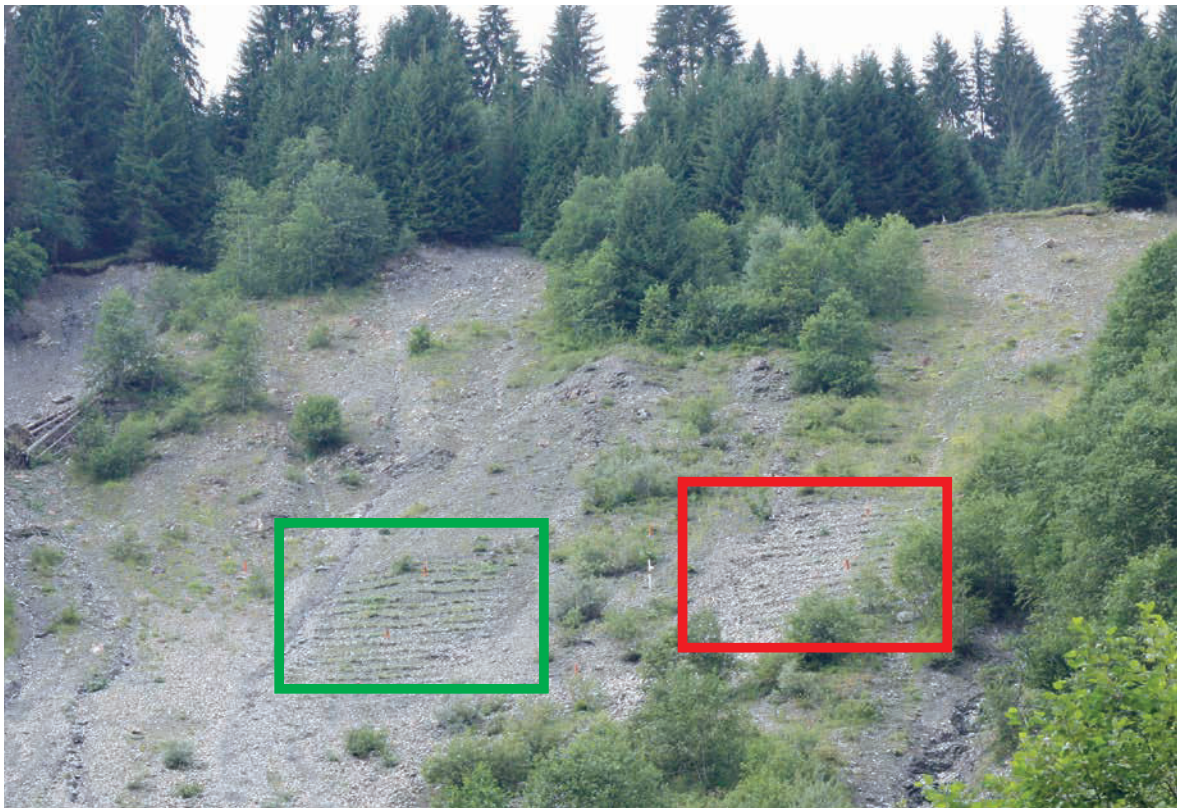

Abb. 5: Untersuchungsgebiet «Arieschbach» (Fideris, GR) mit 40–50° steilem Hang und den beiden ingenieurbiologisch verbauten Untersuchungsflächen mit (grün) und ohne (rot) Anwendung von Mykorrhizapilzen (Aufnahme von Alexander Bast, WSL).

Der Mykorrhiza-Effekt war schon nach der ersten Vegetationsperiode klar ersichtlich und signifikant und so blieb es auch in den nachfolgenden zwei Untersuchungsjahren. Die Überlebensraten der mykorrhizierten Pflanzen nach der dritten Vegetationsperiode betrugen für die Erlen gut 50 Prozent, jene der Weiden 80 Prozent. Im Vergleich dazu lebten bei den nicht behandelten Erlen nur noch knapp 20 Prozent und bei den Weiden 50 Prozent. Von Beginn an konnten sich die Weiden deutlich besser behaupten als die Erlen, sowohl in der mykorrhizierten als auch unbehandelten Variante.

Höhere Überlebensraten sind eng mit besserem Wachstum verknüpft. Insgesamt produzierten die mykorrhizierten Pflanzen (*Alnus spp.; Salix spp.*) deutlich mehr oberirdische Biomasse. Der Unterschied zu den nicht mykorrhizierten Kontrollpflanzen war von Beginn weg ersichtlich und insbesondere bei den Erlen mit 4 bis 6 mal höheren Werten sehr ausgeprägt. Bei den Weiden lag das Verhältnis in allen Untersuchungsjahren ziemlich konstant bei 1,5 (Bast *et al.* 2016).

Sprosswachstum: Der positive Einfluss auf das Pflanzenwachstum (oberirdische Biomasse) ist einer der offensichtlichsten Effekte der Mykorrhiza und wurde unzählige Male sowohl in Feld- als auch Laborversuchen unter kontrollierten Bedingungen nachgewiesen (Smith und Read 2008). Unsere Untersuchungen mit Erle (*Alnus incana* (L.) Mönch) und Hängebirke (*Betula pendula* Rotth.) sowie verschiedenen Inokulum-Typen bestätigen dies und zeigen ebenfalls eine Abhängigkeit der spezifischen Pflanze-Pilz Beziehung (Abb. 6.; Graf *et al.* 2017; im Druck).

Sowohl bei Erle als auch bei Birke bewirkte das kommerzielle Inokulum «Forst» von INOQ eine deutliche Steigerung der oberirdischen Biomasse. Die Zugabe eines jeweils wirtsspezifischen Mykorrhizapilzes führte nur bei Erle zu einer geringfügigen Steigerung gegenüber der unbehandelten Kontrolle (Abb. 7). Als spezifische Pilzarten kamen für die Birke *Hebeloma crus-*

tuliniforme (Bulliard) Quél (Tongrauer Tränen-Fälbling) und für die Erle *Melanogaster variegatus s.l.* (Vittad.) Tul. und C. Tul. (Bunter Schleimtrüffel) zum Einsatz. Beide Pilzarten stammen aus der Kultur-Sammlung von Mykorrhizapilzen der WSL und wurden direkt aus Fruchtkörpern *(H. crustuliniforme)* eines natürlichen Birkenbestands, respektive aus Wurzeln *(M. variegatus s.l.)* von Grauerlen isoliert (Graf und Frei 2013; Graf *et al.* 2017).

Abb. 6: Wachstumseffekt von Mykorrhiza, links bei Erle *(Alnus incana)* und rechts bei Birke *(Betula pendula)*. Die beiden Proben links bei Erle und die eine bei Birke wurden jeweils mit Mykorrhizapilzen inokuliert.

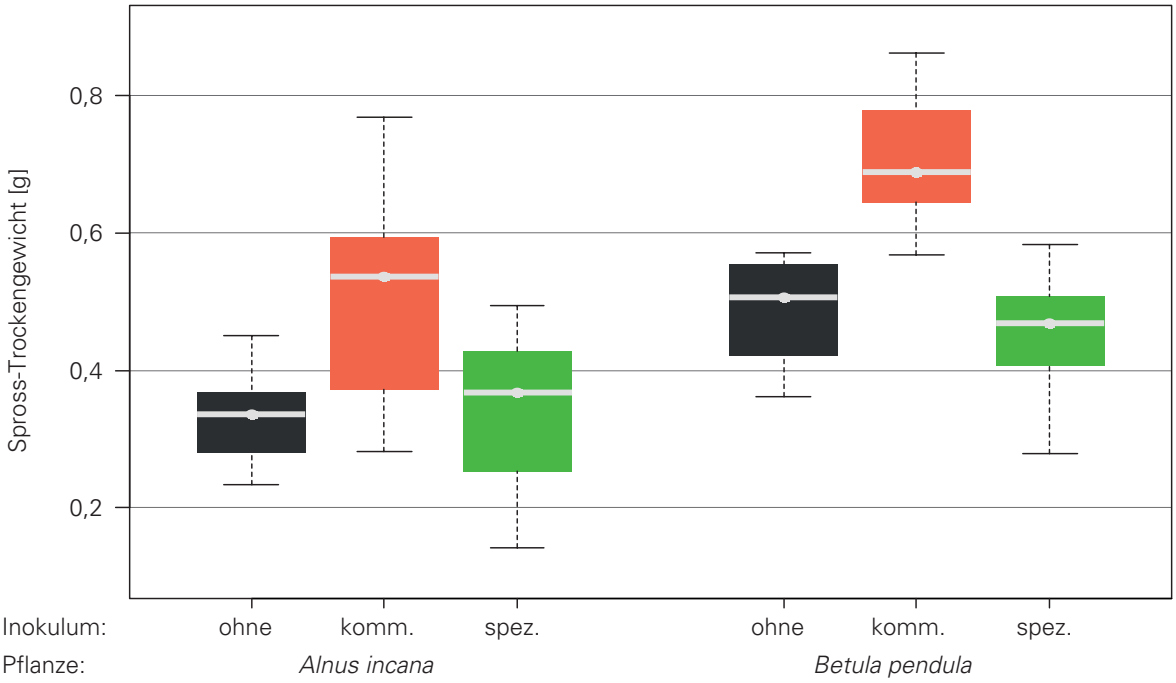

Abb. 7: Auswirkung unterschiedlicher Mykorrhizapilz-Inokuli (kommerziell, spezifisch) auf das oberirdische Wachstum im Vergleich zu unbehandelten Kontrollpflanzen (ohne). Links bei Erle *(Alnus incana)* und rechts bei Birke *(Betula pendula)*.

Wurzelwachstum: Mykorrhizapilze können nicht nur die Produktion der oberirdischen Biomasse ihrer Wirtspflanzen fördern, sondern auch deren Wurzelwachstum in erheblichem Masse beeinflussen. Im Rahmen der Untersuchungen an Erle und Birke hat sich erneut gezeigt, dass die positive Wirkung auf das Wurzelwachstum durch Mykorrhizapilze artspezifisch sein kann. Wiederum bewirkte die Inokulierung mit dem kommerziellen Produkt bei Birke signifikant höhere Wachstumsraten als dies für den spezifischen Mykorrhizapilz der Fall war (Abb. 8). Bei der Erle war im Vergleich zu den unbehandelten Kontrollpflanzen die Steigerung des Wurzelwachstums deutlich weniger ausgeprägt. Im Gegensatz zur Birke, war sie für den spezifischen Mykorrhizapilz am höchsten mit einem Median von 1,9 cm cm^{-3}. Der entsprechende Wert für die Wurzellänge pro Bodenvolumen war für die Pflanzen mit dem kommerziellen Inokulum mit 1,6 cm cm^{-3} sogar geringfügig tiefer als für die Kontrollen (1,7 cm cm^{-3}).

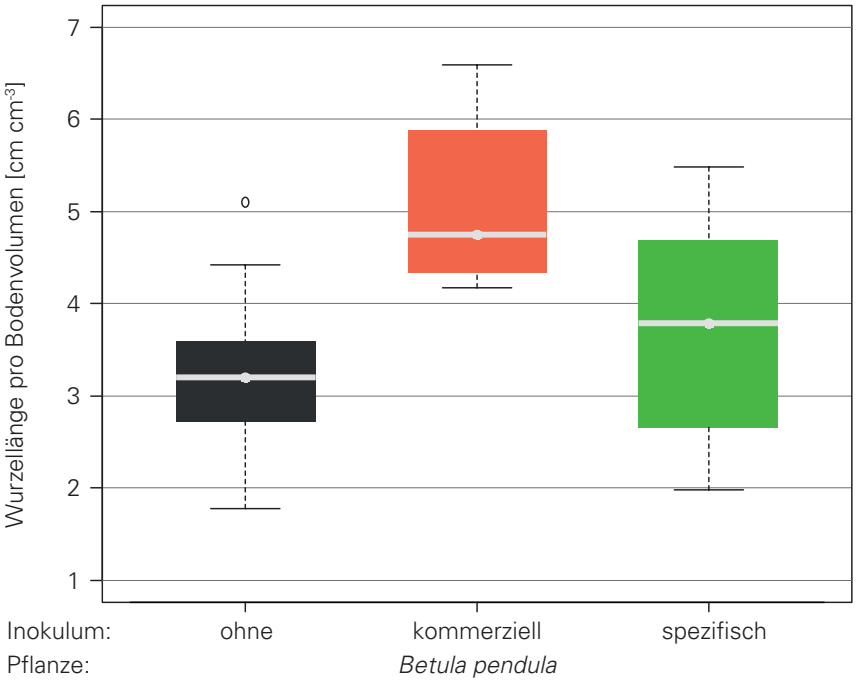

Abb. 8: Auswirkung unterschiedlicher Mykorrhizapilz-Inokuli (kommerziell, spezifisch) auf das Wurzelwachstum von Birke *(Betula pendula)* im Vergleich zu unbehandelten Kontrollpflanzen (ohne).

Bodenstabilität dank Pflanzen und Pilzen

Aggregatstabilität: Stabile Bodenaggregate sind nicht nur essentielle Voraussetzung für eine genügende Wasser- und Nährstoff-Rückhaltekapazität im Hinblick auf das Wachstum und die nachhaltige Entwicklung von Pflanzen und Pflanzengesellschaften. Ebenso fördert eine stabile Aggregatstruktur die Durchwurzelung des Bodenkörpers – insbesondere auch in die Tiefe – und ist somit zumindest indirekt mitentscheidend für die Hangstabilität. Umgekehrt fördert eine gute Durchwurzelung die Aggregatstabilität. Hierbei spielen Mykorrhizapilze erneut eine Schlüsselrolle. Die positive Korrelation zwischen Aggregatstabilität und Wurzeldichte (Wurzellänge pro Bodenvolumen) sowie Mykorrhizierung wurde mehrfach nachgewiesen (Miller und Jastrov 1990; Graf und Gerber 1997; Burri *et al.* 2009; Graf und Frei 2013; Bader 2014; Graf *et al.* 2015; Erktan *et al.* 2016).

Diese positive Beziehung zwischen Wurzelwachstum und der Bildung stabiler Bodenaggregate bestätigte sich auch im Rahmen von Versuchen mit Erle und Birke (Abb. 9). Die höchste Aggregatstabilität wurde für beide Baumarten mit jener Behandlung erreicht, aus welcher auch die höchsten Durchwurzelungswerte resultierten. Für die Erle war das die Inokulierung mit dem spezifischen Mykorrhizapilz, für die Birke mit dem kommerziellen Produkt «Forst» der Firma INOQ. Bei Letzterer war die Aggregatstabilität im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle auch für die Behandlung mit dem spezifischen Mykorrhizapilz signifikant höher. Für die Erle trat dagegen kein Unterschied zwischen der Kontrolle und der Inokulierung mit dem kommerziellen Produkt zu Tage (Abb. 9).

Porenwasserdruck: Ebenfalls entscheidend wirkt sich die Stabilität der Bodenmatrix und somit der Porenstruktur 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.

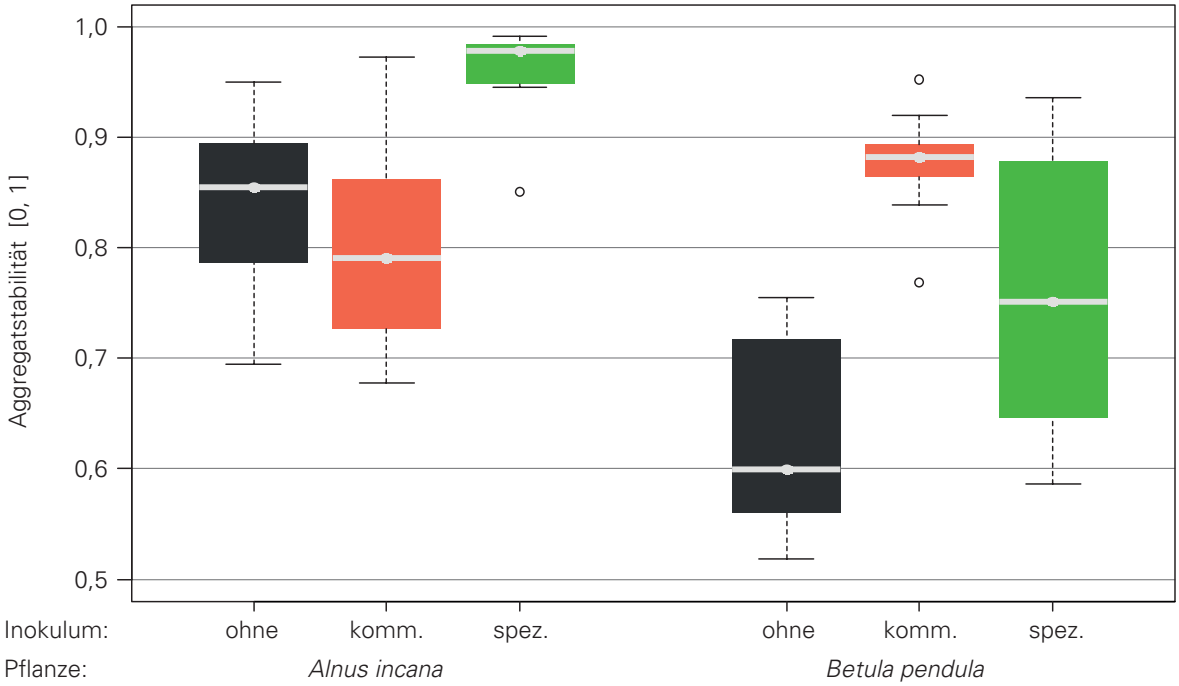

Abb. 9: Auswirkung unterschiedlicher Mykorrhizapilz-Inokuli (kommerziell, spezifisch) zusammen mit Erle *(Alnus incana)* und Birke *(Betula pendula)* auf die Aggregatstabilität im Vergleich zu unbehandelten Kontrollpflanzen (ohne).

Die Untersuchungen von BADER (2014) zur Entwicklung des Porenwasserdrucks während der Aufsättigungsphase im Rahmen von Aggregatstabilitäts-Tests haben diese Begebenheiten sehr schön zum Ausdruck gebracht. Diesbezüglich zeigte sich, dass mit zunehmender Intensität der Durchwurzelung die Zeitdauer bis zum Zerfall des Bodenkörpers aufgrund ansteigenden Porenwasserdrucks verlängert wird. Dieser Widerstand gegenüber dem ansteigenden Porenwasserdruck korrelierte positiv mit der Aggregatstabilität. Versuche mit Erle *(Alnus incana)*, Wiesenrispengras (*Poa pratensis* L.) und der Kombination der beiden Pflanzen haben dies deutlich gezeigt (Abb. 10a).

Verglichen mit den unbepflanzten Kontrollen konnte zwar für die reinen Erlen-Proben nur eine minimale Verbesserung festgestellt werden. In den Proben mit Wiesenrispengras dagegen war die Zeitspanne bis zum Kollaps der Bodenstruktur deutlich verlängert. Am längsten konnte der Widerstand in den reinen Gras-Proben aufrechterhalten werden, wo er mehr als doppelt so lange war als in der kombinierten Behandlung Gras und Erle. Bezüglich Aggregatstabilität konnte zwischen diesen beiden Varianten allerdings kein Unterschied festgestellt werden. Die Ver-

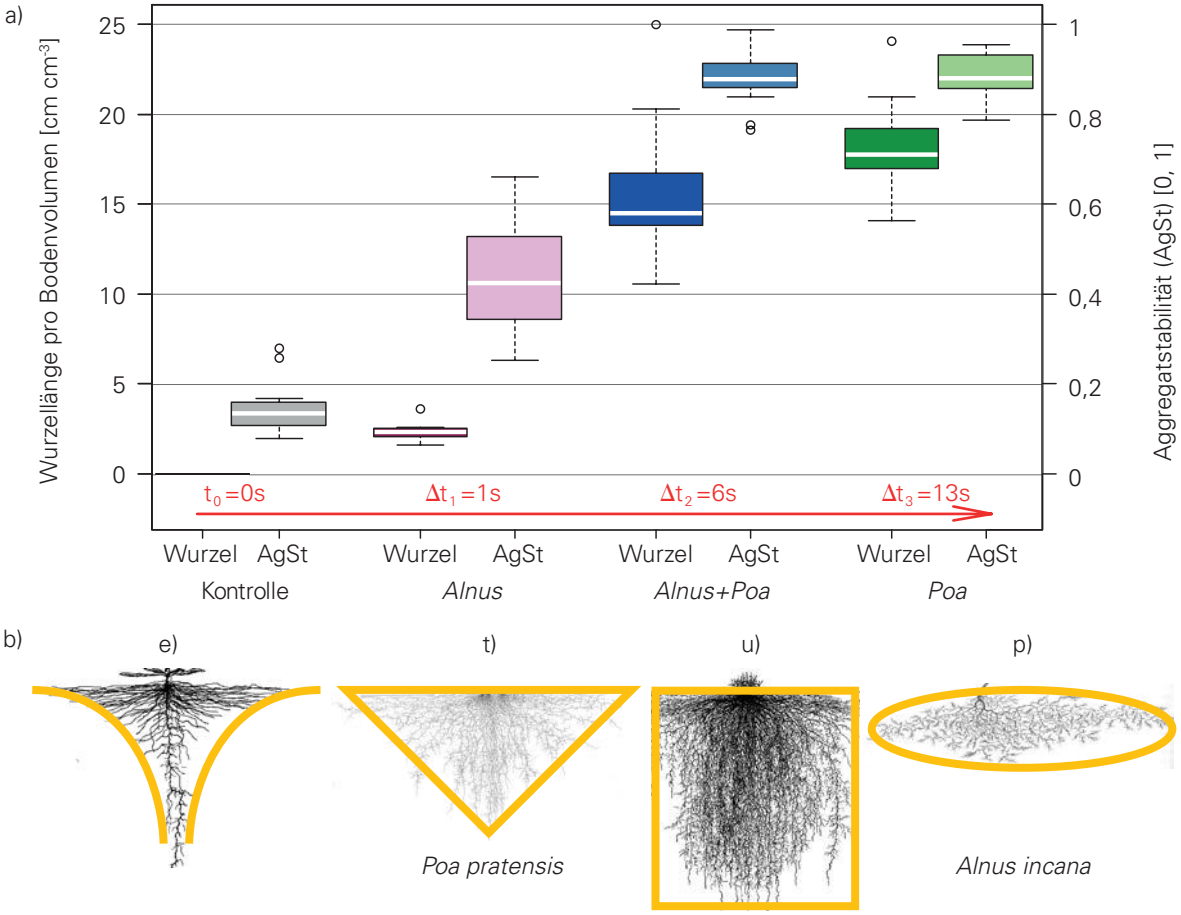

Abb. 10: a) Wurzellänge pro Bodenvolumen (Wurzel) und entsprechende Aggregatstabilität (AgSt) von Bodenproben mit Erle *(Alnus incana)*, Wiesen-Rispengras *(Poa pratensis)* sowie der Kombination der beiden Arten. Roter Pfeil mit Angaben zur Erhöhung der Zeitspanne des Widerstands gegen den Zerfall des Bodenkörpers (Abbau der Saugspannung und Zunahme des Porenwasserdruks) im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle (BADER 2014).
b) Wurzelstruktur (Zeichnungen nach Kutschera und Lichtenegger 1982, 2002) und Wurzelform (gelb; NG *et al.* 2015) mit abnehmender Widerstandskraft gegen zunehmenden Porenwasserdruck: e) exponentiell > t) dreieckig > u) uniform > p) parabolisch.

mutung liegt deshalb nahe, dass die intensivere Durchwurzelung in den reinen Grasproben sowie Unterschiede in der Wurzelstruktur und -architektur zwischen Wiesenrispengras und Erle für die höhere Widerstandskraft gegen zunehmenden Porenwasserdruck massgebend waren. Analysen von NG *et al.* (2015) haben gezeigt, dass die Wurzelstruktur die Widerstandskraft gegen zunehmenden Porenwasserdruck massgeblich beeinflusst. In der Reihenfolge mit abnehmendem Einfluss sind das die Wurzelformen «exponentiell», «dreieckig», «uniform» und «parabolisch» (Abb. 10b).

Die Resultate unserer Untersuchungen (BADER 2014) können diese Klassifizierung bestätigen. Das Wurzelwerk des Wiesenrispengrases ist nicht verholzt, stark verflochten und durch einen hohen Anteil an Feinwurzeln (< 1,0 mm) charakterisiert. Im Gegensatz dazu besitzt die Erle mehrheitlich verholzte Wurzeln mit höheren Anteilen an Mittel- und Grobwurzeln. Die Wurzelarchitektur von *Poa pratensis* entspricht nach NG *et al.* (2015) dem «Dreieck-Typ» (triangular), welcher einen signifikant höheren negativen Porenwasserdruck bewirkt als der «Parabol-Typ» (parabolic) von *Alnus incana* (Abb. 10b). Entsprechend dauert es beim Sättigen in einem von Gras bewachsenen Boden länger bis die Struktur der Bodenmatrix zerstört wird und die Probe auseinanderfällt. Im Zusammenhang mit unseren Untersuchungen konnten wir auch nachweisen, dass die Evapo-Transpirationsraten in den reinen Gras-Proben deutlich höher liegen als in den restlichen Proben. Somit steht jenen von Beginn weg ein grösseres Reservoir für die Aufnahme von Wasser zur Verfügung. Mit einer mittleren Gesamtdauer der Aggregatstabilitäts-Tests von 135 Sekunden bis zum Zerfall unbepflanzter Kontrollen entspricht die Verlängerung in den reinen Gras-Proben um 13 Sekunden einer Zunahme von 10 Prozent bis die Saugspannung abgebaut wird und die Probe zerfällt (Abb. 10a).

Hangstabilität aus Sicht der Bodenmechanik

Triax-Scherversuch: Die positiven Effekte der Vegetation, namentlich der Wurzeln auf Boden- und Hangstabilität haben wir bereits früher nachgewiesen mit triaxialen Scherversuchen von rolligem Moränenmaterial aus einem Rutschungsgebiet. Bepflanzt mit Erle *(Alnus incana)*, ergab die Berechnung der Scherparameter im Vergleich zu unbepflanzten Kontrollen eine mittlere Erhöhung des Reibungswinkels Φ' von 5° ($\Phi'_{unbepflanzt}$: 34,3°; $\Phi'_{bepflanzt}$: 39,4°) ohne Kohäsion ($\Delta c'$ = 0). Ein bepflanzter Hang auf Moräne wäre also auch bei 5° steilerer Neigung als es das reine Bodenmaterial aus geotechnischer Sicht zulässt noch standhaft (GRAF *et al.* 2009).

In verschiedenen Untersuchungsgebieten konnte diese «biologische Erhöhung» der bodenmechanischen Stabilität bestätigt werden. In vergleichbarem Masse übersteile Hänge mit gut entwickelter Vegetationsdecke – insbesondere Waldbestände – überstanden Starkniederschlagsereignisse schadlos, wie beispielsweise das Unwetter von 2005 in der Zentral- und Ostschweiz. Dies im Gegensatz zu grossflächig einförmigen, stark lückigen Beständen, respektive solchen, die vorgängig durch Windwurf und/oder Borkenkäferkalamitäten in Mitleidenschaft gezogen wurden sowie im Unterschied zu intensiv landwirtschaftlich genutzten Flächen. Mitverantwortlich für die stabilisierenden Pflanzenwirkungen war unbestritten die gute Durchwurzelung des Bodenkörpers (RICKLI 2001; BÖLL *et al.* 2008).

Direkt-Scherversuch: Für die angemessene und realitätsnahe Quantifizierung der Wurzelwirkungen auf die Bodenstabilität wurde eigens ein neigbarer Direktscherapparat für grosse Proben (50 x 50 x 40 cm) entwickelt (Abb. 11).

Damit war es uns erstmals möglich, Vorteile von herkömmlichen Feld- und Labormethoden optimal zu kombinieren: gut kontrollierbare und beliebig oft wiederholbare Versuche sowie grosse Proben, welche die Natur angemessen repräsentieren. Die Untersuchungen haben unter anderem gezeigt, dass es nicht ausreichend ist wie bis anhin nur den Reibungswinkel Φ' und die Kohäsion c' zu berücksichtigen. Um die biologischen Bodenstabilisierungseffekte generell und im Speziellen jene durch Wurzeln induzierten angemessen zu quantifizieren, hat sich die

Abb. 11: Bis zu 45° neigbarer Direktscherapparat für grosse Proben von 50 x 50 x 40 cm mit Linear-Antrieben zum Aufbringen der Scher- (a) und Normalkraft (b).

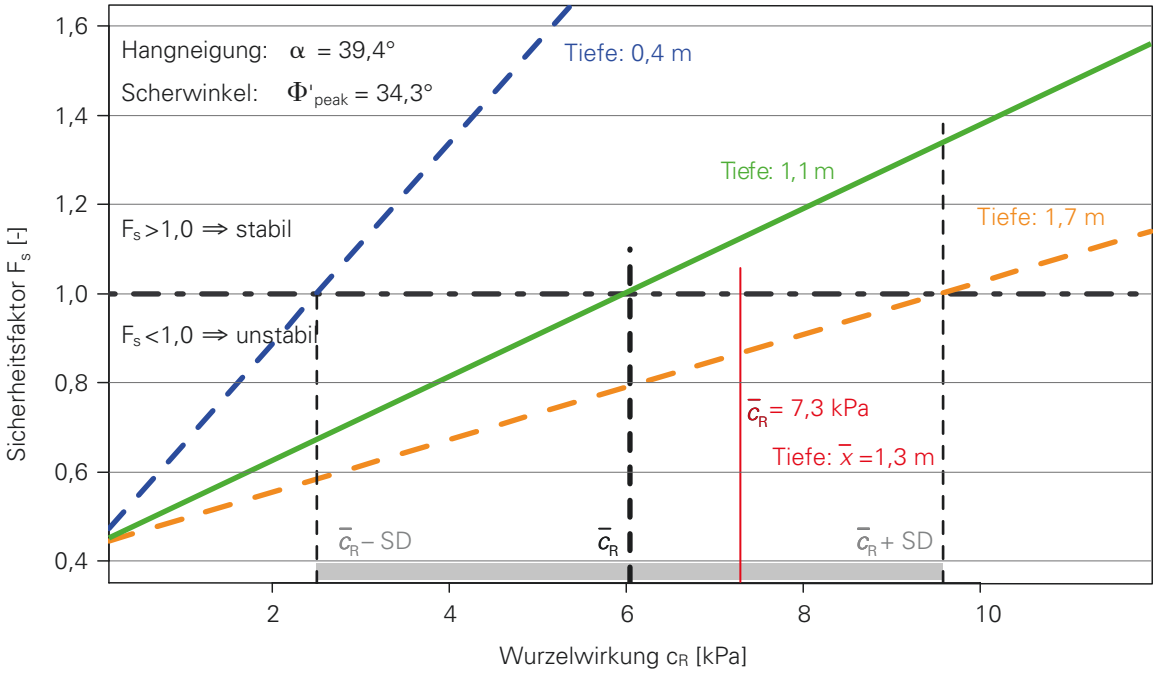

Abb. 12: Sicherheitsberechnungen für einen um 5° steileren Hang (α) als der kritische Reibungswinkel (Φ' = 34,3° aus den triaxialen Scherversuchen) mit unterschiedlicher Wurzelwirkung (Mittelwert [$\bar{c}_R$] ± Standardabweichung [SD]) unter Berücksichtigung der Tiefe der Gleitschicht. Berechnungen nach dem Verfahren für Grenzgleichgewicht einer unendlich langen Böschung mit hangparalleler Sickerströmung (HAEFELI 1948). Mit einer Wurzelwirkung von 7,3 kPa erreicht man einen Sicherheitsfaktor von 1 in einer Tiefe von $\bar{x}$ = 1,3 m, was dem Mittelwert der Gleitschichttiefe von über 200 analysierten Waldrutschungen entspricht, respektive dem Median $\tilde{x}$ = 1,1 m.

Dilatanz (Ψ) als weitere entscheidende Grösse erwiesen (YILDIZ *et al.* 2017, eingereicht). Diese Eigenschaft eines Bodenmaterials, sein Volumen unter der Einwirkung von Scherkräften durch Auflockerung zu vergrössern, prägt das Scherverhalten eines wurzelverstärkten Bodens massgeblich.

Sicherheit gegen Abgleiten: Mit diesem neu konzipierten Ansatz wurde in zahlreichen Versuchen der positive Effekt von Pflanzen und Mykorrhizapilzen auf die Boden- und oberflächennahe Hangstabilität bestätigt. Dabei wurde nicht nur der mechanische Effekt der Wurzelverstärkung (Armierung) betrachtet, sondern die kombinierten Effekte der durch die Wurzeln beeinflussten mechanischen, hydrologischen und strukturellen Veränderungen im Boden berücksichtigt. Neben der Bildung und Zementierung von Bodenaggregaten zählen auch indirekte Effekte der biologischen Stabilisierung dazu, wie beispielsweise die Beeinflussung der Bodenstruktur durch bodenhydrologische Prozesse (Saugspannung, Schrumpfung-Quellung; BLUME *et al.* 2010). Je stärker durchwurzelt das Bodenmaterial war, desto fester war der Boden, desto höher auch die Hangstabilität in Bezug auf flachgründige Rutschungen. Boden einer Rutschfläche, welcher bepflanzt und inokuliert wurde, zeigte nach 6 Monaten Wachstum im Direkt-Scherversuch eine stark erhöhte Scherfestigkeit – im Mittel etwa 6 kPa (Wurzel-Wirkung: c_R = 6,05 ± 3,8 kPa, Abb. 12). Die Untersuchungen von MATTLI (2014) zur Quantifizierung der armierenden Wurzelverstärkung im Schutzwald wie auch andere Arbeiten in diesem Bereich (z.B. Schwarz *et al.* 2012) haben gezeigt, dass die Bodenarmierung durch Wurzeln im Bereich von $\Delta c'$ = 5–10 kPa für gut strukturierte Wälder durchaus realistische Werte darstellen.

Unter Berücksichtigung der in den Direktscherversuchen ermittelten Wurzelwirkungen wurden Berechnungen für die Sicherheit gegen Abgleiten durchgeführt (Verfahren für Grenzgleichgewicht einer unendlich langen Böschung mit hangparalleler Sickerströmung). Wie in unseren Triax-Versuchen zeigte sich, dass der Neigungswinkel α gegenüber dem Reibungswinkel Φ' um 5° erhöht werden kann und der Hang immer noch stabil bleibt – mit einer Wurzelwirkung von etwa 6 kPa bis in eine Tiefe von 1,1 m. Dieser Befund bestätigt somit die Resultate der triaxialen Scherversuche, für welche das gleiche Bodenmaterial verwendet und bei welchen durch die Bepflanzung eine Erhöhung des Reibungswinkels Φ' von 34,3° auf 39,4° festgestellt wurde (GRAF *et al.* 2009).

Die Analyse von über 200 Waldrutschungen, die nach den Unwettern 1997 (Sachseln), 2002 (Napf, Appenzell) und 2005 (Entlebuch, Napf, Prättigau) dokumentiert wurden und in der WSL-Datenbank für flachgründige Rutschungen und Hangmuren enthalten sind, ergab eine durchschnittliche Tiefe des Gleithorizontes in $\bar{x}$ = 1,3 m, respektive einen Median von $\tilde{x}$ = 1,1 m Tiefe (Abb. 12). Aufgrund unserer Laboruntersuchungen und Berechnungen, hätten also fast die Hälfte der Rutschungen, bei entsprechender Durchwurzelung und unter Einhaltung der 5°-Differenz zwischen Hangneigungs- und Reibungswinkel verhindert werden können (siehe Kapitel «Rutschungsanalyse mit einem 3-Stufen-Filter»).

Dilatanz: Wie bereits 1986 von Bolton an verschiedenen Sanden mit unterschiedlich dichter Lagerung demonstriert wurde, ist der maximale Reibungswinkel (Φ'_{peak}) abhängig vom dilatanten Verhalten des Bodenmaterials; ein Zusammenhang, der bei höherer Dichte ausgeprägter wird. Dilatanz bezeichnet die Eigenschaft eines Bodenmaterials, sein Volumen unter Einwirkung von Scherkräften durch Auflockerung zu vergrössern. TAYLOR (1948) wie auch JEWELL und WROTH (1987) konnten zudem zeigen, dass es für dichten Sand, im Vergleich zu lockerem, beträchtlich weniger Deformation bedarf, um Widerstandskräfte zu mobilisieren (z. B. Zugfestigkeit der Wurzeln). Daraus lässt sich eine positive Korrelation ableiten zwischen maximalem Dilatanzwinkel (Ψ_{max}) und maximalem Reibungswinkel (Φ'_{peak}) und somit den Zugkräften, welche auf die Wurzeln wirken: je höher der Dilatanzwinkel ist, desto höher wird der maximale Reibungswinkel und desto höher die mobilisierten Wurzel-Zugkräfte. Der Dilatanzwinkel wird definiert als: $\Psi(°) = \tan^{-1}\frac{\delta y}{\delta x}$; mit δy = Normal-Verschiebung und δx = Scherweg (BOLTON 1986, YILDIZ *et al.* 2017; eingereicht).

Entsprechend kann erwartet werden, dass Dilatanz nicht nur einen direkten Effekt auf den maximalen Reibungswinkel hat, sondern diesen auch indirekt beeinflusst, da auch die Wurzel-

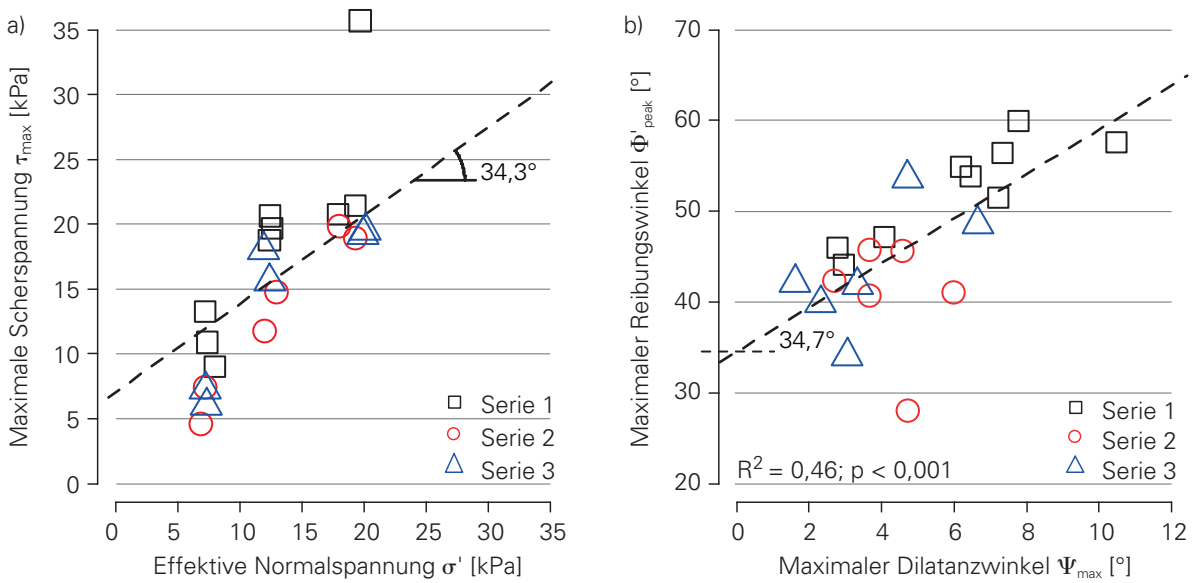

Abb. 13: a) Beziehung zwischen maximaler Scherspannung (τ_{max}) und effektiver Normalspannung (σ') mit einer Regressionsgeraden unter Verwendung des kritischen Reibungswinkels Φ'_{peak} = 34,3°, welcher von den triaxialen Scherversuchen übernommen und auch für die Sicherheitsberechnung in Abbildung 12 verwendet wurde. Die Daten stammen aus drei verschiedenen Versuchsserien (YILDIZ *et al.* 2015), welche sich bezüglich Anzahl Pflanzenarten und Wachstumsdauer unterscheiden: Serie 1 (3 Arten, 6 Monate), Serie 2 (6 Arten, 6 Monate), Serie 3 (6 Arten, 12 Monate).
b) Regressionsanalyse mit signifikanter und positiver Korrelation zwischen maximalem Reibungswinkel Φ'_{peak} und maximalem Dilatanzwinkel Ψ_{max}, mit Φ'_{peak} = 34,7° für Ψ_{max} = 0° (YILDIZ *et al.* 2017; eingereicht).

wirkung beeinflusst wird, wenn die Wurzeln auf Zug belastet werden. Vergleicht man also nur den maximalen Reibungswinkel von reinem und Wurzel durchwachsenem Bodenmaterial und ordnet die Differenz vollumfänglich Parametern der Wurzelverstärkung zu (z. B. RAR = root area ratio; COMINO *et al.* 2010; LOADES *et al.* 2010), kann es zu falschen Annahmen bezüglich Wurzelverstärkung kommen. Denn der Stabilisierungseffekt, also die Erhöhung des maximalen Reibungswinkels, entsteht nicht nur durch den Effekt der Wurzelverstärkung (Bodenarmierung), sondern wird auch massgeblich durch weitere biologisch beeinflusste Prozesse und Bodeneigenschaften mitbestimmt (z. B. Aggregatbildung, Textur, Porenstruktur), welche wiederum einen Einfluss auf das dilatante Verhalten des Bodenmaterials ausüben.

Im Rahmen unserer Auswertungen der Direktscherversuche wurden die Rohdaten der maximalen Scherspannungen und Reibungswinkel Φ'_{peak} korrigiert, um der mechanischen Reibung des Scherapparats sowie der kontinuierlichen Flächenänderung während des Direktscherversuchs Rechnung zu tragen. Die Regressionsanalyse mit den korrigierten Werten und dem kritischen Reibungswinkel Φ'_{peak} = 34,3° (Steigung der Geraden), welcher von den triaxialen Scherversuchen übernommen und auch für die Sicherheitsberechnung in Abbildung 12 verwendet wurde, ergibt für den Stabilisierungsbeitrag der Wurzeln einen Wert von 6,05 kPa (Intercept der Geraden in Abb. 13a). In einem zweiten Ansatz wurde für die biologische Bodenverfestigung eine schrittweise Berechnung von den tiefsten bis zu den höchsten maximalen Scherspannungen für drei Normalspannungen (6, 11, 16 kPa) durchgeführt. Durch die jeweils drei tiefsten und höchsten Werte der maximalen Scherspannungen wurde eine Hüllkurve (Bruchlinie; LANG *et al.* 2011) mit der fixen Steigung von Φ' = 34,3° gelegt und daraus eine mittlere Hüllkurve definiert. Der Mittelwert für die Wurzeleffekte auf die Bodenstabilität beträgt nach dieser Methode ebenfalls 6,05 kPa und deckt sich somit mit dem Wert der Regressionsanalyse aus dem ersten Ansatz.

Aus Abbildung 13b geht deutlich hervor, dass der maximale Reibungswinkel Φ'_{peak} positiv und signifikant mit dem maximalen Dilatanzwinkel Ψ_{max} korreliert ist. Dies gilt sowohl für das reine als auch für das von Wurzeln durchwachsene Bodenmaterial. Es zeigt sich, dass bei einer Dilatanz von $\Psi = 0°$ der Reibungswinkel Φ' (34,7°) mit dem kritischen Reibungswinkel aus den triaxialen Scherversuchen ($\Phi' = 34{,}3°$) sehr gut übereinstimmt. Mit einem multiplen Regressionsmodell, in welchem neben der Wurzelbiomasse auch die Dilatanz berücksichtigt wurde, konnten die Daten der Direktscherversuche am besten angepasst werden. Zudem verhalf dieses Modell den Anteil an erklärter Streuung der maximalen Scherfestigkeitsparameter (Φ'_{peak}, c'_{peak}) massgeblich zu erhöhen (YILDIZ *et al.* 2017; eingereicht). Damit es nicht zu einer Überschätzung des Beitrags der mechanischen Wurzelverstärkung (Armierung) zur Hangstabilität und somit zu einer zu optimistischen Sicherheit gegen Abgleiten kommt (COMINO *et al.* 2010, LOADES *et al.* 2010), ist es demzufolge erforderlich die Dilatanz (Ψ) in entsprechenden Auswertungen von Scherfestigkeitsparametern zu berücksichtigen.

Waldstruktur und Landnutzung

Nicht jeder Wald wirkt der Bildung von flachgründigen Rutschungen gleich gut entgegen. Sowohl biologische Bodenstabilisierung als auch hydrologische Wirkungen sind höher, je vollständiger und vielfältiger der Wurzel- und Kronenraum von unter- und oberirdischen Baumteilen durchdrungen wird. Die Bedeutung der Vielfalt für die Bodenstabilität ist enorm und kommt insbesondere zum Ausdruck, wenn der Wald als dynamisches Ökosystem betrachtet wird; als ein Lebensraum, der sich ständig weiterentwickelt und von natürlichen oder anthropogenen Störungen immer wieder verändert werden kann. In einer Momentaufnahme wirkt Wald mit einer hohen Stammzahl und möglichst grosser Vielfalt bezüglich Baumarten, Vertikalstruktur und Wurzeltypen besonders stabilisierend. In höher gelegenen Schutzwäldern sollten jedoch die Bäume nicht auf grosser Fläche zu dicht stehen. Junge Bäume erhalten sonst zu wenig Licht und können sich nicht entfalten, womit die überlebensnotwendige Verjüngung beeinträchtigt wird. Aber wie gross dürfen Waldlücken sein, damit Waldverjüngung noch möglich ist, flachgründige Rutschungen aber verhindert werden? In St. Antönien gingen wir dieser Frage nach. Verschiedenste Informationen zur Waldstruktur und anderen möglichen Einflussfaktoren wurden auf ehemaligen Rutschungsflächen im Wald erhoben, sowie auf Kontrollflächen, welche vergleichbare Bedingungen bezüglich Bestandesdichte (Kronendeckungsgrad) und Hangneigung aufwiesen (MOOS *et al.* 2016). Es hat sich gezeigt, dass Rutschungen vor allem in Waldlücken mit einer Länge von über 20 m in der Falllinie stattfanden. Bei grösseren Lückenlängen erwies sich in erster Linie die Hangneigung als entscheidend. Die Breite von Waldlücken spielte eine untergeordnete Rolle (Abb. 14). Dieses Resultat ist insofern plausibel, als die Wurzelverstärkung (Armierung) in Richtung des Hanges mit zunehmender Distanz von Bäumen stärker abnimmt als parallel zum Hang und weil auch Wasserflüsse im Boden vorwiegend in Hangrichtung erfolgen (MOOS *et al.* 2016). Die Analyse von Bodenprofilen in unterschiedlichen Distanzen von Bäumen in den gleichen Waldbeständen haben bestätigt, dass die Verhinderung von Rutschungen mindestens teilweise mit dem Grad der Wurzelverstärkung erklärt werden kann. Die berechneten Werte für Wurzelverstärkung wurden mit zunehmender Distanz von Bäumen kleiner und waren in den Rutschflächen kleiner als in den nicht gerutschten Kontrollflächen (MATTLI 2014; MOOS *et al.* 2016).

Die Resultate der Fallstudie in St. Antönien geben wichtige Anhaltspunkte zur Waldwirkung. Allerdings dürfen diese nicht beliebig verallgemeinert werden. Ähnliche Untersuchungen in Rutschflächen von 1997 in Sachseln deuten darauf hin, dass dort vor allem Änderungen der Waldstruktur durch frühere Störungen einen entscheidenden Einfluss auf die Bodenstabilität hatten. Die Rutschungen in Sachseln erfolgten vor allem in Waldbeständen, die vorgängig bereits durch Windwurfschäden (1970 und 1990) und/oder nachfolgende Borkenkäferkalamitäten beeinträchtigt waren (RICKLI 2001; MOOS 2014). Nach solchen Störungen muss aufgrund des Absterbens der Restdurchwurzelung offenbar während einer bestimmten Zeitspanne mit er-

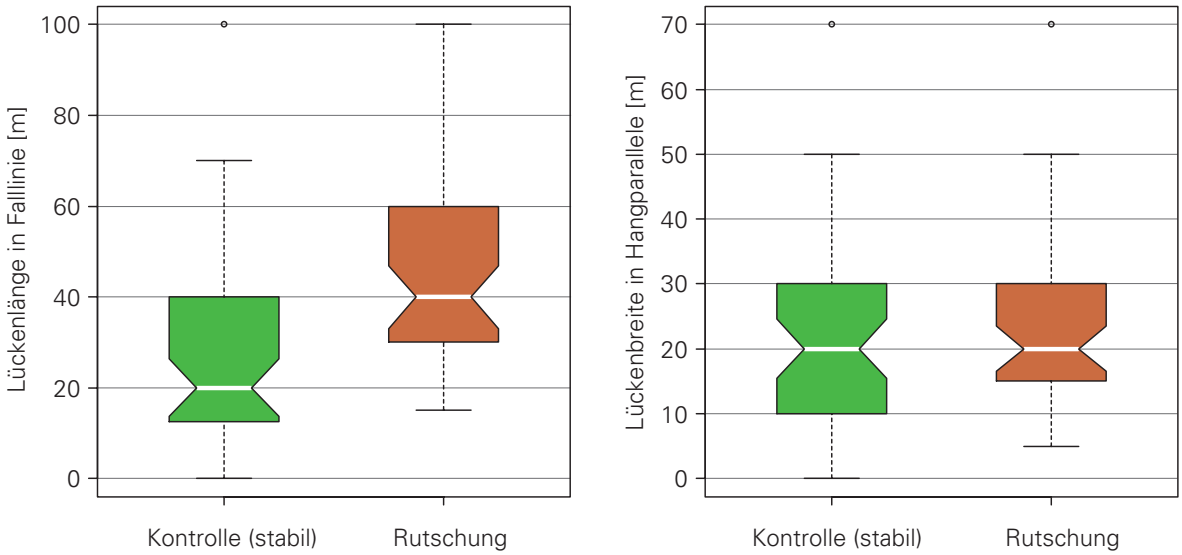

Abb. 14: Verteilung von Lückenlängen (links) und Lückenbreiten (rechts) der jeweils grössten Lücken in Waldflächen von St. Antönien, die stabil waren (grün) sowie in den entsprechenden instabilen Rutschungsflächen (braun). Der Unterschied für die Lückenlänge ist signifikant, nicht aber für die Lückenbreite (Moos *et al.* 2016).

höhter Rutschungsgefährdung gerechnet werden. Diese dauert an, bis die nachwachsende Baumgeneration die Schutzfunktion wieder übernehmen kann (Bebi *et al.* 2015). Eine fortwährende Förderung von Verjüngungsansätzen bereits unter dem Schirm des Altbestandes, respektive in der subalpinen Stufe auch in eigens dafür geschaffenen Bestandesöffnungen, ist daher äusserst wichtig.

Mit waldbaulichen Eingriffen kann die Vielfalt sowie die Struktur eines Waldes und damit dessen Anfälligkeit gegenüber flachgründigen Rutschungen wesentlich beeinflusst werden (Bebi *et al.* 2013, 2016). Dabei ist die Förderung der Diversität nicht nur auf grossflächig einförmige und damit gegenüber Störungen wenig resistente Bestände zu beschränken. Zudem sollten solche Eingriffe in rutschungsgefährdeten Schutzwäldern keine Lücken hinterlassen, die in der Falllinie länger als etwa 20 bis 30 m sind. Dies steht in Einklang mit bestehenden Vorgaben der NaiS-Profile für Rutschungen, Lawinen und Steinschlag (NaiS: Nachhaltigkeit im Schutzwald, BAFU; Frehner *et al.* 2005).

Extensive Beweidung von dicht zusammenwachsenden Wäldern kann unter Umständen dazu beitragen, die Strukturvielfalt zu verbessern (Mayle 1999; Mayer und Stöckli 2005). Hingegen wirken sich intensive Beweidung und Düngung nachteilig auf die Bodenstabilität aus. Bodenverdichtung durch starke Trittbelastungen beeinträchtigt Wurzelwachstum und Infiltrationsvermögen und zusätzlicher Nährstoffeintrag das Artenspektrum von Flora und Mykorrhizapilzen (Rickli 2001; Smith *et al.* 2015; Tracy *et al.* 2015; Roberts 2016; Zhou *et al.* 2016).

Rutschungsanalyse mit einem 3-Stufen-Filter

Mit Hilfe ausgewählter Kriterien aus unseren Untersuchungen wurde eine retrospektive Analyse von flachgründigen Rutschungen durchgeführt. Dazu wurde ein 3-stufiges Ausscheidungsverfahren angewendet. Mit diesem von uns entwickelten 3-Stufen-Filter konnten von insgesamt 218 untersuchten Ereignissen, welche während den Unwettern 1997 (Sachseln), 2002 (Napf, Appenzell) und 2005 (Entlebuch, Napf, Prättigau) im Waldgebiet ausgelöst wurden, über 95 Prozent erklärt werden (Graf und Rickli 2016).

Der seriell angewendete 3-Stufen-Filter (Abb. 15) berücksichtigt Aspekte der Bodenmechanik (Scherparameter, Hangneigung), Vegetation (Kriterien für optimalen Schutz vor flachgründigen Rutschungen nach NaiS in Frehner *et al.* 2005 sowie Erkenntnisse nach Rickli 2001, Rickli *et al.* 2002 und Moos *et al.* 2016) und Topographie (Geländeformen nach Rickli *et al.* 2008).

Mit dem bodenmechanischen Kriterium konnten nahezu 50 Prozent, mit jenem der Vegetation weitere 40 Prozent und mit der Topographie zusätzlich 7 Prozent der Ereignisse erklärt werden; insgesamt 212 von 218 (Abb. 15).

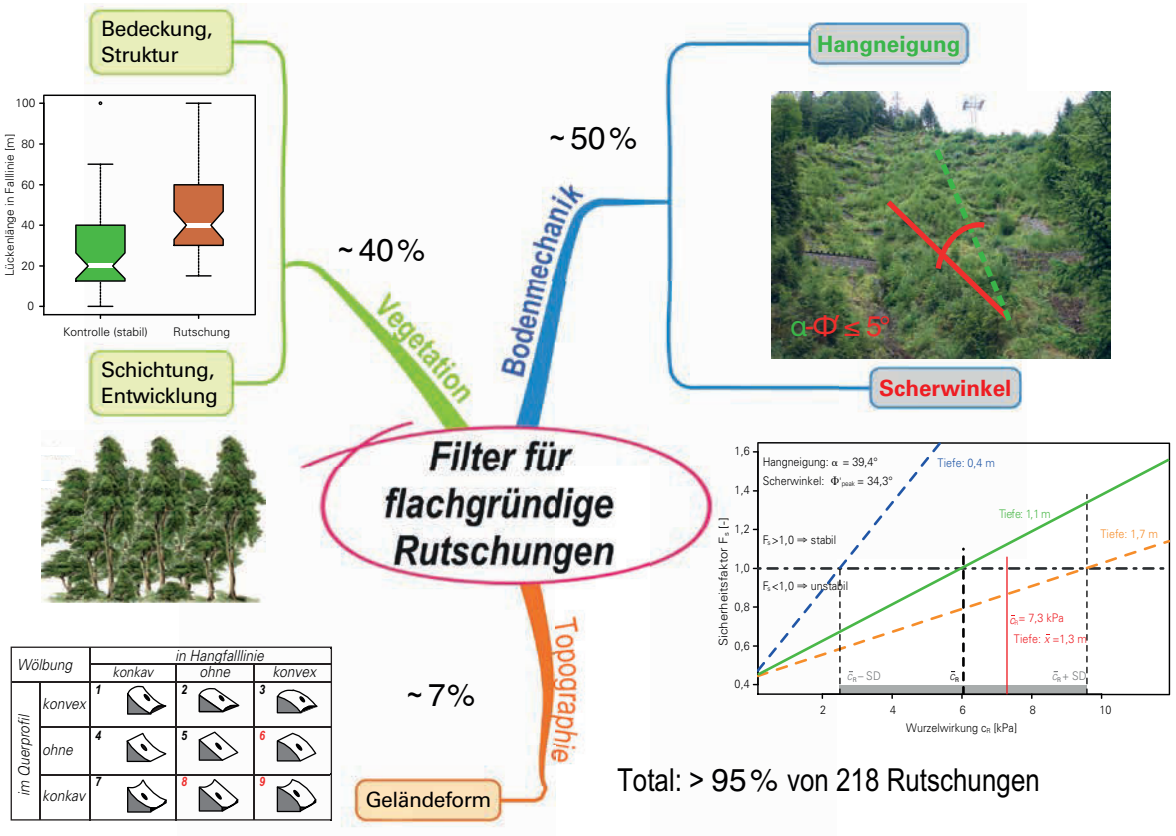

Abb. 15: Erklärungspotential des 3-Stufen-Filters zur Analyse flachgründiger Rutschungen mit den Kriterien: Bodenmechanik, Vegetation und Topographie (Graf und Rickli 2016). Die Kriterien des seriell verwendeten Filters waren:

Bodenmechanik: Hangneigung α nicht mehr als 5° steiler als der Reibungswinkel Φ' (Graf *et al.* 2009; Yildiz *et al.* 2015)

Vegetation (Wald):
– Mehrschichtige Bestände; gute Abstufung von Baumhöhe und -alter
– Gesamt-Deckungsgrad > 60 Prozent (Baumschicht > 40 Prozent)
– Nadelholzanteil < 80 Prozent
– Möglichst artenreiche Bestände in Entwicklungsstufen Stangen- oder Baumholz

Topographie: Geländeform (Falllinien-Horizontal-Profil) ist nicht konvex-flach, flach-konkav oder konvex-konkav (Rickli *et al.* 2008)

Gut strukturierte Wälder halten demnach Hänge bis zu 5° steiler standfest, als es aus bodenmechanischer Sicht für das reine Bodenmaterial zu erwarten ist. Solche Wälder sind möglichst reich an Arten und Wurzelstruktur, sind zu mehr als 60 Prozent bedeckt (Baumschicht ≥ 40 Prozent) sowie gut abgestuft bezüglich Baumhöhe und Altersstruktur. Diese Kriterien waren bei den untersuchten Ereignissen bezüglich Vegetation in ~40 Prozent der Fälle nicht erfüllt. In weiteren ~50 Prozent waren die Hänge mehr als 5° steiler im Vergleich zum entsprechenden Reibungswinkel Φ'. Die Analyse hat weiter gezeigt, dass Jungwaldbestände diesbezüglich weiterer Untersuchungen bedürfen. Dies gilt namentlich für Jungwuchs und Dickungen mit Brusthöhen-Durchmessern bis zu 10 cm auf gut entwickeltem, tiefgründigem Bodenmaterial; beispielsweise nach grossflächigen Holzschlägen oder natürlichen Störungen wie Windwurf, Borkenkäfer-Kalamitäten, Feuer oder Lawinen. Solche Bestände müssen für Vorhersagen bezüglich Anfälligkeit auf flachgründige Rutschungen vorderhand separat betrachtet werden.

Um mit den verwendeten Kriterien von der Retrospektive zur Vorhersage zu gelangen, müssen verschiedene Informationslücken geschlossen werden. Davon besonders betroffen sind die Scherparameter (Reibungswinkel Φ' und Kohäsion c'). Deren Bestimmung ist sehr aufwendig und daher eine flächendeckend geotechnische Charakterisierung grösserer gefährdeter Gebiete aus zeitlichen und Kostengründen unrealistisch. Um diese Problematik zu umgehen, weisen herkömmliche Verfahren geologischen Einheiten häufig fixe Werte für die Scherparameter zu. Dieses Verfahren kann allerdings sehr fehlerbehaftet und unbefriedigend sein. Im Falle der Drusbergschichten von Sachseln ist der zugeordnete Reibungswinkel $\Phi' = 36°$. Die geotechnische Beurteilung des Bodenmaterials in den Anrisszonen mittels Feld- sowie Laboranalysen (Korngrössenverteilung) hat allerdings ergeben, dass für 95 Prozent der 67 Rutschungen von 1997 in den Drusbergschichten die Werte von Φ' zwischen 27° und 33° lagen.

Nur selten genügen auch die Informationen bezüglich Vegetation den Ansprüchen einer fundierten Quantifizierung der biologischen Effekte auf die Hangstabilität. Zur Verbesserung der Situation bezüglich der Vegetationskriterien sind glücklicherweise die notwendigen Instrumente (NaiS; BAFU; Frehner *et al.* 2005) und Protokolle (Rickli 2001; an WSL) verfügbar. Auch das entsprechende Know-how und die Erfahrung sind bei den verantwortlichen Leuten grösstenteils vorhanden. Die Topographie wiederum ist mit vertretbarem Aufwand vorausschauend nur schwer zu beeinflussen.

Aufgrund unserer Untersuchungen wissen wir, dass gut strukturierte Wälder die Hangstabilität beträchtlich erhöhen. Um die Problematik zur Bestimmung der Scherparameter zu umgehen und das vorhandene Wissen bezüglich Vegetation vollumfänglich zu nutzen, bietet es sich deshalb an, die Stabilisierung von Hängen zum Schutz vor flachgründigen Rutschungen über die Landnutzung und insbesondere die fortwährende Pflege und den Unterhalt der Wälder anzupacken. In wie weit und mit welchem Aufwand dies möglich ist, haben wir in einer Fallstudie der Unwetterereignisse von 1997 in Sachseln analysiert.

Fallbeispiel «Sachseln»

Unwetter 1997, Waldstruktur und Hangneigung: Im Rahmen der Dokumentierung flachgründiger Rutschungen während des Unwetters in Sachseln 1997 wurden auch wichtige Parameter nach NaiS zum Zustand der Bestände aufgenommen (Rickli 2001). Aus diesem Fundus wurden insgesamt 107 Waldrutschungen eingehend analysiert. Es hat sich gezeigt, dass nur in 7 Fällen eine Rutschung ausgelöst wurde, obwohl alle Kriterien des vorhergehend beschriebenen 3-Stufen-Filters (Bodenmechanik, Vegetation inkl. NaiS-Parameter, Topographie) ausnahmslos erfüllt waren; also in Waldbeständen, die nach unserem Ansatz optimal vor flachgründigen Rutschungen schützen. Interessant ist dabei die Tatsache, dass diese 7 Rutschungen alle an Hängen von 40° oder steiler auftraten und die Differenz zwischen Hang- und Reibungswinkel zwischen 7° und 17° Grad variierte. Damit wurde das 5°-Kriterium des 3-Stufen-Filters also teilweise deutlich überschritten.

Basierend auf Normalverteilungsannahmen für Hangneigung und Reibungswinkel der 7 Ereignisse und einem Schwellenwert für die Eintretenswahrscheinlichkeit einer Rutschung von 1 Prozent ergibt sich ein Grenzwert für die Hangneigung von ~38° – was in etwa dem Mittelwert der Hangneigung der restlichen Rutschungen entspricht (Tab. 1). Man kann somit spekulieren, dass Hänge mit Waldbeständen, die alle Kriterien erfüllen, bis zu einer Hangneigung von 38° einem Unwetter wie jenem von Sachseln (1997) standhalten, unabhängig vom betroffenen Bodenmaterial und somit vom Reibungswinkel. Für den Fall «Sachseln» lassen daraus abgeleitete Resultate vermuten, dass solche Wälder etwa $^4/_5$ der Rutschungen verhindert hätten und nur knapp 80 von 400 ha der untersuchten Waldfläche betroffen gewesen wären (GRAF und GRUNDER 2017).

Tab. 1: Reibungswinkel (Φ') und Hangneigung (α) von Rutschungen im Waldgebiet (Sachseln 1997). Die Werte für den **«verstärkten»** Reibungswinkel repräsentieren Wurzel durchwachsenen Boden eines im Hinblick auf den Schutz vor flachgründigen Rutschungen optimal gepflegten Waldbestandes und basieren auf Feld- (RICKLI 2001; MOOS *et al.* 2016) und Laboruntersuchungen (GRAF *et al.* 2009; YILDIZ *et al.* 2015).

Reibungswinkel Φ'/ Hangneigung α [°]		optimaler Wald (n = 7)	nicht optimaler Wald (n = 100)
Mittelwert Reibungswinkel:	$\bar{\Phi}'_{soil}$	29,5	32,3
Standardabweichung Reibungswinkel:	$\sigma[\Phi'_{soil}]$	3,2	1,7
Mittelwert Hangneigung:	$\bar{\alpha}$	41,7	38,5
Standardabweichung Hangneigung:	$\sigma[\alpha]$	1,6	2,9
Mittelwert «verstärkter» Reibungswinkel:	$\bar{\Phi}'_{verstärkt}$	**38,1**	na
Standardabweichung «verstärkter» Reibungswinkel:	$\sigma[\Phi'_{verstärkt}]$	**2,4**	na

Verhältnismässigkeit von Aufwand und Ertrag: Das Fallbeispiel «Sachseln» legt eine langfristig angelegte Investition in optimale Pflege von Wäldern in Hanglagen und Gerinneeinhängen hinsichtlich Schutz vor flachgründigen Rutschungen nahe. Optimal heisst in diesem Zusammenhang, dass ein Bestand den Kriterien des 3-Stufen-Filters genügt und insbesondere der Aspekt «Vegetation» einerseits die Bedingungen für den Waldzustand nach RICKLI (2001) sowie nach NaiS für optimalen Schutz vor flachgründigen Rutschungen (FREHNER *et al.* 2005) erfüllt und andererseits auch den Anforderungen an die Waldstruktur nach MOOS *et al.* (2016) gerecht wird.

Eine Kostenschätzung (Preisgrundlage 2016) für die Erreichung, respektive die dauernde Erhaltung des optimalen Waldzustandes, ergibt für den Fall «Sachseln» im Verlauf einer Baumgeneration (120 Jahre) etwa CHF 35 000 pro Hektare. Das entspricht CHF 300 pro Hektare und Jahr. Im Zeitrahmen von 100 Jahren würden sich die Ausgaben für die während dem Unwetter 1997 betroffenen 400 Hektaren auf etwa CHF 12 Mio. belaufen. Diesen Ausgaben stehen mehr als CHF 120 Mio. gegenüber, welche für die Bewältigung der Schäden nach dem Jahrhundert-Ereignis 1997 in Sachseln aufgebracht werden mussten (Tab. 2). Dieser Schaden wurde nicht nur durch flachgründige Rutschungen verursacht, respektive kann diesen nicht immer offensichtlich und direkt zugeordnet werden. Dessen ungeachtet ist eine Investition in die Waldpflege im Hinblick auf bestmöglichsten Schutz vor flachgründigen Rutschungen von nur 10 Prozent der gesamten Schadensumme langfristig gesehen wohl dennoch lohnend. Selbst wenn die verallgemeinerten Ansätze von bis zu CHF 800 pro Hektare und Jahr aus dem «Handbuch NFA im Umweltbereich» (BAFU 2008) zu Grunde gelegt werden, resultiert eine positive Bilanz (~25 Prozent der Schadensumme mit Maximalbetrag von CHF 800). Die tieferen Aufwendungen für das Schutzwald-Management im Fallbeispiel Sachseln können mehrheitlich mit den in Sachseln vergleichsweise einfachen Geländeverhältnissen und der relativ guten Walderschliessung erklärt werden.

Tab. 2: Kostenschätzung für optimal gepflegten Wald zum Schutz vor flachgründigen Rutschungen für das Fallbeispiel «Sachseln» mit Preisgrundlage 2016 sowie mit dem Maximalbetrag nach dem «Handbuch NFA im Umweltbereich» (BAFU 2008).

	Kosten [ha^{-1} $Jahr^{-1}$]	**Kosten** [400 ha^{-1} $Jahr^{-1}$]	**Kosten** [400 ha^{-1} 100 $Jahre^{-1}$]	**Anteil an Schadensumme von CHF 120 Mio.**
Preisgrundlage 2016 (Sachseln)	CHF 300	CHF 120 000	CHF 12 Mio.	~10 Prozent
BAFU 2008 (Maximal-Betrag)	CHF 800	CHF 320 000	CHF 32 Mio.	~25 Prozent

In wie weit sich die Zahlen aus dem Fallbeispiel «Sachseln» bezüglich Schutzpotential von Waldbeständen gegen flachgründige Rutschungen bezogen auf einen «verstärkten» Reibungswinkel Φ' sowie die Kostenschätzungen für die entsprechenden Pflegemassnahmen auf andere Gebiete übertragen lassen, müssen weitere Untersuchungen zeigen.

Was es für Praxis und Forschung bedeutet …

Nützliches für den Praktiker

Pflege und Unterhalt von Wald sollen im Hinblick auf eine nachhaltige Schutzwirkung, insbesondere gegen flachgründige Rutschungen, neben den Richtlinien nach NaiS auch die Erkenntnisse aus unserem Projekt SOSTANAH berücksichtigen. Zur Verminderung der Rutschungsanfälligkeit sind Vielfalt und Strukturparameter von entscheidender Tragweite:

– Waldlücken sollen in der Falllinie eine Länge von 20 (–30) m nicht überschreiten. Die Breite von Waldlücken spielt eine untergeordnete Rolle. Bei grösseren Lückenlängen ist für die Stabilität vor allem die Hangneigung entscheidend, nicht die Fläche der Waldlücke.
– Ein reiches Spektrum an Arten, Sukzessionsstadien, Pflanzenalter, Schichtung, Durchwurzelungstiefe und Wurzelarchitektur stabilisiert effizienter und nachhaltiger.
– Vielfältige Wälder mit fortwährender Verjüngung sind durch natürliche Störungen (z. B. Windwurf oder Insektenkalamitäten) kleinräumiger gefährdet. Ihre Schutzfunktion ist entsprechend weniger beeinträchtigt und das volle Potential wird nach einer Störung schneller wieder erreicht.
– Einbinden von Mykorrhizapilzen in Aufforstungs- und Bepflanzungskonzepte (z. B. nach natürlichen Störungen, Verjüngungsschlägen, Neubegründung von Waldbeständen) fördert stabilisierende Pflanzenleistungen und -entwicklung.

In rutschungsgefährdeten Gebieten ist bei land- und alpwirtschaftlichen Nutzungen ein behutsames Düngungs- und Beweidungsregime einzuhalten. Dadurch können zu hoher Nährstoffeintrag und Bodenverdichtung vermieden werden.

Bei der Renaturierung abgerutschter Hänge mit ingenieurbiologischen Methoden ist bei der Wahl der Pflanzen neben der Artenvielfalt auch den unterschiedlichen Wurzelformen sowie den Mykorrhizapilzen Rechnung zu tragen. Zudem soll bei entsprechenden Massnahmen (z. B. Direktumlagerung) auf eine möglichst heterogene Geländemorphologie geachtet werden, mit variablem Mikrorelief auch im oberflächennahen Bodenbereich.

Wissenschaftliche Folgen

Unsere Untersuchungen haben zu neuen Erkenntnissen von Vegetationseffekten auf die Hangstabilität geführt. Dies sowohl betreffend Bodenmechanik als auch bezüglich Pflanzenleistungen und dem Einfluss von Mykorrhizapilzen sowie im Bereich Waldpflege und Landnutzung.

Zur Abstützung auf ein breites Fundament und um die Umsetzung konsequent voranzutreiben, sind in verschiedenen Bereichen weitere und vertiefende Abklärungen unerlässlich:

– Bodenmechanische Analysen weiterer Bodentypen unter Einbezug der Dilatanz.
– Untersuchung unterschiedlicher Wurzelarchitekturen unter Berücksichtigung der Dynamik des Porenwasserdrucks sowie der Evapo-Transpiration.
– Untersuchungen zur Spezifität der Pflanze-Pilz (Mykorrhiza) Beziehungen im Hinblick auf Wurzelwachstum, Aggregatstabilität, Schutz vor Schädlingen und Schadstoffen.
– Einfluss des Klimawandels (höhere Temperaturen, zunehmende Trockenheit, intensivere Unwetter) auf Vielfalt, Sukzession von Pflanzengesellschaften und Rhizosphäre.

Im Rahmen weiterer Untersuchungen zur Quantifizierung von Vegetationseffekten auf die Hangstabilität darf nicht allein die Wurzelverstärkung (Bodenarmierung) betrachtet werden. Für eine zuverlässige Bestimmung muss der Verbund aller stabilitätswirksamen biologischen Prozesse berücksichtigt werden, welche durch chemisch-mechanische, hydrologische und strukturelle Veränderungen des Bodenmaterials massgeblich zu stabileren Hängen beitragen.

Auswirkungen unterschiedlicher Landnutzung und Managementmassnahmen sind unter Einbezug von Vegetations-, Wurzelraum- und Bodenstruktur zu berücksichtigen. Zukünftige Studien sollen für oberirdische Strukturen vermehrt Fernerkundung (Satelliten, Drohnen, Laserscanning) und in der Rhizosphäre molekularbiologische Methoden einbeziehen (DNA, RNA, Meta Genomics, Next Generation Sequenzing).

Was wir daraus schliessen können …

Wälder, deren Aufgabe in erster Linie den Schutz vor flachgründigen Rutschungen beinhaltet, sollen folgende Anforderungen erfüllen: Vorgaben nach **NaiS** und Erkenntnisse aus unseren Untersuchungen zu **Waldstruktur und Bodenmechanik (3-Stufen-Filter).** Entsprechende Schutzwälder weisen eine gebührende **ober- und unterirdische Vielfalt** auf, insbesondere bezüglich Arten, Alter, horizontaler und vertikaler Struktur, Baumartenmischung sowie Durchwurzelung und Wurzelarchitektur. 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 auch deren Partnerorganismen, in erster Linie Mykorrhizapilze, zu berücksichtigen (Abb. 16). 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.

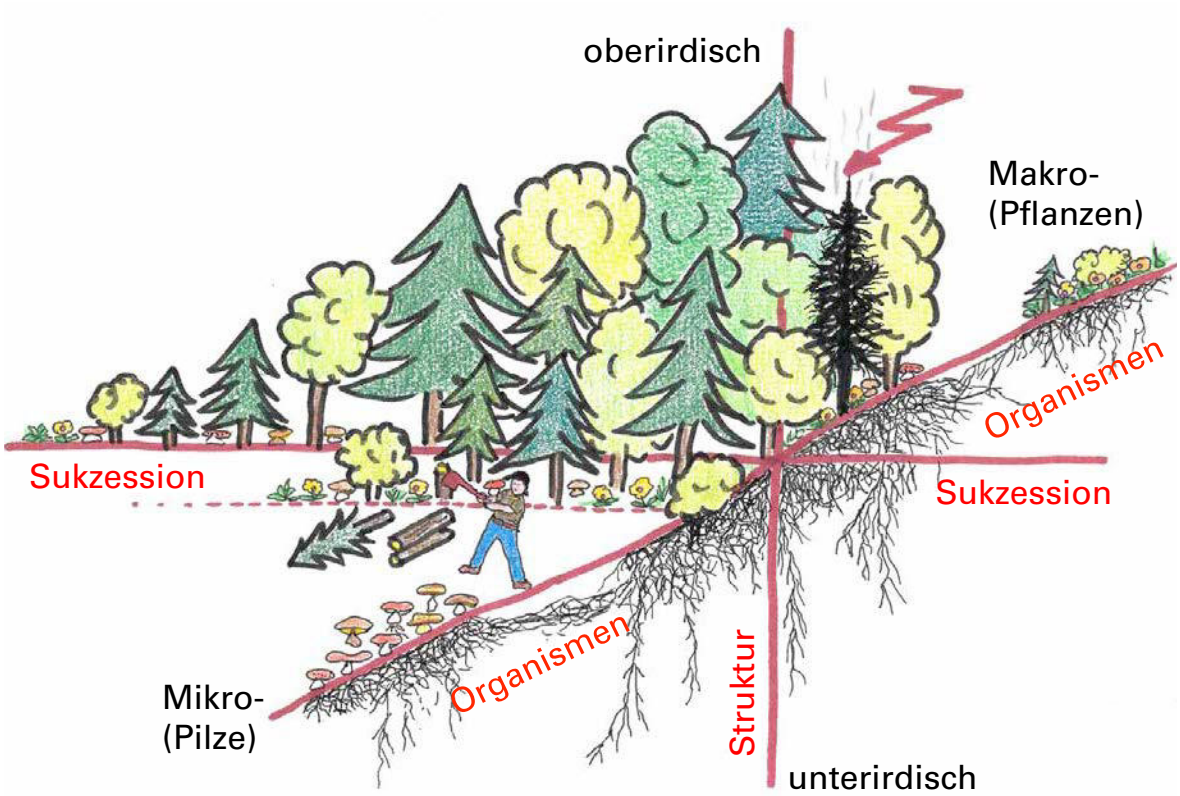

Abb. 16: 3^D-Diversität unter Berücksichtigung von Mikro- und Makro-Organismen (Pflanzen- und Mykorrhizapilz-Arten), ober- und unterirdischer Struktur sowie Sukzession und deren Regulierung durch anthropogene Eingriffe (Pflege und Unterhalt) und natürliche Störungen wie Windwurf, Borkenkäfer, Feuer, Lawinen, … (Zeichnung von V. Graf-Morgen, 2016).

Waldbauliche Eingriffe

Gezielte waldbauliche Eingriffe können die Strukturvielfalt vergrössern und damit die Bodenstabilität erhöhen sowie die Anfälligkeit gegenüber grossflächigen Störungen (Windwurf, Borkenkäfer, Feuer, Lawinen, …) verringern. An steilen Hängen, wo Wälder zu Einförmigkeit tendieren, sind Verjüngungsschläge besonders wichtig, um die zeitliche Vielfalt der Pflanzen- und Bestandesentwicklung zu gewährleisten. Im Sinne von NaiS sollten sich Pflegemassnahmen wo immer möglich an natürlichen Sukzessionsprozessen im Wald orientieren. Dabei sind die spezifischen Standortsbedingungen und die Bestandesgeschichte einzubeziehen. Für ausgewählte Gebiete kann jedoch die aktive Erhaltung einer bestimmten Sukzessionsphase im Hinblick auf Bodenstabilität zielführender sein, zum Beispiel in vernässten Bereichen ein Entwicklungsstadium mit möglichst hoher Evapo-Transpiration.

Landnutzung

Auf eine intensive alp- und landwirtschaftliche Nutzung inner- und oberhalb von Bereichen mit hoher Rutschungs-Wahrscheinlichkeit soll verzichtet werden. Denn hoher Nährstoffeintrag und Bodenverdichtung beeinträchtigen die Stabilität rutschungsgefährdeter Hänge. Zu viel Nährstoff führt zu einer Abnahme des Wurzelwachstums und der biologischen Bodenstabilisierung sowie der Mykorrhizadiversität. Ferner werden an den Standort angepasste Arten durch solche verdrängt, die an eine hohe Nährstoffzufuhr angepasst sind. Bereits die Deposition von Stickstoff durch Luftverfrachtung ist auch in abgelegenen (Wald-) Gebieten erheblich und übersteigt den natürlichen Umsatz teilweise beträchtlich. Bodenverdichtung wiederum beeinträchtigt neben der Wurzelentwicklung und somit der Boden stabilisierenden Wirkungen der Wurzeln insbesondere auch das Hyphenwachstum der Mykorrhizapilze.

Ingenieurbiologie

Bei Wiederbepflanzung und -stabilisierung abgerutschter Hänge mit ingenieurbiologischen Methoden sollen zwar vorrangig Pflanze-Pilz-Kombinationen des Initialstadiums eingesetzt werden. Allerdings muss die Artenauswahl stets auch unter Berücksichtigung der entsprechenden Weiterentwicklung erfolgen. Im Hinblick auf angestrebte Zielgesellschaften ist auf möglichst natürliche Sukzessionsprozesse zu achten. Ebenso sind technische und methodisch-konstruktive Gesichtspunkte einzubeziehen. Vorgängig zu biologischen Schutzmassnahmen müssen der Hangfuss stabilisiert (z. B. durch Wildbachverbau) sowie übersteile Partien abgeflacht werden (Reduktion der Hangneigung). Zudem sollen abrupte (gradlinige) Übergänge zwischen und innerhalb von Vegetationstypen (z. B. Waldlücken) und entlang von Geländeübergängen (Kanten), vermieden werden. Überlappende, mosaikförmige und verzahnte Strukturen sind nachhaltig zu fördern, sowohl horizontal als auch vertikal (Wurzelraum). Dabei soll auf eine möglichst heterogene Geländemorphologie geachtet werden mit variablem Mikrorelief auch im oberflächennahen Bodenbereich (z. B. bei Anwendung von Direktumlagerung).

Konzeptionelle Aspekte

Im Rahmen bodenmechanischer Stabilitätsanalysen sollten zukünftige Untersuchungen zum Beitrag von Vegetationseffekten auf die Hangstabilität – insbesondere im Zusammenhang mit Wurzelverstärkung (Bodenarmierung) – nicht nur den maximalen Reibungswinkel (Φ'_{peak}) und die Kohäsion (c') von reinem und wurzeldurchwachsenem Bodenmaterial berücksichtigen. Um eine Überschätzung des Beitrags der Vegetation, namentlich der sogenannten Wurzelverstärkung, zur Hangstabilität zu verhindern, soll die Dilatanz (Ψ) in den Auswertungen von

Scherfestigkeitsparametern (Φ', c') miteinbezogen werden. So kann einer Überschätzung der Wurzelverstärkung und damit der Prognose zu optimistischer Sicherheitsfaktoren gegen Abgleiten entgegengewirkt werden (COMINO *et al.* 2010; LOADES *et al.* 2010).

Das vorgeschlagene Konzept mit 3-Stufen-Filter, 3^D-Diversität und NaiS soll zukünftig vermehrt Eingang in die praktische Anwendung finden, sowohl in der Waldpflege als auch im Rahmen ingenieurbiologischer Massnahmen. Für eine volle Entfaltung des Potentials soll das Verfahren kontinuierlich weiterentwickelt und verbessert werden. Erste Schritte dazu sind die Übertragung des probabilistischen Ansatzes vom Fallbeispiel «Sachseln» (GRAF und GRUNDER 2017) auf andere Gebiete sowie die Berücksichtigung von flachgründigen Rutschungsereignissen, welche unter Rahmenbedingungen ausgelöst wurden, die in unserem Konzept momentan nicht erfasst werden (z. B. Flächen mit Jungwuchs). Dafür ist es notwendig, die entsprechenden Gelände- und insbesondere die Vegetationsparameter bei der zukünftigen Dokumentation von flachgründigen Rutschungen zu berücksichtigen.

Abklärungen in weiteren Gebieten werden zeigen, wie hoch das effektive Schutzpotential geeignet gepflegter Wälder ist. Sollten sich unsere Resultate und die Folgerungen aus dem Fallbeispiel «Sachseln» bestätigen, sind Investitionen von CHF 300 bis 800 pro Hektare und Jahr für die Schutzwaldpflege langfristig gesehen äusserst lohnend.

Es soll nicht vergessen werden, dass ein vielfältiger und gut strukturierter Wald nicht nur vor Gefahren schützt – und uns so viel Leid und Geld erspart – sondern auch klimarelevante Funktionen ausübt. Zusätzlich wirkt sich Strukturvielfalt im Wald positiv auf den Lebensraum vieler Pflanzen- und Tierarten aus. Und nicht zuletzt erfüllt er gesellschaftliche Bedürfnisse nach Erholung und Freizeitaktivitäten.

Verdankungen: Wir möchten allen Beteiligten, die im Rahmen ihrer Post-Doc-, Doktorats-, Master-, Bachelor-, Praktikums- und weiterer Arbeiten zum Gelingen dieses Projekts beigetragen haben, unser herzlichstes Dankeschön aussprechen.

Wir danken dem Nationalen Forschungsprogramm «Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden» (NFP 68) für die Finanzierung unseres Projekts SOSTANAH (Projektnummer: 406840-143122). Für Abbildung 5 sowie die Daten der Arieschbach-Untersuchungen bedanken wir uns bei Alexander Bast.

Marco Conedera danke ich für die stimulierenden Diskussionen und insbesondere seine unermüdliche Unterstützung der Forschungs- und Umsetzungsarbeiten.

Ein besonderer Dank gebührt auch Albert Böll, der den eigentlichen Grundstein zu diesem Bericht bereits in den 1980-er Jahre gelegt hat ...

Literatur

AMARANTHUS, M.P.; TRAPPE, J.M., 1993: Effects of erosion on ecto- and VA-mycorrhizal inoculum potential of soil following forest fire in southwest Oregon. Plant Soil 150: 41–49.

ASTON, A.R., 1979: Rainfall interception by eight small trees. J. Hydrol. 42: 383–396.

BADER, A., 2014: How Plants and Mycorrhizal Fungi Contribute to Soil Aggregate Stability. Master Thesis ETH, 146 pp. http://www.wsl.ch/fe/gebirgshydrologie/wildbaeche/projekte/SOSTANH/Theses_EN/AnjaBader

BACHMAIR, S.; WEILER, M., 2011: New dimensions of hillslope hydrology. In: LEVIA, D.F.; CARLYLE-MOSES, D.; TADASHI, T. (eds) Forest Hydrology and Biogeochemistry: Synthesis of Past Research and Future Directions. Dordrecht, Springer. Ecol. Stud. 216: 455–482.

BAST, A., 2014: Mycorrhizal inoculation as a promoter for sustainable eco-engineering measures in steep alpine environments? Diss. Univ. Bern. 149 pp.

BAST, A.; WILCKE, W.; GRAF, F.; LÜSCHER, P.; GÄRTNER, H., 2015: A simplified and rapid technique to determine an aggregate stability coefficient in coarse grained soils. Catena 127: 170–176.

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? J. Geophys. Res.: Biogeosciences, DOI: 10.1002/2016JG003422

BAUERLE, T.L.; RICHARDS, J.H.; SMART, D.R.; EISSENSTAT, D.M., 2008: Importance of internal hydraulic redistribution for prolonging the lifespan of roots in dry soil. Plant Cell Environ. 31: 177–186.

BEBI, P.; KRUMM, F.; BRÄNDLI, U.B.; ZINGG, A., 2013: Dynamik dichter, gleichförmiger Gebirgsfichtenwälder. Schweiz. Z. Forstwes. 164: 37–46.

BEBI, P.; PUTALLAZ, J.M.; FANKHAUSER, M.; SCHMID, U.; SCHWITTER, R.; GERBER, W., 2015: Die Schutzfunktion in Windwurfflächen. Schweiz. Z. Forstwes. 166: 168–176.

BEBI, P.; SEIDL, R.; MOTTA, R.; FUHR, M.; FIRM, F.; KRUMM, F.; CONEDERA, M.; GINZLER, C.; WOHLGEMUTH, T.; KULAKOWSKI, D., 2016: Changes of forest cover and disturbance regimes in the mountain forests of the Alps. For. Ecol. Manage. http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.028

BENISTON, M.; STOFFEL, M.; HILL, M., 2011: Impacts of climatic change on water and natural hazards in the Alps: Can current water governance cope with future challenges? Examples from the European «ACQWA» project. Environ. Sci. Policy 14: 734–743.

BEZZATE, S.; AYMERICH, S.; CHAMBERT, R.; CZARNES, S.; BERGER, O.; HEULIN, T., 2000: Disruption of the *Paenibacillus polymyxa* levansucrase gene impairs its ability to aggregate soil in the wheat rhizosphere. Environ. Micorbiol. 2: 333–342.

BEZZOLA, G.R.; HEGG, C. (Ed.) 2007: Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bern, Bundesamt für Umwelt BAFU; Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL. 215 S.

BEZZOLA, G.R.; HEGG, C. (Ed.) 2008: Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen. Bern, Bundesamt für Umwelt BAFU; Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL. 426 S.

BIONDINI, M.E.; BONHAM, C.D.; REDENTE, E.F., 1985: Secondary successional patterns in a sagebrush *(Artemisia tridentata)* community as they relate to soil disturbance and soil biological activity. Vegetatio 60: 25–36.

BLUME, H.-P.; BRUMMER, G.W.; HORN, R.; KANDELER, E.; KOGEL-KNABNER, I.; KRETZSCHMAR, R.; STAHR, K.; WILKE, B.-M., 2010: Scheffer/Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde (16. Auflage). Berlin Heidelberg, Springer. 569 S.

BÖLL, A.; GRAF, F., 2001: Nachweis von Vegetationswirkungen bei oberflächennahen Bodenbewegungen – Grundlagen eines neuen Ansatzes. Schweiz. Z. Forstwes. 152: 1–11.

BÖLL, A.; BURRI, K.; GRAF, F., 2008: Hang- und Böschungsstabilisierung. In: BEZZOLA, G.R.; HEGG, C. (Ed.) Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen. Bern, Bundesamt für Umwelt BAFU; Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL. 222–234.

BOLTON, M.D., 1986. The strength and dilatancy of sands. Géotechnique 36: 65–78. doi:10.1680/geot.1986.36.1.65

BUDI, S.W.; VAN TUINEN, D.; MARTINOTTI, G.; GIANINAZZI, S., 1999: Isolation from the *Sorghum bicolor* mycorrhizasphere of a bacteria compatible with arbuscular mycorrhiza development and antagonistic towards soilborne fungal pathogens. Appl. Environ. Microbiol. 65: 5148–5150.

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

BURRI, K.; GRAF, F.; BÖLL, A., 2009: Revegetation measures improve soil aggregate stability: a case study on a landslide area in Central Switzerland. For. Snow Landsc. Res. 82: 45–60.

CAESAR-TON THAT, T.C.; SHELVER, W.L.; THORN, R.G.; COCHRAN, V.L., 2001: Generation of antibodies for soil aggregating basidiomycete detection as an early indicator of trends in soil quality. Appl. Soil Ecol. 18: 99–116.

CAIRNAY, J.W.G.; CHAMBERS, S.M., 1999: Ectomycorrhizal fungi. Key genera in profile. Berlin, Springer. 369 pp.

CAZZUFFI, D.; CRIPPA, E., 2005: Shear strength behaviour of cohesive soils reinforced with vegetation. Proc. 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Osaka. 2493–2498.

Chloros, N., 1891: Enzyklopädie der Forstwirtschaft. Athen; in Griechisch.

COHEN, D.; SCHWARZ, M.; OR, D., 2011: An analytical fiber bundle model for pullout mechanics of root bundles. J. Geophys. Res. 116, F03010, http://dx.doi.org/10.1029/2010JF001886

COMINO, E.; MARENGO, P.; ROLLI, V., 2010: Root reinforcement effect of different grass species: A comparison between experimental and models results. Soil Tillage Res. 110: 60–68.

COPPOLA, A.; KUTILEK, M.; FRIND, E.O., 2009: Transport in preferential flow domains of the soil porous system: Measurement, interpretation, modelling and upscaling, J. Contam. Hydrol. 104: 1–3, doi:10.1016/j.conhyd.2008.05.011

DEGUCHI, A.; HATTORI, S.; PARK, H.T., 2006: The influence of seasonal changes in canopy structure on interception loss: Application of the revised Gash model. J. Hydrol. 318: 80–102.

DEMONTZEY, P., 1878. Etude sur les travaux de reboisement et de gazonement des montagnes. Paris, Imprimerie Nationale. 421 S.

DUILE, J., 1826: Über Verbauung der Wildbäche in Gebirgs-Ländern, vorzüglich in der Provinz Tirol und Vorarlberg: zum Gebrauche für Bau- und Forstbeamte, Obrigkeiten, Seelsorger und Gemeinds-Vorstände. Innsbruck, 180 S.

ERKTAN, A.; CÉCILLON, L.; GRAF, F.; ROUMET, C.; LEGOUT, C.; REY, F., 2015: Increase in soil aggregate stability along a Mediterranean successional gradient in severely eroded gully bed ecosystems: combined effects of soil, root traits and plant community characteristics. Plant Soil, DOI 10.1007/s11104-015-2647-6. 17 pp.

FILION, M.; ST-ARNAUD, M.; FORTIN, J.A., 1999: Direct interaction between the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* and different rhizosphere micro-organisms. New Phytol. 141: 525–533.

FREHNER, M.; WASSER, B.; SCHWITTER, R., 2005: Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion, Vollzug Umwelt. Bern, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. 564 S.

FREI, M., 2009: Validation of a new approach to determine vegetation effects on superficial soil movements. ETH, DOI:10.3929/ethz-a-005954329

FREI, M.; BÖLL, A.; GRAF, F.; HEINIMANN, H.R.; SPRINGMAN, S., 2003: Quantification of the influence of vegetation on soil stability. In: LEE, C.; THAM, L. (eds) Slope Engineering: Proc. Int. Conf.; Dept. of Civil Engineering, University of Hong Kong. 872–877.

GEER, G.A., 2000: Integralprojekt Fideris (Vorprojekt). August 2000. Kanton Graubünden. Kreisforstamt 20, Küblis.

GIGON, A., 1975: Über das Wirken der Standortsfaktoren; kausale und korrelative Beziehungen in jungen und in reifen Stadien der Sukzession. Mitt. Eidgenöss. Anst. forstl. Versuchswes. 51: 25–36.

GOULAS, K.; GRAF, F., 2003: Lebendverbau in Wildbacheinzugsgebieten Griechenlands. Ing.biol. 4: 19–25.

GRAF, C.; BÖLL, A.; GRAF, F., 2003: Pflanzen im Einsatz gegen Erosion und oberflächennahe Rutschungen. Merkbl. Prax. 37: 8 S.

GRAF, F., 1998: Anforderungen an den Boden bei Renaturierungen oberhalb der Waldgrenze. Ing.biol. 4: 12–18.

GRAF, F., 2009: Stabilität und Artenvielfalt in der Ingenieurbiologie. In: Forstliche Arbeitsgruppe Naturgefahren FAN (Ed.) Wildbacheinzugsgebiete – Prozesse, Gefahren und Schutzmassnahmen. FAN-Tagung September 2009. 16 S. www.wsl.ch/wsl/dienstleistungen/publikationen/pdf/9992.pdf

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.; BAST, A.; GÄRTNER, H.; YILDIZ, A., 2017: Effects of mycorrhizal fungi on slope stabilisation functions of plants. Springer Series Geomech. Geoeng, in print.

GRAF, F.; FREI, M.; BÖLL, A., 2009: Effects of vegetation on the angle of internal friction of a moraine. For. Snow Landsc. Res. 82: 61–78.

GRAF, F.; FREI, M.; SCHWARZ, M.; BÖLL, A., 2006: Use and importance of mycorrhiza in site-specific restoration. Proceedings of «Soil Bioengineering: ecological restoration with native plants and seed material», Gumpenstein, 5–7 September 2006. 155–150.

GRAF, F.; GERBER, W., 1997: Der Einfluss von Mykorrhizapilzen auf die Bodenstruktur und deren Bedeutung für den Lebendverbau. Schweiz. Z. Forstwes. 11: 863–886.

GRAF, F.; GERBER, W.; RICKLI, C., 2014: Documentation of technical and biological slope stabliistaion: Dallenwil-Wirzweli (Schwand- and Hexenrübi). 22 pp. http://www.wsl.ch/fe/gebirgshydrologie/wildbaeche/projekte/SOSTANH/docu_soil_bioengineering.pdf

GRAF, F.; GRUNDER, K., 2017: Shallow landslides: lessons from Sachseln 1997. EGU General Assembly 2017. Geophys. Res. Abstr. 19, http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2017/EGU2017-2719.pdf http://www.nfp68.ch/SiteCollectionDocuments/poster_egu17_graf_grunder.pdf

GRAF, F.; RICKLI, C., 2016: Simple explanations for shallow landslides!? EGU General Assembly 2016. Geophys. Res. Abstr. 18, http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2016/EGU2016-2783.pdf

GRAF, F.; TE KAMP, L.; AUER, M.; SUDAN ACHARYA, M.; WU, W., 2015: Soil aggregate stability in eco-engineering: comparison of field and laboratory data with an outlook on a new modelling approach. Recent Advances in Modeling Landslides and Debris Flows. Springer Series Geomech. Geoeng. 29–47.

GRUNDER, K.; STALDER, R.; ANNEN, B.; FREI, M.; RICKLI, C.; GRAF, F., 2014: Best Practice Excursion «Gangbach» (Schächental, Uri), 13 pp. http://www.wsl.ch/fe/gebirgshydrologie/wildbaeche/projekte/SOSTANH/report_gangbach_excursion_140613.pdf

HAEFELI, R., 1948: The stability of slopes acted upon by parallel seepage, Proc. Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. 1: 57–62.

HACKER, E.; PFLUG, W.; SCHIPPERS, B., 1996: Ingenieurbiologie im Spannungsfeld zwischen Naturschutz und Ingenieurbautechnik. Jahrbuch 6 der Ges. f. Ingenieurbiologie. Aachen, Selbstverlag. 330 S.

HAUTIER, Y.; HECTOR, P.A.; NIKLAUS, A., 2009: Competition for Light Causes Plant Biodiversity Loss After Eutrophication. Science 324: 636–638.

HILDEBRANDT, U.; JANETTA, K.; BOTHE, H., 2002: Towards growth of arbuscular mycorrhizal fungi independent of a plant host. Appl. Environ. Microbiol. 68: 1919–1924.

HÖRMAN, G.; BRANDING, A.; CLEMEN, T.; HERBST, M.; HINRICHS, A., 1996: Calculation and simulation of wind controlled canopy interception of beech forest in Northern Germany. Agric. For. Meteorol. 79: 131–148.

INOQ GmbH: Solkau 2, 29465 Schnega, Deutschland. Mykorrhiza Produkte – Forst (2017), https://inoq.de/produkte-service/mykorrhiza-produkte/inoq-forst/

JEWELL, R.A.; WROTH, C.P., 1987: Direct shear tests on reinforced sand. Géotechnique 37, 53–68. doi:10.1680/geot.1987.37.1.53

KAISER, M., 1967: Die Bouchser Rübi. Schweiz. Z. Forstwes. 8: 493–522.

KONTOS, P., 1929: Griechische Forstgeschichte. Athen; in Griechisch.

KUTSCHERA, L.; LICHTENEGGER, E., 1982: Wurzelatlas mitteleuropäischer Grünlandpflanzen. Band 1 Monocotyledoneae. Gustav Fischer Verlag Stuttgart und New York 1982. 2. Band der Wurzelatlas-Reihe.

KUTSCHERA, L.; LICHTENEGGER, E., 2002: Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher. Leopold Stocker Verlag Graz und Stuttgart 2002. 6. Band der Wurzelatlas-Reihe.

LANDOLT, E., 1862. Bericht an den hohen schweizerischen Bundesrath über die Untersuchung der schweiz. Hochgebirgswaldungen. J.A. Weingart, Bern, 367 S.

LANG, H.-J.; HUDER, J.; AMANN, P.; PUZRIN, A.M., 2011: Bodenmechanik und Grundbau. 9. Auflage, Berlin, Springer. 336 S.

LANGE, B.; LÜSCHER, P.; GERMANN, F., 2012: Wurzeln erhöhen das Wasserspeichervermögen. Wald Holz 12: 23–25.

LEUZINGER, Y.; LACHAT, B., 1995: Ingenieurbiologie kritisch beleuchtet. Ing.biol. 3: 3–7.

LI, W.; JIN, C.; GUAN, D.; WANG, Q.; WANG, A.; YUAN, F.; WU, J., 2015: The effects of simulated nitrogen deposition on plant root traits: A meta-analysis. Soil Biol. Biochem. 82: 112–118.

LICHTENEGGER, E., 1985: Die Ausbildung der Wurzelsysteme krautiger Pflanzen und deren Eignung für die Böschungssicherung auf verschiedenen Standorten. In: Ingenieurbiologie. Wurzelwerk und Standsicherheit von Böschungen und Hängen Bd. 2, Aachen, Sepia Verlag. Jb. Dt.Ges. Ing.biol. 63–92.

LIU, S., 1997: A new model for the prediction of rainfall interception in forest canopies. Ecol. Model. 99: 151–159.

LOADES, K.W.; BENGOUGH, A.G.; BRANSBY, M.F.; HALLETT, P.D., 2010: Planting density influence on fibrous root reinforcement of soils. Ecol. Eng. 36: 276–284. doi:10.1016/j.ecoleng. 2009.02.005

LOCHER OBERHOLZER, N.; STREIT, M.; FREI, M.; ANDREY, C.; BLASER, R.; MEYER, J.; MÜLLER, U.; REIDY, B.; SCHÜTZ, M.; SCHWAGER, M.; STOLL, M.; WYTTENBACH, M., 2008: Richtlinien Hochlagenbegrünung: Ing.biol. 2: 35 S.

LOSHALI, D.C.; SINGH, R.P., 1992: Partitioning of rainfall by three Central Himalayan forests. For. Ecol. Manage. 53: 99–105.

MALIN, R.; RIXEN, C., 2016: Vegetation, Oberflächenerosion und Aggregatstabilität auf alpinen Weiden. Ing.biol. 3: 20–24.

MANKEL, A.; KRAUSE, K.; KOTHE, E., 2002: Identification of hydrophobin gene that is developmentally regulated in the ectomycorrhizal fungus *Tricholoma terreum*. Apppl. Environ. Microbiol. 68: 1408–1413.

MANSFELD-GIESE, K.; LARSEN, J.; BODKER, L., 2002: Bacterial populations associated with mycelium of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices*. FEMS Micorbiol. Ecol. 41: 133–140.

MARTI, N.; VON ALBERTINI, N.; KRÜSI, B., 2016a: Direkt umgelagerte Vegetationsziegel: Durchwurzelung und Vegetationslücken nach 5 Jahren. Ing.biol. 3: 4–12.

MARTI, N.; VON ALBERTINI, N.; KRÜSI, B., 2016b: Erfolgreiche Direktumlagerung von Zwergsträuchern am Julierpass (Kt. Graubünden). Ing.biol. 3: 413–19.

MATTLI, J., 2014: Quantifizierung der Wurzelverstärkung im Schutzwald, Bachelor Thesis. Berne, University of Applied Sciences. 79 S. http://www.wsl.ch/fe/gebirgshydrologie/wildbaeche/projekte/SOSTANH/Theses_EN/JosiasMattli

MAYER, A.C.; STÖCKLI, V., 2005: Long-term Impact of Cattle Grazing on Subalpine Forest Development and Efficiency of Snow Avalanche Protection. Arct. Antarc. Alp. Res. 37, 4: 521–526.

MAYLE, B., 1999: Domestic stock grazing to enhance woodland biodiversity. Forestry Commission Information Note No., 28. Forestry Commission, Edinburgh.

MILLER, R.M.; JASTROW, J.D., 1990: Hierarchy of root and mycorrhizal fungal interactions with soil aggregation. Soil Biol. Biochem. 5: 579–584.

MOSIMANN, T., 1981: Geoökologische Standortsindikatoren für die Erosionsanfälligkeit alpiner Hänge nach Geländeeingriffen für Pistenanlagen. Geomethodica 6:143–174.

MOOS, C., 2014: How Does Forest Structure Affect Landslide Susceptibility? Statistical Prediction Models for Shallow Landslides Integrating Forest Structure. Master Thesis ETH Zürich, 97 pp. http://www.wsl.ch/fe/gebirgshydrologie/wildbaeche/projekte/SOSTANH/Theses_EN/Christine-Moos

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. Landf. DOI: 10.1002/esp.3887

NG, C.W.W.; LIU, H.W.; FENG, S., 2015: Analytical solutions for calculating pore-water pressure in an infinite unsaturated slope with different root architectures. Can. Geotech. J. 52: 1981–1992.

PARK, H., 2000: Physical characteristics of heat and water exchange processes between vegetation and the atmosphere in a deciduous broad-leaved forest. Nagoya University.

PERRY, D.A.; MOLINA, R.; AMARANTHUS, M.P., 1987: Mycorrhizae, mycorrhizospheres, and reforestation: current knowledge and research needs. Can. J. For. Res. 17: 929–940.

POHL, M.; GRAF, F.; BUTLER, A.; RIXEN, C., 2012: The relationship between plant species richness and soil aggregate stability can depend on disturbance. Plant Soil 1: 87–102.

POLLEN, N.; SIMON, A., 2005: Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fibre bundle model. Water Resour. Res. 41, W07025, DOI: 10.1029/2004WR003801

POLOMSKI, J.; KUHN, N., 1998: Wurzelsysteme. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL. Bern, Haupt Verlag. 290 S.

PRICE, A.G.; CARLYLE-MOSES, D.E., 2003: Measurement and modelling of growing-season canopy water fluxes in a mature mixed deciduous forest stand, southern Ontario, Canada. Agric. For. Meteorol. 119: 69–85.

QUEREJETA, J.I.; EGERTON-WARBURTONA, L.M.; ALLEN, M.F., 2008: Hydraulic lift may buffer rhizosphere hyphae against the negative effects of severe soil drying in a California Oak savanna. Soil Biol. Biochem. 39: 409–417.

READ, D.J.; BOYD, R., 1986: Water relations of mycorrhizal fungi and their host plants. In: AYRES, P.G.; BODDY, L. (eds) Water, fungi and plants. Cambridge, Cambridge University Press. 287–303.

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.; RAETZO, H.; MCARDELL, B.; PRESLER, J., 2008: Hanginstabilitäten. In: BEZZOLA, G.R.; HEGG, C. (Ed.) Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen. Bern, Bundesamt für Umwelt BAFU; Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL. 97–116.

RICKLI, C.; ZÜRCHER, K.; FREY, W.; LÜSCHER, P., 2002: Wirkungen des Waldes auf oberflächennahe Rutschprozesse. Schweiz. Z. Forstwes. 153, 11: 437–445.

RILLIG, M.C.; MUMMEY D.L., 2006: Mycorrhizas and soil structure. New Phytol. 171: 41–53, doi:10.1111/j.1469-8137.2006.01750.x

ROBERTS, A.J., 2016: The influence of grazing management on soil carbon and mycorrhizae. Northern Arizona University, ProQuest Dissertations Publishing, 2016. 10159273. http://search.proquest.com/pqdtscieng/docview/1840883585

SANCHEZ-ZABALA, J.; MAJADA, J.; MARTÍN-RODRIGUES, N.; GONZALEZ-MURUA, C.; ORTEGA, U.; ALONSO-GRAÑA, M.; ARANA, O.; DUÑABEITIA, M.K., 2013: Physiological aspects underlying the improved outplanting performance of *Pinus pinaster* Ait. seedlings associated with ectomycorrhizal inoculation. Mycorrhiza 23: 627–640.

SCHIECHTL, H.M., 1973: Sicherungsarbeiten im Landschaftsbau. München, Verlag Georg D.W. Callwey. 244 S.

SCHWARZ, M.; COHEN, D.; OR, D., 2010: Soil-root mechanical interactions during pullout and failure of root bundles, J. Geophys. Res. 115, F04035, DOI:10.1029/2009JF001603

SCHWARZ, M.; COHEN, D.; OR, D., 2012: Spatial characterization of root reinforcement at stand scale: Theory and case study. Geomorphology 171–172: 190–200.

SMITH, A.J.H.; POTVIN, L.R.; LILLESKOV, E.A., 2015: Fertility-dependent effects of ectomycorrhizal fungal communities on white spruce seedling nutrition. Mycorrhiza 25: 649–662.

SMITH, S.E.; READ, D.J., 2008: Mycorrhizal Symbiosis. London, Academic Press. 787 pp.

SPRINGMAN, S.; ASKARINEJAD, A.; CASINI, F.; FRIEDEL, S.; KIENZLER, P.; TEYSSEIRE, P.; THIELEN, A., 2012: Lessons learnt from field investigations in potentially unstable slopes in Switzerland. Slov. Geotech. J. 1: 5–29.

SPRINGMAN, S.M.; JOMMI, C.; TEYSSEIRE, P., 2003: Instabilities on moraine slopes induced by loss of suction: a case history. Géotechnique 52: 3–10.

TAGU, D.; DE BELLIS, R.; BALESTRINI, R.; DE VRIES, O.M.H.; PICCOLI, G.; STOCCHI, V.; BONFANTE, P.; MARTIN, F., 2001: Immuno-localization of hydrophobin HYDPt-1 from the ectomycorrhizal basidiomycete *Pisolithus tinctorius* during colonization of *Eucalyptus globulus* roots. New Phytol. 149: 127–135.

TAYLOR, D.W., 1948: Fundamentals of soil mechanics. New York, Wiley.

TRACY, S.R.; BLACK, C.R.; ROBERTS, J.A.; DODD, I.C.; MOONEY, S.J., 2015: Using X-ray Computed Tomography to explore the role of abscisic acid in moderating the impact of soil compaction on root system architecture. Environ. Exp. Bot. 110: 11–18.

VAN DER HEIJDEN, M.G.A.; KLIRONOMOS, J.N.; URSIC, M.; MOUTOGLIS, P.; STREITWOLF-ENGEL,R.; BOLLER, T.; WIEMKEN, A.; SANDERS, I.R., 1998: Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. Nature 396: 69–72.

VON WYL, B., 1987: Beitrag naturnaher Nutzungsformen zur Stabilisierung von Ökosystemen im Berggebiet, insbesondere zur Verhinderung von Bodenerosion. Schweiz. Landw. Fo. 26: 405–464.

WAG, 1991: Bundesgesetz über den Wald (Waldgesetz, WaG), vom 4. Oktober 1991, SR 921.0.

WU, T.H., 1984: Effect of Vegetation on Slope Stability. Transp. Res. Rep. 965: 37–46.

WU, T.H., 2007: Root reinforcement: analyses and experiments. In: STOKES, A.; SPANOS, I.; NORRIS, J.E.; CAMMERAAT, E. (eds) Eco- and Ground Bio-Engineering: The Use of Vegetation to Improve Slope Stability. Berlin, Springer Verlag. 21–30.

YANG, Z.; HAUTIER, Y.; BORER, E.T.; ZHANG, C.; DU, G., 2015: Abundance- and functional-based mechanisms of plant diversity loss with fertilization in the presence and absence of herbivores. Oecologia 179: 261–270.

YILDIZ, A.; ASKARINEJAD, A.; GRAF, F.; RICKLI, C.; SPRINGMAN, S.M., 2015: Effects of roots and mycorrhizal fungi on the stability of slopes. Proceedings of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development, Edinburgh, 1693–1698. DOI:10.1680/ ecsmge.60678

YILDIZ, A.; GRAF, F.; RICKLI, C.; SPRINGMAN, S.M., 2017: Determination of the shearing behaviour of root-permeated soils with a large-scale direct shear apparatus. Catena (submitted)

ZHOU, J.; JIANG, X.; ZHOU, B.; ZHAO, B.; MA, M.; GUAN, D.; LI, J.; CHEN, S.; CAO, F.; SHEN, D.; QIN, J., 2016: Thirty four years of nitrogen fertilization decreases fungal diversity and alters fungal community composition in black soil in northeast China. Soil Biol. Biochem. 95: 135–143.