

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 152 (2001)

Heft: 1

Artikel: Nachweis von Vegetationswirkungen bei oberflächennahen Bodenbewegungen : Grundlagen eines neuen Ansatzes

Autor: Böll, Albert / Graf, Frank

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1098266>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 01.05.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Nachweis von Vegetationswirkungen bei oberflächennahen Bodenbewegungen – Grundlagen eines neuen Ansatzes

ALBERT BÖLL und FRANK GRAF

Keywords: Soil bioengineering; soil mechanics; shear strength; soil aggregation; erosion; land slides. FDK 116 : 181.351 : 384 : 424

Abstract: Present-day models and characteristic values for the quantification of vegetation effects are evaluated in view of their use in engineering design concepts and stability calculations. The assignment of the vegetation effects to the angle of shearing resistance Φ' is the core of a new approach and its corresponding testing method. Experimental difficulties, resulting from planted soil samples, are avoided by introducing the «virtual density».

Abstract: Vorhandene Modelle und Kennwerte zur Quantifizierung von Vegetationswirkungen werden hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit in ingenieurmässigen Lösungskonzepten und Stabilitätsrechnungen beurteilt. Der neue Ansatz sowie das vorgeschlagene Testverfahren berücksichtigen die Vegetationswirkungen im Scherwinkel Φ' . Versuchstechnische Schwierigkeiten mit vegetationsbehandelten Bodenproben werden durch die Einführung der «virtuellen Dichte» umgangen.

1. Einleitung

Im Zusammenhang mit Naturgefahren ist die Bedeutung intakter Pflanzenbestände, insbesondere von Wäldern, seit alters her erkannt. Um die Schutzfunktionen der Pflanzendecke aufrecht zu erhalten, kam deren Pflege, den Aufforstungen und Bepflanzungen grosse Bedeutung zu. Nicht unerwartet führte die Vernachlässigung der Bestände vielerorts zu teilweise erheblichen Schadenereignissen (LANDOLT 1862, KAISER 1967). Der Stellenwert von Pflanzen beim Schutz gegen Naturgefahren widerspiegelt sich auch in der Tatsache, dass Grundlagen zu Methoden des Lebendverbau (= Ingenieurbio-logie) schon früh schriftlich festgehalten wurden (DUILE 1826, DEMONTZEY 1878). Die damaligen Techniken, insbesondere zur Stabilisierung oberflächennaher Bodenbewegungen, wurden den sich ändernden Bedürfnissen immer wieder angepasst und weiterentwickelt (SCHIECHTL 1973, MORGAN & RICKSON 1995). Im Zusammenhang mit Bodenbewegungen und den entsprechenden technischen und biologischen Überlegungen wird hier von Böden aus bodenmechanischer Sicht, das heisst im Sinne von Lockergestein gesprochen (LANG *et al.* 1996).

Obwohl durch das Aufkommen des Betons vorübergehend in Vergessenheit geraten, sind heute viele Methoden der Ingenieurbio-logie in weiten Kreisen anerkannt. Entsprechend wird ihre Verwendung vielerorts befürwortet und beispielsweise durch Artikel 19 des Waldgesetzes (WAG 1991) zum Teil vorgeschrieben.

Die gesellschaftlichen Veränderungen der letzten Jahre wirken sich zunehmend auch auf die Ingenieurbio-logie aus. Wegen der Sensibilisierung gegenüber der Natur gelten Lebendverbau-Massnahmen nicht mehr vorbehaltlos als natur-nah. Das steigende Bedürfnis nach Sicherheit sowie wirtschaftliche Aspekte verlangen zudem vermehrt konkrete Angaben zu Wirkung und Effizienz der Vegetation. Unter diesen neuen Voraussetzungen lassen sich ingenieurbio-logische und waldbauliche Massnahmen nicht mehr isoliert betrachten. Zukünftige Forschung hat sich vermehrt den spezifischen Funktionen der Pflanzen in einem umfassenden Rahmen zu widmen und weniger einzelnen Techniken. Dabei gilt es in erster Linie, Methoden für den Nachweis der Vegetationswirkungen zu entwickeln. Ein vordringliches Ziel ist es, diese Wirkungen einfließen zu lassen in die heute standardmässigen Verfahren zur Stabilitätsberechnung von Böschungen und Hängen (JANBU 1954), welche auf dem Bruchkriterium von Mohr-Cou-

lomb aufbauen (in LANG *et al.* 1996). Dafür sind die Wirkungen der Vegetation den Scherfestigkeitsparametern zuzuordnen, insbesondere dem Winkel der inneren Reibung (Scherwinkel Φ').

Bei den in der Ingenieurbio-logie verwendeten Berechnungsmethoden, welche das Boden-Pflanzen-System als Stützkörper auffassen oder auf dem Prinzip der «Bewehrten Erde» beruhen (z.B. INGOLD 1982), ist dies nicht der Fall. Deren Einsatzmöglichkeiten sind denn auch stark eingeschränkt und wohl nur für künstlich geschüttete Böschungen geeignet (SCHAARSCHMIDT & KONECNY 1971, SCHUPPENER 1994, SCHUPPENER & HOFFMANN 2000). Der Versuch von WU (1984, 1995), die Vegetationswirkungen als additive Konstante der Kohäsion c' zu interpretieren, hat zwar Vorteile bei der Bestimmung, repräsentiert die Verhältnisse im oberflächennahen Bereich jedoch nicht zutreffend.

Feld- und Laborversuche sowie Berechnungen zeigen, dass durch die Zuordnung der Vegetationswirkungen zum Scherwinkel Φ' eine sehr gute Übereinstimmung mit der natürlichen Situation erzielt werden kann (Böll unveröff. Daten). Dieser Ansatz, welcher gleichzeitig eine elegante Einbindung in vorhandene Berechnungsmethoden erlauben würde, ist in keinem der heute verwendeten Modelle zur Bodenstabilitäts-Analyse realisiert.

Im vorliegenden Aufsatz werden die Grundlagen für diesen neuen Ansatz, welcher die Berücksichtigung der Vegetationswirkungen im Scherwinkel zum Ziel hat, hergeleitet und erläutert. Zudem wird ein Verfahren vorgestellt, das die Prüfung der Hypothesen ermöglicht, welche diesem Ansatz zugrunde liegen. Dazu wird die aktuelle Situation bezüglich der Quantifizierung von Wirkungen der Vegetation bei der Stabilisierung oberflächennaher Bodenbewegungen analysiert sowie deren Einbezug in ingenieurmässige Bemessungs- und Lösungskonzepte geschildert. Anhand der Ingenieurbio-logie werden sowohl die technischen als auch die biologischen Komponenten veranschaulicht.

2. Rahmenbedingungen für die Projektierung von Massnahmen zur Hangstabilisierung

Wie alle Schutzmassnahmen sind auch ingenieurbio-logische Lösungen auf Grund sorgfältiger Untersuchungen und Erhebungen zu planen und projektieren. Diese Arbeiten dienen als

wichtige Entscheidungsgrundlage und beziehen sich auf die massgebenden Prozesse und deren Wechselwirkungen, insbesondere auch auf die Entwicklung der Hangstabilität in Abhängigkeit von der Zeit. Je nach Rahmenbedingungen sind daher ingenieurbio-logische Methoden als alleinige Massnahme durchwegs ausreichend oder aber nur in Kombination mit technischen Verbauungen zulässig. In gewissen Fällen sollten sie hingegen gar nicht in Betracht gezogen werden, wie beispielsweise an Böschungen im unmittelbaren Einflussbereich stark Geschiebe führender Gerinne.

Während für ingenieurbio-logische Massnahmen im Wasserbau einige Grundlagen der Bemessung vorliegen (BWW 1982, FLORINETH 1982, OPLATKA 1998, GERSTGRASER 2000), fehlen entsprechende Informationen im Erdbau weitgehend. Die Verwendung von Pflanzen bei Problemen der Rutschungsstabilität beruht denn auch praktisch vollständig auf empirischem Wissen – über die quantitativen Wirkungen weiss man nach wie vor sehr wenig (*Abbildung 1*). Dies erweist sich insbesondere im Zusammenhang mit Fragen der Sicherheit als entscheidender Nachteil gegenüber klassischen ingenieurmässigen Lösungen.



Abbildung 1: Die Buochserrübi, ein klassisches Beispiel für ingenieurbio-logische Arbeiten¹ (Photo: Kantonsforstamt Nidwalden, etwa 1965).

Figure 1: The «Buochserrübi»: a classic example for soil bio-engineering measures (photo: forestry office of the canton of Nidwalden, approx. 1965).

Die Planung und Projektierung von Schutzmassnahmen zur Geländestabilisierung erfolgt grundsätzlich in mehreren Etappen und auf verschiedenen Ebenen. In einer ersten Phase wird nach möglichen Stabilisierungsmassnahmen gesucht. Danach werden die für die einzelnen Massnahmen relevanten und zur Bemessung erforderlichen Gefährdungsbilder aus detaillierten Prozessanalysen hergeleitet. Anschliessend erfolgt die eigentliche Bemessung und schliesslich der Entscheid für eine Lösung. Je nach Art und Anordnung der Stabilisierungsmassnahmen ergeben sich mit den in der Umgebung stattfindenden Prozessen spezifische Wechselwirkungen (Interaktionen). So stellen sich beispielsweise hinter einer wasserundurchlässigen Stützmauer aus Beton andere Sickerströmungsprozesse ein als bei einem durchlässigen Holzkasten. Die richtige Beurteilung und Berücksichtigung solcher Interaktionen entschei-

det oft über Erfolg oder Misserfolg der Massnahmen. Entsprechend lassen sich Projektierungsarbeiten meistens nicht in scharf getrennten Schritten durchführen, sondern sind im Sinne einer sukzessiven Approximation zu lösen (BÖLL 1997, GERBER 1998, BÖLL *et al.* 1999).

Für jede wirksame Massnahme sind sowohl technische als auch biologische Voraussetzungen erforderlich. Zu letzteren zählen in erster Linie eine den Standortbedingungen angepasste Pflanzenwahl und die Vorbereitung und Entwicklung des Keimbeetes bzw. des Bodens. Es hat sich gezeigt, dass die Pflanzenwurzeln und insbesondere die vergesellschafteten Mykorrhizapilze im Zusammenhang mit dem Aufbau von Bodenstrukturen und der Bodenaggregation wichtige Funktionen übernehmen (GRAF & GERBER 1997, KIEM & KANDELER 1997). Die Bedeutung dieser Boden bildenden Prozesse wird im Hinblick auf die Quantifizierung von Vegetationswirkungen als beträchtlich eingestuft. Die technischen Voraussetzungen sind weitgehend durch die Versagensmechanismen am Hang festgelegt. Zu den wichtigsten Einflussgrössen zählen dabei die Hanggeometrie, der Verlauf der Sickerlinie und die Scherfestigkeit τ_f des Bodenmaterials. Für den Nachweis von Vegetationswirkungen interessiert vor allem die Beeinflussung der Scherfestigkeit durch die Vegetation.

Die Interaktionen zwischen den Stabilisierungsmassnahmen und den destabilisierenden Prozessen sind bei ingenieurbio-logischen Massnahmen in der Regel weniger auffällig als bei technischen Systemen. Wie die *Abbildungen 2* und *5* zeigen, können sie aber ebenfalls zu Misserfolgen führen. Technische Konstruktionen beeinflussen die Prozesse meistens sehr direkt und unmittelbar nach der Erstellung. Durch die Vielfalt der Beziehungen zwischen Standort, Pflanzen und Prozessen sowie durch die komplizierten zeitabhängigen Zusammenhänge sind aber die Interaktionen bei den ingenieurbio-logischen Massnahmen ebenso relevant. Allgemein lässt sich eine Abhängigkeit vom gewählten System feststellen. Dabei sind die Interaktionen bei jenen ingenieurbio-logischen Methoden, die in ihrer Funktion eher technischen Konstruktionen gleichen, meistens ausgeprägter als bei einfachen Begrünungs- und Bepflanzungsmassnahmen. Die Gründe liegen zum Teil in der Stärke des Eingriffs in die vorhandenen Bodenstrukturen und zum Teil in der Wirkungsweise der Systeme. Technische Konstruktionen und verschiedene ingenieurbio-logische Massnahmen, wie Buschlagen und Flechtzäune, verursachen meist schroffe lineare Unterbrechungen des Geländes (*Abbildung 2*; BÖLL & GERBER 1986). Einfache Systeme, bestehend aus Pflanzen und – falls erforderlich – kleintechnischen Massnahmen, ermöglichen einen den lokalen Bedingungen angepassten flächenhaften Schutz (*Abbildung 3*). Sie sind zudem viel eher mit den jeweiligen bodenmechanischen und standortkundlichen Verhältnissen verträglich (BÖLL 1990). Die Verwendung standortfremder Arten und hoher Düngermengen kann jedoch bei diesen Methoden leicht zu kritischen Zuständen führen (*Abbildung 4*; GRABHERR 1978, CERNUSCA 1986). Im übersteilen Gelände ist ein Schutz mit flächenhaft wirkenden technischen Methoden – auch in Kombination mit Pflanzen – auf Dauer meist nur wenig erfolgversprechend. Systeme wie beispielsweise Hangroste (*Abbildung 5*), Netzabdeckungen und dergleichen lassen sich in der Regel den lokalen Unebenheiten der Hänge nur schlecht anpassen. Um die negativen Einflüsse der dabei auftretenden Interaktionen möglichst gering zu halten, sind sehr sorgfältige Geländeanpassungen erforderlich. Es gibt aber auch Fälle, in denen Wechselwirkungen einen günstigen Einfluss auf die Stabilisierung haben. So kann beispielsweise der Oberflächenabfluss durch geschickte Anordnung von Busch- oder Heckenbuschlagen in eine bestimmte gewünschte Richtung abgeleitet werden.

¹ In der Zeit zwischen etwa 1930 und 1960 wurden in diesem steilen und gefährlichen Rensenkessel technische und biologische Stabilisierungsarbeiten ausgeführt. Im Jahre 1981 führten Unwetterereignisse im Hauptgerinne und auf einzelnen Teilflächen zu gewissen Schäden, die durch sofort eingeleitete Massnahmen behoben wurden. In Bezug auf die Sicherheit der Gemeinde Buochs dürfen die Arbeiten als sehr erfolgreich bezeichnet werden.



Abbildung 2: Interaktionen zwischen ingenieurbioologischen Massnahmen und natürlichen Prozessen.²

Figure 2: Interrelationships between soil bioengineering measures and natural processes.

Bei rein technischen Verbauungen sind, abgesehen von Holzkonstruktionen, welche durch holzabbauende Pilze angegriffen werden, biologische Interaktionen in der Regel vernachlässigbar. Bei ingenieurbioologischen Massnahmen können sie dagegen eine entscheidende Rolle spielen. Untersuchungen haben gezeigt, dass beispielsweise Wechselwirkungen zwischen Pflanzen, Mykorrhizapilzen und Böden einen wesentlichen Beitrag zur Bodenaggregation und damit zur Stabilisierung oberflächennaher Bodenschichten leisten (Abbildungen 6, 7; DEGENS *et al.* 1996, GRAF & GERBER 1997, GRAF 1998).

Bei der Projektierung von Massnahmen zur Geländestabilisierung hat man für ingenieurbioologische Systeme relativ gute Grundlagen, was die Rahmenbedingungen, Gefährdungsbilder, Prozessanalysen und Interaktionen betrifft. Die Kenntnisse beruhen auf standorts- und pflanzenkundlichen Über-



Abbildung 3: Wiederbegrünungen mit standortangepasstem Saatgut unter Berücksichtigung der aktuellen Bodenverhältnisse.³

Figure 3: Reclamation method using a site-adapted seed mixture, taking particular consideration of the present soil conditions.



Abbildung 4: Problemzonen beim Versuch, ein Skilift-Trasse zu begrünen.⁴

Figure 4: Failure of reclamation measures within problematic areas of a ski lift track.



Abbildung 5: Anlage eines Hangrostes ohne Berücksichtigung der bodenmechanischen Randbedingungen.⁵

Figure 5: Construction of a wooden slope grid neglecting aspects of soil mechanics.

² Die Erstellung von Buschlagen und ähnlichen Systemen in anstehenden steilen Hängen bewirkt häufig eine Auflockerung des Bodenmaterials und damit eine Destabilisierung der beeinflussten Hangpartie. Im Weiteren kann sich hinter solchen «Kleinstützwerten» Lockermaterial ablagern, was bei starkem Oberflächenabfluss – in Analogie zu vergleichbaren Prozessen in Gerinnen – zu verstärkter Erosion unterhalb der Buschlage führt.

³ Sachgemäss durchgeführte Wiederbegrünungen mit standortangepasstem Saatgut unter Berücksichtigung der aktuellen Bodenverhältnisse sind einfache Methoden, die es erlauben, Erosionszonen ohne vorgängige Geländeingriffe erfolgreich zu stabilisieren. Je weniger die zu renaturierenden Flächen durch Erdarbeiten zusätzlich geschwächt werden, desto höher ist die Erfolgchance auf einen langfristigen und flächenhaften Schutz.

⁴ Die Verwendung von nicht standortangepassten Pflanzen kann nach anfänglichem Wachstumserfolg zu Problemen führen, wenn nämlich die Vegetation abstirbt und sich dadurch Angriffsflächen für Erosion ergeben. Dieser Prozess kann sich durch den unsachgemässen Einsatz von Dünger beschleunigen. Einerseits wird auf Kosten der Wurzeln vorwiegend oberirdische Biomasse produziert; andererseits werden autochthone Pflanzen und insbesondere Mikroorganismen verdrängt. Wird die Düngung eingestellt, kollabiert das so erzeugte künstliche System, und es kommt zu Erosionsprozessen, bevor sich eine natürliche Vegetationsdecke etablieren kann.

⁵ Bei der Anlage dieses Hangrostes blieben die bodenmechanischen Randbedingungen unberücksichtigt. Die Stabilisierung der Böschung ist nur im Bereich der durch die Stützmauer beeinflussten unteren Partie gelungen. Im oberen Bereich ist die Neigung nach wie vor zu steil. Auch in diesem Beispiel ist eine deutliche Interaktion zwischen der Konstruktion und den natürlichen Prozessen zu erkennen. Hinter dem horizontalen Querbalken lagert sich von oben abgerutschtes Material ab. In der Folge treten ausgeprägte Bodenbewegungen im mittleren Bereich des Hangrostes auf. Ein weiteres Beispiel für destabilisierende Interaktionen sind in diesem Fall auch die unterschiedlichen Sickerströmungsverhältnisse innerhalb des stark durchlässigen Bodenkörpers im Hangrost und dem schlecht durchlässigen anstehenden Material.



Abbildung 6: Natürliche Wiederbesiedlung einer alpinen Skipiste (2500 m) durch *Poa alpina* L. (Alpen-Rispengras).⁶

Figure 6: Natural re-colonisation of a graded alpine ski slope (2500m) by *Poa alpina* L. (Alpine Poa).

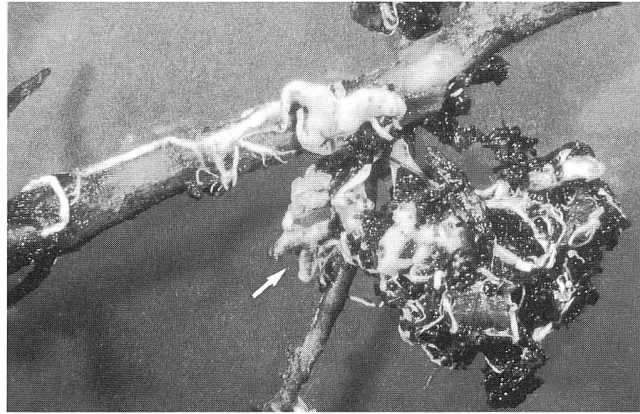


Abbildung 7: Mikrobielle Bodenaggregation am Beispiel einer Arven-Mykorrhiza.⁷

Figure 7: Microbial soil aggregation performed by mycorrhizal fungi of *Pinus cembra* L. (Swiss stone pine).

legungen, geomorphologischen und bodenmechanischen Betrachtungen und nicht zuletzt auch auf langjährigen Beobachtungen und Untersuchungen auf ingenieurbologisch behandelten Flächen. In dieser Beziehung ist der Wissensstand vergleichbar mit den entsprechenden Zusammenhängen bei technischen Massnahmen. Ungenügend sind hingegen die Methoden für die Renaturierung von Extremstandorten sowie die Informationen über die Beeinflussung des Oberflächenabflusses und des Bodenwasserhaushaltes durch die Pflanzen. Ebenso verhält es sich mit den Grundlagen für bodenmechanische Stabilitätsanalysen und Bemessungsverfahren unter angemessener Berücksichtigung der Vegetation. Die Vernetzung und die Abhängigkeiten dieser Bereiche sind noch weniger bekannt, jedoch genauso von Bedeutung und bei Stabilitätsanalysen und Bemessungsproblemen zu berücksichtigen. Andererseits sollen aber für die sehr komplizierten Probleme möglichst einfache und praxistaugliche Lösungsansätze gesucht werden, was gewisse Vereinfachungen und Abstraktionen bei der Modellbildung erfordert.

3. Grundlagen der Stabilitätsanalyse und Bemessung

In der ingenieurb biologischen Forschung wurden verschiedentlich Anstrengungen unternommen, die Wirkungsweisen der Vegetation quantitativ zu beschreiben und in ingenieurmässige Berechnungen einzuführen. Für wasserbauliche Probleme ist dies in einem gewissen Umfang gelungen. Im Wesentlichen geht es dort um den Widerstand, den ein System gegenüber äusseren Einwirkungen (Schleppkräfte, Schleppspannungen) aufweist. Bei gegebenen Randbedingungen lässt sich dieser Tragwiderstand beispielsweise über Ausziehversuche und Kraftmessungen bestimmen. In der Geotechnik sind die Vegetationswirkungen dagegen immer mit Problemen der Rutschungsstabilität und damit vor allem mit inneren Kräften verknüpft. Die Faktoren, die dabei zum Bruch führen, lassen sich weit weniger gut angeben, und die Unbestimmtheit der Versagensmechanismen ist wesentlich grösser. Wie OPLATKA (1998) zeigt, sind die Verhältnisse im Wasserbau in Wirklichkeit nicht so einfach wie manchmal dargestellt, und es gibt deshalb keine scharfe Begriffstrennung. Zur allgemeinen Einführung respektive zur Überleitung in die Problematik der oberflächennahen Bodenbewegungen an Hängen mag sie aber genügen.

Sowohl die Rutschungsanalysen als auch die meisten Bemessungsverfahren der Geotechnik, bei welchen Vegetation

eine Rolle spielt, können auf Stabilitätsrechnungen zurückgeführt werden. Will man den Einfluss der Vegetation nachweisen, braucht es Kenngrössen zur Beschreibung ihrer Wirkungen, die sich in klassische Stabilitätsmodelle einfügen lassen.

Bei der Stabilitätsanalyse eines Hanges oder einer Böschung wird aus einer Anzahl von möglichst plausibel angenommenen Gleitflächen jene mit dem kleinsten rechnerischen Sicherheitsgrad gegen Versagen als kritische Fläche bezeichnet (LANG *et al.* 1996, BÖLL 1997). Dabei wird die mobilisierte Scherfestigkeit τ_f des Bodens entlang der kritischen Gleitfläche mit der dort wirkenden Schubspannung τ verglichen. Falls zusätzliche (äussere) Kräfte am System wirken – beispielsweise Auflasten aus Stützkonstruktionen, Ankerkräfte oder Kräfte aus Bodenvernagelungen – werden diese entsprechend berücksichtigt.

Für die eigentliche Bemessung und den Tragsicherheitsnachweis von Gewichtsmauern sind die Vorgehensweisen grundsätzlich gleich. Die Einwirkung aus dem Baugrund (Erddruck) lässt sich aus einer Stabilitätsbetrachtung im bergseitigen Bodenkörper angeben. Für die Nachweise der Gesamtstabilität, insbesondere der Tragsicherheit in Bezug auf statischen Grundbruch, kann eine Stabilitätsanalyse der beeinflussten Hangpartie durchgeführt werden. Für einfache Fälle in der Praxis des Grundbaus wurden verschiedene Formeln entwickelt (in LANG *et al.* 1996), die ihrerseits auf lokalen Stabilitätsanalysen beruhen. Bei deren Anwendung entfällt das Aufsuchen kritischer Gleitflächen. Die Scherfestigkeit τ_f respektive die Scherfestigkeitsparameter des Bodens sind auch dort massgebende Eingangsgrössen.

In der allgemeinen Form schreibt sich die Scherfestigkeit τ_f eines Bodens nach dem Bruchkriterium von Mohr-Coulomb zu $\tau_f = c' + \sigma' \tan \Phi'$ (Abbildung 8). Unter Berücksichtigung der Porenwasseranspannung u ist dabei $\sigma' = \sigma - u$ die effektive, auf die

⁶ Die Vegetationshorste reduzieren mit ihren Wurzeln und den damit assoziierten Organismen die Auswaschungsprozesse und halten so die Feinanteile im Boden zurück. Dadurch werden einerseits Nährstoffe akkumuliert, andererseits dienen die feinen Kornfraktionen zur Entwicklung einer stabilen Bodenmatrix und Porenstruktur, indem vorwiegend Mikroorganismen das Feinmaterial zur Bildung von Bodenaggregaten verwenden (siehe Abbildung 7).

⁷ Das Mycel des Mykorrhizapilzes umgarnet kleine Bodenpartikel und formt diese zu stabilen Aggregaten, welche wiederum von Pilzfäden durchwachsen werden. Nährstoffe, die sich in solchen Aggregaten akkumulieren, stehen so dem Pilzmycel direkt zur Verfügung und über die Mykorrhiza (→) auch den Pflanzenpartnern der Mykorrhizapilze.

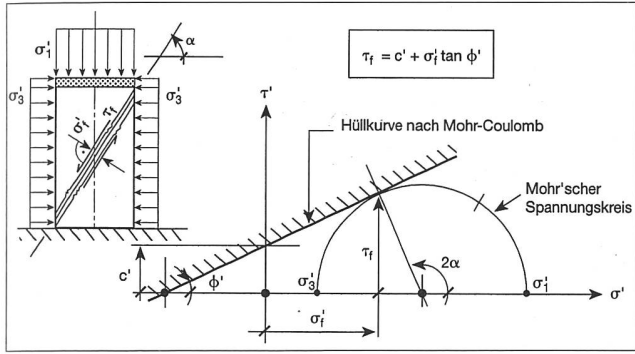


Abbildung 8: Mohr'scher Spannungskreis schematisch für den Bruchzustand eines Bodens mit Kohäsion. Links im Bild ist eine Bodenprobe im Triaxialversuch skizziert unter dem Seitendruck σ_3' , dem Axialdruck σ_1' und mit der unter dem Winkel α geneigten Bruchfläche.

Figure 8: Mohr's envelope for the failure conditions of ground with cohesion (schematic). On the left hand a sketch of a triaxial stress measurement with an all around confining pressure σ_3' , an axial load σ_1' and a surface of fracture with the angle α .

Bruchfläche wirkende Normalspannung. Die Scherfestigkeitsparameter sind die Kohäsion c' und der Schervinkel ϕ' (Winkel der inneren Reibung).

Entsprechend ihren Scherfestigkeitsparametern werden Böden mit Kohäsion ($c' \neq 0$) und ohne Kohäsion ($c' = 0$) unterschieden. Im ersten Fall spricht man auch von kohäsivem Bodenmaterial, im zweiten von Reibungsböden. Stark vereinfacht lassen sich die Zusammenhänge in Bezug auf das Rutschverhalten wie folgt charakterisieren: Tiefverlaufende Rutschungen treten eher bei kohäsiven Böden auf und oberflächennahe Bodenbewegungen bei solchen ohne Kohäsion. In Wirklichkeit kann die Situation teilweise auch umgekehrt sein.

Tiefverlaufende Rutschungen sind hier jedoch nicht von Interesse, da die Vegetation in bodenmechanischer Hinsicht vor allem in den oberflächennahen Bereichen wirksam ist. Will man dort Bodenbewegungen von langgestreckten Rutschungen mit relativ flach verlaufender Gleitschicht modellieren, hat sich der Schervinkel ϕ' als geeigneter Parameter erwiesen (BÖLL 1997).

Je nach Randbedingungen kann bei feinkörnigen Böden auch die undrainierte Scherfestigkeit s_u , die rechnerisch einer reinen Kohäsion entspricht, eine Rolle spielen. Da diese nur für kurzfristige Zustände eingeführt werden kann, ist sie zur Quantifizierung langfristiger Vegetationswirkungen ungeeignet. Auf Grund der einfachen Bestimmung durch Direktmessungen mit dem Scherflügel im Felde wird die undrainierte Scherfestigkeit s_u gelegentlich für vergleichende Angaben bei Bodenuntersuchungen verwendet (BÖLL 1997). Bei Fragen über relative Festigkeiten, etwa im (Fein-)Wurzelbereich von Oberflächenbegrünungen, könnten Scherflügelversuche allenfalls qualitative Resultate liefern.

Mit den oben eingeführten Begriffen lässt sich eine modellbezogene, grobe Klassifizierung der bis heute vorliegenden Arbeiten über die festigkeitsmässigen Vegetationswirkungen wie folgt vornehmen:

3.1 Boden-Wurzel-Verbund als Stützwerk

Ein Verbundkörper bestehend aus Bodenmaterial und Pflanzenwurzeln wirkt gewissermassen als Gewichtsmauer und wird entsprechend bemessen. Die allgemeinen Grundlagen über die Verbundwirkungen basieren zum Teil auf Ausziehversuchen mit Wurzeln und teilweise auf dem Prinzip der «Bewehrten Erde» (z.B. INGOLD 1982). In diese Kategorie fallen Arbeiten von SCHAARSCHMIDT und KONECNY (1971), SCHUPPENER

(1994), HOFFMANN (1995) sowie MORGAN und RICKSON (1995). In einzelnen Fällen ist eine gewisse formelmässige Berechnung möglich – im Sinne des oben skizzierten Gewichtsmauerproblems. Die Modelle sind allerdings an sehr scharfe Randbedingungen bezüglich der Steckstangen- bzw. Pflanzenanordnung sowie der Wurzelverteilung gebunden. Dadurch werden unter anderem auch die Arbeiten bei der Ausführung stark eingeschränkt. Die Randbedingungen lassen sich praktisch nur mit Buschlagen und Systemen von ähnlicher Tragwirkung erfüllen. Für den allgemeinen Nachweis von Vegetationswirkungen, insbesondere an Abtragsböschungen unter natürlichen Bedingungen, eignen sich diese Modelle nicht.

3.2 Wurzeln als Bodenanker

Falls an der Gleitfläche neben der Scherfestigkeit zusätzlich rückhaltende Kräfte wirken, beispielsweise aus Erdankern, werden diese in der Stabilitätsrechnung berücksichtigt. Sinn gemäss können Wurzeln, welche die Gleitfläche durchdringen, in Rechnung gesetzt werden. Die meisten Arbeiten, die den Verbundkörper Boden/Pflanzenwurzel als Tragwerk einführen, befassen sich auch mit solchen Fragen. Die Arbeit von OPLATKA (1998) behandelt zwar ein wasserbauliches Thema, kann aber in einigen Punkten ebenfalls diesem Themenkreis zugeordnet werden und stellt dadurch eine gewisse Verbindung zwischen der Problematik an Fliessgewässern und jener an Hängen dar.

Um die Ankerwirkung der Wurzeln rechnerisch berücksichtigen zu können, sind wir offensichtlich auf genaue Kenntnisse über deren Verteilung sowie die Trag- bzw. Auszieh widerstände angewiesen. Bezüglich den Randbedingungen und der Eignung zur allgemeinen Quantifizierung von Vegetationswirkungen gilt derzeit Ähnliches wie bei den Verbundkörpermodellen. Das Modell als solches ist aber wesentlich flexibler und die mechanische Interpretation trifft auf einen wichtigen Teilaspekt des Stabilitätsproblems zu, nämlich den Einbezug zusätzlicher Kräfte. Falls es mit Hilfe moderner Verfahren gelingt, die heute weitgehend fehlenden Angaben über die Verhältnisse im Wurzelraum zu ermitteln, sind interessante und wertvolle Resultate zu erwarten.

3.3 Scherfestigkeit unter Berücksichtigung der Vegetationswirkungen

Wenn es gelingt, die Vegetationswirkungen direkt der Scherfestigkeit zuzuordnen, liegt eine elegante Methode vor, diese Wirkungen in heute standardmässigen Verfahren der Stabilitätsrechnung zu berücksichtigen. Dazu muss sich die ermittelte Scherfestigkeit allerdings in geeigneter Form präsentieren. Die wichtigsten bis heute vorliegenden Methoden werden nachfolgend dahingehend beurteilt. Im Wesentlichen kann dabei unterschieden werden zwischen Direktmessungen der Scherfestigkeit und Verfahren, welche die Vegetationswirkungen den Scherfestigkeitsparametern zuordnen.

Bei der Direktmessung der Scherfestigkeit durchwurzelter Böden wird der Scherwiderstand mittels Schergeräten im Felde gemessen (z.B. KAIBORI & SASSA 1984, TOBIAS 1991). Der Vorteil solcher Geräte besteht in ihrer Grösse, die den Bedürfnissen in der Natur angepasst werden kann. Die allgemeinen Nachteile von Direktscherversuchen sind in der Literatur zur Bodenmechanik beschrieben (z.B. LANG *et al.* 1996). Für die Stabilitätsrechnung besonders nachteilig wirkt sich die Tatsache aus, dass die Resultate feldmässiger Direktscherversuche einen mehr oder weniger reinen Scherwiderstand repräsentieren, vergleichbar etwa mit den Werten aus Scherflügelversuchen oder mit den für Wasserbauprobleme ermittelten Festigkeiten. Ein solcher Wert lässt sich nicht oder nur schlecht

in die Mohr-Coulomb'sche Form bringen und ist daher für klassische Stabilitätsrechnungen kaum geeignet.

Falls die Scherfestigkeit in der Schreibweise nach Mohr-Coulomb $\tau_f = c' + \sigma' \tan \Phi'$ vorliegt, kann sie direkt in jede Stabilitätsrechnung eingesetzt werden. Wu (1984) ordnet die Vegetationswirkungen der Kohäsion zu, indem er einen zusätzlichen Kohäsionsanteil c_r einführt. Seine Schreibweise für die Scherfestigkeit lautet somit $s_r = c' + \sigma' \tan \Phi' + c_r$, wobei s für «shear strength» (Scherfestigkeit τ_f) und r für «root», also für die Wurzelwirkungen steht. Vermutlich hat Wu (1984) diesen Ansatz aus versuchstechnischen Gründen gewählt. Als reiner Festigkeitswert (additive Konstante in der Formel) lässt sich nämlich die Kohäsion c_r durch Direktscherversuche relativ leicht bestimmen. Sie repräsentiert aber die tatsächlichen Verhältnisse weit weniger gut als der spannungsabhängige Ausdruck $\sigma' \tan \Phi'$. Die Resultate unterscheiden sich deshalb nicht wesentlich von denen der anderen, auf Direktmessungen basierenden Methoden, weshalb das Verfahren keine echte Alternative darstellt.

Die Stabilitätsverhältnisse im oberflächennahen Bereich und damit die Vegetationswirkungen lassen sich durch die Kohäsion nur ungenügend beschreiben. Der Scherwinkel eignet sich dafür wesentlich besser. Bis heute liegt jedoch kein Verfahren vor, das die Berücksichtigung der Vegetationswirkungen im Scherwinkel zulässt. Nachfolgend soll deshalb auf die Möglichkeiten eines solchen Modells eingegangen werden.

4. Bedeutung der Scherfestigkeitsparameter

Zur Einführung in die Problematik wird ein bodenmechanisches Modell betrachtet, das verträglich ist mit den Methoden der klassischen Stabilitätsanalyse. Dabei soll die Bruchhypothese nach Mohr-Coulomb gelten und die Stabilitätsrechnung nach einem gebräuchlichen Verfahren durchführbar sein, zum Beispiel nach JANBU (1954).

Eine lange Böschung aus homogenem Bodenmaterial stehe unter dem Winkel β an und sei im Gleichgewicht gegen Abgleiten mit dem Sicherheitsfaktor $F=1,0$. Die Kohäsion c' sei zunächst $c'=0$. Damit die Gleichgewichtsbedingung erfüllt ist, muss der Scherwinkel Φ' in Abhängigkeit vom Bodenmaterial und von der Lage der Sickerlinie einen bestimmten Betrag aufweisen. Im einfachsten Fall, d.h. ohne Sickerlinie, gilt die bekannte Beziehung $\beta = \Phi'$ und allgemein gilt $\beta \leq \Phi'$. Nun sei der Scherwinkel von bekanntem Betrag Φ' etwas kleiner als für den Gleichgewichtszustand erforderlich, dafür wirke eine Kohäsion c' von unbekannter Grösse. Um diese zu bestimmen, wird mit dem Wert für Φ' und $F=1,0$ eine Stabilitätsrechnung bezüglich einer angenommenen oberflächennahen Gleitfläche Nr. 1 durchgeführt (Abbildung 9). Daraus errechnet sich der Wert für die zur Aufrechterhaltung des Gleichgewichtes erforderliche Kohäsion c_1' . Um zu prüfen, ob Gleitfläche Nr. 1 wirklich die kritische ist, müssen wir weitere Gleitflächen untersuchen. Zu diesem Zweck wird eine neue, etwas tiefer verlaufende Gleitfläche Nr. 2 angenommen und bezüglich dieser eine Stabilitätsrechnung mit dem gleichen Scherwinkel Φ' und der vorher berechneten Kohäsion c_1' durchgeführt. Die Berechnung liefert einen kleineren Sicherheitsfaktor $F_2 < 1,0$ und somit wäre Fläche Nr. 2 die kritische Gleitfläche. Dieses Resultat ist gleichbedeutend mit der Aussage, dass zur Erfüllung der Gleichgewichtsbedingung bezüglich der Gleitfläche Nr. 2 eine grössere Kohäsion vom Betrag c_2' erforderlich ist. Man kann weitere, noch tiefer verlaufende Gleitflächen annehmen und stellt fest, dass sich das Ganze wiederholt und man rechnerisch die kritische Gleitfläche in (immer) grössere

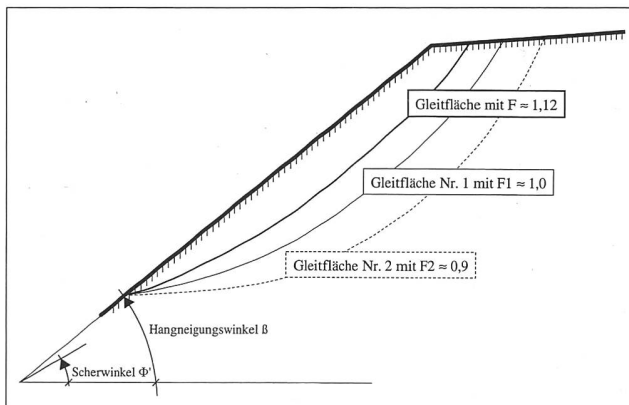


Abbildung 9: Modell zur Stabilitätsanalyse einer langen Böschung mit homogenem Profilaufbau in Bezug auf Scherwinkel Φ' und Kohäsion c' bei oberflächennahen Bodenbewegungen.

Figure 9: Model for the analysis of stability of a long slope with a homogeneous profile structure in view of the shear angle Φ' and the cohesion c' under the conditions of superficial ground movement.

Tiefen verschieben kann. Es lässt sich also immer eine Fläche finden, entlang der Versagen eintreffen sollte. Damit die Sicherheitsbedingung $F=1,0$ erfüllt ist, muss entsprechend die Kohäsion mit zunehmender Tiefe (immer) höhere Werte annehmen. Ab einer gewissen Tiefe werden die rechnerisch ermittelten Kohäsionswerte schliesslich grösser als sie in der Natur effektiv vorkommen.

Oberflächennahe Bodenbewegungen entlang ausgedehnter Gleitflächen lassen sich auf diese Weise nicht beschreiben. Bei Stabilitätsrechnungen wird der längs der Gleitfläche vorhandene Reibungswinkel als Winkel der Gesamtscherfestigkeit Φ' eingeführt und die Trennung in Reibung und Kohäsion nicht empfohlen (RÜEGGER 1990). Das Modell liefert das Resultat, dass die Neigung eines Hanges oder einer langen Böschung nicht steiler sein kann als der Scherwinkel Φ' . Das Modell zeigt ferner, dass es nicht sinnvoll ist, die Vegetationswirkungen der Kohäsion zuzuordnen oder – im Fall von kohäsionslosen Böden – als eine solche einzuführen. Es resultiert nämlich die Aussage, dass sich die kritische Gleitfläche immer unterhalb der vegetationsbeeinflussten Bodenschicht einstellt. Entsprechend dem dort vorhandenen reinen Bodenmaterial wäre die Kohäsion in jedem Fall kleiner als der für die aufliegende durchwurzelte Schicht eingesetzte Wert. Bei sonst homogenen Bedingungen müsste die ganze vegetationsbeeinflusste Schicht entlang dieser Gleitfläche abrutschen. In der Praxis gibt es zwar Fälle, bei denen ein solches Versagen auftritt. Diese lassen sich aber auch mit dem Scherwinkel erklären.

Die Wirkungen ingenieurbioologischer Massnahmen und allgemein der Vegetation sind grösstenteils auf oberflächennahe Stabilitätsprobleme beschränkt. Die beiden Prozesse Oberflächenerosion und Rutschungen sind dabei häufig eng gekoppelt, so dass auch von Erosionsrutschprozessen gesprochen werden kann. Schwach bis stark verfestigte, relativ wenig tonige Bodenmaterialien spielen eine besonders wichtige Rolle. Der Scherwinkel Φ' ist dabei stark von der Lagerungsdichte des Bodens abhängig. Er lässt sich darstellen in Funktion der Verwitterungsprozesse im Oberflächenbereich und somit in Abhängigkeit der Zeit. Im ungestörten Zustand sind bei hochverdichteten (ρ_v) Böden Werte für Φ_v' gegen 45° möglich. Mit fortschreitender Verwitterung nähern sich diese den Kennwerten von aufgelockerten (ρ_L) Materialproben an, beispielsweise $\Phi_L' \cong 30^\circ$. In einem versuchstechnisch möglichen Bereich, d.h. für Scherwinkel bis gegen $\Phi_v' \cong 40^\circ$, können die Zusammenhänge mit Hilfe von Experimenten im Labor und Dichtebestimmungen im Felde gezeigt werden. Dabei

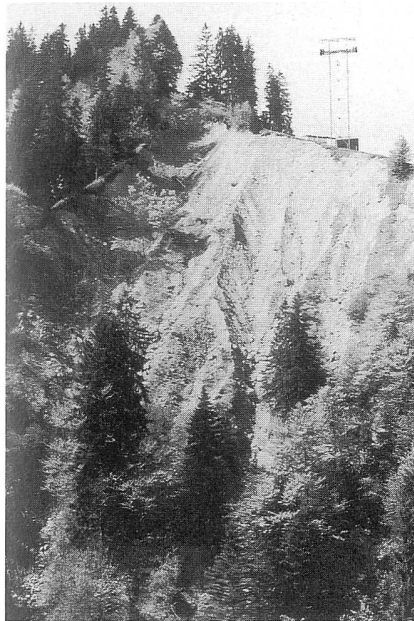


Abbildung 10: Die Schwandrübi vor der Verbauung (Photo: Kantonsforstamt Nidwalden 1974).⁸

Figure 10: The «Schwandrübi» before measures were set up (photo: forestry office of the canton of Nidwalden, 1974).

Abbildung 11: Die Schwandrübi nach den Verbauungen in den Jahren 1981 bis 1985. Zustand 1991.⁹

Figure 11: The «Schwandrübi» in 1991 after the construction projects of 1981 and 1985.

werden Materialproben auf unterschiedlich hohe Dichten gebracht, deren Scherwinkel in Triaxialversuchen bestimmt und die Abhängigkeit zwischen Dichte und Scherwinkel dargestellt. Im Feld wird die Dichte des anstehenden Bodenmaterials gemessen und der Scherwinkel mittels der im Labor ermittelten Beziehung angegeben.

Die Untersuchungen zeigen, dass der Scherwinkel des aufgelockerten – und damit für langfristige Zustände im vegetationslosen Oberflächenbereich massgebenden – Bodenmaterials häufig auf Grund von Geländebeurteilungen abgeschätzt werden kann. Abgelagertes Rutschungsmaterial steht nämlich meistens unter dem Winkel $\beta_1 \cong \Phi_L'$ an. Brauchbare Werte liefert oft auch das Verfahren nach Dhawan in Kombination mit dem Korrekturglied von Brinch Hansen für die Lagerungsdichte (in LANG *et al.* 1996).

Im Zusammenhang mit den Untersuchungen zur Stabilisierung der Schwandrübi (NW) konnte gezeigt werden, dass Böschungen mit der Neigung $\beta_1 \cong \Phi_L'$ im Gleichgewicht sind, falls der Boden ungesättigt ist (Abbildungen 10, 11). Ein solcher Zustand wäre bezüglich der Sicherheit unzulässig. Durch den Lebendverbau konnte die Sicherheit in diesem Falle auf einen akzeptablen Wert angehoben werden (BÖLL 1983). Auf Grund vieler Beobachtungen in den nachfolgenden Jahren sowie Untersuchungen im Gelände lässt sich heute diese Aussage bestätigen. Man kann feststellen, dass sich ein Hang unter dem Winkel $\beta_1 \cong \Phi_L'$ mit biologischen Methoden stabilisieren lässt, sofern keine konzentrierten Wasserabflüsse (Rinnenbildung) auftreten (BÖLL 1997). Im Hinblick auf die Quantifizierung einzelner Vegetationswirkungen und unterschiedlicher ingenieurbioologischer Massnahmen ist damit allerdings noch nicht viel gesagt. Aus bodenmechanischer und sicherheitstechnischer Sicht ist die Aussage aber interessant. Bei einem Sicherheitsgrad $F=1,0$, gegebenen Werten für den Scherwinkel Φ' und der Bodendichte ρ_{sat} bei Sättigung variiert die rechnerische Hangneigung β je nach Lage der Sickerlinie ganz erheblich. So gilt für die lange Böschung bei fehlender Sickerlinie zum Beispiel $\beta=\Phi'=36^\circ$. Bei gleichem Scherwinkel, der Dichte $\rho_{sat}=2,2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ und profillumfassender Sättigung wird $\beta \cong 21^\circ$. Weil in der Natur mit gelegentlicher Wassersättigung zu rechnen ist, wäre die zulässige Hangneigung ohne Berücksichtigung der Vegetationswirkungen im Bereich des unteren Grenzwertes festzulegen.

Unter Berücksichtigung dieser Zusammenhänge interpretieren wir die Vegetationswirkungen als eine Zunahme im Scher-

winkel Φ' . Dabei haben diese Wirkungen einen ähnlichen Effekt wie eine Erhöhung der Lagerungsdichte bzw. wie eine Verhinderung der Bodenauflockerung durch Verwitterungsprozesse im Bereich der ungeschützten Oberfläche. Durch die Vegetation wird der Boden gewissermassen mit einer Schicht von Bodenmaterial höherer Lagerungsdichte und damit höherer Festigkeit belegt. Die Festigkeit dieser Schicht korrespondiert teilweise mit der Festigkeit von tiefergelegenen, der Verwitterung entzogenen Bodenschichten. Die Zunahme der Scherfestigkeit wird im Allgemeinen innerhalb der vegetationsbeeinflussten Schicht variieren. Wenn die Werte für die Scherwinkel in Funktion der Profiltiefe vorliegen, können diese für die entsprechenden Gleitflächen in Rechnung gesetzt werden. Der Ansatz erlaubt somit die Darstellung des Bruchverhaltens sowohl innerhalb als auch unterhalb des Wurzelraumes.

5. Bestimmung des Scherwinkels

Die Bestimmung der Scherfestigkeit im Triaxialversuch ist eine bewährte und allgemein übliche Methode in der Bodenmechanik. Dieses Verfahren bietet verschiedene Vorteile, ist aber sehr anspruchsvoll und aufwendig, was die Durchführung betrifft (TERZAGHI & PECK 1967, LANG *et al.* 1996). Bei der Prüfung durchwurzelter Proben stellen sich zusätzliche Schwierigkeiten ein. Insgesamt eignen sich Triaxialversuche nicht als standardmässiges Verfahren.

Der neue, nachfolgend erläuterte Lösungsansatz basiert auf bodenmechanischen und biologischen Zusammenhängen

⁸ Das beträchtliche Gefahrenpotential der Schwandrübi war Anlass, die bodenmechanischen und ingenieurbioologischen Zusammenhänge bei Arbeiten in verfestigter Moräne zu untersuchen. Dazu wurde 1980 an der EAFV (heute WSL) ein Forschungsprojekt begonnen. Die bodenmechanischen Versuche wurden am IGB (heute IGT) der ETH Zürich durchgeführt.

⁹ In Anlehnung an die bodenmechanischen Untersuchungen und die daraus resultierenden Empfehlungen der EAFV wurde die Schwandrübi zwischen 1981 und etwa 1985 mit Stützwerken verbaut, begrünt und mit Weisserlen (*Alnus incana* (Chaix.) DC.) und teilweise auch Purpurweiden (*Salix purpurea* L.) bestockt. Das Bild aus dem Jahre 1991 zeigt, dass sich die ingenieurbioologischen Massnahmen dort positiv auswirken, wo die Hangneigung β , durch den Stützwerkverbau auf den Wert Φ_L' reduziert werden konnte. Die übersteilen Partien werden unter anderem durch natürliche Abwitterung auf diesen zulässigen Wert gebracht und anschliessend ingenieurbioologisch behandelt.

und liefert eine verhältnismässig einfache Methode zur Bestimmung des Scherwinkels unter Berücksichtigung von Vegetationswirkungen.

Der Scherwinkel nimmt im Allgemeinen mit der Lagerungsdichte einer Bodenprobe zu und diese Abhängigkeit kann qualitativ gut dargestellt werden. Aus den Vegetationswirkungen resultiert ebenfalls eine erhöhte Festigkeit (Abbildungen 12 bis 14). Durch Beregnungsversuche lassen sich die Zusammenhänge relativ einfach als eine Verbesserung der Aggregatstabilität bestimmen (GRAF & GERBER 1997). Zur Quantifizierung wird deshalb ein Modell betrachtet, das diese Vegetationswirkungen als eine fiktive Erhöhung der Lagerungsdichte interpretiert. Wir bezeichnen diese Lagerungsdichte als virtuelle Dichte.

Unbehandelte, d.h. reine Boden-Materialproben werden bei verschiedenen Lagerungsdichten im Triaxialversuch geprüft und die Korrelation zwischen der Lagerungsdichte und dem Scherwinkel wird registriert. Die gleichen Proben (bzw. solche aus dem gleichen Material mit den entsprechenden Dichten) werden zudem in Beregnungsversuchen auf ihre Aggregatstabilität hin untersucht. Als erste Hypothese (Abbildung 15) wird angenommen, dass zwischen der Aggregatstabilität und der Dichte – und damit natürlich auch dem Scherwinkel – eine Korrelation besteht.

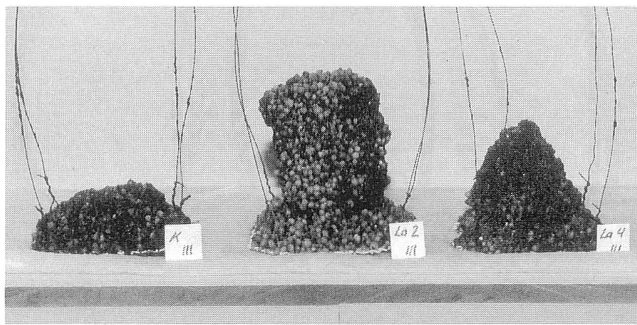


Abbildung 12: Künstliche Substrat-Gemische aus Siran-Kügelchen, Torf und Quarzsand.¹⁰

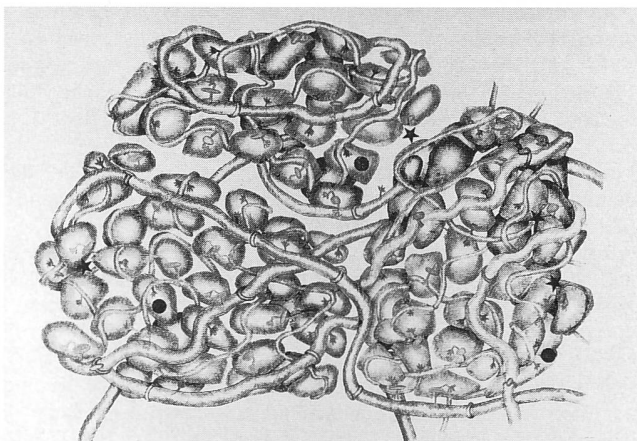
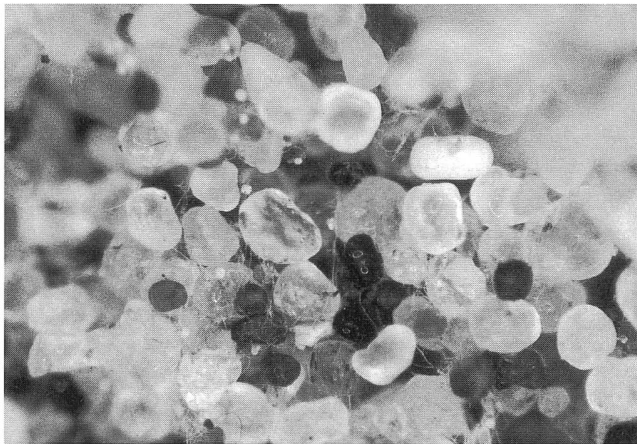
Figure 12: Substrate composition consisting of Siran (porous glass beads), peat and quartz sand.

Abbildung 13: Aggregat von losen Bodenteilchen in einem Sanddünenboden durch Pilzmycel von Föhren-Mykorrhizapartnern (Photo: Prof. Dr. Ottmar Holdenrieder).¹¹

Figure 13: Aggregate of loose particles of a sand-dune soil tied together by mycelia of ectomycorrhizal fungi of pine (photo: Prof. Dr. Ottmar Holdenrieder).

Abbildung 14: Schematische Darstellung der mikrobiellen Bodenaggregat-Bildung. (Zeichnung: Véronique Graf-Morgen).¹²

Figure 14: Schematic illustration of microbial soil aggregate formation (drawing: Véronique Graf-Morgen).



¹⁰ Künstliche Substrat-Gemische aus Siran-Kügelchen, Torf und Quarzsand wurden während drei Monaten mit den Mykorrhizapilzen *Laccaria bicolor* (Maire) P.D. Orton (La2) und *Laccaria montana* Singer (La4) inkubiert, respektive als Kontrollproben (K) unbehandelt belassen und bei 18 °C in Dunkelheit aufbewahrt. Danach wurden die Probezylinder während 24 Stunden in einem Wasserbad gesättigt und der nicht erodierte Rest getrocknet und gewogen (GRAF & GERBER 1997). Das Pilzmycel in den beimpften Proben bewirkte gegenüber den Kontrollen eine beträchtliche Erhöhung der Festigkeit, welche im Falle von *Laccaria bicolor* besonders ausgeprägt war.

¹¹ In einem Sanddünenboden werden die losen Bodenteilchen durch das Pilzmycel von Föhren-Mykorrhizapartnern aggregiert. Die dadurch erhöhte Festigkeit der Bodenmatrix und Porenstruktur erhöht die Rückhaltekapazität für Wasser und reduziert gleichzeitig das Auswaschen von Nährstoffen.

¹² Die Pilzhyphen durchwachsen den Boden und formen aus feinen Kornfraktionen in einem ersten Schritt Mikroaggregate. Durch das Umgarnen von Pilzhyphen werden organische und mineralische Teilchen eng zusammengerückt. Dabei werden sie einerseits durch das Mycel-Netzwerk mechanisch verfestigt (•) und andererseits durch Pilz-Ausscheidungen (Polysaccharide, Polyuronide) zusätzlich verkittet (*). In einem nächsten Schritt werden die kleinen Aggregate zu Makroaggregaten zusammengefügt, wobei es wieder zu einer chemischen und mechanischen Verfestigung kommt. Die so entstehenden Aggregate bilden die Bausteine für eine stabile Boden- und Porenstruktur. Das Pilzmycel, das in und um die Aggregate wächst, hat direkten Zugriff auf die Nährstoffe und das Wasser, welches in diesen Bodenkrümeln gespeichert wird. Als Symbiosepartner profitieren davon entsprechend auch die Wirtspflanzen.

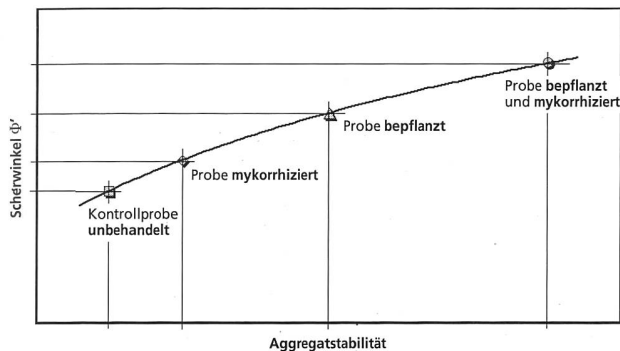


Abbildung 15: Aggregatstabilität einer Bodenprobe.¹³

Figure 15: Aggregate stability of a soil sample.

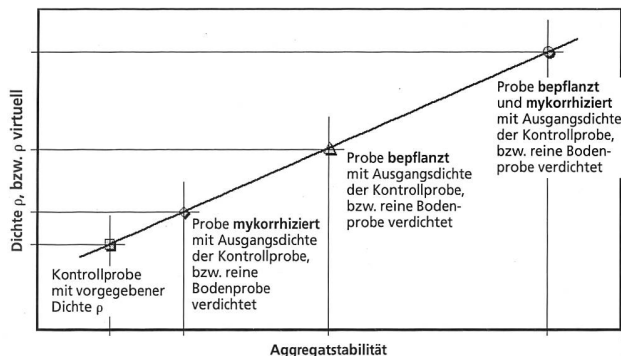


Abbildung 16: Bestimmung des Scherfestigkeitsparameters Φ' für vegetationsbehandelte Bodenproben.¹⁴

Figure 16: Determination of the shearing resistance Φ' of soil samples affected by plants.

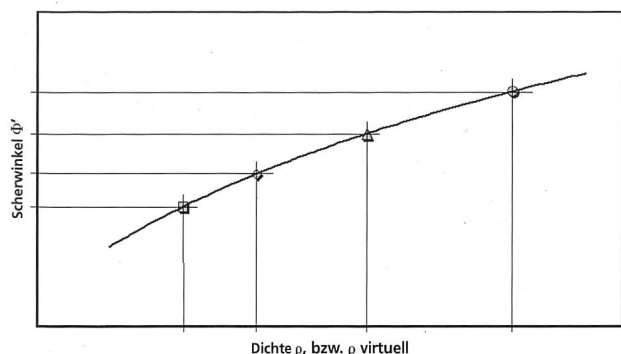


Abbildung 17: Zusammenhang zwischen der Dichte ρ einer Bodenprobe und dem Scherwinkel Φ' .¹⁵

Figure 17: Relation between the density ρ and the shear angle Φ' of a soil sample.

Auf Grund von Voruntersuchungen sind wir zuversichtlich, dass sich diese Hypothesen bestätigen lassen und wir damit eine recht einfache und praxistaugliche Methode zur Quantifizierung der Vegetationswirkungen herleiten können. Die sehr aufwendige Bestimmung der Scherfestigkeit vegetationsbeeinflusster Proben im Triaxialversuch kann damit umgangen werden. Indem die Aggregatstabilität (WRIGHT & UPADHYAYA 1998, GUGGENBERGER *et al.* 1999) und damit die virtuelle Dichte vegetationsbeeinflusster Bodenproben in einfachen Berechnungsversuchen (GRAF & GERBER 1997) bestimmt wird, können direkte Vergleiche mit vegetationsfreien Proben angestellt und die Scherwinkel angegeben werden. In einfacheren Fällen und für allgemeine Beurteilungen kann das Verfahren nach Dhawan, mit der Korrektur für die Lagerungsdichte (in LANG *et al.* 1996), zur Bestimmung des Scherwinkels der unbehandelten Vergleichsproben dienen, so dass auch für die reinen Bodenproben keine Triaxialversuche erforderlich

sind. Die Scherwinkel der vegetationsbeeinflussten Bodenproben finden schliesslich Eingang in standardmässige bodenmechanische Abschätzungen und Berechnungen.

In der Formel für die Scherfestigkeit τ_f tritt im spannungsabhängigen Ausdruck $(\sigma-u)\tan\Phi'$ der Scherwinkel Φ' auf, zusammen mit der Porenwasserspannung u . Bei hohen Porenwasserspannungen resultiert – unabhängig vom Scherwinkel – eine geringere Scherfestigkeit. Für die ingenieurmässige Stabilitätsrechnung ist der massgebende Fall zu berücksichtigen, das heisst die ungünstigste Lage der Sickerlinie (BÖLL 1997). In der Praxis entspricht dies oft einer profillumfassenden Wassersättigung. Die Resultate von BORER (1982) zeigen, dass die Pflanzenwirkungen in Bezug auf das Sättigungsverhalten periodisch ausgeschaltet werden. Die Untersuchungen von RICKLI *et al.* (2000) über die Vegetationswirkungen auf die Rutschungen von Sachseln (OW) im Jahre 1997 zeigen ferner, dass es kaum möglich ist, einzelnen Vegetationstypen eine unterschiedliche Wirkung auf die Sickerströmungsverhältnisse bei extremen Niederschlagsereignissen zuzuordnen. Auf Grund dieser Untersuchungen interpretieren wir das Stabilitätsverhalten von Flächen unter gleichen, extremen Niederschlagsbedingungen in erster Linie als eine Frage differenzierter, scherwinkelbedingter Festigkeiten im und unterhalb des Wurzelraumes. Selbstverständlich kommen daneben als rutschungsauslösende Faktoren weitere Phänomene wie hydraulischer Grundbruch hinzu («Hangwasserexplosionen»). Die Wirkungen der Vegetation auf solche Prozesse lassen sich aber nicht in allgemeingültiger Form angeben.

Zusammenfassung

Die bis heute vorliegenden Modelle und Kennwerte zur Quantifizierung von Vegetationswirkungen werden hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit in ingenieurmässigen Lösungskonzepten und Stabilitätsrechnungen beurteilt. In den meisten Fällen werden Input-Informationen in einem Detaillierungsgrad benötigt, welcher heute nicht garantiert ist, insbesondere bezüglich der dreidimensionalen Verteilung der Wurzeln

¹³ Die Aggregatstabilität einer Bodenprobe kann aufgefasst werden als ihr Widerstand gegen äussere Einwirkungen; sie ist daher mit den Festigkeitskennwerten verknüpft. Zur bodenmechanischen Beschreibung der Festigkeit dient der dichteabhängige Scherwinkel Φ' . Eine Zunahme der Aggregatstabilität bedeutet eine Erhöhung der Scherfestigkeit und entspricht damit einem grösseren Scherwinkel.

¹⁴ Aus versuchstechnischen Gründen ist die direkte Bestimmung des Scherfestigkeitsparameters Φ' für vegetationsbehandelte Bodenproben ausserordentlich schwierig. Die Ermittlung dieses Wertes für unbehandelte Proben unterschiedlicher Lagerungsdichte ist dagegen vergleichsweise einfach. Durch einen entsprechenden Zwischenschritt werden die Probleme umgangen. Dabei wird die erhöhte Aggregatstabilität vegetationsbeeinflusster Proben mit der durch Verdichtung verbesserten Aggregatstabilität unbehandelter Bodenproben korreliert. Als Kenngrösse dient die bodenmechanische Dichte ρ . Dieser Wert ist variabel für die unbehandelten Proben und konstant für die Proben mit Vegetation. Als Grundlage für das weitere Vorgehen ordnen wir den vegetationsbeeinflussten Proben entsprechend ihrer Aggregatstabilität den Kennwert der virtuellen Dichte ρ_{virtuell} zu.

¹⁵ Der Zusammenhang zwischen der Dichte ρ einer Bodenprobe und dem Scherwinkel Φ' kann bei entsprechendem Bodenmaterial gut dargestellt werden und wird in der Bodenmechanik relativ häufig verwendet. Sinngemäss soll er nun auch für vegetationsbeeinflusste Proben ermittelt werden, wobei als Eingangsgrösse deren virtuelle Dichte ρ_{virtuell} eingeführt wird. Standardmässige Versuche werden mit unbehandelten Bodenproben durchgeführt, wobei deren Dichten ρ den virtuellen Dichten ρ_{virtuell} entsprechen (gemäss Abbildung 16).

sowie deren Trag- und Ausziehwiderstände. Zudem sind keine Aussagen über die Bodenverhältnisse im Rhizosphärenbereich möglich.

Bei dem neuen Ansatz und dem vorgeschlagenen Testverfahren wird der Scherwinkel Φ' mit den Vegetationswirkungen beaufschlagt. Dieser für oberflächennahe Bodenbewegungen massgebende Scherfestigkeitsparameter kann direkt in konventionelle rechnerische Stabilitätsanalysen eingesetzt werden.

Die versuchstechnischen Schwierigkeiten mit vegetationsbehandelten Bodenproben werden im vorgestellten Testverfahren durch die Einführung der virtuellen Dichte umgangen. Dieser Hilfsparameter repräsentiert die durch Pflanzenwurzeln und Pilzmycelien verbesserte Aggregatstabilität, welche als Dichtezunahme interpretiert wird. Gelingt es damit den neuen Ansatz zu validieren, resultiert die mobilisierbare Scherfestigkeit entlang ganzer Gleitflächen innerhalb oder unterhalb des Wurzelraumes.

Summary

The Evidence of Vegetation Effects on Superficial Soil Movements – Basics of a New Approach

Present-day models and characteristic values for the quantification of vegetation effects are evaluated in view of their use in engineering design concepts and stability calculations. Most models require more detailed data than are currently available, particularly on the 3-dimensional distribution of the roots as well as on their bearing and pull-out resistance. Furthermore, they do not provide information on the rhizosphere and surrounding soil conditions.

The assignment of the vegetation effects to the angle of shearing resistance Φ' is the core of a new approach and its corresponding testing method. This parameter is decisive for superficial ground failure and easily applicable to conventional stability calculations.

Experimental difficulties, resulting from planted soil samples, are avoided by introducing the virtual density. This auxiliary parameter represents the increase in aggregate stability achieved by roots and mycelia and is interpreted as an augmentation of density. Successful validation, thereby, results in the possible shear strength along sliding surfaces within and beneath the rhizo-sphere.

Résumé

Mise en évidence des effets de la végétation lors de mouvements superficiels du sol – Fondements d'une nouvelle approche

Les modèles et les valeurs caractéristiques existants aujourd'hui pour quantifier les effets de la végétation sont évalués en fonction de leur applicabilité à des modèles et à des calculs de stabilité. Or la plupart de ces modèles nécessitent des données plus détaillées, notamment en ce qui concerne la distribution tridimensionnelle des racines, la capacité portante de ces dernières et leur résistance à l'arrachement. En outre, les modèles actuels ne fournissent pas d'informations sur les conditions du sol dans la zone de la rhizosphère.

La nouvelle approche et la méthode de vérification proposées prennent en considération l'angle de cisaillement Φ' pour étudier les effets de la végétation. Ce paramètre, décisif dans l'appréciation des mouvements superficiels du sol, est facilement applicable aux calculs conventionnels de stabilité.

Les difficultés d'ordre technique que posent les échantillons de sol garnis de plantes sont évitées grâce à l'introduction de la densité virtuelle. Ce paramètre auxiliaire représente une amélioration de la stabilité des agrégats apportée par les

racines et les mycéliums; cette stabilité est interprétée comme une augmentation de la densité. Si cette nouvelle approche se révèle efficace, il sera possible de calculer la résistance au cisaillement le long de la surface de glissement à l'intérieur et au-dessous de la rhizosphère.

Traduction: MONIQUE DOUSSE

Literaturverzeichnis

- BÖLL, A. (1983): Lebendverbau bei der Sanierung von steilen Hängen. Schweiz. Z. Forstwes. 3: 167–177.
- BÖLL, A. (1990): Kombinierte technisch-biologische Methoden im Hang- und Runsenverbau: Voraussetzungen und Massnahmen. Selbstverlag Gesellschaft für Ingenieurbio-logie e.V., Aachen, Jahrbuch 5: 127–137.
- BÖLL, A. (1997): Wildbach- und Hangverbau. Ber. Eidg. Forsch.anst. Wald Schnee Landsch. 343: 1–123.
- BÖLL, A. & GERBER, W. (1986): Massgebende Gesichtspunkte im Lebendverbau. Bündner Wald 8: 43–50.
- BÖLL, A., GERBER, W., GRAF, F. & RICKLI, C. (1999): Holzkonstruktionen im Wildbach-, Hang- und Runsenverbau. Birmensdorf, Eidg. Forsch.anst. WSL, 60 S.
- BORER, F. (1982): Zum Wasserhaushalt einer dominierenden Douglasie in einem Waldbestand. Mitt. Eidg. Forsch.anst. Wald Schnee Landsch. 58: 1–162.
- BWW (1982): Hochwasserschutz an Fließgewässern, Wegleitung. Veröff. Bundesamt für Wasserwirtschaft, EDMZ, Bern, 77 S.
- CERNUSCA, A. (1986): Probleme von Wintersportkonzentrationen für den Naturschutz. Jb. Naturschutz u. Landschaftspflege, Bonn 38: 33–48.
- DEGENS, B.P., SPARLING, G.P. & ABBOTT, L.K. (1996): Increasing the length of hyphae in a sandy soil increases the amount of water-stable aggregates. Appl. Soil Ecol. 3: 149–159.
- DEMONTZEY, P. (1878): Etude sur les travaux de reboisement et de gazonement des montagnes. Imprimerie Nationale, Paris, 421 S.
- DUILE, J. (1826): Über Verbauung der Wildbäche in Gebirgs-Ländern, vorzüglich in der Provinz Tirol und Vorarlberg: zum Gebrauche für Bau- und Forstbeamte, Obrigkeiten, Seelsorger und Gemeinds-Vorstände. Innsbruck, 180 S.
- FLORINETH, F. (1982): Erfahrungen mit ingenieurbio-logischen Massnahmen bei Fließgewässern im Gebirge. Landschaftswasserbau, TU Wien 3: 243–263.
- GERBER, W. (1998): Beobachtungen von *Alnus incana* bei ingenieurbio-logischen Arbeiten auf verdichteten Böden. Selbstverlag Gesellschaft für Ingenieurbio-logie e.V., Aachen, Jahrbuch 7: 235–254.
- GERSTGRASER, C. (2000): Ingenieurbio-logische Bauweisen an Fließgewässern – Grundlagen zu Bau, Belastbarkeiten und Wirkungsweisen. Diss. Univ. f. Bodenkultur, Wien, Bd. 52, 228 S.
- GRABHERR, G. (1978): Schädigung der natürlichen Vegetation über der Waldgrenze durch die Anlage von Schipisten und deren Fähigkeit zur Renaturierung. Akad. f. Naturschutz u. Landschaftspflege. Tagungsbericht 2: 45–50.
- GRAF, F. (1998): Anforderungen an den Boden bei Renaturierungen oberhalb der Waldgrenze. Ingenieurbio-logie 4: 12–18.
- GRAF, F. & GERBER, W. (1997): Der Einfluss von Mykorrhizapilzen auf die Bodenstruktur und deren Bedeutung für den Lebendverbau. Schweiz. Z. Forstwes. 11: 863–886.
- GUGGENBERGER, G., ELLIOT, E.T., FREY, S.D., SIX, J. & PAUSTIAN, K. 1999: Microbial contributions to the aggregation of a cultivated grassland soil amended with starch. Soil Biol. Biochem. 31: 407–419.
- HOFFMANN, J. (1995): Lebend Bewehrte Erde – neue Methoden der Böschungssicherung im Verkehrswegbau. Das Gartenamt 2: 115–118.
- INGOLD, T.S. (1982): Reinforced earth. Thomas Telford Ltd., London, 141 S.
- JANBU, N. (1954): Application of the composite slip surfaces for stability analysis. Proc. European Conference on Stability of Earth Slopes, Stockholm Sweden, Nr. 3: 43–49.
- KAIBORI, M. & SASSA, K. (1984): Tragbares Geländeschengerät – Einige Versuchsergebnisse und Vergleich mit gewöhnlichen Scherver-suchen. Proc. Interpraevent Symposium 1984, Villach, Österreich, Bd. 2: 263–274.

- KAISER, M. (1967): Die Bouchser Rübi. Schweiz. Z. Forstwes. 8: 493–522.
- KIEM, R. & KANDELER, E. (1997): Stabilization of aggregates by the microbial biomass as affected by soil texture and type. Appl. Soil Ecol. 5: 221–230.
- LANDOLT, E. (1862): Bericht an den hohen schweizerischen Bundesrath über die Untersuchung der schweiz. Hochgebirgswaldungen. J.A. Weingart, Bern, 367 S.
- LANG, H.-J., HUDER, J. & AMAN, P. (1996): Bodenmechanik und Grundbau (6. Aufl.). Springer, Berlin, 320 S.
- MORGAN, R.P.C. & RICKSON, R.J. (1995): Slope stabilization and erosion control: a bioengineering approach. Spon, London, 274 S.
- OPLATKA, M. (1998): Stabilität von Weidenverbauungen an Flussuferrn. VAW Mitteilungen 156, ETH Zürich, 217 S.
- RICKLI, C., ZIMMERLI, P. & ZÜRCHER, K. (2000): Waldwirkungen auf oberflächennahe Rutschungen anlässlich der Unwetterereignisse vom August 1997 in Sachseln, Schweiz. Proc. 9th Interpraevent Symposium, 26.–30. Juni 2000, Villach, Österreich, Band 1: 305–316.
- RÜEGGER, R. (1990): Tiefenstabilisierungen und erdbautechnische Verfahren wie Verankerung, Verdübelung und Geotextilarmierung. Selbstverlag Gesellschaft für Ingenieurbilogie e.V., Aachen, Jahrbuch 5: 61–79.
- SCHAARSCHMIDT, G. & KONECNY, V. (1971): Der Einfluss von Bauweisen des Lebendverbbaus auf die Standsicherheit von Böschungen. Mitt. Inst. Verkehrswasserbau, Grundbau und Bodenmechanik, Techn. Hochschule Aachen, VGB 49: 1–90.
- SCHIECHTL, H.M. (1973): Sicherungsarbeiten im Landschaftsbau. Callwey, München, 244 S.
- SCHUPPENER, B. (1994): Die statische Berechnung der Bauweise Lebend Bewehrte Erde. Geotechnik 4: 204–213.
- SCHUPPENER, B. & HOFFMANN, J. (2000): Wirkungsweise von Gehölzen zur Stabilisierung von Hängen und Böschungen. Ingenieurbilogie 2: 47–53.
- TERZAGHI, K. & PECK, R.B. (1967): Soil mechanics in engineering practice (2nd ed.). John Wiley & Sons, New York. 729 S.
- TOBIAS, S. (1991): Bautechnisch nutzbare Verbundfestigkeit von Boden und Wurzel. Diss. ETH Nr. 9483, 135 S.
- WAG (1991): Bundesgesetz über den Wald (Waldgesetz, WaG), vom 4. Oktober 1991, SR 921.0.
- WRIGHT, S.F. & UPADHYAYA, S. (1998): A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. Plant Soil 198: 97–107.
- WU, T.H. (1984): Effect of vegetation on slope stability. Transport. Res. Rec. 965: 37–46.
- WU, T.H. (1995): Slope stabilization. In: MORGAN, R.P.C. & RICKSON, R.J. (Ed.): Slope stabilization and erosion control: a bioengineering approach. Spon, London, 221–264.

Verdankungen

Wir danken Emil Saxer, Alt Kantonsoberförster NW, und Urs Braschler, Kantonsoberförster NW, für die uns zur Verfügung gestellten Langzeituntersuchungsgebiete. Ebenso danken wir Fritz Ammann, Forstunternehmung Bollingen, welcher uns über Jahre hinweg mit wertvollen Hinweisen in Bezug auf die Planung und Ausführung ingenieurbilogischer Arbeiten unterstützt hat. Ein weiteres Dankeschön gebührt Jürg Stückelberger, Assistent bei Prof. Dr. H.R. Heinimann, ETH Zürich, für die Durchführung ingenieurbilogischer/ bodenmechanischer Voruntersuchungen.

Autoren:

ALBERT BÖLL, dipl. Forst.-Ing. ETH, dipl. Bau-Ing. ETH, und Dr. FRANK GRAF, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Abteilung Wasser-, Erd- und Felsbewegungen, 8903 Birmensdorf.