



FACHSTELLE FÜR FORSTLICHE BAUTECHNIK
CENTRE POUR LE GÉNIE FORESTIER
CENTRO PER IL GENIO FORESTALE
POST SPEZIALISÀ PER TECNICA DA CONSTRUCZIUN FORESTALA

Bund, Kantone und Fürstentum Liechtenstein

Bovel
CH-7304 Maienfeld
Telefon +41 81 403 33 62
e-mail walter.kraettli@ibw.ch
www.fobatec.ch

Stabilisierung rutschender Hänge

Tagungsunterlagen

Plaffeien, 11.06.15
Schüpfheim, 18.6.15
Fideris, 25.6.15



Einführung	3
Prozessgrundlagen und Folgen für die Problemlösung technischer und ökologischer Art (M. Schwarz)	5
Berechnungsgrundlagen	5
Bodenmechanische Parameter	9
Faktoren der Instabilität	11
Sensitivitätsanalyse des unendlichen Böschungsverfahrens	13
Rutschungsereignis - Situation richtig erfassen - zielführend Handeln (W. Krättli)	16
Sofortige Intervention, ja oder nein?	16
Mittel- und langfristiger Handlungsbedarf	16
Durchführung der Massnahmen	18
Technische Lösungsmöglichkeiten (W. Krättli)	19
Fassung und Ableitung von Grund- und Oberflächenwasser	19
Abflachen	26
Stützen	28
Rückhalten	30
Oberflächenschutz	32
Grenzen	33
Biologische Lösungsmöglichkeiten (M. Schwarz)	34
Wirkung der Vegetation in biologischen Maßnahmen	34
Zeitliche Entwicklung der Wurzelverstärkung und dessen Bedeutung in biologischen Massnahmen	36
Quellen	45
Anhang	47
Sturme zur Ereignisanalyse	47
Econome Bsp.	51

Impressum

Herausgeber:

Fachstelle für forstliche Bautechnik
Bovel
CH-7304 Maienfeld
Telefon +41 81 403 33 62
e-mail walter.kraettli@ibw.ch
www.fobatec.ch



Autoren:

Walter Krättli, Fachstelle forstliche Bautechnik (fobatec), ibW Maienfeld
Massimiliano Schwarz, Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL), Zollikofen

Erscheinungsjahr 2015

Einführung

Der Mensch plant, gestaltet und nutzt seinen Lebensraum. In seinem Tun wird er immer wieder von den natürlichen Prozessen der Landschaftsbildung aus dem Konzept gebracht. Rutschungen und Hanginstabilitäten gehören zur natürlichen Formung der Erde. Ein Bewahren eines Ausgangszustandes kann im Umgang mit ihnen daher höchstens temporär zielführend sein. Es geht mehr um ein Entgegennehmen neuer Gegebenheiten und die Findung einer menschlich akzeptablen Neugestaltung. Eine Rutschung wird in den Empfehlungen des Bundes folgendermassen definiert: ‚Hangabwärts gerichtete Bewegung von Hangbereichen aus Fels und/oder Lockergesteinsmassen längs eines Scherbruches‘ (Gleitfläche) (Lateltin et. al. 1997).

Um die Bedeutsamkeit von Rutschungen und Hanginstabilitäten abzubilden und vergleichbar zu machen, existieren klassifizierende Definitionen von unterschiedlicher Betrachtungsweise.

– Klassifikation nach Geschwindigkeit

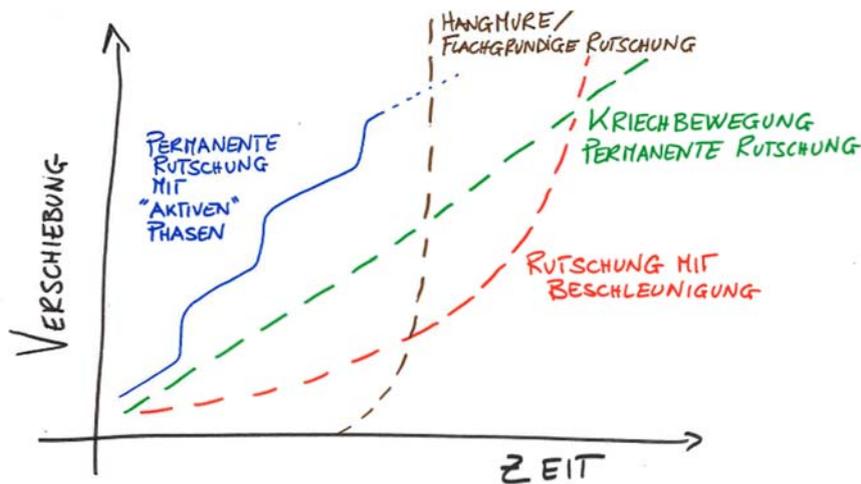


Abbildung 1 Unterschiedliche Verschiebungsgeschwindigkeiten unterteilen im Wesentlichen permanente Rutschungen, spontane Rutschungen und Hangmuren (Schwarz 2015 mod. nach Parriaux).

Aus der über einen längeren Zeitraum feststellbaren, durchschnittlichen Rutschgeschwindigkeit in cm pro Jahr wird die Aktivität abgeleitet:

$v \leq 2\text{cm} / \text{a}$	substabil	sehr langsam
$v \leq \text{dm} / \text{a}$	wenig aktiv	langsam
$v > 0.1\text{m} / \text{d}$	aktiv	langsam mit schnellen Phasen

– Klassifikation nach Gründigkeit (nach Tiefe der Gleitfläche)

Oberflächlich	0 bis 2m
Mitteltief	2 bis 10m
Tief	> 10m

– Klassifikation nach Entstehungsmechanismen

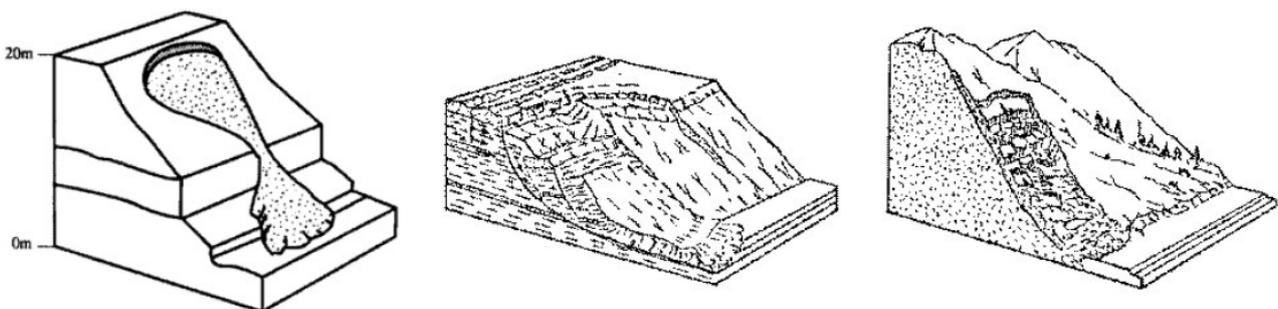


Abbildung 2: Hangmure aus (Krummenacher B., Tobler D, 2009)

Rotationsrutschung

Translationsrutschung

Bei der **Translationsrutschung** (Abbildung 2) gleiten Schichten oder Schichtpakete auf einer bestehenden Schwächezone ab (oft Schicht-, Schieferungs-, Kluft- oder Bruchflächen). Die Schwächezone ist oft wasserstauend, deshalb wassergesättigt und ist dadurch als Gleitfläche geeignet. Die Ausdehnung solcher Rutschungen kann einige m² bis km² betragen. Häufig kommt diese Rutschung auf Flysch, kalkigen Mergelschiefern oder metamorphen Schiefen vor (PLANAT 2015).

Die **Rotationsrutschung** dagegen besitzt eine kreisförmige Gleitfläche, die in der Ausbruchsnische sehr steil einfällt (siehe Abbildung 2). Rotationsrutschungen umfassen ein kleineres Materialvolumen, das durch diesen Gleitmechanismus nur schwach umgearbeitet wird. Die Gleitfläche bildet sich oft im lehmigen, tonigen und siltigen homogenen Lockermaterial aus. Oft sind in der oberen Hälfte der Rutschung typische Nackentälchen und Zerrspalten sichtbar. An der Front wird die Masse zusammengestaucht, zerfällt dadurch und geht bei starker Wassersättigung manchmal (vor allem bei Ton-Silt-feinkörnigem Sand) in Hangmuren oder schlammige Fließerutschungen über (PLANAT 2015).

Eine **Hangmure** ist ein an steilen Hängen erfolgreiches, schnelles Abfahren eines Gemisches aus Lockergestein (Steine, Holz, Boden und Vegetationsbedeckung) und viel Wasser. Gelegentlich werden Hangmuren auch durch oberflächliche Rutschungen ausgelöst, sehr oft jedoch auch ohne Vorhandensein einer Gleitfläche. Hangmuren ereignen sich besonders häufig auf eher gering durchlässigen Böden (tonige Moräne und Gehängelehm). Ferner begünstigen Quellwasserausstritte und intensive Niederschläge die Bildung von Hangmuren. Das oberflächlich abgleitende Gemisch der Hangmure umfasst nur ein beschränktes Volumen (PLANAT 2015).

– Vereinfachte Klassifikation **zur Gefahrenbeurteilung**

Permanente Rutschungen (kontinuierliche Rutschungen): Rutschungen, die sich über lange Zeiträume gleichmässig hangabwärts bewegen. Die Bewegungen erfolgen entweder längs mehr oder weniger deutlich ausgebildeter, bestehender Gleitflächen oder längs bestehender Zonen verstärkter Scherdeformation (Bolliger et. al. 2004).

Spontane Rutschung: Lockergesteinsmasse, die infolge eines plötzlichen Verlustes der Scherfestigkeit unter Ausbildung einer Bruchfläche (= Gleitfläche) relativ schnell abgleitet. Der Begriff „Sekundärrutschung“ beinhaltet die Bezeichnung „spontane Rutschung“ nur zum Teil; er impliziert nämlich, dass die Rutschung innerhalb eines bereits existierenden Rutschgebietes erfolgt. Bei spontanen Rutschungen bildet sich stets eine neue Gleitfläche bzw. Bruchfläche aus, was sie von permanenten Rutschungen unterscheidet (Bolliger et. al. 2004).

Hangmuren: Relativ rasch abfließendes Gemisch aus Lockergestein (oft nur der Boden und die Vegetationsbedeckung) und Wasser (Bolliger et. al. 2004).

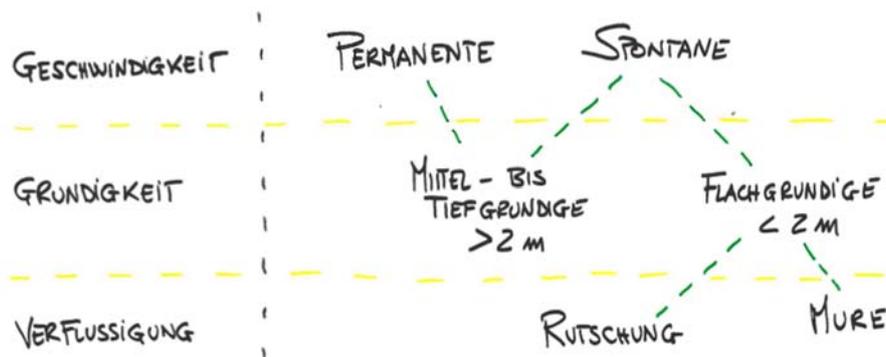


Abbildung 3 Zusammenstellung der drei hauptsächlichsten Unterscheidungskriterien von Rutschungen (Schwarz M.)

Die Erfassung der vielen, schwer zu erkennenden und häufig auch zeitlich ändernden Faktoren, die zu einer Rutschung führen, bildet die Hauptschwierigkeit. Je genauer man die sich zeigenden Gegebenheiten wahrnimmt und die unsichtbaren abklärt oder abschätzt, umso besser sind die Möglichkeiten wirksame und effiziente Massnahmen zu treffen. Neben der Wiederholung grundlegender Regeln, die zu einer Stabilisation eines Hanges beitragen, sollen Hilfsmittel zur Ereignisdokumentation, konzeptionelle Lösungswege mit Beispielen und im speziellen die Wirkungsweise und Grenzen der Vegetationswirkung gegeben werden. Die in diesem Kurs gemachten Betrachtungen beziehen sich vorwiegend auf spontane Rutschungen, Hangmuren und kleinere, permanente Rutschungen. Sehr tiefgründige, permanente Rutschungen sind durch forstlich angewandte Bautechniken nur sehr beschränkt zu beeinflussen.

Prozessgrundlagen und Folgen für die Problemlösung technischer und ökologischer Art (M. Schwarz)

Berechnungsgrundlagen

Für eine quantitative und nachvollziehbare Beurteilung der Stabilität eines Hanges wurden zahlreiche Methoden entwickelt. All diese Methoden benötigen Annahmen bezüglich Vereinfachung gegenüber der Komplexität der Natur auf verschiedenen Ebenen (geologische Strukturen, hydrogeologische Prozesse, bodenmechanische Eigenschaften, u.s.w.). Für die Analyse der Stabilität eines Hanges sind zwei wichtige Schritte nötig: die Erstellung eines Grundmodells und die Wahl einer Berechnungsmethode.

Die Erstellung eines Grundmodells ist sehr wichtig für eine sinnvolle Stabilitätsanalyse. Das Grundmodell sollte so genau wie möglich erstellt werden. Als Grundlagen gelten geologische Karten, Karten der Bodentypen, geomorphologische Karten. Im besten Fall können Informationen aus Projektgrundlagen aus der Region beigezogen werden (Gutachten Baugruben, Bohrungen für Erdwärmesonden, ...). Diese Informationen sind in der Regel bei den kantonalen Stellen zu finden. In speziellen Fällen können detaillierte Untersuchungen verwendet werden (Schlitzprofil mit Bagger, Bohrungen, seismische Untersuchungen, u.s.w.). Diese Untersuchungen fallen meistens auf Grund hoher Kosten aus, wobei in jedem Fall die Nutzung solcher Untersuchungen evaluiert werden sollte.

Als weiterer Schritt sollte eine sinnvolle Berechnungsmethode ausgewählt werden: so einfach wie möglich und so komplex wie nötig. Dabei sollte entschieden werden, welche Gleichgewichtsbedingungen erfüllt werden müssen (Kräfte, Momente oder Energien), welche Geometrie (Diskretisierung, 2 oder 3 Dimensionen, Bruchfläche oder Bruchzone) und welche Materialeigenschaften angenommen werden sollen (räumliche und zeitliche Heterogenität, konstitutives Gesetz).

In der forstlichen Praxis haben sich zwei Berechnungsverfahren etabliert: das „unendliche Böschungs“-Verfahren und das Lamellenverfahren. In beiden Verfahren wird das mechanische Verhalten des Bodens bei der Entstehung einer Rutschung durch steife „Blockelemente“ simuliert. Das mechanische Verhalten dieser Blöcke wird mit den Gesetzen der Festkörpermechanik berechnet. Betrachtet werden die einwirkenden und widerstehenden Spannungen, Kräfte oder Momente.

Das „unendliche Böschungs“-Verfahren ist der einfachste Ansatz und betrachtet eine Berechnung des Kraftgleichgewichtes von einem einzigen repräsentativen Bodenelement. Es heisst „unendliche“ Böschung weil keine lateralen Kräfte berücksichtigt werden und eine unendliche lineare Gleitfläche angenommen wird.

Das Lamellenverfahren (auch nach „Fellenius“ genannt, Jahr 1927) wurde ab den 60er Jahren in der Geotechnik hauptsächlich eingesetzt und wurde in vielen Varianten weiter entwickelt. Bei diesem Verfahren wird ein zweidimensionales Profil eines Hanges in Lamellen („Slices“) unterteilt (= diskretisiert). Jede Lamelle wird als starrer Körper betrachtet. Die gesamte Stabilität des Hanges wird als Summe des Gleichgewichtes jeder Lamelle berechnet, wobei entweder Kräfte (Jambu Ansatz), Momente (Bishop Ansatz) oder beides (Spencer und Morgenstern Ansatz) für das Gleichgewicht berücksichtigt werden können. Diese Verfahren erlauben es, viele unregelmässige Randbedingungen zu berücksichtigen (z.B. kreisförmige oder unregelmässige Gleitflächen). Einige Varianten dieses Verfahrens unterscheiden sich auf Grund der Methode, wie die horizontalen und vertikalen Spannungen zwischen den einzelnen Lamellen berechnet werden können (siehe Duncan et al. für weitere Details).

Diese Verfahren sind heutzutage in Softwares implementiert welche auch die Wirkungen von geplanten Massnahmen berücksichtigen können (z.B. „LARIX“-cubussoftware, SLIDE-rocsciences).

In der SIA Normen werden Koeffizienten eingeführt um die Unsicherheit bei der Berechnung von einwirkenden und rückhaltenden Kräften zu berücksichtigen (Teilsicherheitskoeffizienten). In diesem Zusammenhang ist zu bemerken, dass es je nach Berechnungsansatz bereits in den Resultaten der Berechnungen einen „nicht expliziten“ Sicherheitskoeffizient geben kann, welcher auf Grund der Annahme der Berechnung gegeben ist (z.B. 2D Berechnungen berücksichtigen nicht Randeffekte der dritten Dimension welche den Sicherheitsfaktor erhöhen). Diese Bemerkung gilt vor allem für kleinere, flachgründige Rutschungen.

Folgendes Beispiel zeigt anhand der Anwendung des „unendlichen Böschungsverfahrens“, wie treibende und rückhaltende Kräfte berechnet werden können und welche Parameter dafür nötig sind. Dieses Beispiel zeigt die grundlegenden Konzepte der Hangstabilitätsberechnung, welche auch beim Lamellenverfahren gelten. Bei allen erwähnten Verfahren wird die berechnete Stabilität einer Böschung als „Sicherheitsfaktor“ (SF) ausgedrückt, welcher der Quotient zwischen stabilisierenden (R) und destabilisierenden (E) Kräften ist.

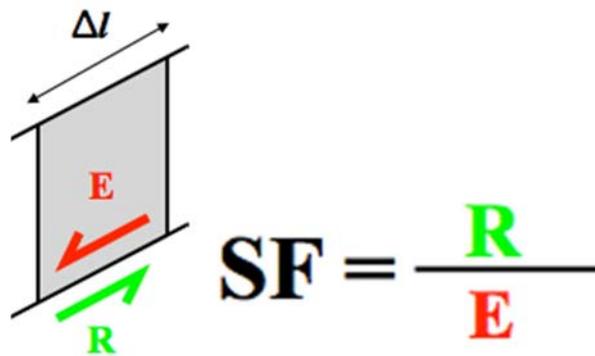


Abbildung 4 Darstellung der rückhaltende (R) und treibende (E) Kräfte welche an der Scherfläche eines Rutschkörpers wirken. Die Sicherheitsfaktor (SF) ist definiert als Quotient Zwischen R und E.

Die nötigen Schritte für diese Berechnung können wie folgt zusammengefasst werden:

Dimensionen des Rutschkörpers und gesättigtes/ungesättigtes Volumen definieren. Dabei wird angenommen, dass der repräsentative Rutschkörper eine konstante Breite von 1 m hat (3D zu 2D Berechnungen) —> Berechnung Gewichtskraft —> Berechnung Treibende Kraft und Spannung (E)—> Berechnung Normale Kraft und Spannung (senkrecht zu Scherfläche) —> Berechnung stabilisierende Kraft und Spannung (R) mit der Mohr-Coulomb Gleichung —> Berechnung des Sicherheitsfaktors.

Die Bodentiefe, z , ist in der Parallelrichtung zur Erdbeschleunigung gemessen. Um das Volumen eines Rutschkörpers zu berechnen, muss die Bodenmächtigkeit, h , senkrecht zur Schlifffläche der Rutschung mit folgender Gleichung berechnet werden

$$h = z \cos(\alpha) \text{ [m]}$$

wobei α die Hangneigung ist. Die Gleitfläche wird parallel zur Oberkante Terrain (OKT) angenommen (siehe Abbildung 5).

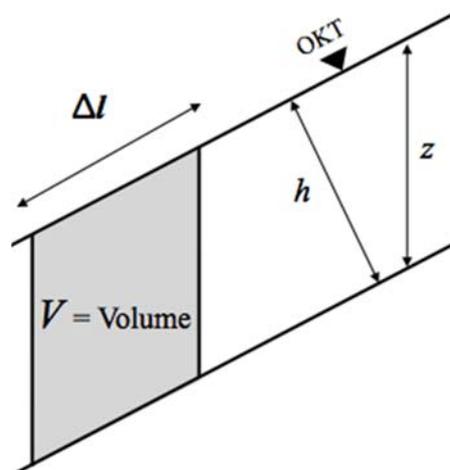


Abbildung 5 Definition des 2D-Bodenvolumens (V) und Bodenmächtigkeit (z) bei der Darstellung eines Rutschkörpers für die Berechnung nach dem unendlichen Böschungsverfahren.

Das Bodenkörpervolumen, V , kann mit folgender Gleichung berechnet werden

$$V = h \Delta l \text{ (Breite) [m}^3\text{]}$$

wobei Δl die Länge des Bodenkörpers ist. Die Breite ist konstant = 1 m.

Die Gewichtskraft, W , ist das Produkt der Rutschkörpermasse, M , mal die Erdbeschleunigung, g ($9.81 \text{ [m s}^{-2}\text{]}$). Die Rutschkörpermasse wird berechnet als Volumen, V , mal die Dichte des Bodens, ρ . Es wird unterschieden zwischen scheinbarer Dichte, ρ (ungesättigter Zustand), gesättigter Dichte, ρ_{sat} (alle Bodenporen sind mit Wasser gesättigt) und der Dichte des Wassers, ρ_w (circa $1 \text{ [t m}^{-3}\text{]}$). Plausible Werte der scheinbaren Bodendichte eines B Horizontes (mineralisch verwitterter Horizont) sind zwischen 1.4 und $1.6 \text{ [t m}^{-3}\text{]}$.

Aus der Gewichtskraft, W , werden die zwei vektoriellen Komponenten parallel und senkrecht zum Hang berechnet. Folgende Abbildung 6 zeigt die geometrische Darstellung der vektoriellen Komponenten der Gewichtskraft (E und N).

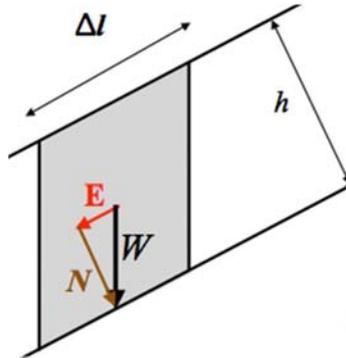


Abbildung 6 Teilung der Gewichtskraft eines Rutschkörpers in die hangsenkrechte (N) und hangparallele (E) Komponente.

Die parallele Komponente dieser Kraft entspricht der treibenden/destabilisierenden Kraft, E .

$$\mathbf{E} = W \sin(\alpha)$$

wobei

$[\text{N}] = [\text{kg m s}^{-2}] = \text{„Newtons“}$,
Einheit für Kräfte

$[\text{Pa}] = [\text{N/m}^2] = \text{„Pascal“}$, Einheit für Spannungen

Die hangsenkrechte Komponente der Gewichtskraft wird als „normal“-Kraft bezeichnet und trägt zur Stabilität des Hanges bei.

$$\mathbf{N} = \text{Normalkraft} = W \cos(\alpha)$$

Die mobilisierte Scherkraft entlang einer potenziellen Scherfläche wirkt als rückhaltende Kraft, R , und ist direkt proportional zur Normalkraft (Abbildung 7).

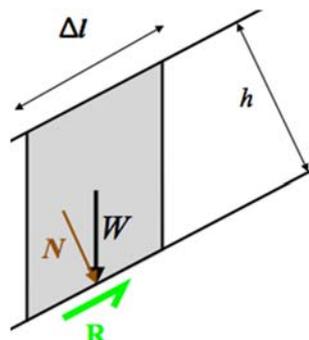


Abbildung 7 Darstellung der Reaktionskraft (R) berechnet als Funktion der Normalkraft (N).

Die Scherkraft wird berechnet als Scherspannung, τ , mal die Scherfläche, A , wobei die Scherspannung nach der sogenannten „Mohr-Coulomb“ Gleichung berechnet wird.

$$\tau_f = c' + (\sigma - u) \tan \Phi' = c' + \sigma' \tan \Phi'$$

Wobei c' die effektive Kohäsion des Bodens ist, Φ' ist der effektive Scherwinkel des Bodens, σ ist die Normalspannung, σ' ist die effektive Normalspannung und u ist der Porenwasserdruck. Der Porenwasserdruck ist isotrop und linear proportional zu der Tiefe des gesättigten Teils des Bodenprofils (z_2)

$$u = z_2 \rho_w g \quad [\text{Pa}]$$

wobei ρ_w die Dichte des Wassers und g die Erdbeschleunigung ist.

Wenn nur ein Teil des Bodenprofils gesättigt ist (in Abbildung 8 dargestellt), können die Normalspannung (σ) und die treibenden Kräfte (E) mit folgender Formel berechnet werden:

$$\sigma = (\rho z_1 + \rho_{\text{sat}} z_2) \cos^2(\alpha) g \quad [\text{Pa}]$$

$$E = (\rho z_1 + \rho_{\text{sat}} z_2) \cos(\alpha) (\Delta l \text{ Breite}) g \sin(\alpha) \quad [\text{N}]$$

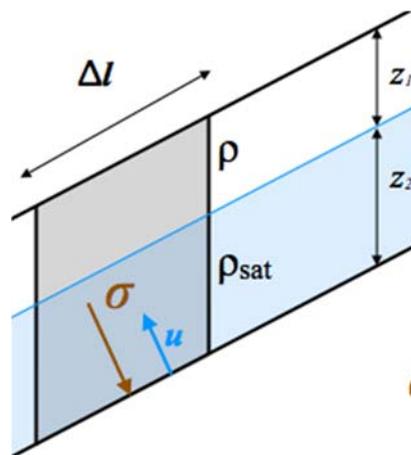


Abbildung 8 Darstellung des Porenwasserdrucks (u) als gegenwirkende Kraft zu Normalspannung (σ).

Folgendes Beispiel zeigt die Berechnung des Sicherheitsfaktors eines kleinen „geneigte Ebene“-Experimentes:



Masse = 545 [g]
Gewicht = 5,35 [N]
Fläche = 0.022575 [m²]

Neigung= 30°

Kohaesion= 0 [Pa]

Reibungswinkel<- 30°

$E <- \text{Gewicht} * \sin(\alpha_{\text{rad}})$
E = 2.675 [N]

$\sigma <- \frac{\text{Gewicht} * \cos(\alpha_{\text{rad}})}{\text{Fläche}}$
 $\sigma = 205.2375 \text{ [Pa]}$

$\text{Tau} <- \text{Kohaesion} + (\sigma * \tan(\text{Reibungswinkel}))$

R <- Tau*Fläche
R = 2.675 [N]

SF <- R/E
SF = 1

Bodenmechanische Parameter

Im nächsten Abschnitt werden die bodenmechanischen Parameter besser erläutert und diskutiert. Um die Scherfestigkeit eines Bodens zu berechnen ist die Eingabe von den zwei bodenmechanischen Parametern Scherwinkel und Kohäsion nötig.

Der effektive Scherwinkel (Φ') oder Winkel der inneren Reibung ist der Winkel, unter dem ein Körper oder ein körniges Material belastet werden kann, ohne abzurutschen oder zu versagen.

Bei kohäsionslosem Material ist es möglich die Bedeutung dieser Parameter als den Winkel der Schüttungen oder Schuttkegel zu visualisieren (Abbildung 9). Der Scherwinkel hängt von der Korngrösse, der Kornform und der Lagerungsdichte des Bodens ab. Je grösser die einzelnen Körner sind und je dichter sie gelagert sind, desto grösser ist auch der Scherwinkel. Je ungleichförmiger die Korngrössenverteilung ist, desto dichter können die Körner gelagert werden, da die Poren mit feinerem Material gefüllt werden können. Das heisst also, dass eine ungleichförmige Korngrössenverteilung einen grösseren Scherwinkel hat als eine gleichförmige (Lang et al. 2003). Es ist also zu erwarten, dass ein gut gestreuter sandiger Boden einen hohen Scherwinkel (ca. 40°) hat, ein reiner Tonboden hingegen einen tiefen (ca. 22°).

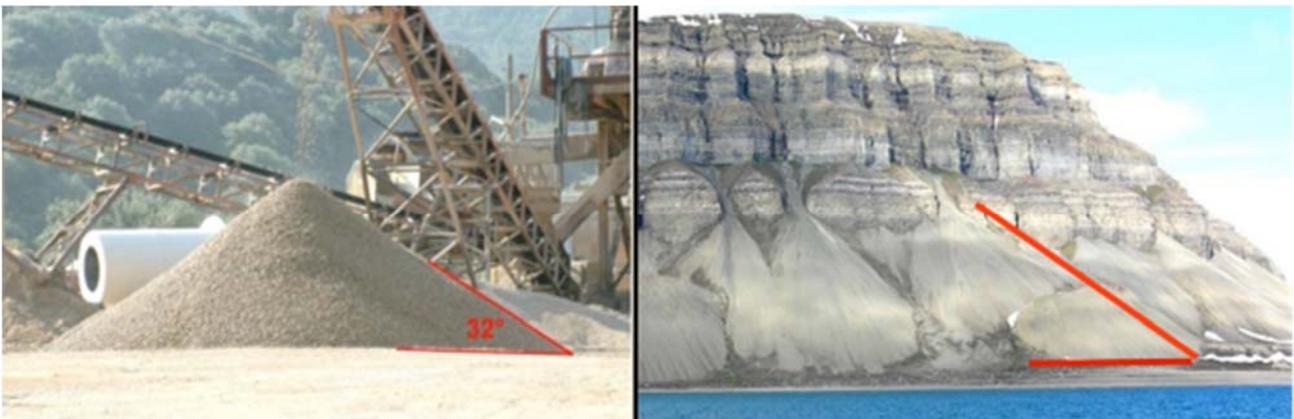
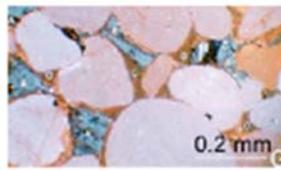


Abbildung 9 Visualisierung der Scherwinkel bei kohäsionslosem Material als Schuttwinkel (Links) und als Neigung eine Schuttkegel (Rechts).

Unter Kohäsion (oder Haftfestigkeit) versteht man in der Bodenmechanik die zusammenhaltenden Kräfte in bindigen Böden. Sie ist nur bei Böden merklich, welche sehr kleine Körner enthalten.

Ein Teil dieser Kohäsion ist variabel und wird als „scheinbare“ Kohäsion bezeichnet. Die Kohäsion ist durch mehrere Faktoren beeinflusst wie Chemie der Tonminerale im Boden, chemische Zusammensetzung der Wasserlösung, Produkte der biologischen Aktivität (Exsudate aus Wurzeln, Pilzen oder Bakterien), Wurzeln, Wurzelhaare, Pilzmyzel, usw. (Abbildung 10). Alle diese Faktoren werden vom Wassergehalt im Boden beeinflusst. Dazu wirkt in ungesättigten Bedingungen noch die Kapillarkraft, welche durch die Wasserbrücken zwischen den einzelnen Bodenkörnern entsteht. Je nach Textur des Bodens (Verteilung der Korngrösse), kann die Bedeutung von dieser Kapillarkraft sehr unterschiedlich sein. Abbildung 11 zeigt konzeptionell, wie die scheinbare Kohäsion je nach Wassergehalt und Bodentyp ändert. Bekannt ist das Beispiel von einer Sandburg: Mit trockenem Sand ist es nicht möglich eine Sandburg zu bauen; es braucht etwas Wasser um die „scheinbare“ Kohäsion des Bodens zu erhöhen und damit bauen zu können; bei der Sättigung des Bodens gehen die Kapillarkräfte verloren und die Sandburg zerfällt.

Zement



Wurzeln



„Extracellular Polymeric Substances“

Pilzmyzel / Wurzelhaare

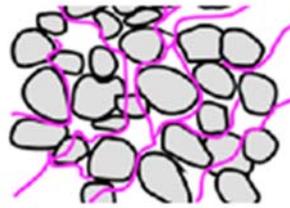


Abbildung 10 Darstellung einiger Komponenten der Kohäsion im Boden: Zement, Wurzeln, Exsudate, Pilzmyzel/Wurzelhaare.

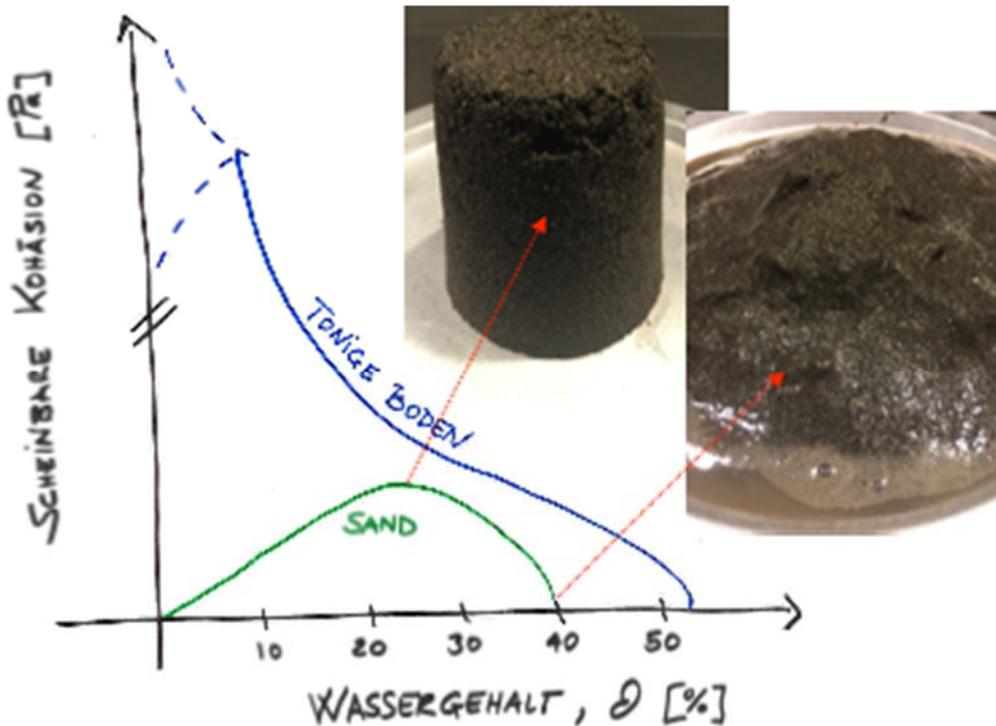


Abbildung 11 Konzeptionelle Darstellung des Zusammenhangs zwischen Wassergehalt und scheinbarer Kohäsion für sandige und tonige Böden. Die Bilder zeigen den Effekt von den Kapillarkräften in sandigen Böden. Modifiziert nach Lu et al. (2010).

Die Bestimmung/Schätzung der bodenmechanischen Parameter ist schwierig. Weil die mechanischen Eigenschaften des Bodens von Parametern wie Lagerungsdichte und Wassergehalt abhängig sind, ist es auch für Labor- und Feldversuche schwierig Messungen in einem repräsentativen Zustand zu machen.

Verschiedene Methoden wurden entwickelt um eine möglichst genaue Schätzung der bodenmechanischen Parameter zu machen. Der Aufwand (Zeit und finanziell) dieser Methoden können sehr unterschiedlich sein und müssen zum Nutzen des Projekts verhältnismässig sein. Diese Methoden können in vier Hauptgruppen geteilt werden:

- Feldmethode: Mit dieser Methode wird der Boden aufgrund seiner Plastizität qualitativ getestet und klassiert. Aufgrund der Klassifikation werden die Werte der bodenmechanischen Parameter von Tabellen abgeleitet.
- Korngrösseverteilungsanalyse: Diese Analyse erlaubt eine genaue Klassifikation des Bodenmaterials (Körner bis 60 mm Durchmesser). Damit können die bodenmechanischen Parameter in Tabellen abgelesen werden. Bei der VSS Norm wird zum Beispiel auch eine Schätzung der Standardabweichung gegeben als Hinweis zur Variabilität der geschätzten Werte. Für eine Korngrössenverteilungsanalyse muss bis zum Vorliegen des Resultates mit einer Woche und circa CHF 800.- pro Bodenprobe gerechnet werden.
- Scherversuche (Labor oder Feld): Diese Methode erlaubt die direkte Messung der Scherfestigkeit bei unterschiedlichen Bodenzuständen. Dabei werden die Bodenproben in einem Scherkasten mit bekannter Grundfläche gefüllt und abgeschert. Der Schaukasten wird mindestens mit drei verschiedenen Normalspannungen beschwert (das heisst es müssen mindestens drei Versuche gemacht werden). Die Bestimmung der Scherparameter mit dieser Methode kostet circa CHF 2500.- (drei Scherversuche).
- Triaxialversuche: Diese aufwändigen Versuche erlauben eine vielfältige Einstellung von Rahmenbedingungen sowie die Messung von Spannungen, Dehnungen und Durchlässigkeit. Die Art von Tests, welche durchgeführt werden können, werden in Folgende unterteilt: drainiert oder undrainiert; konsolidiert oder unkonsolidiert. Die Bestimmung der Scherparameter mit dieser Methode kostet circa CHF 5000.- (drei Versuche).

Faktoren der Instabilität

Die Faktoren des Stabilitätszustandes eines Hanges werden in drei Charaktere zeitlicher Variabilität eingeteilt. Die langfristig praktisch unbeeinflussbaren Faktoren der Grunddisposition, die mittel- oder kurzfristig sich ändernden variablen Faktoren (variable Disposition) und die kurzzeitig auftretenden, auslösenden Faktoren. Die Einteilung ist nicht immer scharf abzugrenzen. Trifft die Summe der destabilisierenden Einflüsse von Grunddisposition, variabler Disposition und auslösenden Faktoren die Belastungsgrenze, kommt es zum Ereignis.

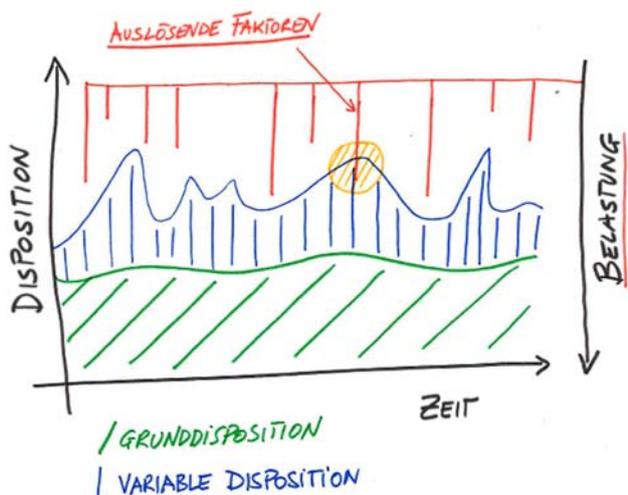


Abbildung 12 Aufteilung der Belastungsgrenze eines Hanges in Grunddisposition, variable Disposition und auslösende Faktoren (Schwarz M.).

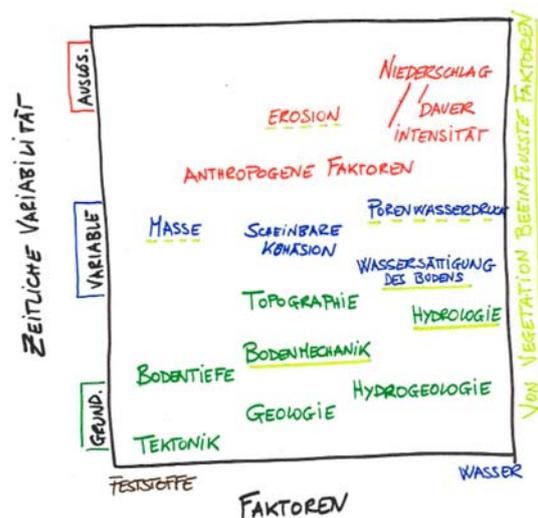


Abbildung 13 Aufteilung der zeitlich variabel auftretenden Faktoren in Feststoff und Wasser, sowie die Abhängigkeit von Vegetation (Schwarz M.).

Grunddisposition (GD): Geologie (Schichten, Mineralien, Tektonische Bewegung, Hydrogeologie...), Boden (Tiefe, mechanische Eigenschaften, hydrologische Eigenschaften), Neigung, Geländeform, Klima

Variable Disposition (VD): Vegetation, Geometrie Gelände, Masse, Sättigung des Bodens, etc.

Auslösung (AL): Wasser (unterschiedliche Mechanismen: Gewicht, Verlust Saugspannung, Quelle, Zwischenabfluss), Erdbeben, Mensch (Leitungen, Strassen, Landnutzung,...)

Im Anschluss an Untersuchungen der zahlreichen Rutschungsereignisse des Jahres 2005 schlagen Gruner und Wyss (2009) eine Auswahl hydrogeologischer und boden- und felsmechanischer Faktoren vor (Tabelle 1), die zur Erreichung der Grenzbelastung der untersuchten Einzelhänge speziell häufig beigetragen haben. Insbesondere soll nicht bei der Ereignisanalyse stehen geblieben werden, sondern eine Ursachenanalyse folgen.

Tabelle 1 Auswahl an hydrogeologisch sowie boden- und felsmechanisch speziell zu beachtende Faktoren nach Gruner und Wyss (2009) mit Hinweis ihres Charakters.

Hydrogeologische Faktoren

- Wasserzutritt aus unterliegendem Festgestein (GD (VD))
- Wasserzutritt durch Infiltration ins Lockergestein (allgem. Oberflächenwasser) (VD)
- Wasserzutritt durch Infiltration aus Oberflächengewässer (GD (VD))
- Anthropogen (vom Menschen) verursachter Wasserzutritt (AL)
- Wasserzutritt aus bestehenden Entwässerungsbauten (AL)

Boden- und Felsmechanische Faktoren

- Art und Lage der Gleitebene (VD)
- Hangneigung / Neigung Anrissbereich (VD (GD))
- Beschleunigung / Aktivierung alter Rutschungen (GD (VD))
- Hangfusserosion (AL)

Wasser als Auslöschungsfaktor

Das Wasser ist häufig der wichtigste Auslöschungsfaktor für Rutschungen. Man kann drei wichtige Mechanismen durch welche Wasser die Stabilität eines Hanges beeinflussen unterscheiden:

1. Zunahme des Bodengewichts
2. Abnahme von scheinbarer Kohäsion
3. Zunahme des Porenwasserdrucks

Diese drei Mechanismen sind in Abbildung 14 Konzeptuelle Darstellung des Zusammenhanges zwischen Zeit nach Beginn eines Niederschlagsereignisses und Änderung des Bodengewichtes (Links), der scheinbare Kohäsion (Mitte) und des Porenwasserdruckes (Rechst) in der Tiefe der potenziellen Scherfläche. konzeptuell dargestellt als Funktion der Zeit nach Beginn eines Niederschlagsereignisses. Am Anfang des Niederschlags wird das Wasser infiltrieren und vor allem in Mesoporen gespeichert (in die Mikroporen der Tonfraktionen zu fließen braucht viel Zeit - Stunden bis Tage). Mit zunehmendem Wassergehalt nimmt das gesamte Gewicht des Bodens zu bis zur vollen Sättigung der Poren. Mit zunehmendem Wassergehalt nimmt die scheinbare Kohäsion des Bodens ab bis zu einem residualen Wert, welcher bei der Bodensättigung erreicht wird. Je nachdem, kann sich an der Scherfläche einer Rutschung Wasser stauen und zur Bildung von Porenwasserdruck führen (je intensiver und länger der Niederschlag ist, desto höher wird der Porenwasserdruck). Weiter können Hänge durch Fusserosion destabilisiert werden (bei Fluss- oder Bachufer).

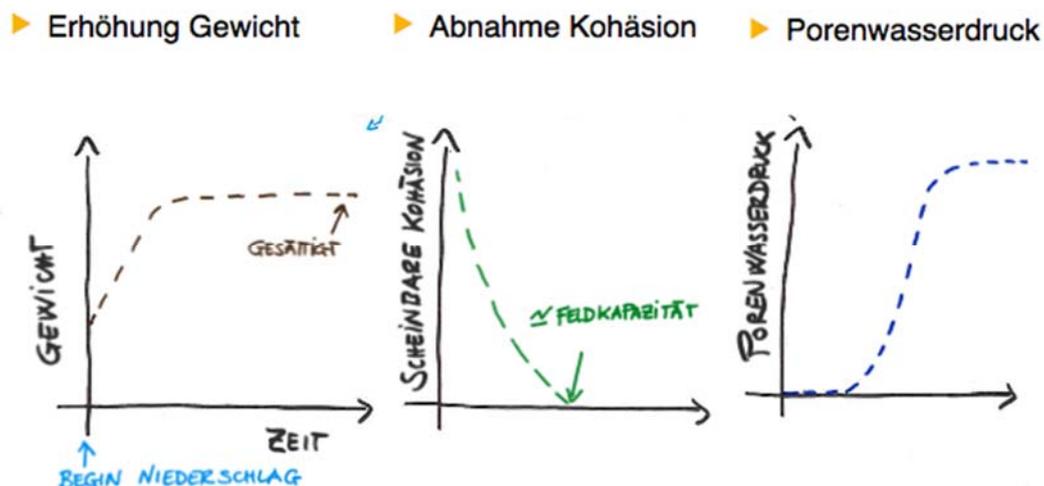


Abbildung 14 Konzeptuelle Darstellung des Zusammenhanges zwischen Zeit nach Beginn eines Niederschlagsereignisses und Änderung des Bodengewichtes (Links), der scheinbare Kohäsion (Mitte) und des Porenwasserdruckes (Rechst) in der Tiefe der potenziellen Scherfläche.

Die zeitliche und räumliche Verteilung des Wassers im Boden wird durch zahlreiche Prozesse beeinflusst. Dabei können natürliche oder anthropogene Faktoren entscheidend sein (lokale Gewitterzelle, Bruch Wasserleitung, konzentrierter Abfluss aus Forststrassen, usw.). In den meisten Fällen entstehen Rutschungen durch eine punktuelle Zunahme des Porenwassers in einem Hang. Zur Vereinfachung können wir hier zwei Prozesse nennen, welche zu diesem Zustand führen:

1. Konzentrierter Zwischenabfluss oberhalb einer undurchlässigen Schicht (Bodenhorizont oder kompaktes Muttergestein).
2. Austritt von temporellen Quellen welche durch die Exfiltration des Wassers aus durchlässigen Gesteinsschichten (typisch in Flysch, Grundmoräne, Schiefer und Molasse) entstehen.

Sensitivitätsanalyse des unendlichen Böschungsverfahrens

Folgende Graphiken zeigen die Sensitivitätsanalyse der Resultate einer Berechnung mit dem unendlichen Böschungsverfahren gegeben durch die Änderung der Eingangsparameter. Als Beispiel wurde eine gut dokumentierte Rutschung in Rüdlingen (Schwarz et al., 2012a) angenommen mit folgenden Charakteristiken:

Hangneigung = 38°

Tiefe Scherfläche = 1.1 m

Scherwinkel = 31°

Effektive Kohäsion = 3.78 kPa

Bodendichte = 1.63 t m^{-3}

Breite Rutschung = 7.5 m

Länge Rutschung = 17 m

Die Geometrie der Rutschung ist als Ellipse angenommen.

Die Resultate der Sensitivitätsanalyse zeigen, dass die Kohäsion und der Porenwasserdruck den grössten Einfluss auf die Hangstabilität haben (Abbildung 15). Eine Änderung der Kohäsion kann auch zu einem Verlust der Saugspannung auf Grund einer Zunahme des Wassergehaltes im Boden assoziiert werden. Die Hangneigung hat auch einen grossen Einfluss auf die Hangstabilität (Abbildung 16), aber dieser Parameter kann ziemlich genau bestimmt werden. Die Bodendichte hat einen kleinen Einfluss auf die Hangstabilität, und dieses Resultat zeigt, dass die Änderung des Gewichts auf Grund des Wassers oder der Vegetation einen relativ kleinen Einfluss auf die gesamte Stabilität des Hanges hat (Abbildung 16). Kleine Variationen des Reibungswinkels haben einen kleinen Einfluss auf den gesamten Sicherheitsfaktor (Abbildung 17). Schätzungen dieses Wertes im Bereich von $\pm 3^\circ$ reichen für einen guten Einsatz in Hangstabilitätsberechnungen. Die Bodentiefe hat einen nicht linearen Einfluss auf die Hangstabilität und die gesamte Sensitivität vom Resultat nimmt mit zunehmender Bodentiefe ab (Abbildung 17).

Die Resultate dieser Sensitivitätsanalyse können je nach Zusammensetzung der Parameter unterschiedlich sein, jedoch kann man allgemein sagen, **dass die effektive Kohäsion des Bodens und der Porenwasserdruck entscheidende Parameter für die Hangstabilitätsberechnung sind**. Es muss auch gesagt werden, dass die Auslösung von Rutschungen oft eine Kombination von mehreren Faktoren ist.

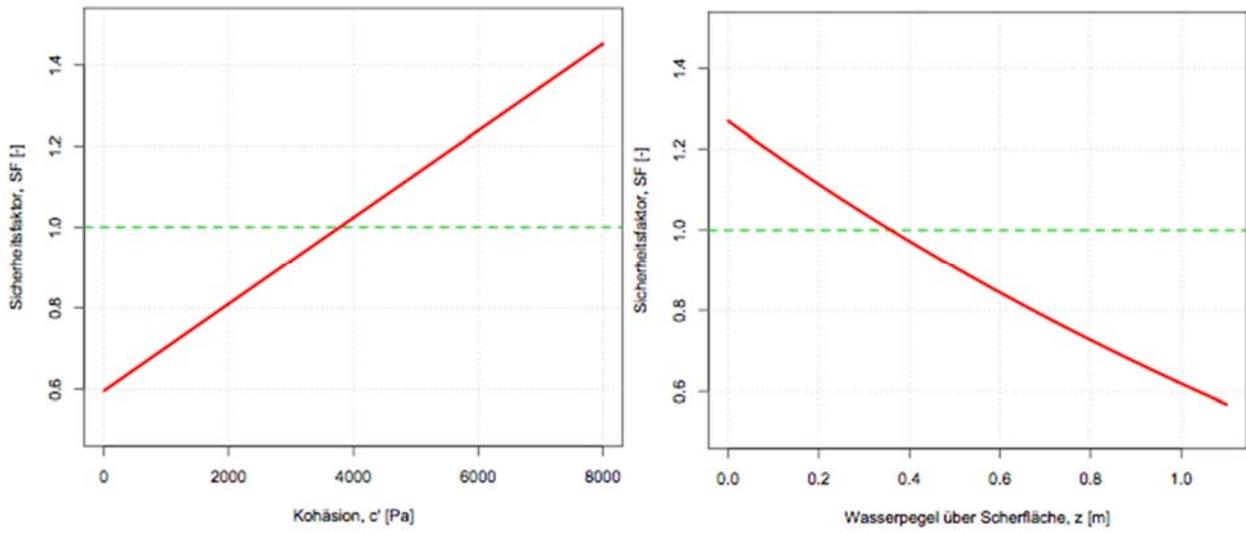


Abbildung 15 Sicherheitsfaktor als Funktion der Kohäsion (Links) und des Porenwasserdrucks (Rechts).

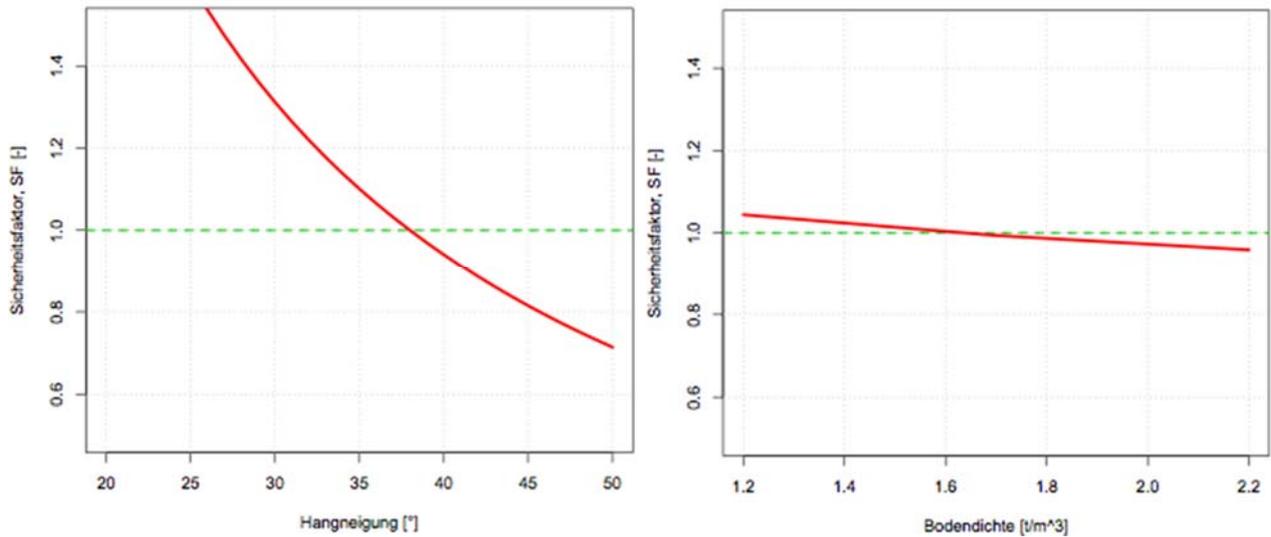


Abbildung 16 Sicherheitsfaktor als Funktion der Hangneigung (Links) und der Bodendichte (Rechts).

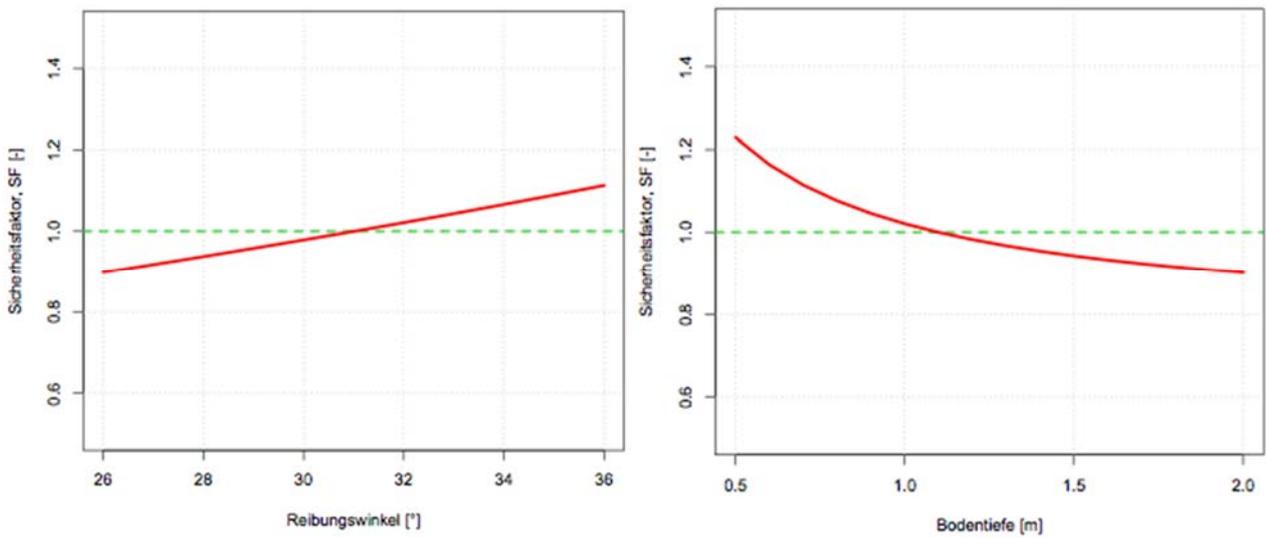


Abbildung 17 Sicherheitsfaktor als Funktion des Reibungswinkels (Links) und der Bodentiefe (Recht).

Modelle sind wichtige Instrumente um die Situation zu quantifizieren und Massnahmen nachvollziehbar und transparent zu planen. Die Resultate von Modellen müssen aber immer professionell in Zusammenhang mit den Annahmen der Modelle diskutiert werden. Beispielweise hat die unendliche Böschung den Vorteil, einfach zu sein und gibt eine gute erste Einschätzung der dominierenden Faktoren die eine Rolle spielen können in der Stabilität eines Hanges. Trotzdem nimmt dieser Ansatz sehr grosse Vereinfachungen an: Keine laterale Interaktionen, der Boden verhält sich wie ein steifer Block und homogene Bedingungen (Porenwasserdruck, Wurzelverstärkung und mechanische Parameter des Bodens sind räumlich konstant).

Insbesondere für kleine flachgründige Rutschungen können diese Annahmen zu großen Abweichungen in der Berechnung des Sicherheitsfaktors auf Grund der „Randeffekte“ und der räumlichen Heterogenität der Faktoren führen. Feldbeobachtungen (Abbildung 18) und Untersuchungen (Schwarz et al., 2012b) haben gezeigt, dass der Rutschkörper sich nicht als „Block“ verhält sondern dass Zug- und Druckkräfte bei unterschiedlichen Verschiebungen der Rutschfläche stattfinden. Alle diese Annahmen wirken ungünstig (steifer Körper) oder günstig (Randeffekte) bei der Berechnung des Sicherheitsfaktors, aber nicht immer kompensieren sich diese Effekte.

Weitere Methoden werden entwickelt um diese Probleme zu überwinden und möglichst realitätsnahe Resultate zu erzeugen. In den letzten Jahren wurden vor allem finite Elemente Methoden oder diskrete Elemente Methoden in der Forschung oder für grosse Projekte eingesetzt. Der zeitliche Aufwand und die schwierige Schätzung der Parameter limitieren die Anwendung dieser Methode in der Praxis.



Abbildung 18 Flachgründige Rutschung mit Zug- und Kompressionszonen.

Rutschungsereignis - Situation richtig erfassen - zielführend Handeln (W. Krättli)

Sofortige Intervention, ja oder nein?

- **Unmittelbares Gefahrenpotential erkennen:**
 - Abgrenzung des Rutschkörpers (mit weitem Blick über den ganzen Prozessraum!)
 - variable und auslösende Faktoren minimieren (oberflächliches Wasser abführen (temp. Graben, Plastikabdeckung), Auflasten vermeiden und abbauen)
- **Unmittelbares Schadenpotential erkennen und schützen:**
 - Sperrung/Evakuierung,
 - Objektschutz,
 - Räumung,
 - Arbeitssicherheit
- Abschätzen der **Relevanz der Rutschung** für die Umwelt (alle Interessen in Waagschale (Schadpotential Infrastruktur, Schadpotential Landwirtschaft, Schadpotential Forstwirtschaft, ökologische Chancen, langfristige Folgen, nachgelagerte Schäden))

Mittel- und langfristiger Handlungsbedarf

Bodenschichtung, Anrisszone, Transitzone, Ablagerungszone, Rutschhorizont, Wasserverlauf (Hydrologie und Hydrogeologie)), Einbettung des Ereignisses in der weiteren Landschaft, Abschätzen des Niveaus der Beeinflussbarkeit (siehe technische und biologische Lösungsmöglichkeiten) und weitere Fragen stellen sich.

Um den mittel- und langfristigen Handlungsbedarf bei Rutschungsereignissen festzulegen, ist die möglichst realitätsnahe Abbildung des Ereignisses sehr wichtig (Ereignisanalyse). Durch die vielen, nicht offensichtlichen Gegebenheiten ist dies eine schwierige Herausforderung. Auch nach sehr aufwändigen Abklärungen bleibt das Resultat immer ein „ungenaueres“ Modell. Und jedes Ereignis bleibt ein Spezialfall. Das exakte Festhalten der sicht- und messbaren Ereignisspuren (stumme Zeugen) hilft zur realitätsnahen Darstellung.

Modellvorstellung des Ereignisses

- Storme Ereignisdokumentation (Beispiel siehe Anhang)
- Geländeaufnahmen (Situation, Profile, Gegenhangfotografie, GPS-Messungen, Laserscanning)
- Bodenansprache (Bodentyp, -schichtung, -prozesse, Färbungen, Vegetation, Erosion)
- Wasserhaushalt (vergangene Niederschlagswerte, Wasseraustritte, wasserführende Schichten, einwirkende Gerinne, überprüfen bestehender Anlagen)
- allenfalls geologische Gutachten mit detaillierteren Methoden (Sondierungen, Bohrungen, Inklinometermessungen, Geodäsie, Schlitzte, hydrogeologische Untersuchungen (u.a. Tracer- und Pumpversuche und numerische Modelle)
- Beachtung aller genannten Punkte über den direktbetroffenen Ereignisperimeter hinaus (Bezug zur Landschaft)

Resultat: Protokoll und Skizzen des Ereignisses mit allen festgestellten Zeichen
Situation
Profile (Oberflächenabbildung und Untergrundabschätzung (Baugrundmodell)!)
Rückschluss auf den auslösenden Faktor und allenfalls die variable Disposition

Die Modellvorstellung zeigt, in welcher Grössenordnung die vorliegenden Prozesse ablaufen. Gefährdete Objekte sind danach erkannt. Mit den zusammengetragenen Informationen ist der weitere Umgang mit dem Ereignis festzulegen. Dazu muss, ungeachtet der Grössenordnung, definiert und überprüft werden, ob und welche Massnahmen verhältnismässig sind. Die technischen und biologischen Möglichkeiten sind in den folgenden Kapiteln als Konzepte beschrieben. Sie gelangen erfahrungsgemäss auch in Kombination zur Anwendung. Die Abklärung, ob weitere Massnahmen nach einer Rutschung nötig und sinnvoll sind, wirft zwei zentrale Fragen auf:

- Wie stark verbessern sich die Lebensraumbedingungen und menschlichen Nutzungsansprüche durch die Massnahmen (**Wirkung des Projektes**)?
- Wie ist das Verhältnis der erzielten Verbesserung zu den Kosten, welche die Massnahmen verursachen (**Wirtschaftlichkeit des Projektes**)?

Um die Wirkung und Effizienz von möglichen Vorgehensweisen zu prüfen, existieren Variantenanalysen. Je nach Grösse und Bedeutung der Rutschung bieten sich unterschiedliche Hilfen zur strukturierten Variantenanalyse an:

Definition und Überprüfung der verhältnismässigen Beeinflussbarkeit mittels einer Variantenanalyse

Nach Kenntnis der Modellvorstellung des Prozesses sind die denkbaren Massnahmen und Massnahmenkombinationen zu definieren: Welche Konzepte (technisch und biologisch) kommen in Frage? Welche, sich ergänzenden Kombinationen kommen in Frage? Was darf es kosten (Lebensdauerkosten)? Gibt es zwingende Ausschlussgründe einzelner Lösungen?

Je nach Umfang der Rutschung (vorwiegend Schadpotential, Kosten (Investitionskosten, Unterhaltskosten, Kosten potentieller Einbussen); aber auch Flächengrösse, Komplexität, etc.) sind unterschiedliche Vorgehensweisen zur Bestimmung und dem Vergleich von Massnahmen (Variantenanalyse) anzuwenden.

1. Sehr kleine Instabilitäten, unbedeutende Gefährdung (bspw. unruhige Strassenböschungen, Weideland)

Durch die meist kleinen Risiken sprechen andere Gründe für eine Sanierung, respektive Stabilisierung, insbesondere die Gebrauchstauglichkeit. Die Bewältigung, sofern für sinnvoll und finanzierbar erachtet, ist in der Regel mit vorhandenen oder einfach zu beschaffenden Mitteln und den eigenen Kenntnissen zu bewältigen (pragmatisch).

2. Qualitative und Quantitative Bewertung (bspw. Nutzwertanalyse) von Massnahmen mittleren Umfanges

In den Kantonen bestehen teilweise vorgegebene Instrumente zum Variantenvergleich. In Vorlagen zu Projektanträgen oder Vorstudien sind vorgegebene Variantenvergleiche anzustellen.

Bei fehlenden Vorlagen und Vorgaben können umfassende Nutzwertanalysen oder rein qualitative Nutzwertanalysen in Kombination mit Investitionsrechnungen zum Vergleich dienen. Kriterien und deren Gewichtung muss man nach Objekt selbst definieren. Dabei sollen die ermittelten Fakten der Ereignis- und Ursachenanalyse leiten (Erfüllung technischer Anforderungen). In Tabelle 2 und Tabelle 3 ein Beispiel, wie unterschiedliche Massnahmenvarianten sehr einfach vergleichbar sind.

Tabelle 2 Einfache Gegenüberstellung

Stützsystem	Bauablauf	Unterhalt	Fundamentstabilität	Umwelt	Investitionskosten	Lebensdauer	Jährl. Unterhaltskosten	Kosten pro Jahr ¹
Blockmauer (250 t)	Blockgrösse beschränkt, Zwischentransporte	Klein	Mittel	Trsp. --- Eingriff --- Baustoff +	45'450 Fr.	40	500 Fr.	1640 Fr.
Rühlwand (95 m²)	Wenig problematisch	Klein	Hoch	Trsp. +++ Eingriff +++ Baustoff --	76'000 Fr.	50	500 Fr.	2020 Fr.
Holzkasten (210 m³)	Viel Zwischentrsp. / Erdbewegungen	Klein	Mittel	Trsp. -- Eingriff - Baustoff +++	105'000 Fr.	30	500 Fr.	4000 Fr.
Stahl-/Holzlehne (55 m)	Abschnittsweise, hoher Organisationsaufwand	Rel. hoch	Mittel	Trsp. + Eingriff - Baustoff +	63'600 Fr.	30	1300 Fr.	3420 Fr.
Betonlehne (55 m)	Abschnittsweise, sehr hoher Organisationsaufwand	klein	Mittel	Trsp. --- Eingriff --- Baustoff ---	57'300 Fr.	40	500 Fr.	1930 Fr.

¹ unverzinst

Tabelle 3 Zusammenfassende Nennung von Vorteilen und Nachteilen der gemachten Gegenüberstellung aus Tabelle 2

Stützsystem	Vorteile	Nachteile
Blockmauer	günstig	grosser Eingriff, Realisierung aufgrund der hohen Lasten und engen Verhältnisse sehr schwierig, viele Transporte, Preisunsicherheit
Rühlwand	kleine Transport- und Materialbewegungen, sichere Fundation, langlebig	Stahl als Fremdkörper in der Natur, ästhetisch umstritten
Holzkasten	unproblematischer und naher Baustoff, reagiert flexibel auf kleine Setzungen	grosser Eingriff, grosse Materialbewegungen, kurze Lebensdauer, da nicht eingedeckt werden kann, teuer
Stahl-/Holzlehne	teils unproblematischer Baustoff, relativ kleine Fundation	komplexe Transportorganisation, hoher Unterhaltsaufwand, teuer, Preisunsicherheit
Betonlehne	langlebig, günstig	grosser Eingriff, Realisierung aufgrund der engen Verhältnisse sehr schwierig, viele Transporte und Zwischentransporte, Preisunsicherheit

3. Bei grösseren Rutschungen Econome für Wirkungs- (Risikosenkung) und Wirtschaftlichkeitsprüfung

Ab einer von den Kantonen zu bestimmenden Projektsumme existiert ein auf risikobasierten Überlegungen arbeitendes online-Instrument ‚Econome‘ zur Wirkungs- und Wirtschaftlichkeitsprüfung. In jedem Kanton existiert ein amtlicher Projektleiter, der den Zugang und die Analysen verwaltet. Die Prüfung folgt den nachgenannten Schritten:

- Systembeschreibung
- Gefahrenanalyse und Szenariendefinition
- Schadenpotential im Perimeter
- Konsequenzanalyse (Eingabe der gefährdeten Objekte)
- Individuelles Risiko
- Definition Massnahme (n)
- Konsequenzanalyse nach Massnahme
- Individuelles Risiko nach Massnahme
- Übersicht Risiken und Kosten
- Projektabschluss

Im Anhang befindet sich ein Beispielauszug eines Econome bewerteten Massnahmenvorschlages für eine Steinschlagverbauung. Für den Rutschungsverbau ist Econome schwierig anzuwenden, da der Prozess durch unterschiedliche Aktivitäten geprägt ist.

Durchführung der Massnahmen

Nach dem Treffen des Entscheides folgt die detaillierte Massnahmenplanung und –ausführung mit anschliessendem Erstellen eines **Ausführungsplanes** zur Ermöglichung von anfallendem Unterhalt/Pflege der getätigten Massnahmen. Dazu gehört auch das Festhalten der **Verantwortlichkeit für den Unterhalt** und Hinweise zu konkreten Tätigkeiten und deren Turnus.

Technische Lösungsmöglichkeiten (W. Krättli)

Die Lösungsmöglichkeiten instabile Hänge zu stabilisieren kann man nach ihrer Wirkungsweise konzeptionell ordnen. In Anlehnung an Lateltin et. al. (1997) sind folgende Massnahmen zu unterscheiden:

- | | | |
|--|---|-----------------------------------|
| – Absenkung des Hangwasserspiegels durch Entwässerungsgräben und Drainagen; | } | Entwässerung |
| – Fassung von Wasseraustritten; | | |
| – Verhinderung der Infiltration von Bächen in die Rutschmasse durch Ableitung; | } | Abflachen |
| – eventuell Materialabtrag im treibenden Teil bzw. Aufschüttung im bremsenden Teil (Rutschfuss); | | |
| – Einbringen von Scherwiderständen auf der Gleitfläche durch Vernagelung, | } | Stützen |
| – Stützkonstruktionen; | | |
| – Anker oder Pfähle; | } | Rückhalten
(Bodenverbesserung) |
| – Rückhaltekonstruktionen; | | |
| – Verbesserung der bodenmechanischen Eigenschaften durch Injektionen und Stabilisationen; | } | Oberflächenschutz |
| – verschiedene ingenieurbioologische Massnahmen. | | |

Bei allen Konzepten sind „kleine“, einfache Lösungen, die sinnbildlich ‚mit der Schaufel‘ zu bewerkstelligen sind, bis zu technisch anspruchsvollsten Varianten möglich. Die hier betrachteten, technischen Lösungen umfassen die in der Forstwirtschaft zur Anwendung gelangenden Techniken.

Fassung und Ableitung von Grund- und Oberflächenwasser

Die langfristige Fassung und Ableitung von Oberflächen- und teilweise Grundwasser ist Teil jeder Stabilisationsbemühung. Ein Absenken des Wassergehaltes innerhalb von Erdmaterialien bewirkt:

- Zunahme der scheinbaren Kohäsion (Zunahme der Saugspannung)
- Abnahme des Porenwasserdrucks (Abnahme des Gewichtes des Rutschkörpers)
- Erhöhung der Wasser- und Frostbeständigkeit

Dies sind Gründe für eine Stabilisierung. Nicht jedes Material ist gleich gut zu entwässern. Die Durchlässigkeit ist unterschiedlich. Lagerungsdichte, Korngrössenzusammensetzung und Sättigungsgrad sind dafür entscheidend. Durch die unterschiedlichsten Schichtungen innerhalb eines Bodentyps wechselt die Durchlässigkeit relativ schnell. In Rutschgebieten liegen häufig schlecht durchlässige Böden vor. Effektiv ist daher mit forstlichen Techniken häufig nur die Erfassung und Ableitung offensichtlichen Wasserflusses mit Ergänzung einer systematisch verteilten, oberflächlichen Sammeleinrichtung. Sie verhindert vorwiegend die Infiltration von Gerinnen, Quellwasser, Schmelz- und Regenwasser und trägt so ihren Teil zu günstigeren Bodenwasserverhältnissen bei (Böll 1997).

Nach Erfassung der ersichtlichen Fliessverhältnisse ist die Entwässerung als Teil der gesamten Rutschungssanierung zu planen. Dabei können situativ unterschiedlichste Entwässerungstechniken eingesetzt werden.

- Oberirdische Ableitung kann in einfachen Gräben, in abgedichteten, offenen Gräben (beide max. 34% Gefälle), in Känneln unterschiedlichster Art, oder verrohrt erfolgen.
- Zu den eingegrabenen gehören Sickerleitungen, Sickerpackungen, Faschinen, eingegrabene Nadelbäume, Prügellagen, Sickerunterlagen, etc.

Offene Systeme sind gut kontrollier- und reparierbar und lassen eine oberflächliche Einleitung von Starkregen und Schneeschmelze, welche den Bemessungsabfluss bilden, einfach zu (Zeller J., Trümpler J., 1984). Zudem sind sie unabhängig der Frosttiefe (Patt H, Gonsowski P. 2010).

Zur Bemessung von Entwässerungseinrichtungen:

Zeller und Trümpler (1984) und Böll (1997) verwenden die für Kleinstzugsgebiete vorsichtig verwendbare Fliesszeitformel. Die Bestimmung von Hochwasserabflussmessungen in Kleinstzugsgebieten ist mit grossen Unsicherheiten behaftet. Die Berechnungen sollten mit mehreren Methoden und mittels Analysen vergangener Ereignisse z.B. anhand von Chroniken, Katastern, Hochwasserspuren und Befragungen Ortskundiger überprüft werden (Ammann M., 2014). Entwässerungsanlagen sollen ein 30 jährliches Ereignis (HQ₃₀) bewältigen.

Wasser spendend: Sicker- und Grundwasser, Schneeschmelze, Regen (wovon Starkregen einzig entscheidend ist (Zeller J., Trümpler J., 1984)).

Bemessung nach dem Fließzeitverfahren $HQ_{30} = 0.278 \times E \times \psi \times i(t_{R,30})$

Wobei: HQ_x : Abfluss der Wiederkehrperiode [m³/s]
 E : Einzugsgebietsgrösse [km²]
 ψ : Abflussbeiwert [-]
 $i(t_{R,30})$: Niederschlagsintensität der Wiederkehrperiode 30 und der Ereignisdauer T_R in mm/h

Höhenlage	Charakter	ψ flach bis steil	$i(t_{R,x})$ bspw. aus dem hydrologischen Atlas der Schweiz herzuleiten.
oberhalb Waldgrenze	undurchlässige Weidenböden, Fels Schutthalde (Zeller)	0,4 bis 0,8 0,05 bis 0,4	
Waldgrenzgebiet	Alpweiden mit Sträuchern, einzelne Bäume lichter Wald ohne Schluss	0,3 bis 0,7 0,2 bis 0,6	
tieferer Lagen	junger Wald, Wies- und Ackerland vernässte Gebiete, Sumpf (Zeller)	0,1 bis 0,5 0,3 bis 0,6	

Tab. 5-2: Abflusskoeffizient ψ nach Müller resp. Zeller.

Abbildung 19 Abflusskoeffizient aus Spreafico et al. 2003

Beim Ableiten dürfen mit dem gesammelten Wasser in anderen Hangbereichen vorhandene Instabilitäten nicht gefördert werden. Die Einleitung in einen Vorfluter muss eventuell in vergrabenen oder offenen Transportleitungen (Rohre) über weitere Distanzen als sichere Lösung in Kauf genommen werden.



Abbildung 20 Wasseraustritte an der Rutschung Untere Schafera, Plaffeien, nach ersten Entwässerungsmassnahmen (Bild WALDA FR)

Entwässerungsgräben

Mit Eintiefungen im Gelände wird oberflächlich fließendes, und bei möglicher horizontaler Sickerfähigkeit, umliegend stehendes Bodenwasser gesammelt und abgeleitet (Abbildung 21). Dem Stehenbleiben von Wasser und diffusem Versickern kann so entgegnet werden. Die Funktionstüchtigkeit ist durch die offene Wasserführung stets unter Kontrolle. Die Grabenböschungen dürfen nicht zu steil ausgebildet werden. Zeller und Trümpler liefern dazu Nomogramme, aus denen man nach Bodentyp die Neigungen ermitteln kann. Ihre Erfahrung zeigt, dass eine Neigung von rund 40° (84%) nicht überschritten werden sollte.

Das Grabengefälle und die Sohlenbeschaffenheit müssen zueinander passen (max. 34% (Böll, 1997), da ansonsten zu starke Erosion einsetzt. In steileren oder erosionsgefährdeten Abschnitten sowie zur Verhinderung der Infiltration gelangen diverse Kännelvarianten zur Anwendung. Deren Unterhalt ist äusserst wichtig, da bei Schadstellen grosser Wasseraustritt und Schaden möglich ist. Ansätze der Bemessung sind einleitend genannt. Ausführliche Überlegungen dazu haben Zeller und Trümpler (1984) im Werk „Rutschungsentwässerungen“ festgehalten, das online einsehbar ist.

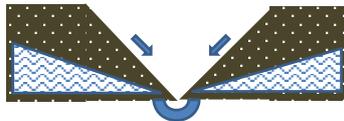


Abbildung 21 Sammeln und Abführen von Oberflächen- und Bodenwasser in einem offenen Graben.



Abbildung 22 Offener V-Profil Graben zur Entwässerung des Geländes.



Abbildung 23 Polymerbeton-Sohlschalen (Wildbachschalen) zur verlustfreien Wasserableitung (bap Ing.).



Abbildung 24 Rundholz-Rechteckkännel 40/25 nach Zeller/Trümpler 1984 (Lieberherr M.)



Abbildung 25 Graben mit Holz-V-Kännel 20/4 nach Zeller/Trümpler 1984 (Lieberherr M.)

Drainagen

Drainagen sind Entwässerungssysteme für Grund- und Niederschlagswasser unter der Geländeoberfläche. Durch die Schaffung von unterschiedlichen Systemen höherer Durchlässigkeit, angrenzend am vorhandenen Bodenmaterial wird vorhandenes Boden- oder Oberflächenwasser gesammelt und abgeleitet (Abbildung 26). Sickerleitungen, Sickerpackungen, Faschinen, Raubäume und Drainageanker werden im Forst häufig angewendet. Ihre Wirkungstiefe ist relativ beschränkt und die Drainageleistung in meist schlecht durchlässigen Rutschungsböden eher klein (Böll, 1997). Zur ganzjährigen Funktionstüchtigkeit muss die Wasserableitung unter der Frosttiefe liegen. Drainagepfähle und –wände oder gar Entlastungstunnels sind weitere, komplexer zu erstellende Drainagesysteme des Spezialtiefbaus und werden forstlich nicht angewendet. Sie gelangen bei tiefgründigen Rutschungen mit hohem Schadpotential zur Anwendung und sind äusserst kostspielig (bspw. Glissement de la Frasse VD).

Drainagesysteme sind durch fehlenden Einblick häufig nur durch die abgeleitete Wassermenge zu kontrollieren. Die sorgfältige Sammlung und Ableitung mit Kontrollmöglichkeiten nach dem eigentlichen Sickerprozess ist zur späteren Kontrolle wichtig. Denn die Verlagerungen feinsten Bodenteilchen in Fliessrichtung führen zu einer Verringerung des Porenvolumens und der Abnahme der Durchlässigkeit (Kolmation) im Sickermaterial. Zur Verhinderung dieser Verlagerungen, werden häufig Geotextilien mit der Funktion Trennen/Filtern zwischen Bodenmaterial und Sickermaterial gelegt. Die mittel- und langfristige Funktionsfähigkeit solcher Geotextilien ist durch die Anlagerung und Abdichtung durch Feinmaterial umstritten. Die Kombination von Bodenmaterial und Geotextil muss passen. Diesbezüglich bewährt sich das Vertrauen auf lokale Erfahrung, was nicht davor abhalten soll, Neues auszuprobieren. Drainagen sind nicht in Abwasserleitungen einzuleiten!

Drainage in Rohren ist relativ heikel gegenüber Verschiebungen und eignet sich für die direkte Entwässerung in Rutschgebieten nicht. Kann dennoch nicht auf Rohre verzichtet werden, ist die Verwendung von PE Rohren mit fester Verbindung durch Heizwendel-Schweissmuffen am zuverlässigsten.

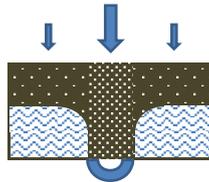


Abbildung 26 Drainagewirkung durch das Einbringen von Materialien höherer Durchlässigkeit.

Hinweise zur Bemessung von Rohrabflussleistungen und Schluckvermögen von Sickerleitungen sind in technischen Handbüchern von Herstellern oder in den Verlegerichtlinien des Verbandes Kunststoff-Rohre und –Rohrleitungsteile (VKR), basierend auf der SN Norm 640 355, einsehbar. Grundsätzlich wird die Strickler- Formel mit einem teilgefüllten Rohr verwendet.

Praktische Hinweise sind:	Mindestgefälle Sickerleitungen	0.5%
	Mindestgefälle Transportleitungen	1%
	Mindestdurchmesser	150mm (di)
	Mindesttiefe	Frosttiefe (Rohroberkante)



Abbildung 27 Sickerpackung mit Geotextil (Filtern/Trennen) gegen Berg und Geotextilabdichtung (Bentonit) am Grund und gegen den Strassenkörper sowie ein Kontrollschacht (AWN GR).



Abbildung 28 Klassische Sickerleitung mit PP S, dn 160, mit Sickerkies 32/50, ausgeführt ohne Geotextil. Sichtbar als Auslauf und als Spülstutzenende vor Realisierung des Einlaufbauwerkes einer Strasse (AWN SZ).



Abbildung 29 PE Rohr mit Heizwendel-Schweissmuffe zur Verschweissung angeschlossen (bap Ing.).

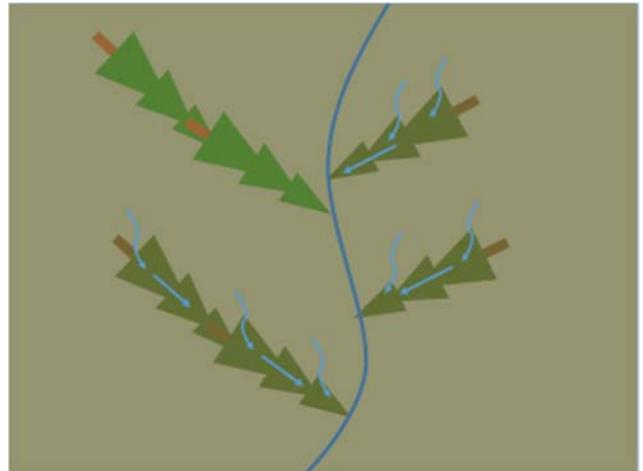
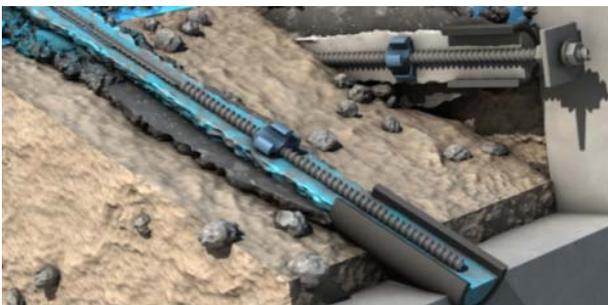


Abbildung 30 Eingedeckte Nadelbäume, dem Raubbaum nachempfunden, bieten vorhandenem Bodenwasser einen Fließweg und stützen das Bodenmaterial zugleich (fobatec).



Verkitteter Boden
 Filterkuchen
 Filterbaustoff
 Stahltragglied

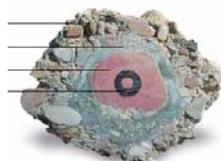


Abbildung 31 Drainageanker haben anstelle eines normalen Ankermörtel-Verpresskörpers einen höher durchlässigen Filterbaustoff ($k=10^{-4}$ ~ Feinsand) und leiten Stauwasser druckfrei ab (Sytec).



Abbildung 32 Tote Hangfaschinen vor dem Eindecken mit vorhandenem Erdreich (Caprez Ing.).

Abdichtungen

Bei der Ableitung von Wasser spielen dichte Abschnitte eine entscheidende Rolle. Zur Einleitung in Sickerrohre und dem Verhindern des Versickerns von Oberflächenwasser in ungewollte Geländebereiche sind Abdichtungen nötig. Möglichst natürlich und nachhaltig bietet sich dazu Ton an. Die abdichtende Wirkung kann durch direkten Einbau von Ton (bspw. Stauriegel zur Sickerrohreinleitung) oder in vorfabrizierten Bentonitbahnen (flächige Abdichtung bspw. in Ableitungsgräben) geschehen (Abbildung 33). Bentonit ist ein Tonmineral, das getrocknet in Pulverform, lose oder in Geogewebe eingearbeitet, erhältlich ist. Bentonitbahnen haben beschränktes „Selbstheilungspotential“. Löcher können sich durch Tonmineralverlagerungen wieder schliessen. Sie sind bekannt aus dem Teichbau.



Abbildung 33 Eine mit Bentonitmatte abgedichtete und mit Spreitlage geschützte Grabensohle.



Abbildung 34 Mit Bentonit-Matten abgedichteter Entwässerungsgraben zur kontrollierten Ableitung von Oberflächenwasser (bap Ing.)

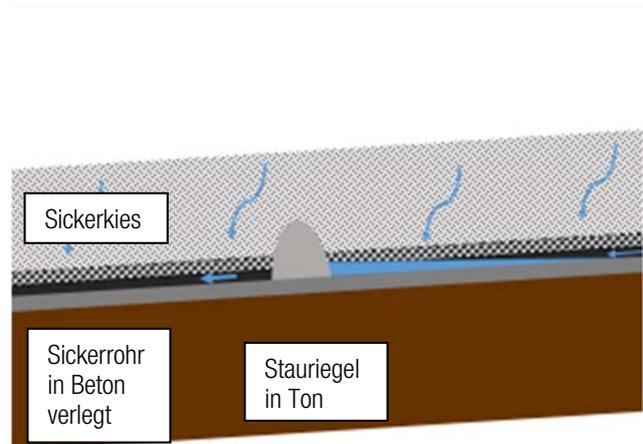


Abbildung 35 Schema eines Stauriegels aus Ton eine Sickerleitung umhüllend zur Wassereinleitung.

Kontroll- und Absetzeinrichtungen

Allen Entwässerungseinrichtungen gemeinsam ist der schleichende Transport von Feinanteilen. Ebenso sind je nach Gewässerqualität Ausfällungen von Kalk, die zu Tuffsteinbildung führen, normal. Immer wieder nutzen Gehölze die Feuchte im Innern von Sickereinrichtungen und wachsen mit ihrem Wurzelwerk in die Ableitung hinein. Allmähliche Verstopfung ist die Folge. Daher sind die periodische Kontrolle und der Unterhalt sehr wichtig. Spülstutzen, Kontrollschächte und Absetzbecken helfen dabei. Sie sind in die Planung einzubeziehen (Abbildung 36).

Spülstutzen als Anschluss an eine Sickerleitung sollen gut sichtbar und zweckmässig geschützt sein. Nur dann wird der Unterhalt auch gemacht. Die Unterbringung in einem kleineren Schacht ist dafür angebracht.

Kontrollschächte dienen beim forstlichen Bauen in einem auch als Schlammfänger und müssen ein Absetzbecken aufweisen. Sie sollten für Kontrollen und die Entleerung zweckmässig zugänglich sein. Zur reinen Kontrolle ist ein Mindestdurchmesser von 60cm genügend. Zur Entleerung ist dies ab einer Schachttiefe von ca. 1.3 m zu knapp (SN 640 355 sagt min. 70cm). Absetzbecken in Ortbeton sind oft zweckmässiger. Vor Einleitung einer offenen Wasserführung in ein Rohr kann ein Abscheidebecken gegebenenfalls mit reiner Geländemodellierung (evtl. Abdichtung) realisiert werden.

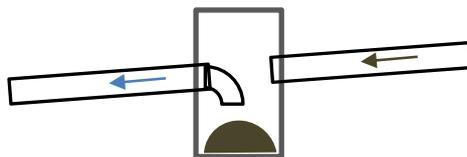


Abbildung 36 Zur Kontrolle der Entwässerungsanlagen, Abscheidung und Entnahme von Schwebstoffen sind Schächte und Absetzbecken vorzusehen.



Abbildung 37 Ein Kontrollschacht muss für die Kontrolle und Spülung mindestens einen Durchmesser von dn600 aufweisen. Ab einer Schachttiefe von über 1.3 m reicht dies nicht mehr (AWN GR).

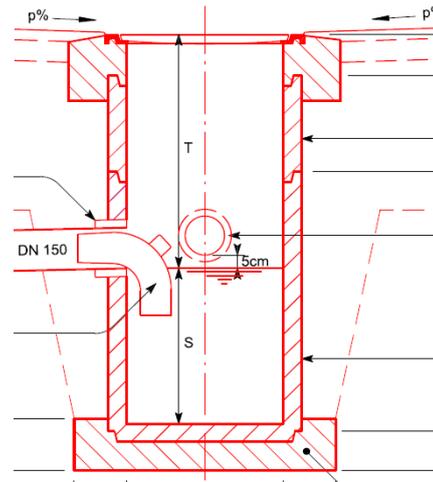


Abbildung 38 Schema eines Schachtes mit Absetzbecken (Schlammsammler). In der Ansicht der 5cm höher liegende Einlauf, im Querschnitt der mit Tauchbogen ausgerüstete Auslauf (TBA ZH).



Abbildung 39 Bei Verrohrung von offen geführtem Wasser ist vorgängig ein unterhaltstaugliches Absetzbecken einzurichten (bap Ing.)



Abbildung 40 Sauber verschlossener und geschützter Spülstutzen (AWN GR).

Abflachen

Die Kornzusammensetzung und Schichtung eines Bodenmaterials ist im Wesentlichen bestimmend für dessen Scherfestigkeit. Die Scherfestigkeit in einer Bruchfläche ist das Vergleichsmass um Stabilitätsnachweise im Grundbau zu führen. Gegenüber gestellt wird die zur entsprechenden Bruchfläche gehörende Schubspannung der resultierenden Auflast. Im Falle eines Hanges und der Gefahr von Rutschungen führt der auflastende Rutschkörper zu Schubspannungen. Hohe Wassersättigung oder wasserführende Schichten wirken zusätzlich destabilisierend. Verringert sich bei gleichbleibendem Bodenmaterial die Neigung werden auch der auflastende Rutschkörper und damit die Gefahr einer Rutschung kleiner (Abbildung 41).

Abflachen kann erreicht werden durch bergseitigen Abtrag von auflastendem Material in der Anrisszone der Rutschung oder durch Auftrag im Fussbereich (Dammschüttung). Bei Schüttungen ist auf die genügende Verzahnung mit dem gewachsenen Boden durch Stufenbildung (Böschungsfüsse) und den lagenweisen Einbau (ca. 40cm mit Verdichtung) zu achten. Die Stufen sollen mindestens die Breite des vorgesehenen Verdichtungsgerätes aufweisen.

Um herauszufinden, in welcher Form bei gegebener Geländeform eine Rutschbewegung am wahrscheinlichsten ist und wie sicher die abgeschätzte Situation ist, können EDV Programme helfen (Abbildung 42). Sie ermitteln aus allen erdenklichen Bruchkörperformen die schwächste Zone einer Böschung. Dazu muss vorerst wie erwähnt ein Modell der Bodenschichtung vorliegen, was in der Regel nicht einfach zu ermitteln oder abzuschätzen ist.

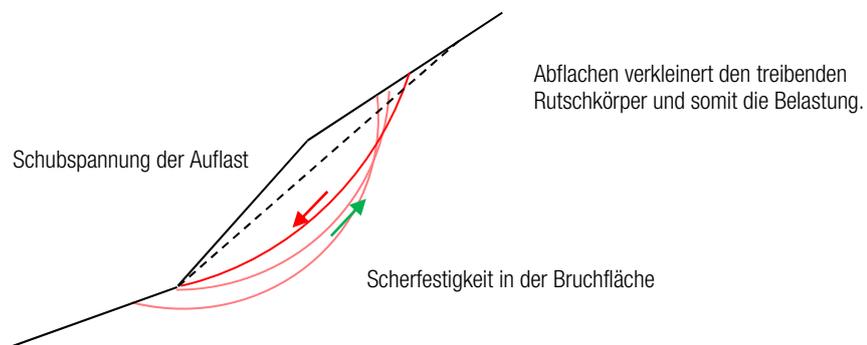
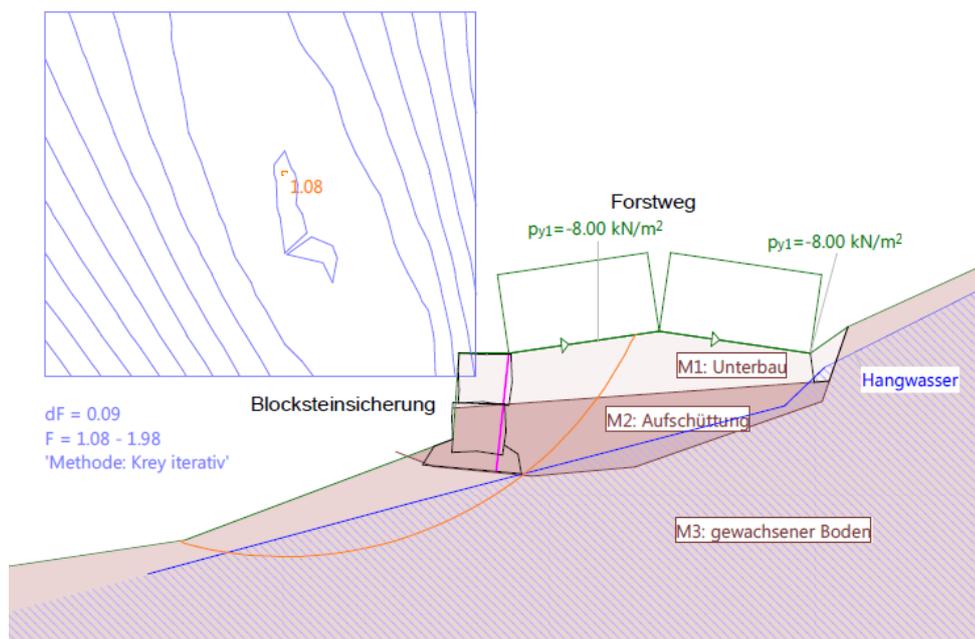


Abbildung 41 Schematische Darstellung von treibenden Spannungen und rüchhaltenden Scherkräften.

Je flacher das Gelände ist, je flacher ist auch der Verlauf der potentiell schwächsten Bruchfläche und je kleiner sind die zu Spannungen führenden Auflasten. Die Standsicherheit oder Stabilität des Hanges nimmt somit zu.





BAUGRUNDMODELL

Bodenschichteigenschaften

Id	Beschreibung	ϕ_k [°]	γ_k [kN/m ³]	C_k [kN/m ²]
M1	Unterbau	34.00	20.00	2.00
M3	gewachsener Boden	28.50	19.50	2.00
M2	Aufschüttung	32.00	20.00	2.00

Numerische Resultate aller Ewk für Definition mit Zentren und Zwangslinie

Gleitkreise mit den kleinsten Sicherheiten

GWS	Ewk Nr	Kreis Nr.	x [m]	y [m]	R [m]	Anker	F _{vorth} [-]	L _{erf} [m]	L _{min} [m]	Bemerkung siehe Fussnoten
G1	1	166	2.15	4.86	3.85		1.08			
		136	2.15	4.45	3.54		1.08			
		109	2.62	4.05	2.92		1.08			
		106	2.15	4.05	3.25		1.09			

GWS : G1 = IGZ Tragsicherheit Typ 3
 F_{vorth} : vorhandene Sicherheit, erforderliche Sicherheit F_{erf} = 1.00
 L_{erf} : berechnete, erforderliche freie Ankerlänge im Bereich L_{min} - L_{max}
 L_{min} : eingegebene, minimale freie Ankerlänge

Abbildung 42 Beispielresultat einer Standsicherheitsberechnung mit Hilfe eines Grundbau-Berechnungsprogrammes (Cubus, Larix 5.0)



Abbildung 43 Die steile Böschung wäre durch die bergseitige Verbreiterung des Weges instabil. Auf der ganzen Böschungshöhe wurde daher Material abgetragen (AWN GR).



Abbildung 44 Dank Materialabtrag ist die Böschung flacher und ihre Tragsicherheit gegeben. Ohne Abflachung wäre eine deutlich höhere Stützmauer nötig gewesen (AWN GR).

Stützen

Stützbauwerke stellen den treibenden Kräften ihr Gewicht entgegen. Einerseits gibt es die vergleichsweise massigen Stützbauwerke, die mit ihrem Eigengewicht eine Gegenlast bilden (Abbildung 46). Beispiel dafür sind Dämme, Schwergewichtsmauern, Gabionen, bewehrte Erde, Nagelwände oder auch Holzkasten. Die drei letztgenannten Systeme gehören zu den Verbundkonstruktionen, die kombiniert aus Erdmaterial und bewehrenden Einlagen ein standfestes Gegengewicht bilden. Andererseits bedienen sich filigran wirkende Winkelstützmauern vorwiegend des Gewichtes des ihnen anlastenden Erdreichs (Abbildung 45). Durch die erdseitig liegenden Winkel und Konsolen wird der Bruchkörper dadurch aufgeteilt. Das über Winkel und Konsolen aufliegende Gewicht, sowie die steiler angreifenden, aktiven Erddrücke erhöhen die Standsicherheit. Winkelstützmauern sind in der Regel in bewehrtem Ortsbeton gefertigt. Nicht ausser Acht zu lassen ist bei der Errichtung von Stützbauwerken, egal welcher Bauweise die Erhöhung der gesamten Masse im Hang. Daher müssen sie zwingend in stabilem Untergrund fundiert sein.

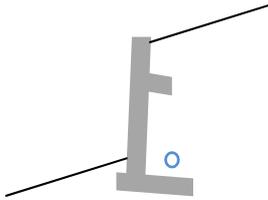


Abbildung 45 Winkelstützmauer mit Konsole und Entwässerung.

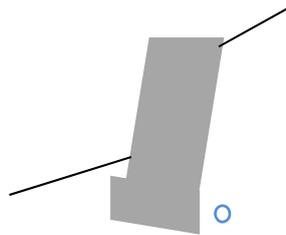
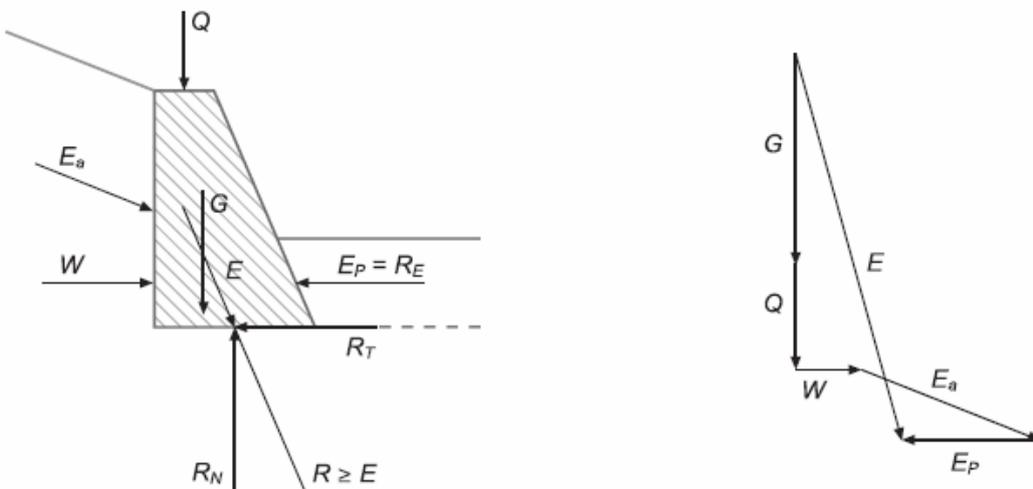


Abbildung 46 Schwergewichtsstützmauer mit Entwässerung.

Mit Stützbauwerken kann das darüber liegende Terrain abgeflacht werden. Die Oberfläche wird somit ebenfalls stabilisiert. Da gestautes Wasser hinter Stützbauwerken eine weitere Erhöhung der Hangbelastung auf das Bauwerk bedeutet, ist dies durch Sickereinrichtungen oder offene Bauweise des Stützbauwerkes zu verhindern.

Bemessung von Stützbauwerken

Nach Norm sind Tragsicherheitsnachweise für die Szenarien Gleiten, Kippen und Grundbruch zu führen (SIA 267, 267/1, SN 640 383a). Abbildung 47 zeigt die Einwirkungen (G Gewicht, Q Auflast, W Wasserdruck, E_a aktiver Erddruck, E_p passiver Erddruck) Auswirkungen (E) und Widerstände (R).



Der Widerstand R wird in Berücksichtigung der Auswirkung E berechnet

Einwirkungen	G, Q, W, E_a, E_p
Auswirkung	E
Widerstände	R bzw. R_N, R_T

Abbildung 47 Einwirkungen, Auswirkungen und Widerstände bei Stützbauwerken (SIA 267)

Für die praktische Konstruktion zu folgern ist:

Neigung der Fundamentsohle gegen Berg
 Beibehalten der Neigung auch in den folgenden Lagerflächen
 Fundamentbreite ≈ 0.35 bis 0.4 mal Bauwerkshöhe (Annäherung für bindige Böden)
 Anzug mind. 5:1, (Holzkasten flacher eindecken!)
 Einbindung Fundament mind. 0.8m (eigentlich Frosttiefe)
 Entwässerung mit Sickerleitung oder Rohreinlagen



Abbildung 48 Bei Stützmauern aus Blöcken und Bruchsteinen mit natürlichen Kanten sind Form- und Kraftschluss wichtig. Eine Vermörtelung unterstützt den Kraftschluss und ist ab ca. 3m Höhe sinnvoll (AWN GR).



Abbildung 49 Durch Eindeckung und Erstellung in Hangneigung ist ein Holzkasten als Stützkonstruktion langlebig und kann Bewegungen mitmachen (AWN GR).



Abbildung 50 Das Konzept der bewehrten Erde bildet einen in sich stabilen Block, der mit seinem Gewicht dem bergseitigen Material entgegenwirkt (nackten-steisslingen.de)

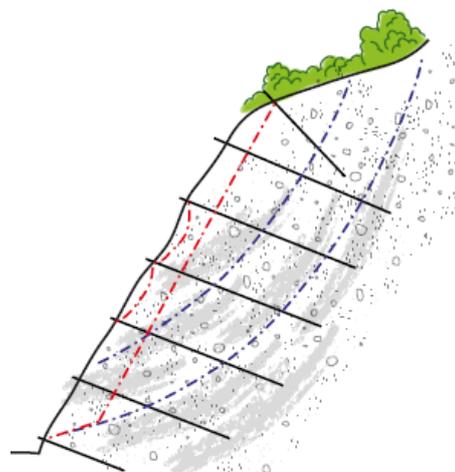


Abbildung 51 Eine Nagelwand bildet durch das vom Bodenmaterial abhängige Nagelraster ebenfalls einen Block mit höherer Scherfestigkeit. Die Front kann mit Spritzbeton oder hochfesten Drahtgeflechten gesichert werden (Geobrugg).

Rückhalten

Rückhaltebauwerke wirken Rutschmassen nicht durch ihr Eigengewicht entgegen, sondern leiten die auf schlanke Tragwerksteile wirkenden Kräfte über Zugelemente in tiefer liegende, stabile Bodenschichten (Abbildung 52 u. Abbildung 53). Die Rutschhorizonte liegen also über dem verankernden Teil der Zugelemente. Seilanker, Stabanker, Erdanker (Duckbill u.ä.) und Totmann-Anker sind Beispiele forstlich angewandeter Zugelemente. Die lineare oder flächige Lastaufnahme an der Front der Rutschmasse kann durch Schwellen, Holzwände, Kanaldielen oder Spundwandprofile erfolgen. Die Bauteile sind wesentlich schlanker als die mit ihrem Schwergewicht wirkenden Stützbauwerke. Ein sich aufbauender Staudruck durch Wasser hinter dem Tragwerk ist ebenfalls zu vermeiden. Dies kann wie bei den Stützbauwerken durch Sickerpackungen oder offene Bauweise (wasserdurchlässig) erreicht werden.

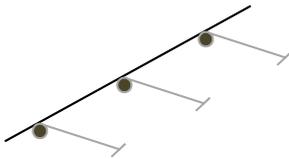


Abbildung 52 Mit Erdankern (Manta Ray o.ä.) befestigte Schwellen.

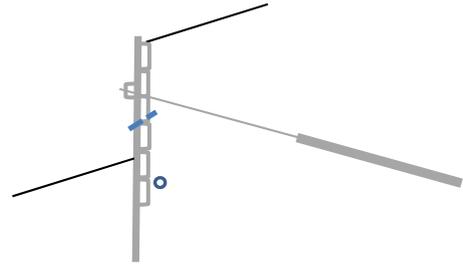


Abbildung 53 Rückverankerte Pfahlwand, die idR. offen (wasserdurchlässig) ausgeführt wird.

Bemessung von Rückhaltebauwerken (ungespannte Zugglieder)

Tragwerksmodell

Das Tragwerk besteht in der Regel aus frontseitig abschliessenden Bauteilen (Stahlelementwände (Kanaldielen, Larssen, o.ä.), Mikropfähle, Holzpfähle und -schwellen, etc.) und den zugehörigen Verankerungen (ungespannte Anker, Erdanker, Spiralseilanker). Die Ankerkräfte sind abhängig von einer Tragwerksverschiebung zur Aktivierung, die akzeptierbar sein muss.

Einwirkung	aktiver Erddruck Wasserdruck	Auswirkung	Zugspannung über Frontelemente auf Ankerkopf
Einwirkung	Ankerelement	Auswirkung	Spannungen des Verbundkörpers (Mantelreibung) im Baugrund

Nachfolgend der Fall ungespannter Anker (Nagel)

- Nachweis der inneren Tragsicherheit Der charakteristische Wert der Zugkraft an der Fließgrenze des Zugglieds von ungespannten Ankern aus Stahl.
- Nachweis der äusseren Tragsicherheit Der charakteristische Wert des äusseren Tragwiderstands entspricht dem kleinsten aus mindestens drei Ausziehversuchen pro Untergrundbereich
- (Gebrauchstauglichkeit) bei forstlichen Projekten bei nachgewiesener Tragsicherheit in der Regel unbedeutend.

Korrosionsschutz:

Stabanker (Nägel) können temporär bis 5 Jahre und permanent über 5 Jahre Standzeit eingesetzt werden. Der Schutz vor Korrosion ist nach SIA 267 vorgeschrieben. Die Bedeutung des Bauwerkes (Bauwerksklasse nach SIA 261) und die vorgesehene Nutzungsdauer entscheiden über die zu treffenden Massnahmen.

Für die praktische Konstruktion zu folgern ist:

- Mindestens drei Versuchsanker (Ausziehversuch) pro Untergrundbereich für Ermittlung des äusseren Tragwiderstandes, der Verankerungslänge, der Bohr- und Injektionsmethode. Sinnvollerweise werden Versuchsanker ausschliesslich hinter der vermuteten Gleitfläche vermörtelt. Die geprüfte Grösse ist der charakteristische Baugrundwiderstand.
- Korrosionsstufe nach Bauwerksklasse (forstliche Anwendungen idR. Schutzstufe 1 (Mörtelüberdeckung des Zuggliedes 20mm))
- Prüfung der Ausführungsqualität mittels Zugproben an 5% oder mindestens drei Ankern pro Untergrundbereich. Die geprüfte Grösse ist die Bemessungslast.



Abbildung 54 Oberflächenbefestigung durch rückverankerte Schwellen (AWN GR).



Abbildung 55 Eintreiben des Erdankers mit dem Kompressor und Gestänge mit anschliessendem Festsetzen durch Ausziehen bis zum Halt (AWN GR).



Abbildung 56 Setzen der Pfähle (SBB) und vorbereitete, rückhaltende Spiralseilanker für eine rückverankerte Pfahlwand (Ribbert AG).



Abbildung 57 Rückverankerte Pfahlwand nach der Fertigstellung (Ribbert AG)

Oberflächenschutz

Wird mit der angelegten Hangneigung der Scherwinkel des Bodenmaterials nicht erreicht und stimmen die klimatischen Bedingungen, ist ein Bewuchs mit Gräsern und Gehölzen auch auf Rohböden in der Regel gut möglich. Stimmen diese Bedingungen nicht, sind häufig anderweitige Befestigungsmassnahmen zur Unterstützung nötig. Ein Abflachen der Neigung ist am erfolgversprechendsten. Mit Kleinpählungen, Diagonalflechtwerken, Hangrosten, Rollierungen und dergleichen kann eine oberflächliche Armierungswirkung erzielt werden (Abbildung 58 u. Abbildung 59). Kräfte aus dem nahen Umkreis können so vertikal und lateral verteilt werden. Leicht steilere Neigungen sind damit realisierbar. Schutz vor dem Aufprall des Regens, vor Auswaschungen und lokalen Setzungen bieten verschiedenste Abdeckungsgeflechte. Sie sollen eine Begrünung ermöglichen. Die standortgerechte Wahl des Saatgutes und der Gehölze und der Einsatzzeitpunkt sind für den Begrünungserfolg entscheidend. Die Erreichung eines vegetationsverträglichen Mikroklimas unter und innerhalb der eingesetzten Geflechte ist in einzelnen Fällen schwierig. Insbesondere an sonnenexponierten, relativ skelettreichen Hängen in Grenzneigung zeigt sich in der Praxis, dass leichtes Eindecken der Gewebe durch Oberbodenmaterial eine starke Hitzeentwicklung und damit die Austrocknung der keimenden Begrünung verhindert. Die Ingenieurbiologie befasst sich eingehend mit Fragen der Oberflächenstabilisierung.

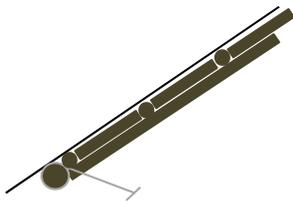


Abbildung 58 Eingedeckter Hangrost mit verankerter Schwelle.

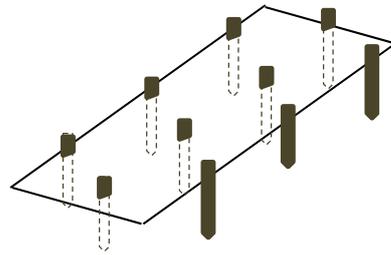


Abbildung 59 Hangbereich mit diagonal versetzter Kleinpählung.



Abbildung 60 Rollierung einer instabilen Wegböschung. Die Blöcke/Steine sind in Hangneigung kraftschlüssig gesetzt (AWN GR)



Abbildung 61 Mit Kokosmatten abgedecktes und begrüntes Gelände (LAWA LU).



Abbildung 62 Auf einer Mauer abgestützter Hangrost im Bau (AWN GR).



Abbildung 63 Der fertiggestellte Hangrost ist vollständig eingedeckt und bleibt so am längsten funktionstüchtig (AWN GR).



Abbildung 64 Ankerraster (Nägel) und Netzabdeckung vor der Begrünung (fobatec).

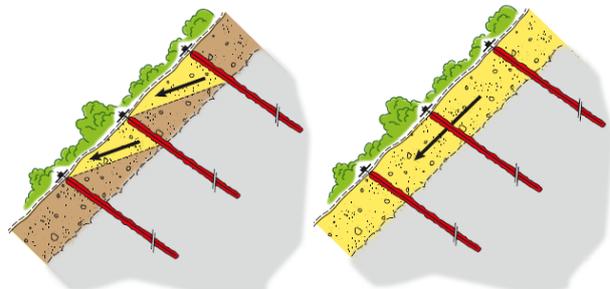


Abbildung 65 Oberflächennahe Wirkungsweise von Vernagelungen und Netzabdeckungen: Lokale Setzungen und Ausbrüche als auch oberflächennahe Rutschungen können stabilisiert werden. Durch Optimierung der Kopfplatten ist eine Vorspannung auf das Netz möglich und die Nagelabstände können etwas weiter gewählt werden (Geobrug). Insgesamt ist eine Erhöhung der Scherfestigkeit die Folge. Eine Begrünung ist wichtig zum Schutz vor Erosion durch oberflächlich fließendes Wasser.

Grenzen

Die technischen Möglichkeiten sind bei nicht Beachtung der Kosten sehr weitreichend. Zu den aufwendigsten und somit für Rutschungen äusserst selten eingesetzten Verfahren gehören Systeme zur tiefgründigen Entwässerung aus Drainagepfählen, Tiefenbohrungen und Entlastungstunnels. Sie bilden ein nach detaillierten, geologischen und hydrogeologischen Untersuchungen gezielt angelegtes Drainagenetz innerhalb einer Rutschmasse. Ein Beispiel bildet die Grossrutschung „La Frasse“ am Col de Mosse (VD). Bodenverbesserung durch Jetting- Injektionen, wo man bindende Stoffe wie Zement und Kalk einbringt oder immense Erdumlagerungen sind ebenfalls sehr aufwendig und kommen bei forstlichen Problemstellungen nicht in Frage. Bei Überschreitung eines gewissen Schadpotentials sind allein aus Haftungsgründen Geologen, Geotechniker und Bauingenieure zur Massnahmenfindung beizuziehen.

Biologische Lösungsmöglichkeiten (M. Schwarz)

Wirkung der Vegetation in biologischen Maßnahmen

Die Anwendung von ingenieurbioologischen Massnahmen hat eine lange Tradition im Wasser- und Hangverbau. Erst in den 60er Jahren hatte dieser Fachbereich wieder neues Interesse in der Lehre und der Praxis dank Fachpublikationen, welche diese Disziplin qualitativ erfasst haben (z.B. Schiechl), erhalten. Ab den 70er/80er Jahren wurden die ersten quantitativen Ansätze formuliert, um die Wirksamkeit solcher Massnahmen zu berechnen und zu diskutieren. Die Wirkung von Vegetation als Zentrum der stabilisierenden Effekte von ingenieurbioologischen Massnahmen bleibt sehr schwierig zu quantifizieren. Dies aufgrund der komplexen Heterogenität der involvierten Prozesse (mechanische, chemische, hydrologische, usw.). Oft werden biologische Massnahmen mit temporären, technischen Bauten erstellt (Holzkasten, Hangroste, usw.), um die Etablierung der Vegetation zu fördern. Zahlreiche Publikationen über die unterschiedlichen Typen von ingenieurbioologischen Massnahmen können gefunden werden (Sotir und Gray, 1996; Florineth, 2004; Pauli et al. 2005; Zeh et al., 2010). In diesem Kapitel geht es darum, die Wirkungen der Vegetation bei solchen Massnahmen besser zu quantifizieren und einzuordnen; somit kann geschätzt werden welche Wirkung, in welcher Zeit und für welche Prozesse wirklich relevant sind.

In erster Linie muss unterschieden werden in welchem Bereich diese biologischen Massnahmen eingesetzt werden: Hang- oder Flussufer.

In diesem Skript wird weiter auf die Hangverbaumassnahmen eingegangen. In diesem Bereich muss man je nach Prozess unterscheiden welcher die dominierende Wirkung der Vegetation sein kann: Aggregatstabilität bei Oberflächenerosion, Wurzelverstärkung bei flachgründigen Rutschungen, oder Evapotranspiration auf Einzugsgebietsebene bei mittel- bis tiefgründigen Rutschungen (siehe Abbildung 66). Bei jedem Prozess kann die Wirkung der Vegetation unterschiedlich sein.



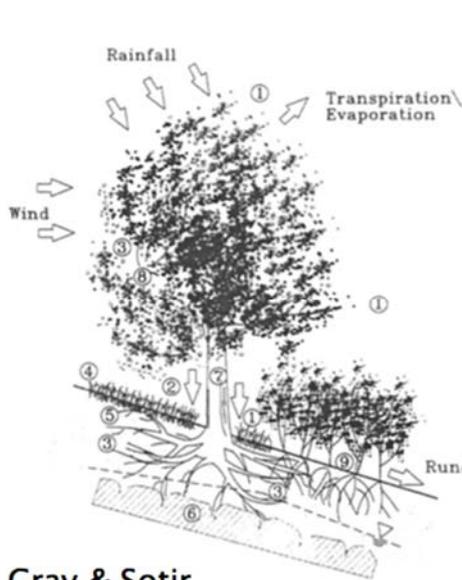
Abbildung 66 Schematische Darstellung der wichtigsten Vegetationswirkungen für Hangstabilität je nach Prozess.

Die Wirkungen der Vegetation auf die Hangstabilität können in direkte (z.B. Interzeption oder Wurzelverstärkung) und indirekte (z.B. Regulierung biologischer Aktivität des Bodens mit steuern der Bodenentwicklung) geteilt werden. Weiter können diese Wirkungen in hydrologisch, mechanisch und chemisch unterteilt werden. Um eine Grössenordnung der Bedeutung dieser Wirkungen zu haben, werden hier quantitative Daten aus der Literatur kurz zusammengefasst und im Blick auf ein 100 jährliches Niederschlagsereignis diskutiert (ca. 80 mm/1 Stunde, oder 180 mm/ 24 Stunden):

- **Interzeption:** 0 bis 5 mm (max 20 mm), wirkt pro Ereignis; dazu wirkt die Vegetationsdecke als „Puffer“ und verzögert die Zeit, mit welcher das Regenwasser in den Boden gelangt. Das interzeptierte Regenwasser kann als Stammabfluss konzentriert in den Boden sickern und lokale Sättigung verursachen (typisch bei Buche), wobei dieser Effekt als irrelevant für die Hangstabilität angenommen werden kann.

- **Infiltration:** Durchwurzelte Bodenhorizonte haben eine erhöhte Infiltration im Vergleich zu nicht durchwurzelten Horizonten. Aggregatstabilität und Bodenstruktur welche durch die biologische Aktivität des Bodens beeinflusst werden können, beeinflussen auch die Infiltration.
- **Evapo-Transpiration (ET):** kurzfristig hat sie eine sehr kleine Bedeutung (0-2 mm/Stunde), hingegen langfristig kann sie eine grosse Bedeutung für die hydrologischen Prozesse auf Einzugsgebietsebene (EZG-Ebene) haben und damit den Wassergehalt des Bodens und den Abfluss während Niederschlägen beeinflussen. Wälder haben eine höhere ET als Wiesen/Weiden und können bis 50% der jährlichen Niederschlagssumme evapotranspirieren. Diese Wirkung kann auch für die mittel- bis tiefgründigen Rutschungen von Bedeutung sein (Sidle und Ochai, 2008). Diese Wirkung ist räumlich heterogen und hängt von der Wurzelverteilung ab.
- **Wasserspeicherkapazität:** bis 70-80 mm in A und B Horizont, je nach Bodentyp. Die lokale Zunahme des Bodengewichtes hat einen sehr kleinen negativen Einfluss auf die Hangstabilität (siehe Beispiel Sensivitätsanalyse); hingegen kann der Einfluss auf den reduzierten Abfluss auf die EZG-Ebene einen wichtigen Beitrag zu Hangstabilität haben.
- **Fliessgeschwindigkeit:** Die erhöhte Rauigkeit der Bodenoberfläche dank Wurzeln, Streuschicht und Grasvegetation setzt die Geschwindigkeit des Oberflächenabflusses herab und fördert die Infiltration.
- **Wurzelverstärkung:** kann zwischen 0 und 20 kPa variieren, und wirkt durch drei Mechanismen (basale Wurzelverstärkung, Laterale Wurzelverstärkung, Erhöhung der Bodensteifigkeit). Der Beitrag der basalen Wurzelverstärkung ist begrenzt bis zu einer Tiefe von 1.5-2 m (je nach Baumart, Bestandesalter und Standort). Diese Wirkung wird später noch im Detail behandelt.
- **Scheinbare Kohäsion:** Diese wird erzeugt durch die ET und entsprechende Abnahmen des Wassergehaltes im Boden. Mehrere Studien haben gezeigt, dass dieser Effekt schon bei kleinen Niederschlagsereignissen verloren geht. Also es ist langfristig für die Hangstabilität nicht bedeutend.
- **Gewicht der Bäume:** Diese Wirkung kann positiv oder negativ je nach Hangneigung und bodenmechanischer Parameter sein. Insgesamt ist diese Wirkung aber unbedeutend weil die Kräfte, welche durch das Gewicht der Bäume erzeugt werden, massgeblich kleiner sind als die Kräfte, welche durch den Boden erzeugt werden. (Beispiel: die treibende Kraft gegeben durch die Belastung eines alten Bestands (5 t/100 m²) auf einen 30° steilen Hang beträgt circa 400 N/m², während die treibende Kraft von einem 1 m tiefen Boden circa 8000 N/m² beträgt).
- **Wind- und Schneelast:** Die Kräfte erzeugt durch Wind- und Schneelast werden in die Wurzelsysteme geleitet und von dort innerhalb weniger Meter in dem Boden aufgelöst. Diese Belastungen sind sehr lokal (1-2 m Radius des Wurzeltellers) und wirken auf einer Seite des Wurzelsystemes destabilisierend (unter Zug) und auf der anderen Seite stabilisierend (Erhöhung der Normalspannung). Diese Belastungen werden vor allem durch die grossen „strukturellen“ Primärwurzeln weitergeleitet. Während sekundäre Wurzeln mehr zur Hangstabilität beitragen und eine viel breitere räumliche Verteilung haben.
- **Aggregatstabilität:** die biologische Aktivität im Boden steuert wichtige chemische und mechanische Prozesse welche auch durch die Vegetation beeinflusst werden können. Ein wichtiges resultierendes Merkmal dieser Prozesse ist die Bodenstruktur und die entsprechende Aggregatstabilität. Die Aggregatstabilität ist direkt beeinflusst durch die Art und Menge der chemischen Produkte (Exsudate) welche aus Pilzen, Bakterien und Wurzeln freigelassen werden. Dazu kann die Aktivität der Regenwürmer einen grossen Beitrag zur Durchmischung (Turbation) des Bodens leisten (damit werden Tonfraktionen des Bodens gleichmässig vertikal verteilt). Eine hohe Aggregatstabilität entspricht einem höheren Widerstand des Bodens gegen Erosion und Abscherung. Die Aggregatstabilität nimmt stark ab mit zunehmender Bodentiefe. Diese Wirkung der Vegetation hat eine wichtige Bedeutung zur Reduktion der Oberflächenerosion von steilen Hängen. Abbildung 68 zeigt die zeitliche Entwicklung der Aggregatstabilität nach biologischen Massnahmen im Arieschbach (GR).
- **Zusammensetzung der Wasserlösung im Boden:** Vegetation kann die chemische Eigenschaften der Bodenlösung beeinflussen (pH, Konzentration Ionen und Tonmineralien), welche wiederum wichtige Bodenprozesse langfristig beeinflussen können (Verwitterung, Tonverlagerung). Diese Bodenbildungsprozesse können die hydrologischen und mechanischen Eigenschaften von Bodenhorizonten stark beeinflussen und somit die Anfälligkeit eines Hanges zu rutschen, erhöhen oder senken. Diese Wirkungen finden langfristig statt und sind sehr schwierig quantitativ nachzuweisen.

Obwohl viele der aufgelisteten Wirkungen je nach Situation schwierig zu quantifizieren sind, ist diese Zusammenfassung schon ein weiterer Schritt um eine Grobordnung der Vegetationswirkungen quantitativ zu beurteilen. Die Quantifizierung dieser Wirkungen bleibt ein zentrales Element um die Wirksamkeit von biologischen Massnahmen auf demselben Niveau der technischen Massnahmen zu vergleichen.



Hydrologisch

- **Interzeption**
- **Infiltration** (Rauigkeit Oberfläche, macroporen)
- **Evapo-Transpiration**
- **Wasserspeicherung**
- **Fliessgeschwindigkeit**

Mechanisch

- **Wurzelverstärkung** (laterale und basale)
- **Scheinbare Kohäsion** (durch ET)
- **Gewicht Bäume** (+/-)
- **Wind/Schneelast**
- **Aggregatstabilität**

Chemisch

- **Zusammensetzung**
- **Wasserlösung im Boden** (pH, Ionen, Tonmineralien)

Gray & Sotir.

Abbildung 67 Liste der möglichen Vegetationswirkungen für Hangstabilität (modifiziert nach Gray und Sotir (1995).

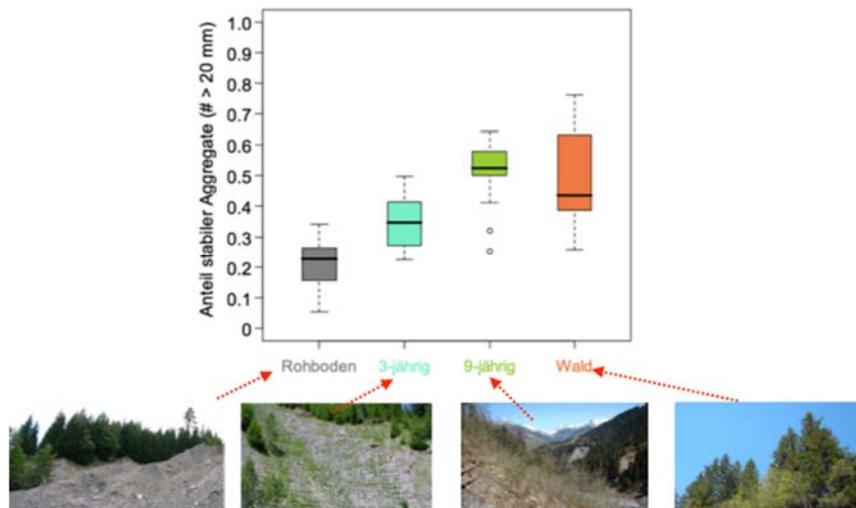


Abbildung 68 Resultate der Aggregatstabilität des Oberbodens in einer Chronosequenz von Vegetationsentwicklung nach ingenieurbiologischen Maßnahmen in Arieschbach (GR) (modifiziert nach Schwarz et al. (2006)).

Zeitliche Entwicklung der Wurzelverstärkung und dessen Bedeutung in biologischen Massnahmen

In diesem Kapitel wird die Rolle der Wurzelverstärkung in biologische Massnahmen vertieft diskutiert. Bei Rutschprozessen mit einer Gründigkeit unter 2m und einem Rutschvolumen kleiner als 500-1000 m³, kann die Wurzelverstärkung von grosser Bedeutung für die Hangstabilität sein. Aus diesem Grund können biologische Massnahmen sehr wirksam in der Behandlung solcher Prozesse sein und eine günstigere Variante gegenüber technischen Massnahmen sein.

Die Wurzelverstärkung kann je nach Situation durch drei Hauptmechanismen wirken:

1. Verankerung des instabilen Bodenmaterials zum stabilen Untergrund.
2. Die Erhöhung der Bodensteifigkeit durch vernetzte Wurzelsysteme welche durch Druck- und Zugkräfte die Rutschmasse stützen.
3. Laterale Wurzelverstärkung (Druck und Zug) am Rand der Rutschung trägt zu Stabilität bei.

Diese Mechanismen wurden in Ordnung von Effizienz aufgelistet und sind in Abbildung 69 dargestellt. Abbildung 70 zeigt drei typische Situationen, welche die Wirkung dieser drei Mechanismen deutlich veranschaulichen.



Abbildung 69 Darstellung der drei möglichen Mechanismen durch welche die Wurzelverstärkung stabilisierend wirken. Modifiziert nach Giadrossich et al. (2014).



Abbildung 70 Situationen in welchen die Wurzelverstärkung durch die drei Hauptmechanismen wirkt: basale Wurzelverstärkung (Links), Erhöhung Steifigkeit und passiver Erddruck (wie bei einer Hangrost, Mitte) und laterale Wurzelverstärkung (Rechts).

In der Planung von ingenieurb biologischen Massnahmen spielt die Wurzelverstärkung erst nach einer bestimmten Zeit eine Rolle. Diese Zeit braucht die Vegetation um sich zu entwickeln. Angenommen, dass die Dimensionen der einzelnen Pflanzen (z.B. BHD) nicht linear mit dem Alter zunimmt, ist es möglich diese zeitliche Entwicklung mit der Formel $BHD = a \cdot \text{Alter}^b$ zu berechnen, wobei a und b empirische Koeffizienten sind, welche sich je nach Baumart und Standort ändern.

Forschungsstudien haben die Wurzelverstärkung quantifiziert und als Funktion des BHD's und dem Abstand von Stamm dargestellt (Mattli, 2014; Vergani et al., 2014; Schwarz et al., 2012b). Abbildung 71 zeigt das Beispiel der Resultate einer Buche in den Berner Voralpen.

Die Daten sind mit einer Gamma Funktion gefittet, wobei die Parameter dieser Funktion mit zunehmendem BHD ändern. Mit dieser Formulierung ist es möglich die räumliche laterale Verteilung der Wurzelverstärkung zu berechnen.

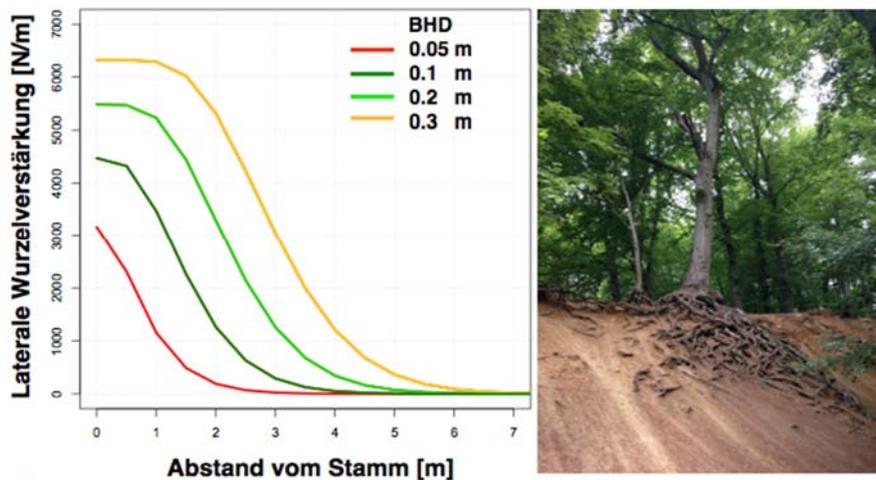


Abbildung 71 Grafik der berechneten lateralen Wurzelverstärkung je nach Baumdimensionen (BHD) und Abstand von Stamm. Das Foto zeigt die Verteilung eines exponierten Wurzelsystems einer Buche (*Fagus sylvatica*) welches das daraus folgende Resultat zeigt.

Die Wirkung der Wurzelverstärkung auf die potenzielle Scherfläche einer Rutschung (basale Wurzelverstärkung, Mechanismus 1 in Abbildung 69) hängt von der vertikalen Verteilung der Wurzeln ab. Die vertikale Verteilung der Wurzel ändert je nach Baumart und Standort. Glenz (2005) hat Literaturwerte zusammengefasst und die mögliche Durchwurzelungstiefe je nach Baumart und Stressfaktoren eingeordnet. Abbildung 72 zeigt die durchschnittliche zeitliche Entwicklung der maximalen Durchwurzelungstiefe je nach Baumarten. Die Baumarten wurden in drei Wurzeltypen (Root Typ, RT) eingeordnet. Die Tabelle 4 listet die Namen der Baumarten je Wurzeltyp. Diese Informationen sind sehr wichtig um die Wirkung der Wurzelverstärkung bei einer bestimmten Bodentiefe zu schätzen je nach Entwicklungsstadium des Bestandes und je nach Baumart. Diese Schätzung erlaubt zu sagen, ob in einer bestimmten Situation die basale Wurzelverstärkung eine Rolle für die Hangstabilität hat oder nicht.

In dem Fall, in dem potenziell eine basale Wurzelverstärkung vorhanden sein könnte, ist es wichtig die Intensität dieser Wurzelverstärkung zu schätzen. Die Wurzelverstärkung nimmt mit zunehmender Bodentiefe nicht linear ab. Abbildung 72 zeigt die Typische Verteilung der Wurzelverstärkung als Funktion der „normalisierten“ Bodentiefe (= Bodentiefe/maximale Durchwurzelungstiefe), wobei der Wert der „normalisierten“ Bodentiefe je nach Wurzeltyp einer unterschiedliche Bodentiefe entspricht.

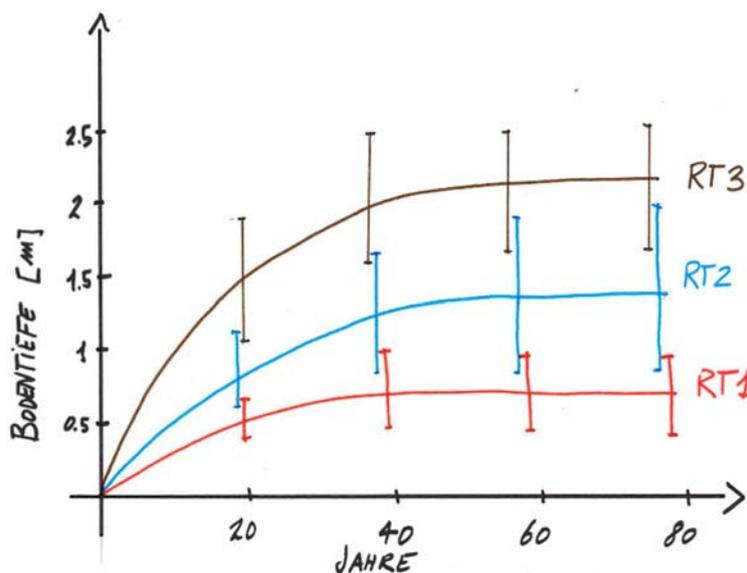


Abbildung 72 Grafik der maximal durchwurzelten Bodentiefe als Funktion des Alters (Jahre), je nach Wurzeltyp (RT). Modifiziert nach Glenz (2005).

Tabelle 4 Liste der Baumarten geteilt je nach Wurzeltyp (RT1, RT2 und RT3).

RT 1		RT 2		RT 3	
<i>Alnus viridis</i>	Grün-Erle	<i>Acer campestre</i>	Feldahorn	<i>Pinus silvestris</i>	Waldkiefer
<i>Cornus sanguinea</i>	Roter Hartriegel	<i>Aesculus hipp.</i>	Gewöhnliche Rosskastanie	<i>Quercus petraea</i>	Traubeneiche
<i>Frangula alnus</i>	Faulbaum	<i>Betula pendula</i>	Hänge-Birke	<i>Quercus pubescens</i>	Flaumeiche
<i>Ilex Aquifolium</i>	Europäische Stechpalme	<i>Fraxinus excelsior</i>	Gemeine Esche	<i>Quercus robur</i>	Stieleiche
<i>Ligustrum vulgare</i>	Gewöhnlicher Liguster	<i>Prunus spinosa</i>	Schlehdorn	<i>Robinia pseudo.</i>	Gewöhnliche Robinie
<i>Ionicera xylosteum</i>	Rote Heckenkirsche	<i>Prunus domestica</i>	Pflaume	<i>Salix alba</i>	Silber-Weide
<i>Prunus avium</i>	Vogel-Kirsche	<i>Prunus padus</i>	Gewöhnliche Traubenkirsche	<i>Salix appendiculata</i>	Grossblättrige Weide
<i>Rhamnus cathartica</i>	Purgier-Kreuzdorn	<i>Prunus mahaleb</i>	Steinweichsel	<i>Salix caprea</i>	Sal-Weide
<i>Viburnum opulus</i>	Gewöhnlicher Schneeball	<i>Sorbus aucuparia</i>	Vogelbeere	<i>Salix cinerea</i>	Asch-Weide
<i>Sambucus nigra</i>	Schwarzer Holunder	<i>Ulmus glabra</i>	Bergulme	<i>Salix daphnoides</i>	Reif-Weide
<i>Picea abies</i>	Gemeine Fichte	<i>Abies alba</i>	Weiss-Tanne	<i>Salix elaeagnos</i>	Lavendel-Weide
		<i>Tilia platyphyllos</i>	Sommerlinde	<i>Salix fragilis</i>	Bruch-Weide
		<i>Viburnum lantana</i>	Wolliger Schneeball	<i>Salix m. nigricans</i>	Schwarz-Weide
		<i>Cornus mas</i>	Kornelkirsche	<i>Salix pentandra</i>	Lorbeer-Weide
		<i>Carpinus betulus</i>	Hainbuche	<i>Salix purpurea</i>	Purpur-Weide
		<i>Populus tremula</i>	Espe	<i>Salix triandra</i>	Mandel-Weide
		<i>Alnus incana</i>	Grau-Erle	<i>Salix viminalis</i>	Korb-Weide
		<i>Acer platanoides</i>	Spitzahorn	<i>Acer pseudopl.</i>	Berg-Ahorn
		<i>Amelanchier ovalis</i>	Gewöhnliche Felsenbirne	<i>Alnus glutinosa</i>	Schwarz-Erle
		<i>Berberis vulgaris</i>	Gewöhnliche Berberitze	<i>Ulmus minor</i>	Feldulme
		<i>Castanae sativa</i>	Edelkastanie	<i>Larix decidua</i>	Europäische Lärche
		<i>Corylus avellana</i>	Gemeine Hasel	<i>Populus nigra</i>	Schwarz-Pappel
		<i>Crataegus laevigata</i>	Zweigriffeliger Weissdorn	<i>Fagus sylvatica</i>	Rotbuche
		<i>Crat. monogyna</i>	Eingriffeliger Weissdorn		
		<i>Hipp. Rhamnoides</i>	Sanddorn		
		<i>Juglans regia</i>	Walnuss Baum		
		<i>Juniperus com.</i>	Gemeiner Wacholder		
		<i>Sorbus aria</i>	Mehlbeere		
		<i>Taxus baccata</i>	Eibe		
		<i>Tilia cordata</i>	Winterlinde		
		<i>Malus sylvestris</i>	Wildapfel		
		<i>Betula pubescens</i>	Moor-Birke		
		<i>Populus alba</i>	Silber-Pappel		

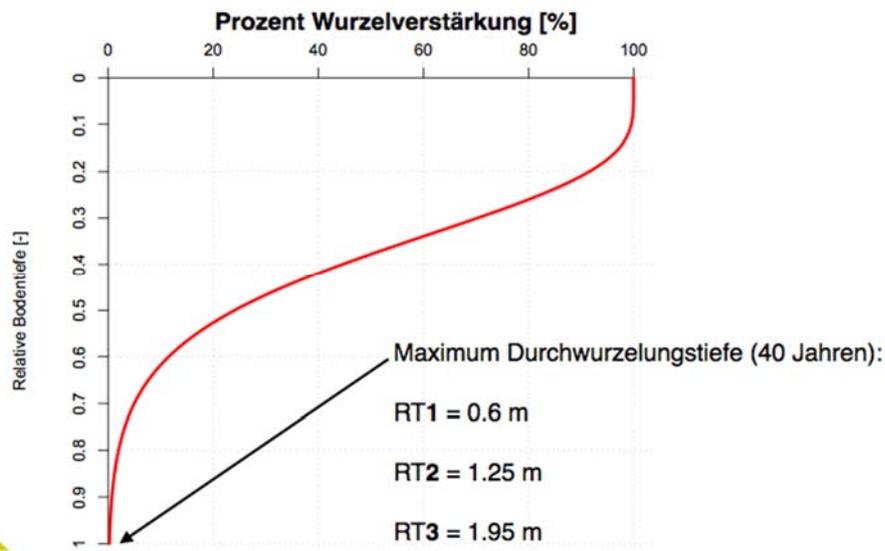


Abbildung 73 Grafik der Abnahme der Wurzelverstärkung als Funktion der Bodentiefe. Modifiziert nach Vergani et al. (2014). Der absolute Wert in Meter der relativen Bodentiefe ändert je nach Wurzeltyp (RT). Dargestellt sind die Werte der maximalen Wurzelstiefe je nach Wurzelstiefe bei einem Alter von 40 Jahren (RT1=0.6 m, RT2= 1.25, RT3=1.95); Daten aus Glenn (2005).

Es wurde gezeigt dass der Beitrag der Wurzelverstärkung von zwei überlappenden Wurzelsystemen summiert werden darf (Giadrossich et al., 2013). Diese Bedingung erlaubt die Schätzung der lateralen Wurzelverstärkung auf Bestandsebene angenommen, als den minimalen Wert der Verstärkung, berechnet im Zwischenkronenbereich (Hälfte des durchschnittlichen Abstands der Bäume bei einem Bestand; Beispiel: 100 Bäume pro Hektar entsprechen ein Baum pro 100 m², was einen durchschnittlichen Abstand von 11 m zwischen den Bäumen ergibt; $2 \cdot \sqrt{100/3.14}$). Dieser Ansatz schätzt die Wurzelverstärkung (lateral und basal) aufgrund der Entwicklung der Dimensionen der Pflanzen. Diese Informationen erlauben eine nachvollziehbare Schätzung des Beitrags der Wurzelverstärkung zur Stabilität eines Hanges durch basale und laterale Wirkungen. Abbildung 74 zeigt ein Beispiel der Berechnung der Entwicklung der lateralen Wurzelverstärkung für einen ingenieurbologisch behandelten Hang mit unterschiedlicher Pflanzdichte (2x2 m, 3x3 m, 5x5 m). Dieses Beispiel zeigt, dass die Wirkung der Wurzelverstärkung erst nach mindestens 30-40 Jahren bedeutend wird und dass die Bestockungsdichte einen grossen Einfluss auf die Intensität der Wurzelverstärkung auf Bestandsebene hat. Ab einem bestimmten Zeitpunkt muss der Effekt von Unterhaltmassnahmen berücksichtigt werden. Diese Massnahmen fliessen progressiv in das Konzept der Schutzwaldpflege ein, welche die Empfehlungen der Richtlinie NaiS (Nachhaltigkeit im Schutzwald) folgen. Die Umsetzung dieser Richtlinie auf ingenieurbologisch behandelten Hänge findet oft in der biologischen Rationalisierung einen effizienten Ansatz (Ammann, 2004).

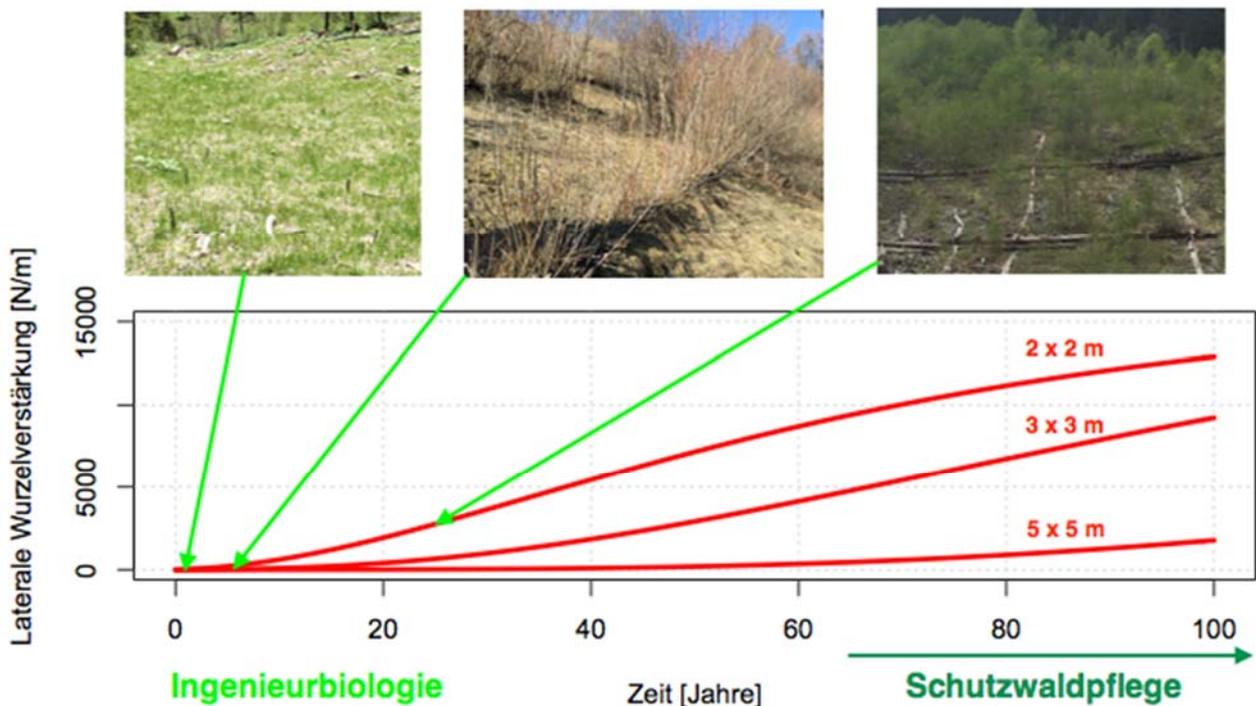


Abbildung 74 Grafik der zeitlichen Entwicklung der lateralen Wurzelverstärkung als Funktion des Alters und des Abstandes zwischen den gepflanzten Stecklingen/Pflanzen. Die Darstellung berücksichtigt den eventuellen Effekt von nötiger Durchforstung nicht, welchen es mit zunehmendem Alter geben könnte.

Die Lücke der mechanischen Wirkung der Wurzeln in den ersten Jahren wird oft kompensiert durch den Einsatz von temporären, technischen Maßnahmen wie Holzkasten und Hangrosten. Die Lebensdauer solcher Strukturen hängt von zahlreichen Faktoren ab. Böll et al. (1999) haben diese Faktoren detailliert diskutiert und gezeigt, dass die Lebensdauer der Holzkonstruktionen stark von Feuchtzustand des Standorts (anaerob versus wechselfeuchte Bedingungen) abhängig ist. Dabei spielt die Art der abbauenden Mikroorganismen und die Holzarten eine wichtige Rolle. Obwohl die Lebensdauer der Holzkonstruktionen je nach Kombination der erwähnten Faktoren sehr unterschiedlich sein kann, liegt dieser Zeitraum bei einem pessimistischen Szenario in der Größenordnung von 20 bis 40 Jahren. Es muss bemerkt werden, dass unter anaeroben Bedingungen solche Strukturen in optimalem Zustand auch nach mehr als 100 Jahren dokumentiert wurden. Abbildung 75 zeigt die Resultate der Wirksamkeitsanalyse von Holzbachsperrern in Funktion deren Alters; diese Daten geben einen guten Hinweis zum plausiblen Ablauf der Wirksamkeit von Holzkonstruktionen. Dieser Verlauf kann mit einer Überlebensfunktion simuliert werden (Beispiel einer Überlebensfunktion in Schwarz et al., 2013). Die Stützfunktion eines Hangrosts kann als maximale Spitzenbelastung der Schwellenhölzer der Gitter quantifiziert werden. Dabei spielen die Materialeigenschaften des Holzes, die Dimensionen der Schwellenhölzer und die Gitterlänge eine Rolle. Abbildung 76 zeigt ein Beispiel der Berechnung des Zusammenwirkens von Holzkonstruktionen und Wurzelverstärkung im Verlauf der Zeit nach der Instandsetzung einer Maßnahme.

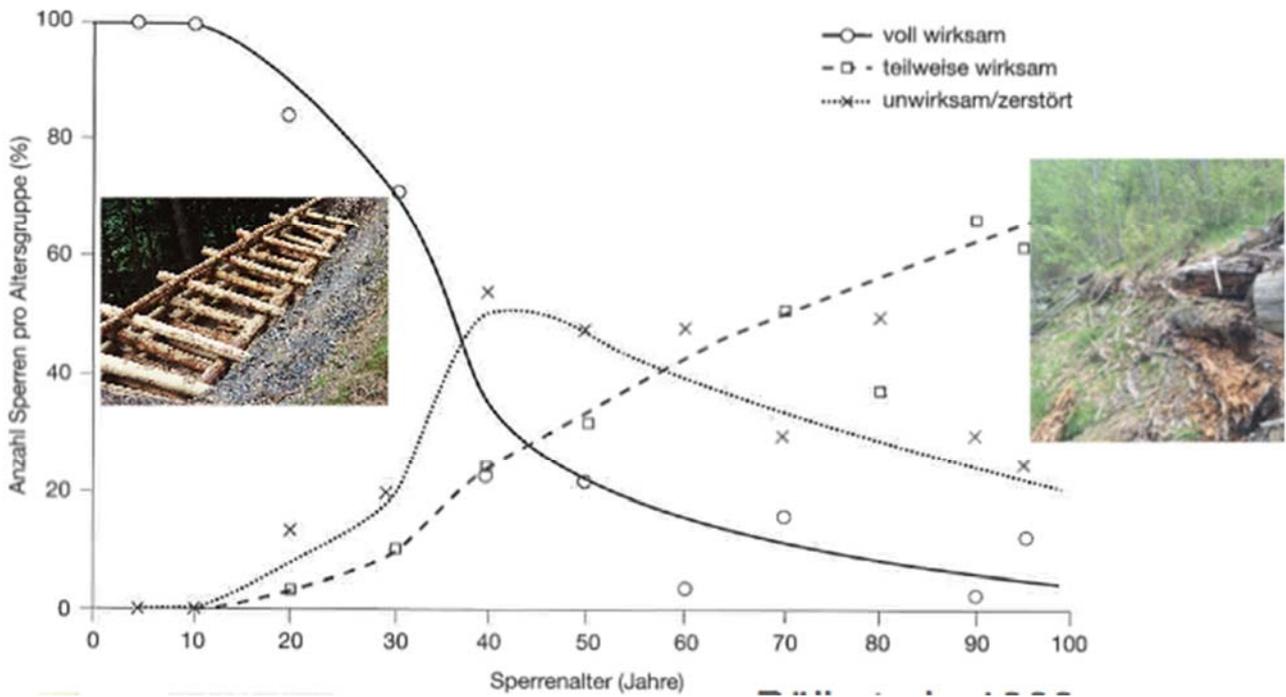


Abbildung 75 Grafik der Überlebungsfunktion pro Holzsperrgruppe als Funktion des Alters. Modifiziert nach Böll et al. (1999).

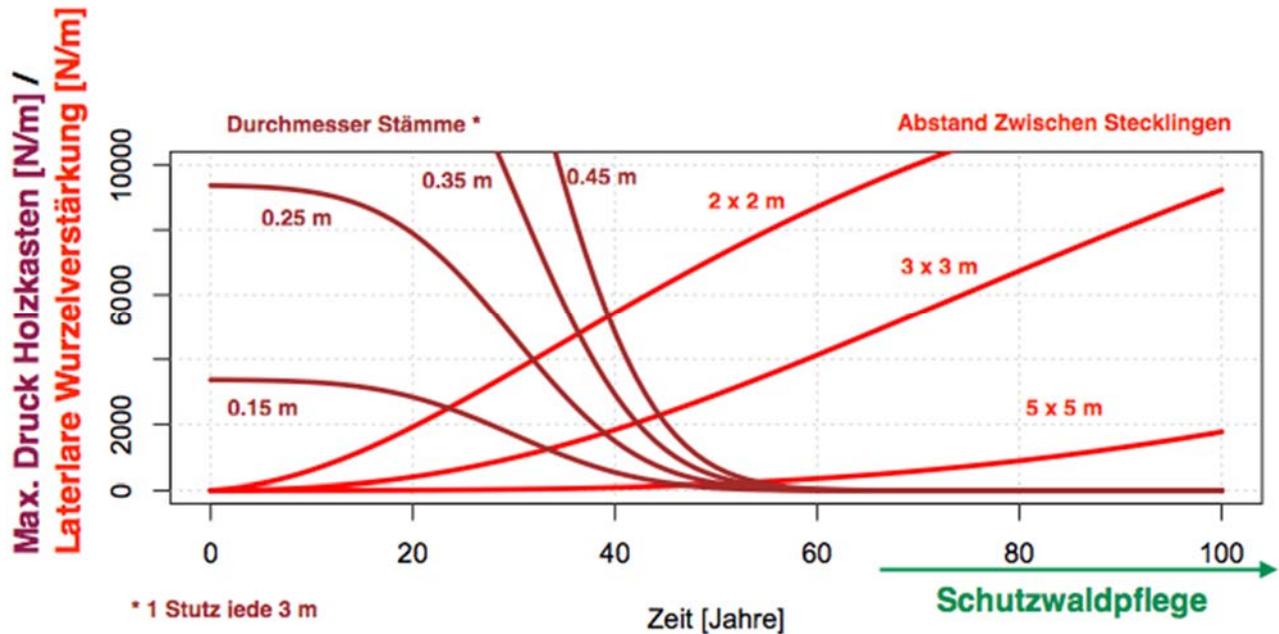


Abbildung 76 Kombinierte Darstellung der mechanischen Wirkung von Holzkonstruktionen (in diesem Fall Hangrost) und laterale Wurzelverstärkung als Funktion der Zeit.

Abbildung 76 zeigt ein Beispiel der Übergangsphase in der die Wirkung der Holzkonstruktionen rasch abnimmt und die Wirkung der Vegetation zunimmt. In diesem Fall ist die Wirkung der Vegetation mehrmals zu erkennen (Aggregatstabilität, Reduktion des konzentrierten Abfluss durch Infiltration und Speicherung, Wurzelverstärkung, biologische Aktivität des Bodens). Je nachdem, brauchen solche Maßnahmen regelmäßigen Unterhalt, welcher im Lauf der Zeit fließend in Schutzwaldpflege übergeht. Abbildung 77 zeigt das Beispiel eines Waldbestandes, welcher sich nach einer ingenieurbiologischen Maßnahme circa 35 Jahre entwickelt hat. Der Bestand wurde durchforstet um die Baumartenmischung zu steuern und die Bestandesstruktur zu verbessern.



Abbildung 77 Beispiel eines ingenieurbioologisch behandelten Hanges nach circa 35 Jahren (Patenjarüfe, Arieschbach.2015). Sichtbar ist die Zerlegung-/Abbau-stadium von Holzkonstruktionen (Links) und die Entwicklung der Vegetation zum Jungwald.

Die Richtlinie „Nachhaltigkeit im Schutzwald“ (NaiS, Frehner et al., 2005) ist eine wichtige Grundlage für die Betrachtung der waldbaulichen Aspekte in der Planung von Schutzwaldpflege. Rezente Studien bieten, komplementär zu NaiS, quantitative Ansätze um die Wirkung der Schutzwaldpflege in Bezug auf Rutschprozesse zu Analysieren. Das Tool SlideforNET (<http://www.ecorisq.org/slidefor-net-en>) berechnet die laterale und basale Wurzelverstärkung auf Grund von Waldbestand-Charakteristika wie Baumartenmischung, durchschnittliche BHD und Stammdichte pro Hektar. Die geschätzten Werte der Wurzelverstärkung werden in Hangstabilitätsberechnungen von potenziellen, flachgründigen Rutschungen implementiert und damit die Schutzwirkung des Waldes quantifiziert nach der Wahrscheinlichkeit das die Wurzelverstärkung der Anzahl der Rutschungen mit unterschiedlichen Dimensionen reduziert werden kann. Die Abbildung 78 und Abbildung 79 zeigen die Anwendung dieses Tools anhand eines Beispiels im Kanton Bern in welchem die Schutzwirkung des Waldes bei unterschiedlichen Profilen des Waldbestands verglichen wurde: „Ist Zustand,“ „Optimal Profil nach NaiS“ und „Minimum Anzahl Bäume pro Hektar“ welche eine minimale Wurzelverstärkung garantieren. Letzteres Szenario würde die Situation nach einem Angriff darstellen, welcher nach der Hangstabilitätsbetrachtung noch erlaubt wäre. Je nach Situation, des Tools zeigt es auch wo die Grenzen der Wurzelverstärkung für den Schutz gegen flachgründige Rutschungen liegen. Weitere Details können in Schwarz et al. (2014a) gefunden werden.

SlideForNet

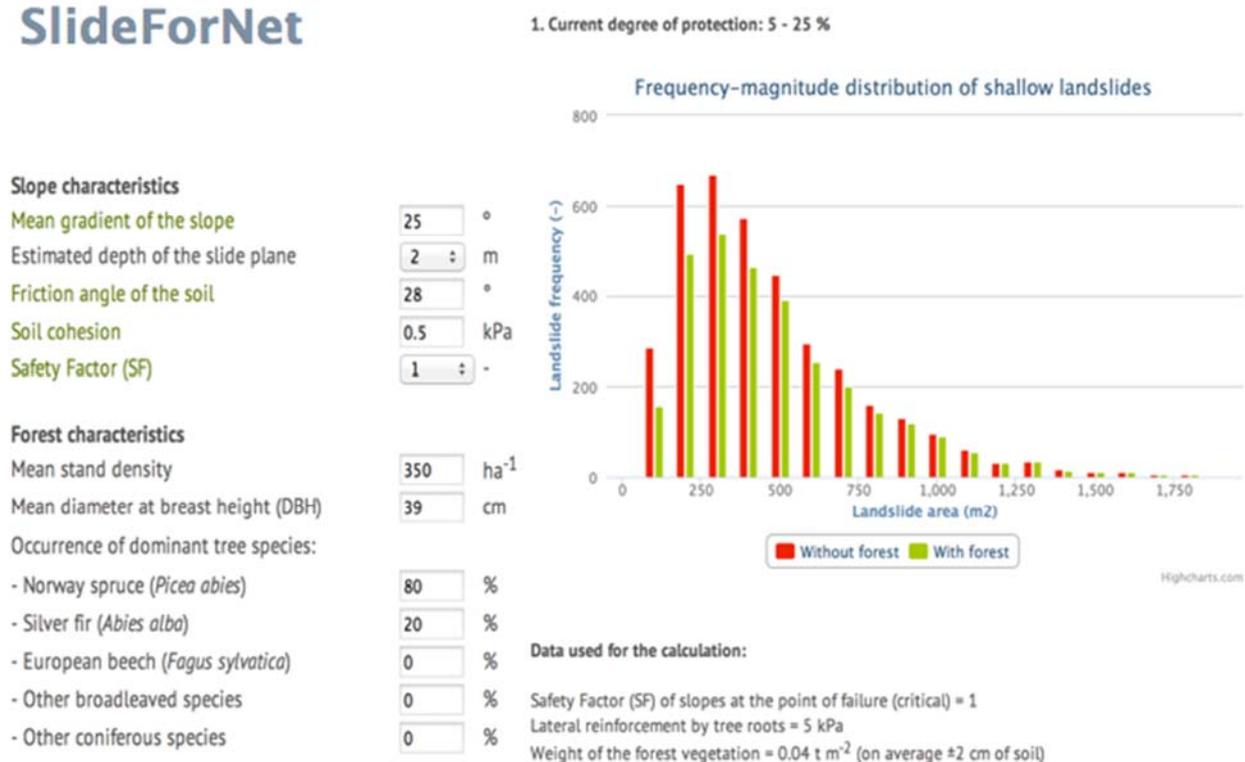


Abbildung 78 Interface der Applikation „SlideForNet“ (EcorisQ, 2013) mit Liste der Eingangsparameter (Links) und Darstellung der Resultate (Rechts).



SlideForNet

“Honegg” bei Schangnau

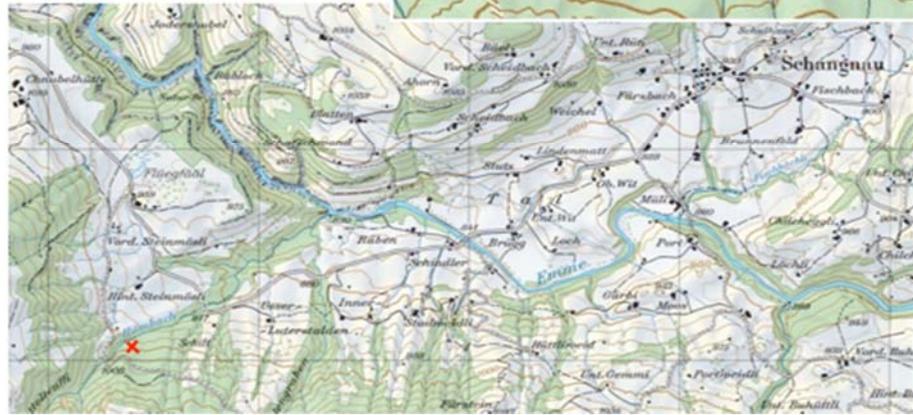
Gründigkeit: **1.5 m**
 Hangneigung: **25°**
 Boden: Toniger Sand mit viel Feinanteil ($\phi=25$ $c=0.5$)
 Waldgesellschaft:
 18, Waldschwingel-Tannen-Buchenwald



“ist Zustand”: **Bu 0%, Ta 30%, FI 70%**;

Mininal Profil (NaiS):
 Bu 30-80%,
 Ta 20-60%,
 FI 0-30%;
 Optimal Profil (NaiS):
 Bu 40-60%,
 Ta 30-50%,
 FI 0-20%;

Anzahl Stämme:
350/ha;
 Mittlerer BHD:
38.91 cm;



Slope characteristics

Mean gradient of the slope
 Estimated depth of the slide plane
 Friction angle of the soil
 Soil cohesion
 Safety Factor (SF)

25 *
 1.5 ± m
 25 *
 0.5 kPa
 1 ±

Slope characteristics

Mean gradient of the slope
 Estimated depth of the slide plane
 Friction angle of the soil
 Soil cohesion
 Safety Factor (SF)

25 *
 1.5 ± m
 25 *
 0.5 kPa
 1 ±

Slope characteristics

Mean gradient of the slope
 Estimated depth of the slide plane
 Friction angle of the soil
 Soil cohesion
 Safety Factor (SF)

25 *
 1.5 ± m
 25 *
 0.5 kPa
 1 ±

Forest characteristics

Mean stand density
 Mean diameter at breast height (DBH)
 Occurrence of dominant tree species:
 - Norway spruce (*Picea abies*)
 - Silver fir (*Abies alba*)
 - European beech (*Fagus sylvatica*)
 - Other broadleaved species
 - Other coniferous species

350 ha⁻¹
 38.91 cm
 70 %
 30 %
 0 %
 0 %
 0 %

Forest characteristics

Mean stand density
 Mean diameter at breast height (DBH)
 Occurrence of dominant tree species:
 - Norway spruce (*Picea abies*)
 - Silver fir (*Abies alba*)
 - European beech (*Fagus sylvatica*)
 - Other broadleaved species
 - Other coniferous species

350 ha⁻¹
 38.91 cm
 0 %
 40 %
 60 %
 0 %
 0 %

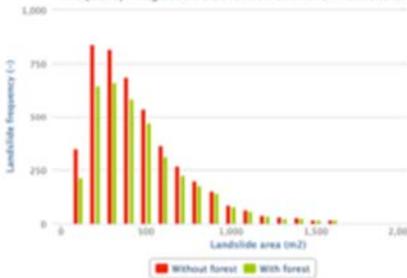
Forest characteristics

Mean stand density
 Mean diameter at breast height (DBH)
 Occurrence of dominant tree species:
 - Norway spruce (*Picea abies*)
 - Silver fir (*Abies alba*)
 - European beech (*Fagus sylvatica*)
 - Other broadleaved species
 - Other coniferous species

70 ha⁻¹
 38.91 cm
 0 %
 40 %
 60 %
 0 %
 0 %

1. Current degree of protection: **5 - 25 %**

Frequency-magnitude distribution of shallow landslides

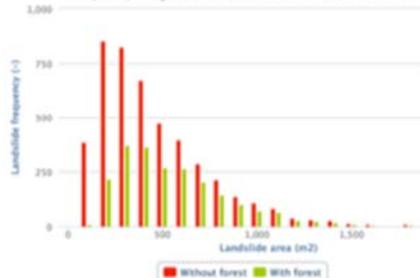


Data used for the calculation:

Safety Factor (SF) of slopes at the Lateral reinforcement by tree roots = **5 kPa** (critical) = 1
 Weight of the forest vegetation = **5 kPa** (average #2 cm of soil)

1. Current degree of protection: **50 - 75 %**

Frequency-magnitude distribution of shallow landslides

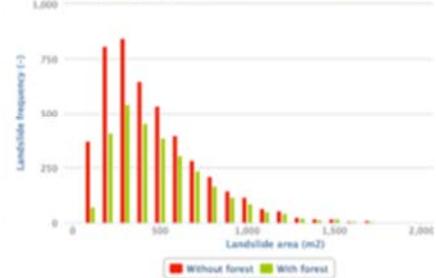


Data used for the calculation:

Safety Factor (SF) of slopes at the Lateral reinforcement by tree roots = **15 kPa** (critical) = 1
 Weight of the forest vegetation = **15 kPa** (average #3 cm of soil)

1. Current degree of protection: **75 - 90 %**

Frequency-magnitude distribution of shallow landslides



Data used for the calculation:

Safety Factor (SF) of slopes at the Lateral reinforcement by tree roots = **10 kPa** (critical) = 1
 Weight of the forest vegetation = **10 kPa** (average #3 cm of soil)

Abbildung 79 Beispiel der Anwendung von SlideForNet® für eine Fallstudie in Kt. Bern. Dabei wurden die Resultate von drei Szenarien verglichen („ist Zustand“, „Profil minimal“ nach NaiS, „Profil optimal“ nach NaiS).



Quellen

- AGN, 2004: Gefahreinstufung Rutschungen. Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren AGN. Arbeitsbericht zu Handen des BWG. Bern (download www.sfig-gsgi.ch).
- Ammann M., 2014. Grundlageninformationen zur Realisierung von Querungsbauwerken, in Tagungsdokumentation ‚Waldstrassen und Gerinnequerungen‘. fobatec, Maienfeld, 2014.
- Ammann, P.L., 2004. Untersuchung der natürlichen Entwicklungsdynamik in Jungwaldbestände biologische Rationalisierung der Waldbaulichen Produktion bei Fichte, Esche, berghohen und Buche. Dissertation ETH, E-collection: eth-27834-02.
- Böll A., 1997. Wildbach- und Hangverbau. Bericht Eidgenössische Forschungsanstalt Wald Schnee und Landschaft, Birmensdorf, 123S.
- Böll A., Gerber W., Graf F. und Rickli C., 1999. Holzkonstruktionen im Wildbach-, Hang- und Runsenverbau. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald Schnee und Landschaft, 60S.
- Bolliger D., Keusen H.R., Rovina H., Wildberger A., Wyss R., 2004. Gefahreinstufung Rutschungen i.w.S. - Permanente Rutschungen, spontane Rutschungen und Hangmuren (Entwurf), Bundesamt für Wasser und Geologie. Bern und Zollikofen, 44S.
- Florineth F., 2004. Pflanzen statt Beton: Handbuch zur Ingenieurbiologie und Vegetationstechnik. Patzer Verlag, 272S.
- Frehner M., Wasser B., Schwitter R., 2005. Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald: Wegleitung für Pflegemassnahmen in Walder mit Schutzfunktion. Bundesamt für Umwelt, Bern, 564S.
- Giadrossich F., Schwarz M., Cohen D., Preti F. und Or D., 2013. Mechanical interactions between neighbouring roots during pullout tests, Plant and Soil, DOI 10.1007/s11104-012-1475-1.
- Giadrossich F., Schwarz M., Pirastru M. und Niedda M., 2014. Stabilization's mechanisms of hill-slopes due to root reinforcement. Quaderni di idronomia montana 31, 353-362.
- Glenz C., 2005. Process-based, spatially-explicit modelling of riparian forest dynamics in Central Europe: tool for decision-making in river restoration. Dissertation EPFL, doi:10.5075/epfl-thesis-3223.
- Gray D. und Sotir, R, 1996. Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization, John Wiley and Sons, NY, 369S.
- Gruner U., Wyss R., 2009. Anleitung zur Analyse von Rutschungen. In Swiss Bulletin für angewandte Geologie Vol 14/1_2. 2009. Bern, 4S.
- Lang H-J., Huder J., Ammann P., Puzrin A.M., 2010. Bodenmechanik und Grundbau, Springer, Heidelberg, 336S.
- Lateltin O., Tripet J.-P. und Bollinger D., 1997. Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten, EDMZ Bern, 42S.
- Lu N., Godt J.-W. und Wu D., 2010. A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil. Water Resources Research, VOL. 46, W05515, doi:10.1029/2009WR008646.
- Krummenacher B., Tobler D., 2009. Teil B. Anwendung des Risikokonzepts: Spontane Rutschung / Hangmuren, PLANAT und BAFU, Bern, 32S.
- Mattli J., 2014. Quantifizierung der Wurzelverstärkung im Schutzwald. Bachelor Thesis HAFL-BFH, 79S.
- Parriaux, A., Bonnard C. und Tacher L., 2010. Glissements de terrain: hydrogéologie et techniques d'assainissement par drainage. Guide pratique. Office fédéral de l'environnement, Berne. Connaissance de l'environnement n° 1023: 128S.
- Patt H., Gonsowski P., 2010. Wasserbau. Grundlagen, Gestaltung von wasserbaulichen Bauwerken und Anlagen, Springer, Heidelberg, 410S.
- PLANAT 2015: Erdrutsch, <http://www.planat.ch/de/wissen/rutschung-und-felssturz/erdrutsch/> (Stand 28.5.15)
- Rüegger R., 2014. Entwurf und Konstruktion in der Geotechnik, Vorlesungsteil Verankerungen, ETH-Skript, St. Gallen, 178S.
- Sauli G., Cornelini P. und Preti F., 2005. Manuale d'ingegneria naturalistica. Regione Lazio, Roma, 192S.

Schwarz M., Cohen D. und Or D., 2012a. Spatial characterization of root reinforcement at stand scale: theory and case study, *Geomorphology*, 171: 190-200.

Schwarz M., Thormann J.-J., Zürcher K. und Feller K., 2012b. Quantifying root reinforcement in protection forests: implications for slope stability and forest management. 12th Congress Interpraevent-Grenoble, France. 791-802.

Schwarz M., Giadrossich F. und Cohen D., 2013. Modeling root reinforcement using a root-failure Weibull survival function, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 4367-4377, doi:10.5194/hess-17-4367-2013.

Schwarz M., Dorren L. und Thormann J.-J., 2014a. SLIDEFORNET: a web tool for assessing the effect of root reinforcement on shallow landslides. Code: F04. International Conference Analysis and Management of Changing Risks for Natural Hazards, 18-19 November 2014 I Padua, Italy.

Schwarz M., Mattli J., Dorren L., Hunziker G., Loup B., Hagen K., Mazzorana B., Rickli C., Bebi P., Wohlweind S., Huwiler A. und Vacchiano G., 2014b. „Best Practice“ Methoden zur Gefahrenbeurteilung für flachgründige Rutschungen - Ein alpiner Vergleich. *Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz*, Villach, 78(174) : 223-231.

Sidle R. und Okay H., 2008. Landslides - Processes, Prediction, and Land Use. AGU Water Resources Monograph 18, 312S.

Spreafico M, Weingartner R, Barben M, Ryser A, 2003. Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten, Praxishilfe, Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern, 119S.

Vergani C., Schwarz M., Cohen D., Thormann J.-J. und Bischetti G.B., 2014. Effects of root tensile force and diameter distribution variability on root reinforcement in the Swiss and Italian Alps. *Canadian Journal of Forest Research*. DOI: 10.1139/cjfr-2014-0095.

Zeh H., 2010. Ingenieurbiologische Bauweisen im naturnahen Wasserbau. Praxishilfe. *Umwelt-Wissen* Nr. 1004. Bundesamt für Umwelt, Bern. 59 S.

Zeller J., Trümpler J., 1984. Rutschungsentwässerungen, EAFV Birmensdorf, Teufen AR, 276S.

Normen / Standards

SIA Normen:	261 Einwirkungen auf Tragwerke 267 Geotechnik 267/1 Geotechnik – Ergänzende Festlegungen
SN Normen (VSS):	640 355 Drainage, Projektierung 640 383a Stützbauwerke, Konzeption, Projektierung und Ausführung
Normpositionenkataloge:	164 Verankerungen und Nagelwände 211 Erdbau 237 Kanalisationen und Entwässerungen

Herstellerinformationen

Jansen AG, Technisches Handbuch Entwässerungssysteme

Geobrugg, Tecco System3 und Spider

Cubus, 2005. Larix-5, http://www.cubus-software.com/Guests/Produkte/Larix/d_main.html (Stand 28.5.15)

Verband Kunststoffrohre und Rohrleitungsteile VKR, 2015. Richtlinie drucklos betriebene Rohrleitungen 03



Anhang

Stürme zur Ereignisanalyse

Ereigniskataster Naturgefahren	Grunddaten	Blatt 1/4
<input type="checkbox"/> Felder (MAXO-Code): M = Messwert, Feststellung A = Annahme, Schätzung X = Unklar, noch zu erheben O = nicht bestimmbar		
Prozesstyp <input type="radio"/> Lawine <input type="radio"/> Sturz <input type="radio"/> Rutschung <input type="radio"/> Wasser / Murgang		
Basisinformation		
Name	Nummer / Code	Weitere betroffene Gemeinden? Name
Gemeinde:	<input type="text"/>
Gewässer: GEWISS-	<input type="text"/>
Forstkreis:	<input type="text"/>
Kantonsinterne Gebiets-einteilung:	<input type="text"/>
Name spez. Prozessraum:		
<input type="radio"/> Einzelereignis Datum: <input type="text"/> . <input type="text"/> . <input type="text"/> Zeitpunkt: <input type="text"/> . <input type="text"/> Dauer: <input type="text"/> d <input type="text"/> h <input type="text"/> min		
<input type="radio"/> Wiederkehrendes Ereignis <input type="radio"/> täglich <input type="radio"/> wöchentlich <input type="radio"/> monatlich von Datum: <input type="text"/> . <input type="text"/> . <input type="text"/> bis Datum: <input type="text"/> . <input type="text"/> . <input type="text"/>		
Oberster Punkt des Anriss-/Ausbruchsbereiches: X / Y = <input type="text"/> / <input type="text"/> Z = <input type="text"/> [m ü. M.] Koordinaten des vordersten Ablagerungsrandes: X / Y = <input type="text"/> / <input type="text"/> Z = <input type="text"/> [m ü. M.] Erhebungsdatum: <input type="text"/> . <input type="text"/> . <input type="text"/> X / Y = <input type="text"/> / <input type="text"/>		
Erhebung durch (Name, Adresse, Tel.):		
Schäden		
Mensch / Tiere		
Personen	# Tote	# Verletzte
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Tiere	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Sachwerte		
Wohnhäuser	# zerstört	# beschädigt
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Industrie, Gewerbe, Hotel	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Landwirtschaftl. Ökonomiegebäude	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Öffentliche Gebäude und Infrastruktur	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Schutzbauten	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Andere (Beschreibung in Memo)	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Verbindungen / Infrastruktur		
Nationalstrassen	verschüttet [m]	Unterbruch [Std.]
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Hauptstrassen	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Übrige Strassen	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Bahnlinien	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Transportanlagen, Masten	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Leitungen	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Andere (Beschreibung in Memo)	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Wald / Landwirtschaft		
Wald	betroff. Fläche [a]	Schadholzkub. [m³]
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Landwirtschaftliche Nutzfläche	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Andere (Beschreibung in Memo)	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
StorMe 2.0 Kantonsinterne Nummer: <input type="text"/> Ereigniskatastemummer: <input type="text"/>		



Schäden (Fortsetz.)

Memo (Beschreibung Schadenbild):

- (1) Räumungsarbeiten und –kosten, bewegte Kubaturen
- (2) Aufteilung Schadensumme: Anteile privat / öffentlich
- (3) Erstellte Verkehrsumleitungen
- (4) Weitere
- (5) Vorwarnungen publiziert
- (6) Veranlasste Sofortmassnahmen

Raumplanung

Konflikt mit den momentan rechtsgültigen Nutzungs- und Gefahrenzonen?

Betroffene Zonen? (Bau-, Camping-, Abbau-, Gefahrenzone, etc.):

Schutzbauten

- Im Anriss-/Ausbruchbereich vorh.? Nr. Schutzbautenkataster:
- Im Transitbereich vorhanden? Nr. Schutzbautenkataster:
- Im Ablagerungsbereich vorhanden? Nr. Schutzbautenkataster:

Memo (Beschreibung Schutztauglichkeit und Massnahmen):

- (1) Art / Typ der Schutzbauten
- (2) Zustand der Bauten, Beurteilung der Schutztauglichkeit
- (3) Verbleibende / neue Gefahren
- (4) Kosten Reparaturen / Ergänzungsbauten
- (5) Weitere

Dokumentation

Name, Adresse Dokumentationsstelle / Bezeichnung, Nummer der Studie, Bilder, etc.

- Notiz, Studie, Gutachten, Berechnungen
- Zeitungen, Literatur, Historische Quellen
- Fotodokumentation
- Orthofotos, Luftbilder
- Video, Film
- Meteodaten

Kartierung

Prozessraum kartiert?

Methodik

Anriss-/Ausbruchsbereich:

Ablagerungsbereich:

- | | |
|---|---|
| <input type="checkbox"/> An Ort und Stelle | <input type="checkbox"/> An Ort und Stelle |
| <input type="checkbox"/> Luftbilder, Fotos | <input type="checkbox"/> Luftbilder, Fotos |
| <input type="checkbox"/> Fernbeobachtung (vom Gegenhang) | <input type="checkbox"/> Fernbeobachtung (vom Gegenhang) |
| <input type="checkbox"/> Andere bzw. retrospektive Erhebung | <input type="checkbox"/> Andere bzw. retrospektive Erhebung |

StorMe 2.0

Kantonsinterne Nummer:

Ereigniskatasternummer:



Ereigniskataster Naturgefahren

Rutschung

Blatt 3/4

Felder (MAXO-Code): M = Messwert, Feststellung A = Annahme, Schätzung X = Unklar, noch zu erheben O = nicht bestimmbar

Prozessart

Rutschung Hangmure Absenkung und Einsturz

Weitere beteiligte Prozesse (von untergeordneter Bedeutung):

Überschwemmung Murgang (in Gerinne) Erosion (Ufer, Böschung) Andere (Beschreibung in Memo)
 Übersarung Rutschung Sturz

Ursachen Meteo

Gewitter

Dauer [Std.]
 Niederschlags-
menge [mm]

Dauerregen

Dauer [Std.]
 Niederschlags-
menge [mm]

Schneeschmelze Nicht bestimmbar

Auslösung

Qualifikation Auslösung:

Natürlich Künstlich, aufgrund menschlicher Tätigkeit
 Durch Gerinneerosion Andere (Beschreibung in Memo)

Ausbruch- / Ablösungsbereich

Anrissmächtigkeit: [m]

Absenktiefe: [m]

Rutschkörper:
Einsturzmasse: Fels
 Lockermaterial

Anrissbreite: [m]

Anrissfläche:
Einsturzfläche: [m²]

Gleitfläche: auf Fels
 im Lockermaterial

Transit- / Ablagerungsbereich

Ablagerungsmächtigkeit im Staubereich: [m]

Bewegte Kubatur: [m³]

Tiefe der Gleitfläche:
(Gründigkeit) 0 – 2 m (flachgründig)
 2 – 10 m (mittelgründig)
 > 10 m (tiefgründig)

Übergang der Rutschung in Hangmure (Rüfe)?

Geschwindigkeit: Aktiv (> 10 cm/a)
 Langsam (2 – 10 cm/a)
 Substabil, (< 2 cm/a)
sehr langsam

Ablagerung im Gerinne?

Wenn JA, Gerinnerückstau?

Memo (Ereignis-Beschreibung zu den Stichworten):

- (1) Wasseraustritte, Allgemeiner Prozessmechanismus
- (2) Falls künstliche Auslösung: Nähere Beschreibung der auslösenden Prozesse
- (3) Hydrologische Verhältnisse im Einzugsgebiet
- (4) Vorgeschichte (nass, mittel, trocken, Frost)
- (5) Ergänzende Meteorologie (Nullgradgrenze, Niederschläge, Schneeschmelze)
- (6) Vergleich zu früheren Ereignissen, Abschätzung der Schadenwirkung
- (7) Weitere

StorMe 2.0

Kantonsinterne Nummer:

Ereigniskatastemummer:



Ereigniskataster Naturgefahren

Kartierung

Blatt 4/4

Ereignis: Gemeinde: _____ Prozesstyp: _____ Digitalisierung erfolgt?
Kartierung: Massstab 1 : _____ Datum: .. Name, Adresse, Tel.: _____

StorMe 2.0

Kantonsinterne Nummer:

Ereigniskatastemummer:



Econome Bsp



Graubünden - Econome Projekt 10-20-2793 Zusammenfassung

08.03.13, 15:37:30

Steinschlagschutz [REDACTED]

Laufzeit:	12.02.2013 -
Firma:	tur GmbH
Gemeinde:	[REDACTED]
Gebiet:	[REDACTED]

Beteiligte Personen

[REDACTED] - Administrator Kanton

Amt für Wald und Naturgefahren

Telefon [REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED] - Projektleiter

tur GmbH

Telefon [REDACTED]

[REDACTED]

Anrechnerpartner Kanton Graubünden: Graubünden

Anrechnerpartner Gemeinde: [REDACTED]

Projektfortschritt

12.02.13, 14:10	Projekt einrichten	[REDACTED]
12.02.13, 14:14	Projektleiter benachrichtigt	[REDACTED]
22.02.13, 13:41	Systemdefinition	[REDACTED]
22.02.13, 13:41	Gefahrenanalyse	[REDACTED]
22.02.13, 13:41	Objektdefinition im Perimeter	[REDACTED]
22.02.13, 14:08	Konsequenzenanalyse	[REDACTED]
22.02.13, 14:08	Individuelles Risiko	[REDACTED]
08.03.13, 15:38	Massnahme definieren	[REDACTED]
22.02.13, 13:42	Konsequenzenanalyse nach Massnahme	[REDACTED]
22.02.13, 14:09	Individuelles Risiko nach Massnahme	[REDACTED]
22.02.13, 13:42	Kostenwirksamkeit	[REDACTED]

Gefahrenprozesse

Stein-Blockschlag -

Szenario extrem, 1 Jahre

Datei [http://www.econome.admin.ch/doc/GR/10-20-2793/IK_\[REDACTED\]_0.5m3_1j_vM.pdf](http://www.econome.admin.ch/doc/GR/10-20-2793/IK_[REDACTED]_0.5m3_1j_vM.pdf)

Räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit 0.005

Szenario frei, 5 Jahre

Datei [http://www.econome.admin.ch/doc/GR/10-20-2793/IK_\[REDACTED\]_1m3_5j_vM.pdf](http://www.econome.admin.ch/doc/GR/10-20-2793/IK_[REDACTED]_1m3_5j_vM.pdf)

Räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit 0.01

Anstelle vom Szenario extrem werden die Werte des 1-j. E. eingegeben. P(rA) Werte basieren auf den entsprechenden Szenarien.

Szenario 30, 30 Jahre

Datei [http://www.econome.admin.ch/doc/GR/10-20-2793/IK_\[REDACTED\]_3m3_10j_vM.pdf](http://www.econome.admin.ch/doc/GR/10-20-2793/IK_[REDACTED]_3m3_10j_vM.pdf)



Räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit 0.03

Anstelle vom 30j. Ereignis werden die Werte des 10j. E. eingegeben. P(rA) Werte basieren auf den entsprechenden Szenarien.

Massnahmendefinition

Steinschlagverbau [REDACTED]
500 kJ Netze, 563 m, 9 Werkreihen
1000 kJ Netze, 120m, 2 Werkreihen
1500 kJ Netze, 227m, 4 Werkreihen
2000 kJ Netze, 230m, 4 Werkreihen

Investitionskosten	3 500 000 CHF
Jährliche Unterhaltskosten	70 000 CHF/a
Jährliche Betriebskosten	0 CHF/a
Lebensdauer	50 Jahre
Jährliche Kosten	175 000 CHF/a

Ergebnisübersicht

Übersicht Schadenpotenzial	
Schadenpotenzial Anzahl Personen	85.17
Schadenpotenzial Personen (monetarisiert)	425 850 275 CHF
Schadenpotenzial Sachwerte	15 496 100 CHF
Schadenpotenzial Gesamt	441 346 375 CHF

Stein-Blockschlag -

Risiko vor Massnahmen	477 408 CHF/a
Risiko vor Massnahmen (Berechnung mit Basiswerten)	418 458 CHF/a
Nach Massnahme Steinschlagverbau [REDACTED]	0 CHF/a
Nach Massnahme Steinschlagverbau [REDACTED] (Berechnung mit Basiswerten)	0 CHF/a

Risikoreduktion (Nutzen) CHF/a	
Steinschlagverbau [REDACTED]	477 408 CHF/a
Steinschlagverbau [REDACTED] (Berechnung mit Basiswerten)	418 458 CHF/a

Massnahmekosten CHF/a	
Steinschlagverbau [REDACTED]	175 000 CHF/a

Verteilung nach Nutznießern	
RhB	
Steinschlagverbau [REDACTED]	144 573 CHF/a (82,6%)
TBA	
Steinschlagverbau [REDACTED]	30 427 CHF/a (17,4%)
Ohne Nutznießer - Zuweisung	

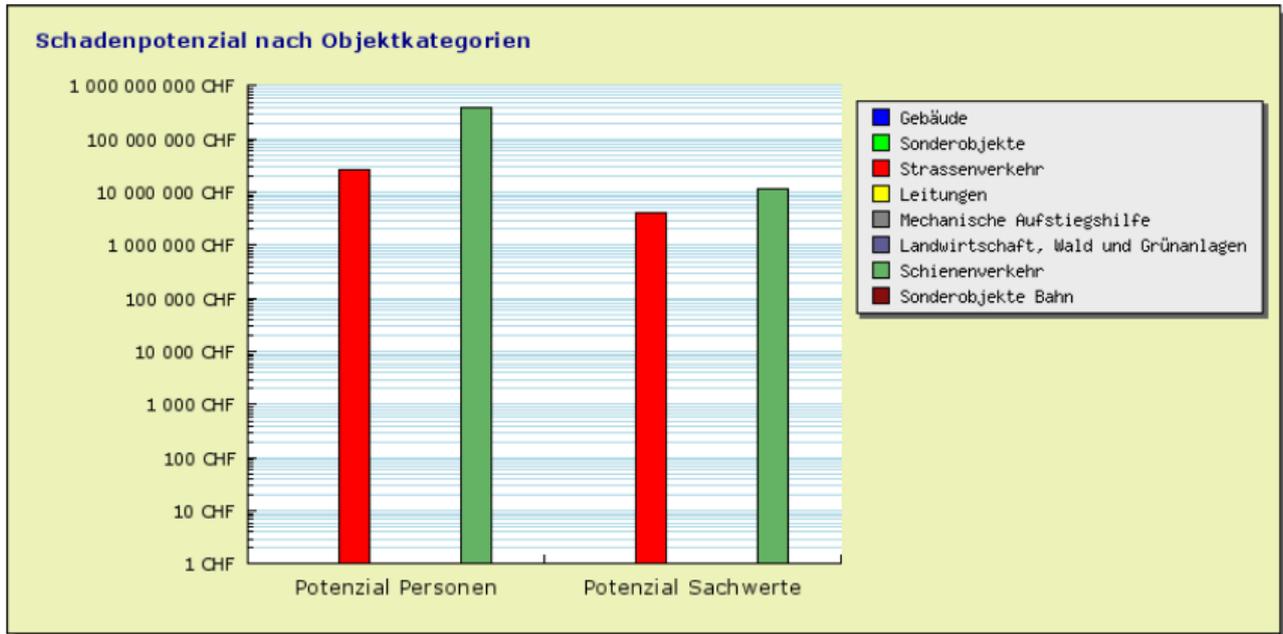
Nutzen/Kosten - Verhältnis	
Steinschlagverbau [REDACTED]	2,7

Steinschlagverbau [REDACTED] (Berechnung mit Basiswerten)	2,4
---	-----

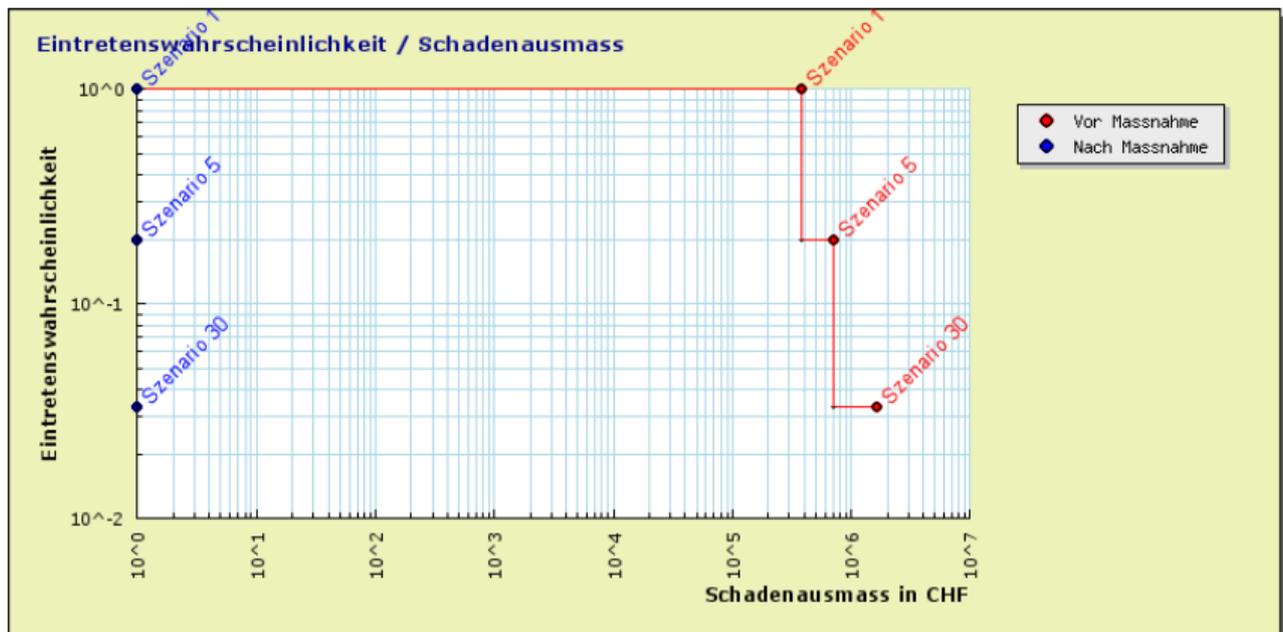
Individuelles Risiko (Anzahl betroffener Objekte)			
Vor Massnahme	1	1	0
Nach Massnahme Steinschlagverbau [REDACTED]	0	0	0



Schadenpotenzial nach Objektkategorien

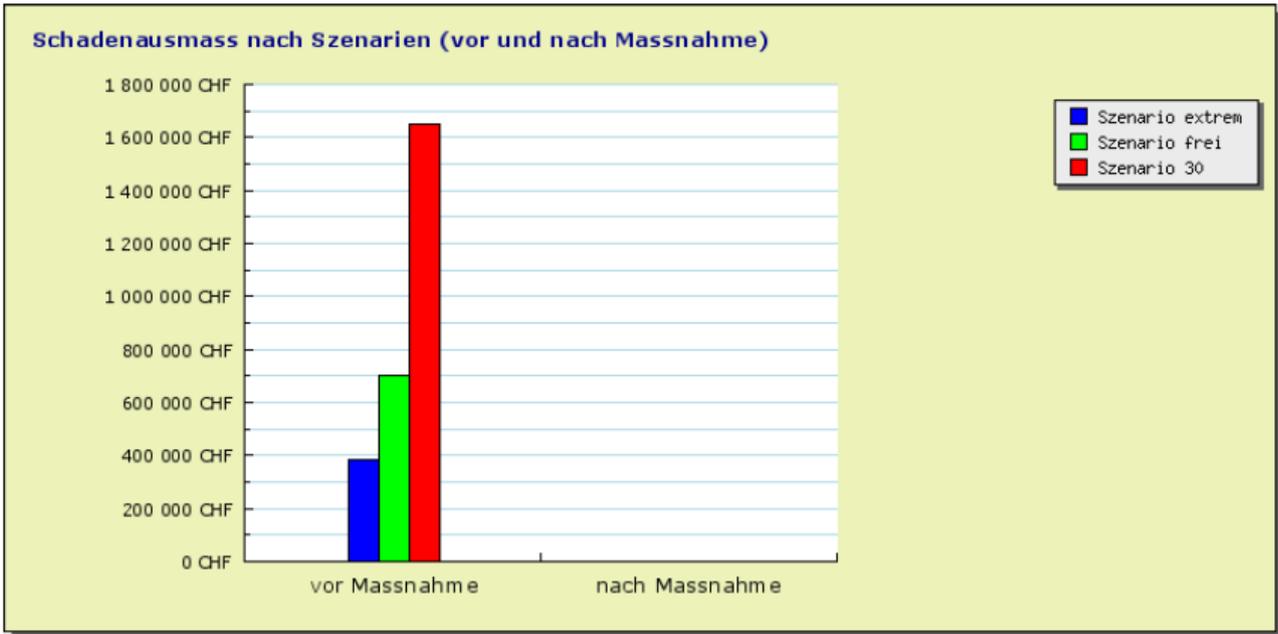


Stein-Blockschlag, -, Steinschlagverbau - Eintretenswahrscheinlichkeit / Schadenausmass





Stein-Blockschlag, ↘ Steinschlagverbau [redacted] - Schadensausmass nach Szenarien



Stein-Blockschlag, ↘ Steinschlagverbau [redacted] - Risiken, Risikoreduktion und Kosten in CHF/Jahr

