

Executive Stakeholder Summary

Projektnummer	406840_143122
Titel	Bodenstabilität und Naturgefahren: Vom Wissen zum Handeln
Projektleiter	Frank Graf, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF
Weitere Projektverantwortliche	Peter Bebi, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF Martin Frei, Amt für Wald und Naturgefahren, Kanton Graubünden; MFrei Infra GmbH Christian Rickli, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL Christian Rixen, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF Sarah Springman, ETH Zürich

Beiträge zu den thematischen Synthesen:

<input type="checkbox"/> Boden und Nahrungs- mittelproduktion	<input checked="" type="checkbox"/> Boden und Umwelt	<input type="checkbox"/> Raumentwicklung	<input checked="" type="checkbox"/> Bodendaten, Methoden und Instrumente	<input type="checkbox"/> Bodenpolitik
--	---	--	---	---------------------------------------

Ort, Datum: Davos, 29. Januar 2017

Hintergrund

Erosion und flachgründige Rutschungen sind eine stete Gefährdung für Mensch, Gebäude und Verkehrswege. In den letzten Jahren verursachten solche Ereignisse nicht selten enormen Schaden – bis über 100 Millionen Franken durch ein einzelnes Unwetter – und haben auch Menschenleben gefordert. Mit der Klimaveränderung dürften Häufigkeit und Intensität extremer Unwetter zunehmen und dadurch auch das Risiko dieser Naturgefahren. Der Schutz davor und die Verbesserung der Vorhersage sind daher wichtige Anliegen. Dabei gilt ein besonderes Augenmerk der Prävention von flachgründigen Rutschungen.

Die Wirksamkeit von Vegetation und insbesondere Wald zum Schutz vor Hangrutschungen, wurde schon früh erkannt. Massnahmen zur Wiederbepflanzung und Stabilisierung betroffener Gebiete sind in der Schweiz seit 1991 im Waldgesetz festgehalten. Ingenieurbiologische Methoden zur Hangstabilisierung sowie die Pflege von Bepflanzungen und Aufforstungen wurden dadurch gegenüber rein technischen Lösungen aufgewertet. Das steigende Bedürfnis nach Sicherheit sowie wirtschaftliche Aspekte verlangen jedoch vermehrt konkrete Angaben zur Wirkung und Effizienz der Vegetation.

Die Schwierigkeit, hangstabilisierende Wirkungen von Pflanzen nachzuweisen, liegt vorab an der Dynamik der Vegetationsentwicklung. Unbestritten sind die Voraussetzungen für nachhaltige Hangstabilität mit Hilfe von Pflanzen: Wachstum, Entwicklung und Vielfalt. Was selbstverständlich scheint, ist jedoch alles andere als trivial. Die Bedingungen auf abgerutschten und erodierten Hängen sind harsch. Für die Pflanzen ist es eine grosse Herausforderung, rechtzeitig Fuss zu fassen und sich zu behaupten. Zudem ist die Zeit knapp, um einen Hang zu besiedeln und namentlich den Wettkampf gegen Erosions- und Rutschungsprozesse zu gewinnen. Dank Mykorrhizapilzen gedeihen viele Pflanzen jedoch besser und schneller und ihre Überlebensraten sind höher. Unter den extremen Bedingungen auf vegetationslosen Hängen ist Ähnliches zu erwarten.

Ziel

Das Ziel des Projekts Bodenstabilität war, die **Pflanzenwirkungen auf die Hangstabilität zuverlässiger zu quantifizieren**. Dazu wurden biologische Stabilisierungseffekte mit bodenmechanischen Parametern verknüpft, die massgebend sind für Berechnung des Sicherheitsfaktors gegen Bodenversagen durch flachgründige Rutschungen. 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.

Als Grundlage diente eine Datenbank mit über 700 detailliert dokumentierten Rutschungen. Im Feld und im Labor wurden ergänzende Untersuchungen durchgeführt zum Einfluss der Waldstruktur auf die Hangstabilität sowie zu Bodenscherkräften und zur Aggregatstabilität. Ein eigens dafür entwickelter neigbarer Scherapparat für grosse Proben ermöglichte **realitätsnahe Versuche**. Damit wurde angestrebt, **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 Schutzpotenzial gegen flachgründige Rutschungen definieren**. Die Ergebnisse sollen in die Planung von ingenieurbiologischen Massnahmen und Pflegeeingriffen einfließen sowie Prognosen ermöglichen, respektive deren Qualität verbessern.

Ergebnisse

Pflanzen und Mykorrhizapilze

Mykorrhizapilze unterstützen ihre Wirtspflanzen insbesondere unter extremen Bedingungen. Dies wurde in einem Partnerprojekt in einem steilen Wildbacheinzugsgebiet in der subalpinen Stufe erneut bestätigt. Auf flachgründigen Rutschungen an bis zu 50° steilen Einhängen des Wildbaches war die Überlebensrate mykorrhizierter Pflanzen im Vergleich zu unbehandelten Kontrollpflanzen deutlich höher. Der Mykorrhiza-Effekt war bereits nach einer Vegetationsperiode klar ersichtlich und signifikant.

Höhere Überlebensraten von Pflanzen sind eng mit besserem Wachstum verknüpft. In der Wildbachstudie produzierten die mykorrhizierten Pflanzen – Erlen- und Weidenarten – deutlich mehr oberirdische Biomasse. Der Unterschied zu den nicht mykorrhizierten Kontrollpflanzen war von Beginn an ersichtlich und insbesondere bei den Erlen sehr ausgeprägt. Der im Vergleich zu Weiden verstärkte Mykorrhizaeffekt bei Erlen lässt sich teilweise mit dem Artenspektrum des verwendeten Pilz-Inokulums erklären.

Der positive Einfluss auf das oberirdische Pflanzenwachstum ist einer der offensichtlichsten Effekte der Mykorrhiza und zeigte sich auch in Laboruntersuchungen mit Grauerle (*Alnus incana*) und Hängebirke (*Betula pendula*). Allerdings gab es deutliche Unterschiede in Abhängigkeit der beiden verwendeten Inokulum-Typen. Sowohl bei Erle als auch Birke bewirkte ein kommerzielles Inokulum mit einer Kombination verschiedener Arten zweier Mykorrhizagruppen (Ektomykorrhiza, arbuskuläre Mykorrhiza) eine deutliche Steigerung der oberirdischen Biomasse. Die Zugabe einer einzelnen, jeweils für Erle respektive Birke wirtsspezifischen Ektomykorrhiza-Pilzart führte nur bei Erle zu einer geringfügigen Steigerung gegenüber der unbehandelten Kontrolle.

Mykorrhizapilze können nicht nur die oberirdische 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 Birken-Mykorrhizapilz der Fall war. Bei der Erle war im Vergleich zu den unbehandelten Kontrollpflanzen die Steigerung des Wurzelwachstums deutlich weniger ausgeprägt und mit beiden Inokulum-Typen nicht signifikant. Dies steht im Gegensatz zu Resultaten einer früheren Untersuchung von uns, bei der der gleiche Ektomykorrhizapilz verwendet wurde und das Wurzelwachstum inokulierter Erlen signifikant besser war als bei den unbehandelten Kontrollpflanzen.

Aggregatstabilität und Bodenmechanik

Stabile Bodenaggregate sind nicht nur essenzielle Voraussetzung für eine genügende Wasser- und Nährstoff-Rückhaltekapazität im Hinblick auf die nachhaltige Entwicklung von Pflanzen und Pflanzengesellschaften. Eine gute Aggregatstruktur fördert auch die Durchwurzelung des Bodenkörpers – insbesondere 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 Durchwurzelung sowie Mykorrhizierung wurde mehrfach nachgewiesen.

In den Versuchen mit Erle und Birke kam dies ebenfalls deutlich zum Ausdruck. Die höchste Aggregatstabilität wurde für beide Baumarten mit jener Behandlung erreicht, aus der auch die höchsten Durchwurzelungswerte (Wurzellänge pro Bodenvolumen) resultierten. Für die Erle war dies die Inokulierung mit dem spezifischen Mykorrhizapilz, für die Birke mit dem kommerziellen

Produkt. Bei Letzterer bewirkte auch der spezifische Mykorrhizapilz eine signifikante Erhöhung der Aggregatstabilität.

Die Stabilität der Bodenmatrix und Porenstruktur wirkt sich entscheidend auf die hydrologischen Eigenschaften des Bodens aus. Diese spielen wiederum eine massgebende Rolle für die Stabilität von Hängen. Die Auslösung flachgründiger Rutschungen ist eng gekoppelt mit dem Prozess der Wassersättigung und dem entsprechenden Anstieg des Porenwasserdrucks im Bodenkörper. Diesbezüglich zeigte sich, dass mit zunehmender Intensität der Durchwurzelung die Zeitdauer bis zum Kollaps des Bodenkörpers verlängert werden konnte. Dieser Widerstand gegenüber dem ansteigenden Porenwasserdruck korrelierte positiv mit der Aggregatstabilität. Versuche mit Grauerle, Wiesenrispengras (*Poa pratensis*) und der Kombination der beiden Pflanzen haben dies deutlich gezeigt. Im Vergleich zu unbepflanzten Kontrollen konnte zwar für die reinen Erle-Proben nur eine minimale Verbesserung festgestellt werden. In den Proben mit Wiesenrispengras dagegen war die Zeitspanne bis zum Kollaps der Bodenstruktur deutlich verlängert. Im Vergleich zur Kombination mit Erle leisteten die reinen Gras-Proben dem ansteigenden Porenwasserdruck mehr als doppelt so lange Widerstand. Bezüglich Aggregatstabilität konnte zwischen diesen beiden Varianten allerdings kein Unterschied festgestellt werden. Die Vermutung 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. Das Wurzelwerk des Wiesenrispengrases ist nicht verholzt, stark verflochten und durch einen hohen Anteil an Feinwurzeln (0.5–1 mm) charakterisiert. Im Gegensatz dazu besitzt die Grauerle mehrheitlich verholzte Wurzeln mit höheren Anteilen an Mittel- und Grobwurzeln. Ihre Wurzelarchitektur wird dem sogenannten «Parabol-Typ» zugeordnet, jene von *Poa pratensis* dem «Dreieck-Typ», der einen vergleichsweise signifikant tieferen Porenwasserdruck bewirkt. Entsprechend dauert es länger bis es bei der Sättigung zu einem kritischen Überdruck kommt. Zudem konnte nachgewiesen werden, dass die Evapo-Transpirationsraten in den reinen Gras-Proben deutlich höher liegen als in den restlichen Proben, so dass von Beginn weg ein grösseres Reservoir für die Aufnahme von Wasser zur Verfügung steht.

Die positiven Effekte der Vegetation auf Boden- und Hangstabilität haben wir bereits früher mit triaxialen Scherversuchen von kohäsionslosem Moränenmaterial aus einem Rutschungsgebiet nachgewiesen. Bepflanzt mit Grauerle, ergab sich im Vergleich zu unbepflanzten Kontrollen eine mittlere Erhöhung des Scherwinkels Φ' von 5°. Ein bepflanzter Hang wäre also auch bei 5° steilerer Neigung noch standhaft als es das reine Bodenmaterial aus geotechnischer Sicht zulässt.

In verschiedenen Untersuchungsgebieten konnte diese «biologische» Erhöhung der bodenmechanischen Stabilität bestätigt werden. In vergleichbarem Masse übersteile Hänge mit einer gut entwickelten Vegetationsdecke überstanden Starkniederschlagsereignisse wie das Unwetter von 2005 schadlos. Die gute Durchwurzelung des Bodenkörpers war unzweifelhaft mitverantwortlich für die stabilisierenden Wirkung der Pflanzen.

Mit dem neu entwickelten, neigbaren Direktscherapparat war es uns erstmals möglich, Vorteile herkömmlicher Feld- und Labormethoden optimal zu kombinieren: gut kontrollierbare und beliebig oft wiederholbare Versuche sowie grosse Proben (50x50x40 cm), die die Verhältnisse im Feld angemessen repräsentieren. Die Untersuchungen haben unter anderem gezeigt: Es reicht nicht wie bis anhin nur den Reibungswinkel (Φ') und die Kohäsion (c') zu berücksichtigen. Um die Verstärkung der Bodenstabilität durch die Wurzeln angemessen zu quantifizieren, erwies sich die Dilatanz (Ψ) als weitere entscheidende Grösse. Diese Eigenschaft eines Bodenmaterials, sein Volumen unter der Einwirkung von Scherkräften durch Auflockerung zu vergrössern, prägt das Scherverhalten eines wurzelverstärkten Bodens massgeblich.

Mit diesem neuen Ansatz wurde der positive Effekt der Bepflanzung auf die Boden- und somit Hangstabilität in den zahlreichen Versuchen bestätigt. Je stärker durchwurzelt das Bodenmaterial war, desto fester war der Boden, desto höher die Hangstabilität. Boden einer Rutschfläche, die bepflanzt und mit Mykorrhizapilzen inokuliert wurde, zeigte nach 6 Monaten im Direkt-Scherversuch eine stark erhöhte Festigkeit – im Mittel ca. 6,5 kPa. Die Felduntersuchungen sowie andere Arbeiten zur Quantifizierung der Wurzelverstärkung im Schutzwald haben gezeigt, dass 5-10 kPa für gut strukturierte Wälder realistische Werte darstellen.

Unter Berücksichtigung dieses als Wurzelverstärkung (Kohäsion) bezeichneten Effekts wurden Berechnungen für die Sicherheit gegen das Abgleiten durchgeführt (Verfahren für Gleichgewicht einer unendlich langen Böschung mit hangparalleler Sickerströmung). Wie in den Triaxial-Versuchen zeigte sich: Der Neigungswinkel kann gegenüber dem Scherwinkel um 5° erhöht werden und der Hang immer noch stabil bleibt – mit 6,5 kPa bis in eine Tiefe von 1,2 m. Diese 1,2 m entsprechen etwa dem Mittelwert von über 200 Waldrutschungen, die nach den Unwettern 1997 (Sachseln), 2002 (Napf, Appenzell) und 2005 (Entlebuch, Napf, Prättigau) dokumentiert und in der WSL-Datenbank für flachgründige Rutschungen und Hangmuren erfasst wurden.

Waldstruktur und Landnutzung

Nicht jeder Wald wirkt der Bildung flachgründiger Rutschungen in gleichem Mass entgegen. Sowohl Wurzelverstärkung als auch hydrologische Wirkungen sind höher, je vollständiger und vielfältiger der Wurzel- und Kronenraum von unter- und oberirdischen Baumteilen durchdrungen wird. Die Vielfalt ist für die Bodenstabilität von enorm Bedeutung, der insbesondere Rechnung getragen wird, wenn der Wald als dynamisches Ökosystem betrachtet wird. – als 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 die Bäume jedoch nicht auf grosser Fläche zu dicht stehen, weil sonst junge Bäume zu wenig Licht erhalten. Wie gross dürfen Waldlücken aber sein, damit Waldverjüngung noch möglich ist, flachgründige Rutschungen aber verhindert werden? In St. Antönien, wo wir dieser Frage nachgingen, wurden auf ehemaligen Rutschungsflächen im Wald verschiedenste Informationen zur Waldstruktur und anderen wichtigen Einflussfaktoren erhoben. Wie sich zeigte ereigneten sich Rutschungen vor allem in Waldlücken mit einer Länge von über 20 Metern in der Falllinie. Bei grösseren Lückenlängen war vor allem die Hangneigung für das Auftreten von Rutschungen, die Breite von Waldlücken spielte dagegen eine untergeordnete Rolle. Dieses Resultat ist insofern plausibel, als die Wurzelverstärkung in Richtung des Hanges mit zunehmender Distanz von Bäumen stärker abnimmt als parallel zum Hang und Wasserflüsse im Boden vorwiegend in Hangrichtung erfolgen. 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.

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 nachfolgenden Borkenkäferbefall beeinträchtigt waren.

Aufgrund des Absterbens der Restdurchwurzelung muss nach solchen Störungen offenbar während einer bestimmten Zeitspanne mit erhöhter Rutschungsgefährdung gerechnet werden. Diese dauert an, bis die nachwachsende Baumgeneration die Schutzfunktion wieder übernehmen kann. Es ist daher äusserst wichtig, die Verjüngung bereits unter dem Schirm des Altbestandes stetig zu fördern, beziehungsweise in der subalpinen Stufe den Waldbestand dafür gezielt zu öffnen.

Mit waldbaulichen Eingriffen kann die Vielfalt und die Struktur eines Waldes und damit dessen Anfälligkeit gegenüber flachgründigen Rutschungen wesentlich beeinflusst werden. 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 sind als ca. 20 bis 30 Meter. Dies steht in Einklang mit bestehenden Vorgaben der NaiS-Profile für Rutschungen, Lawinen und Steinschlag (NaiS: Nachhaltigkeit im Schutzwald, BAFU).

In dicht zusammenwachsenden Wäldern lässt sich die Strukturvielfalt unter Umständen durch extensive Beweidung verbessern. Intensive Beweidung und Düngung wirken sich dagegen nachteilig auf die Bodenstabilität aus, denn starke Trittbelastungen beeinträchtigen das Wurzelwachstum und das Infiltrationsvermögen und zusätzlicher Nährstoffeintrag das Artenspektrum von Flora und Mykorrhizapilzen.

3-Stufen Filter

In einer retrospektiven Analyse von den insgesamt 218 flachgründigen Rutschungen, die sich während den Unwettern 1997 (Sachseln), 2002 (Napf, Appenzell) und 2005 (Entlebuch, Napf, Prättigau) im Waldgebiet ereigneten, liessen über 95% anhand ausgewählter Kriterien aus unseren Untersuchungen erklären.

Der seriell angewendete «3-Stufen-Filter» berücksichtigt Aspekte der Bodenmechanik (Scherparameter, Hangneigung), Vegetation (Kriterien für optimalen Schutz vor flachgründigen Rutschungen nach NaiS, ergänzt mit unseren Erkenntnissen) und Topographie. Mit dem bodenmechanischen Kriterium liessen sich nahezu 50%, mit jenem der Vegetation weitere 40% und mit der Topographie zusätzlich 7% der Ereignisse erklären.

Gut strukturierte Wälder halten demnach Hänge bis zu 5° steiler standfest. Solche Wälder sind möglichst reich an Arten und Wurzelstruktur, sind zu mehr als 60% bedeckt (Baumschicht $\geq 40\%$) sowie gut abgestuft bezüglich Baumhöhe und Altersstruktur. Diese Kriterien waren bei den untersuchten Ereignissen bezüglich Vegetation in rund 40% der Fälle nicht erfüllt. In weiteren rund 50% waren die Hänge mehr als 5° steiler als der entsprechende Scherwinkel Φ' . Die Analyse hat weiter gezeigt, dass bei Jungwaldbeständen diesbezüglich weiterer Untersuchungen notwendig sind.

Um mit den verwendeten Kriterien von der Retrospektive zur Vorhersage zu gelangen, sind verschiedene Informationslücken zu schliessen. Dies betrifft insbesondere die Scherparameter (Scherwinkel Φ' und Kohäsion c'), deren Bestimmung sehr aufwendig ist. Eine flächendeckend geotechnische Charakterisierung grösserer gefährdeter Gebiete ist daher aus Ressourcengründen unrealistisch. Herkömmliche Verfahren weisen deshalb geologischen Einheiten häufig fixe Werte zu, was aber sehr fehlerbehaftet und unbefriedigend sein kann. Im Falle der Drusbergschichten von Sachseln beträgt der zugeordnete Scherwinkel $\Phi'=36^\circ$. Die geotechnische Beurteilung des Bodenmaterials in den Anrisszonen hat allerdings ergeben, dass für 95% der 67 Rutschungen von 1997 in den Drusbergschichten die Werte von Φ' 27° bis 33° betragen.

Nur selten genügen auch die Informationen bezüglich Vegetation den Ansprüchen einer fundierten Quantifizierung der biologischen Effekte. Zur Verbesserung der Situation sind glücklicherweise die

notwendigen Instrumente (NaiS, BAFU) und Protokolle (WSL) verfügbar. Auch das Know-how und die Erfahrung sind bei den verantwortlichen Personen grösstenteils vorhanden.

Mit vertretbarem Aufwand ist die Topographie vorausschauend nur schwer zu beeinflussen. Gut strukturierte Wälder vermögen die Hangstabilität beträchtlich zu erhöhen. Die Stabilisierung von Hängen zum Schutz vor flachgründigen Rutschungen ist daher 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.

Fallstudie Sachseln

In der Fallstudie Sachseln analysierten wir insgesamt 107 Waldrutschungen aus dem Jahre 1997. Nur in 7 der untersuchten Fälle wurde eine Rutschung ausgelöst, obwohl alle Kriterien des beschriebenen 3-Stufen Filters ausnahmslos erfüllt waren. Diese traten alle an Hängen von 40° oder steiler auf, wobei die Differenz zwischen Hang- und Scherwinkel zwischen 7° und 17° Grad variierte. Damit wurde das 5°-Kriterium des 3-Stufen Filters teilweise deutlich überschritten. Basierend auf Normalverteilungsannahmen für Hangneigung und Scherwinkel dieser Ereignisse und einem Schwellenwert für die Eintretenswahrscheinlichkeit einer Rutschung von 1% ergibt sich ein Grenzwert für die Hangneigung von rund 38°. Somit lässt sich 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 Scherwinkel. Für den Fall «Sachseln» lassen erste Resultate vermuten, dass solche Wälder rund 80% der Rutschungen verhindert hätten und nur knapp 80 von 400 ha der untersuchten Waldfläche betroffen gewesen wären.

Wie sieht es aber mit der Verhältnismässigkeit von Aufwand und Ertrag im Fallbeispiel «Sachseln» aus? Das Fallbeispiel legt eine langfristig angelegte Investition in optimale Pflege von Wäldern in Hanglagen und Gerinneabhängungen hinsichtlich Schutz vor flachgründigen Rutschungen nahe. 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) ca. 35 000 Franken pro Hektare oder 300 Franken pro Hektare und Jahr. Im Zeitrahmen von 100 Jahren würden sich die Ausgaben für die 400 betroffenen Hektaren auf ca. 12 Millionen Franken belaufen. Diesen Ausgaben stehen Kosten von mehr als 120 Millionen Franken gegenüber, die für die Bewältigung der Schäden nach dem Jahrhundertereignis 1997 in Sachseln aufgebracht werden mussten. Dieser Schaden wurde allerdings nicht nur durch flachgründige Rutschungen verursacht oder kann diesen nicht immer offensichtlich und direkt zugeordnet werden. Eine Investition ins Waldmanagement ist im Hinblick auf bestmöglichen Schutz vor flachgründigen Rutschungen langfristig gesehen wohl dennoch lohnend. Selbst wenn die verallgemeinerten Ansätze von bis zu 800 Franken pro Hektare und Jahr aus dem «Handbuch NFA im Umweltbereich» des BAFU zu Grunde gelegt werden, resultiert eine positive Bilanz (maximal 25% der gesamten Aufwendungen). Die im Fallbeispiel tieferen Aufwendungen für das Schutzwaldmanagement lassen sich mehrheitlich mit den vergleichsweise einfachen Geländebedingungen und der relativ guten Walderschliessung in Sachseln erklären.

Weitere Untersuchungen müssen zeigen, inwieweit sich die Zahlen von Sachseln auf andere Gebiete übertragen lassen.

Bedeutung für die Forschung

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, aber auch im Bereich Waldmanagement 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 auf Vielfalt und Sukzession von Pflanzengesellschaften und Rhizosphäre – höhere Temperaturen, zunehmende Trockenheit, intensivere Unwetter

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

Bedeutung für die Praxis

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 diesem Projekt berücksichtigen. Zur Verminderung der Rutschungsanfälligkeit sind Vielfalt und Strukturparameter von entscheidender Tragweite:

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

In rutschungsgefährdeten Gebieten ist bei land- und alpwirtschaftlichen Nutzungen ein behutsames Düngungs- und Beweidungsregime einzuhalten, um zu hohen Nährstoffeintrag und Bodenverdichtung zu vermeiden.

Bei der Renaturierung abgerutschter Hänge mit ingenieurbioologischen Methoden ist bei der Wahl der Pflanzen neben der Artenvielfalt auch den unterschiedlichen Wurzelformen sowie den Mykor-

rhizapilzen 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.

Empfehlungen

Schutzwälder mit Anfälligkeit auf flachgründige Rutschungen 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** (Arten, Alter, horizontaler und vertikaler Struktur, Baumartenmischung, Durchwurzelung, Wurzelarchitektur) auf. 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 massgeblich gefördert. Neben Pflanzen sind auch deren Partnerorganismen, insbesondere Mykorrhizapilze, zu berücksichtigen (Abb. 1). Eine vielfältige Myko-Rhizosphäre treibt die Sukzession der Pflanzengesellschaften an und ist ein wichtiger Beschleuniger für die nachhaltige Entwicklung einer schützenden Vegetationsdecke. Deshalb soll auch der **unterirdischen Arten- und Strukturvielfalt** (Wurzelarchitektur) angemessene Aufmerksamkeit zuteilwerden.

Waldbauliche Eingriffe

Angemessene waldbauliche Eingriffe können Strukturvielfalt und somit die Bodenstabilität 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 Sinn 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, z.B. in vernässten Bereichen ein Entwicklungsstadium mit möglichst hoher Evapo-Transpiration.

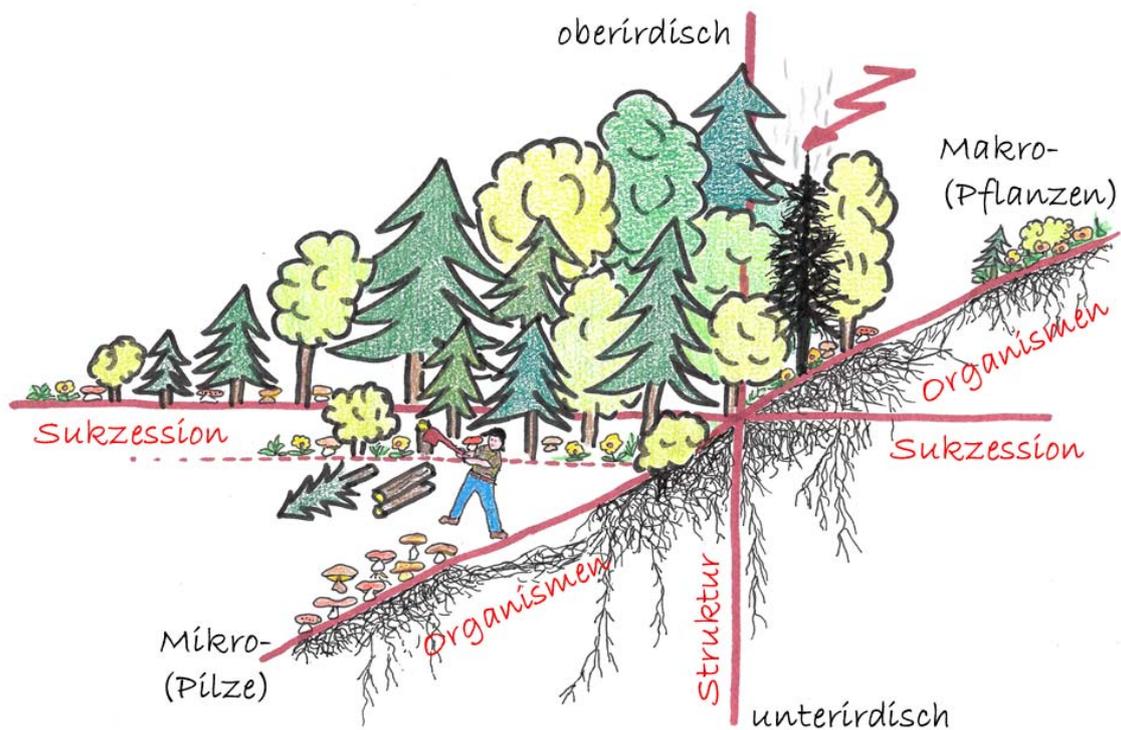


Abbildung 1: 3^D-Diversität unter Berücksichtigung von Mikro- und Makro-Organismen (Pflanzen- und Mykorrhizapilz-Arten), ober- und unterirdischer Struktur sowie Sukzession und deren Regulierung durch anthropogene Eingriffe (Pflege und Unterhalt) und natürliche Störungen wie Windwurf, Borkenkäfer, Feuer, Lawinen, ... (Zeichnung von V. Graf-Morgen, 2016).

Landnutzung

Auf eine intensive alp- und landwirtschaftliche Nutzung inner- und oberhalb von Bereichen mit hoher Rutschungswahrscheinlichkeit ist zu verzichten, da hoher Nährstoffeintrag und Bodenverdichtung die Stabilität rutschungsgefährdeter Hänge beeinträchtigt. Zuviel Nährstoff reduziert das Wurzelwachstums und die Mykorrhizadiversität. Zudem werden standortangepasste Arten verdrängt. Bodenverdichtung beeinträchtigt die Wurzelentwicklung und somit die Wurzelverstärkung des Bodens, aber auch die Entwicklung der Mykorrhizapilze.

Ingenieurbiologie

Bei Wiederbepflanzung und -stabilisierung abgerutschter Hänge mit ingenieurbiologischen Methoden sind Pflanze-Pilz-Kombinationen des Initialstadiums zu berücksichtigen. 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. 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 zu fördern, sowohl horizontal als auch vertikal (Wurzelraum). Dabei soll auf eine möglichst heterogene Geländemorphologie geachtet werden mit variablem Mikrorelief auch im oberflächennahen Bodenbereich.

Konzeptionelle Aspekte

Das vorgeschlagene Konzept mit 3-Stufen Filter, 3^D-Diversität und NaiS soll für eine volle Entfaltung des Potenzials kontinuierlich weiterentwickelt und verbessert werden. Die Ausdehnung des probabilistischen Ansatzes zur Erklärung von Rutschungen auf das Vorkommen von Ereignissen, die mit unserem Konzept nicht erfasst werden, ist ein erster Schritt dazu. 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 Schutzpotenzial geeignet gepflegter und unterhaltener Wälder ist. Sollten sich unsere Resultate und die Folgerungen aus dem Fallbeispiel «Sachseln 1997» bestätigen, sind Investitionen von 300 bis 800 Franken pro Hektare und Jahr für die Schutzwaldpflege langfristig gesehen äusserst lohnend.