

**Zeitschrift:** Schweizer Ingenieur und Architekt  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 105 (1987)  
**Heft:** 17

**Artikel:** Festigkeitsfragen im Grünverbau  
**Autor:** Burkard, André M.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-76573>

### **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:** 12.01.2026

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

# Festigkeitsfragen im Grünverbau

Von André M. Burkard, Zürich

Die Fähigkeit, den Boden bis in eine gewisse Tiefe zu festigen, macht die Pflanze zu einem wertvollen, lebenden Baustoff. Das Ausmass der mittels Pflanzenbewuchs erreichbaren oberflächennahen Stabilisierung von Böschungen und Hängen ist teilweise umstritten; in der Literatur liegen noch kaum Angaben über Festigkeitsparameter durchwurzelter Bodenschichten vor. Neigt der Ingenieurbiologe gelegentlich zur Überbewertung, so sieht der bauende Ingenieur und Techniker in der Begrünung und standortgerechten Bepflanzung oft nur eine kosmetische Massnahme.

Der vorliegende Beitrag versucht, die Begriffe Wurzelwerk, Standsicherheit, Böschung und Hang zueinander in Beziehung zu setzen, und er zeigt die Schwierigkeiten und Wege, Festigkeitsparameter durchwurzelter Bodenschichten zu bestimmen. Dabei wird erstmals für das System Boden-Wurzel eine Verbundfestigkeit definiert.

## Einleitung

In einer intensiv genutzten Landschaft mit bereits eingeebneten und stellenweise überforderten Lebensräumen werden wieder vermehrt ingenieurbiologische Bauweisen angewendet. Jene, die bei der Errichtung und Erhaltung von *Erdbauten* sowie der Stabilisierung und Sicherung instabiler *Hänge* und *Böschungen* zur Anwendung kommen,

nennt man *Grünverbauungen* (vgl. Übersicht). Kennzeichnend ist, dass Pflanzen und Pflanzenteile als lebende Baustoffe so eingesetzt werden, dass sie im Laufe ihrer Entwicklung in Verbindung mit Boden, Gestein und Bodenwasser wesentlich zur Festigung des Bodens beitragen.

Dem Grünverbau steht heute eine umfangreiche Auswahl an Bauformen zur Verfügung. Diese wirken meliorativ,

indem sie den Standort für das Gedeihen der Pflanzen vorbereiten und sukzessive verbessern. Entsprechend dieser beabsichtigten Wirkung pflegt man sie einzuteilen in *Stabil-, Deck-, Ergänzungs- und kombinierte Bauweisen* sowie *biotechnische Entwässerungen* [1]. Die Standortverhältnisse, die örtlichen Gegebenheiten und das Ziel der Grünverbauung bestimmen dabei die Wahl der jeweils geeigneten Methode.

Als *Pionierpflanzen* kommen oft *Weidenarten* (*Salix purpurea*, *S. daphnoides*, *S. cinerea* u.a.) in Betracht. Sie haben die Fähigkeit, sich leicht *vegetativ vermehren* zu lassen. Darüber hinaus zeichnen sie sich aus durch *optimale Bewurzelungsfähigkeit* zwischen Laubfall und Blatttrieb – also während der winterlichen Ruhe – sowie durch eine bedingte *Bewurzelungsfähigkeit* zwischen Samenflug und Blattgilben.

## Der Begriff der Standsicherheit

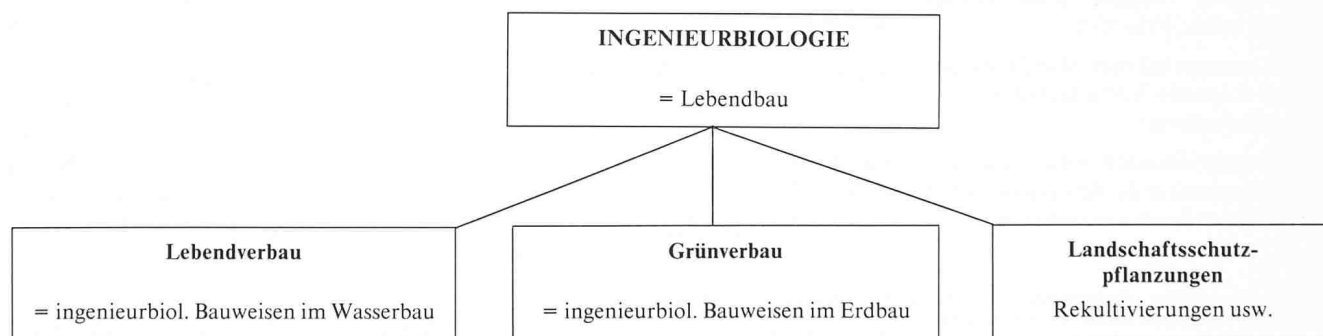
Im Hinblick auf die Bedeutung der Pflanze für die Stabilität einer Bö-

## TERMINOLOGIE

Ingenieurbiologie  
(Krüdener 1951)

Wissenschaft von den Eigenschaften und vom Verhalten lebender Pflanzen als Baustoff.

Die davon abgeleiteten Bauweisen werden vor allem nach dem baulichen Zweck, dem bestmöglichen technischen, ökologischen und landschaftspflegerischen Wirkungsgrad und dem anzustrebenden botanisch-ökologischen Endzustand der Pflanzung (Rasen, Buschwerk, Wald) eingesetzt.



*Stabilbauweisen* zur Ausschaltung von mechanischen Kräften und zur tiefgründigen Bodenbefestigung (Flechtzäune, Buschlagen usw.).

*Deckbauweisen* zum raschen Schutz offener Flächen vor der Erosion, der Einstrahlung sowie zur Verbesserung von Wärme- und Wasserhaushalt im Sinne einer biologischen Aktivierung des Bodens (Spreitlagen, Saaten).

*Ergänzungsbauweisen* zur Einleitung und Beschleunigung des Wachstums und der Festigung der Pflanzungen (Stecklinge, Ballenpflanzung, Rhizomhäkel).

*Biotechnische Entwässerungen*  
(pumpende Pflanzen, Rasenmulden, Faschinendrainen).

*Kombinierte Bauweisen*: Stützbauten, kombiniert aus nicht lebenden Stoffen und Bauteilen mit lebenden Pflanzen (Grünschwelen, bepflanzte Trockenmauern und Gabioni, Hangroste usw.).

Einteilung nach [1,15].

sung seien die Begriffe «Standfestigkeit» und «Stabilitätsberechnung» kurz erläutert.

Die *Standfestigkeit* (Stabilität) einer Böschung hängt von vielen Faktoren ab. Der Aufbau des Bodenkörpers, die hydrologischen Verhältnisse, die Vorgesichte, die Neigung und – bis zu einer gewissen Tiefe – die Pflanzendecke sind von entscheidender Bedeutung. Verändern sich diese Faktoren mit der Zeit (z.B. infolge Verwitterung, Platzregen usw.) oder infolge äusserer Eingriffe wie bauliche Massnahmen, Absenkung bzw. Einstau des Grundwassers, aber auch wegen Kahlschlägen (Waldsterben!), so beeinflusst dies die Standfestigkeit massgebend.

Für die *Stabilitätsberechnungen* wird ein Bruchmechanismus angenommen, anhand dessen die in einer Gleitfläche wirkenden Schubspannungen  $\tau$  vorausgesagt und mit der Scherfestigkeit  $\tau_f$  des Bodens verglichen werden:

$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi'$ , wobei:  $c'$  = effektive Kohäsion,  $\sigma'$  = effektive Normalspannung,  $\phi'$  = effektiver innerer Reibungswinkel.

Die Sicherheit einer Böschung wird als Quotient ausgedrückt:

$$F = \tau_f / \tau.$$

$F = 1$  bedeutet demzufolge den Bruchzustand. Für  $F > 1$  wird die Scherfestigkeit des Bodens wegen der geringen Verformungen nur teilweise mobilisiert, so dass langsame Bewegungen in Spannungsbereichen unterhalb der Scherfestigkeit möglich sind. Dieses Verhalten heisst *Kriechen*.

Für eine aussagekräftige Stabilitätsanalyse sind folgende Voraussetzungen von grösster Bedeutung:

- Ein Baugrundmodell, welches grundsätzlich zutreffende Annahmen über Porenwasserdrücke erlaubt.

- Die grundsätzlich zutreffende Beschreibung des Scherverhaltens des Bodens und die annähernd richtige Quantifizierung der Scherparameter [2].

Die Wahl des Berechnungsverfahrens ist dagegen von zweitrangiger Bedeutung.

Bisher gibt es noch kein zuverlässiges Nachweisverfahren, in welchem auch die bodenfestigende, wirksam werdende Vegetationsdecke berücksichtigt wird, weil erst wenige Angaben über Festigkeitsparameter (Kohäsion, Reibungswinkel) vorhanden sind.

Ob nun eine Böschung oder ein Hang durch den Grünverbau die erforderliche Standsicherheit erlangt, hängt von seiner edaphisch und geologisch bedingten Standfestigkeit und von potentiellen Bruchmechanismen ab. Erfahrungsgemäss lässt sich für oberflächennahe Bruchmechanismen die Standsicherheit bei einer sorgfältig ausgeführten und rechtzeitig wirksam werdenden Grünverbauung erhöhen. Dagegen können Grünverbauungsmethoden – im Falle flächenhaften Gleitens mit einer tief unter dem Wurzelwerk liegenden Gleitfläche und im Falle räumlichen Gleitens mit tiefreichender Verzerrungszone sowie langzeitigen Kriechbewegungen – die Instabilität eines Hanges nicht aufheben. Dazu sind Hartbauweisen notwendig, die allerdings mit passenden ingenieurbio-logischen Massnahmen vervollständigt werden können.

Grünverbauungsmassnahmen tragen also nur dann zur Standsicherheit von Erdböschungen und Hängen bei, wenn diese in ihrem Oberflächenbereich abgleit- bzw. erosionsgefährdet sind. Wodurch und wie wirkt nun die Pflanze in diesem Bereich auf die Bodenbefestigung ein?

## Wirkung von Spross und Wurzel

Zwischen der Bodenentwicklung und der Ausbildung des Wurzelsystems besteht eine ständige Wechselwirkung (Bild 1). Immer grösser werdende Bodenvolumina (Tiefenwirkung) werden immer dichter von Wurzeln durchwachsen und umschlossen, sofern keine Hindernisse auftreten (Grundwasser, Verdichtungen u.a.).

Die deckende Vegetation schützt den Boden vor Verschlämmung und vor Erosion. Zudem verbessert sie infolge ihrer *Retentionswirkung* die Infiltrationsverhältnisse des Wassers. Durch Evapotranspiration und kapillare Saugwirkung der Wurzeln werden Porenwasserunterdrücke erzeugt. Der Boden wird kapillar konsolidiert, und sein Wassergehalt nimmt ab. Damit wächst die Scherfestigkeit der Böden, und die Porenwasser-Unterdrücke bewirken zusätzlich eine *scheinbare Kohäsion*, die aber wieder verschwindet, wenn z.B. bei Regen Sättigung eintritt.

Zudem zeigt die Durchsicht der vorhandenen Literatur folgende Erkenntnisse:

- *Siedeck* (1965) hat in Modelluntersuchungen und analytischen Berechnungen festgestellt, dass eine durchwurzelte Schicht die Standsicherheit einer Böschung erheblich erhöht [3].
- *Schaarschmidt* (1974) erbrachte den wichtigen Nachweis, dass durch den Einbau von Buschlagen Böschungen steiler gestellt werden können. Er fand eine Beziehung zwischen der Einlagetiefe, dem Einlegeabstand und dem Einlegewinkel [4].
- Durch das laufende Neubilden und Absterben der Wurzeln entstehen mit Humus angereicherte Wurzelröhrrchen, in deren Bereich *intensive Lebendverbauung mit Mikroorganismen*

Bild 1. Extensivwurzler. Purpurweide (*Salix purpurea*) mit weitreichendem Wurzelwerk in mergeligem Boden (Foto A. Burkard)

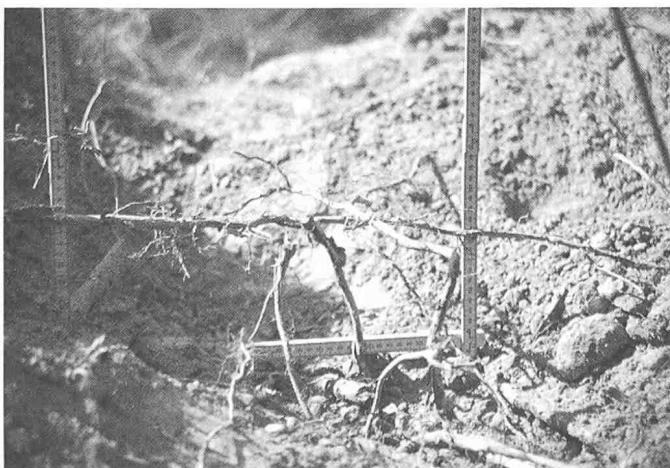
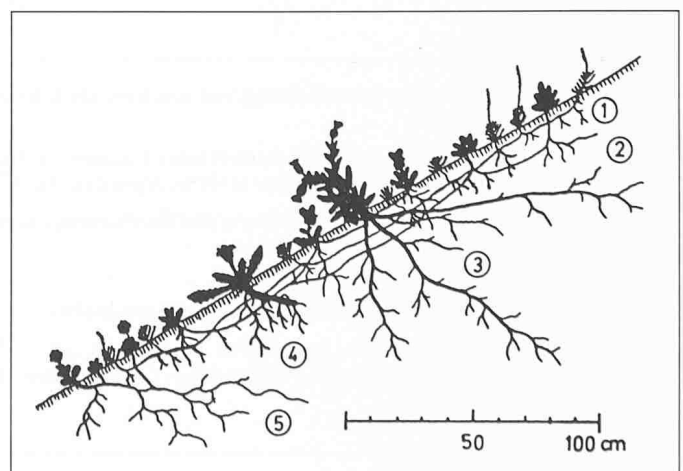


Bild 2. Natürlicher Pionierbestand auf alpinem Kalk-Schutt (*Trisetum distichophyllum*) nach [10]. 1 *Trisetum distichophyllum*, 2 *Viola calcarata*, 3 *Silene vulgaris*, 4 *Crepis tergloviensis*, 5 *Thlaspi rotundifolia*



men beginnt [5]. Sie verkitten die Bodenteilchen aufgrund der Schleimbildung und schaffen so ein sehr stabiles krümeliges Bodengefüge. Dabei handelt es sich um die lose Verknüpfung von winzigen Primär-Aggregaten durch koloniebildende und fädige Formen des Mikro-Edaphon. Die Schleimabsonderung der Wurzelverzweigungen und Wurzelhaare verstärkt dies noch.

Sogenannte Bio-Gele bilden dabei elastische Brücken zwischen «belebt» und «unbelebt», bei deren Dynamik erhebliche Klebkräfte an ihren Grenzflächen zu allen Bodenpartikeln auftreten [6]. Aus kohäsionslosen Böden entstehen dabei Böden mit zum Teil sehr hohen Kohäsionswerten.

- Im Hochgebirge liegen die Verhältnisse anders. Die Pflanzen produzieren fast keine Wurzelausscheidungen. 80 bis 90 Prozent ihrer Stoffproduktion bringen sie in die unterirdische Triebmasse ein [7]. Die Wurzelbefestigung geschieht hier vor allem durch den Aufbau von *Haftreibung* an der Manteloberfläche der Wurzeln.
- Nassif (1965) untersuchte den Einfluss organischer Bestandteile auf die physikalischen Eigenschaften, insbesondere auf die Scherfestigkeit bindiger Böden. Er versetzte Tonböden mit Proteinen und Mikroorganismen. Dabei stellte sich heraus, dass Proteine den Winkel der inneren Reibung vergrössern und Mikroorganismen ihn verkleinern. Die Kohäsion wurde jedoch sowohl nach Protein- als auch nach Mikroorganismenzugabe verbessert [8].
- An mit synthetischen Fasern und Vliesen armierten Proben führte Bucher (1983) triaxiale Scherversuche durch; er stellte dabei eine wesentliche Erhöhung der Scherfestigkeit fest [9].

Die vorgenannte, durch direkte und indirekte Einwirkungen der Pflanzen und Pflanzenwurzeln bedingte Festigkeitszunahme ist – mit wenigen Ausnahmen – unter natürlichen Bedingungen nach Grösse und Zeitabhängigkeit bisher noch weitgehend unbekannt. Schwierigkeiten bereitet nach wie vor die Quantifizierung dieser Festigkeitszunahme, mit der die festigende Wirkung der Wurzeln für oberflächennahe Kriech- und Rutschvorgänge in die Standsicherheitsberechnung einbezogen werden könnte.

Die Festigkeitseigenschaften lebender Baustoffe und die Art und Weise, in der sie Beanspruchungen aufnehmen, weichen von denen toter Baustoffe ab. Die Beanspruchungsformen von Pflanzen

und Wurzeln sind bisher nur vereinzelt systematisch erfasst worden.

## Wurzelbildung

Pflanzen weisen eine erbliche Tendenz auf, eine bestimmte Form des Wurzelsystems auszubilden. *Extensivwurzler* (Bild 1) entwickeln ein weitreichendes und damit meist auch tiefgehendes System, je nachdem, ob eine starke Verankerung nötig ist oder tiefliegendes Grundwasser erreicht werden muss; *Pfahlwurzler* gehören zu dieser Gruppe.

*Intensivwurzler* bleiben meist in den obersten Bodenschichten mit kurzen, stark verzweigten, dicht beieinander liegenden Wurzeln; sie sind also *Flachwurzler*. Gemischte Pflanzenbestände bilden gestufte Wurzelhorizonte und verhindern dadurch die Bildung von Gleithorizonten (Bild 2).

## Belastungsreiz und Reaktion

Oberirdisch angreifende Kräfte – zum Beispiel aus der Anströmung durch Wind und Wasser sowie aus Schuttbewegungen und Schnee – belasten die Sprosssteile vor allem auf *Biegung*. Dies führt sekundär zur Belastung der Wurzeln auf *Zug* und *Druck* sowie *Scherung* und *Torsion*. Unterirdisch angreifende Kräfte ergeben sich aus allen Formen der Bodenbewegungen im durchwurzelten Raum und aus Überlagerungen (z.B. durch Schnee und Schutt) und verursachen ebenfalls verschiedenartige Beanspruchungen [11].

Diese Belastungen und ihre Änderungen – ob sie nun langsam oder schnell, intermittierend oder dauernd wirken – sind für lebende Pflanzen *physiologische Reize*, auf welche sie in vielfältiger Weise reagieren. So kommt es zu beschleunigtem Längen- und sekundärem Dickenwachstum der Wurzelfäden, zum Ausheilen von Gewebeverletzungen in Ruhephasen und zur Ausbildung von Zugankerwurzeln (Bild 3). Das Massenverhältnis Wurzel:Spross ändert sich (die im Grünverbau bestgeeigneten Pflanzenarten weisen ein Verhältnis zwischen eins und zwei auf, d.h., die Masse der unterirdischen Organe ist grösser als die der oberirdischen). Im Steilhang beobachtet man bei Holzgewächsen eine Funktionsteilung zwischen ernährenden und haltenden Wurzeln sowie die Ausbildung von zusätzlichem Festigkeitsgewebe. Die Stammquerschnitte werden unter Schneedruck oval, die Stämme zeigen Krumm- und Säbelwuchs. Diese Anpas-

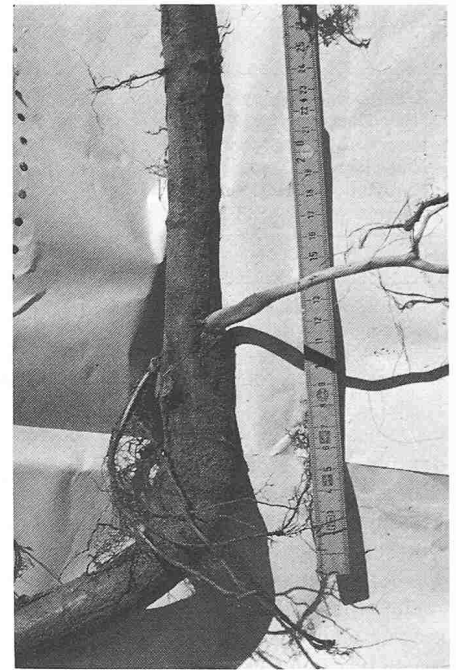
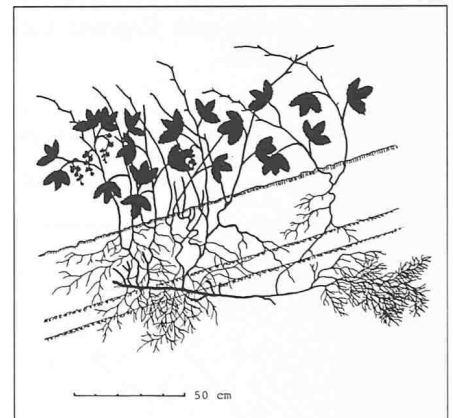


Bild 3. Zugankerwurzel einer fünfjährigen Reifweide (*Salix daphnoides*) in Granitschüttung (Foto A. Burkard)

Bild 4. Zweimal überschotterte Himbeere (*Rubus idaeus*) z.T. nach [10]



sungen nennt man *Mechanomorphosen* (Senn 1922). Zusätzlich können gewisse Pflanzen (Weiden, Ahorn, Eschen, krautige Arten und Gräser) durch die Ausbildung adventiver *Wurzelstockwerke* Verschüttungen durch Übermürung oder nachfolgende Erosion schadlos überstehen (Bild 4).

## Wurzelfestigkeit

Die Pflanzenwurzeln wirken als lebende Bodenarmierung, können sie doch erhebliche Zugbeanspruchungen aushalten. Allein die mehr oder weniger heftige Bewegung der Pflanzen bei Wind verursacht andauernd erhebliche Biegungen und somit Druck- und Zugbelastungen, also physiologische Reize mit biotechnischen Folgen. Vor allem



| Pflanzen   | Zugfestigkeiten [kN/cm <sup>2</sup> ] |      |           |
|--|---------------------------------------|------|-----------|
|  | max.                                  | min. |           |
| Ackerquecke ( <i>Agropyron repens</i> )            | 2,53                                  | 0,72 | STINY     |
| Nesselglockenblume ( <i>Campanula trachelium</i> ) | 0,37                                  | 0    | STINY     |
| Luzerne ( <i>Medicago sativa</i> )                 | 6,65                                  | 2,54 | SCHIECHTL |
| Knäuelampfer ( <i>Rumex conglomer.</i> )           | 0,62                                  | 0,14 | STINY     |
| Feld-Beifuss ( <i>Artemisia campe.</i> )           | 2,64                                  | 0,91 | SCHIECHTL |
| Schweiz. Weide                                     | 2,40                                  | 0,76 | HILLER    |
| Scherfestigkeiten [kN/cm <sup>2</sup> ]            |                                       |      |           |
| Luzerne ( <i>Medicago sativa</i> )                 | 2,62                                  | 1,03 | SCHIECHTL |
| Beifuss ( <i>Artemisia vulg.</i> )                 | 4,77                                  | 0,65 | SCHIECHTL |

Tabelle 1. Zug- und Scherfestigkeiten junger Wurzeln

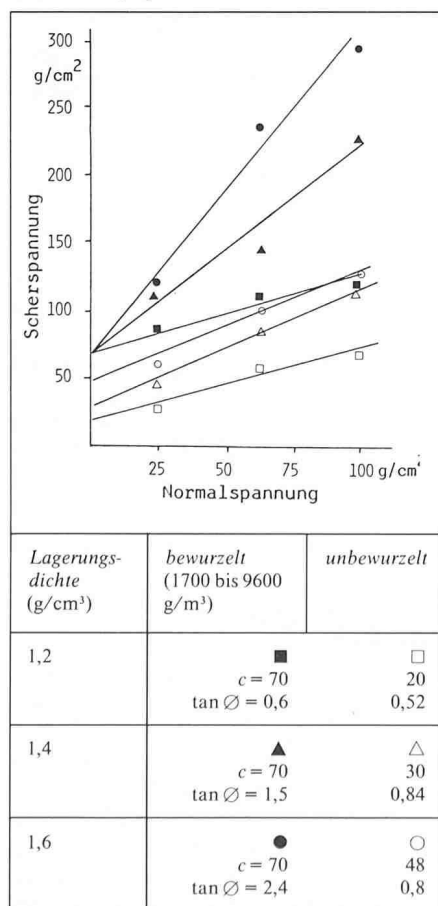
der Zentralzylinder im Inneren der Wurzeln bedingt die Zugfestigkeit. Messungen der Wurzelzugfestigkeiten sind schon 1947 von *Stiny* durchgeführt worden. *Schiecht* (1958) hat diese Versuche mit Wurzeln bis 3 mm Durchmesser weitergeführt und auch Scherversuche angestellt. *Hiller* (1966) berichtet über Zugversuche an einjährigen Weidenwurzeln ( $\varnothing < 2$  mm). Wie die Messergebnisse zeigen, haben schon junge, sehr dünne Wurzeln hohe Zugfestigkeiten (Tabelle 1).

Bei den von *Schiecht* abgescherten Zugwurzeln deuten sich folgende Gesetzmässigkeiten an:

- Die Zugfestigkeit steigt, die Scherfestigkeit sinkt mit zunehmendem Wurzeldurchmesser.
- Holzige Wurzeln weisen im Verhältnis zur Zugfestigkeit eine hohe Scherfestigkeit auf, bei krautigen dagegen ist die Zugfestigkeit meist mehr als doppelt so hoch wie die Scherfestigkeit.
- Zugankerwurzeln (Bild 3) sind zugfester als Stücke der übrigen Wurzelteile.

Eine Durchsicht der Literatur fördert nur wenige weitere und nur unscharf definierte Werte und qualitative Hinweise über Zug- und Scherversuche an Wurzelstücken zutage. Mangels genauer Definitionen der Prüflinge (Zeitpunkt der Entnahme innerhalb der Vegetationsperiode, Feuchtegehalt, Länge und Dicke u.a.) sind die Ergebnisse kaum vergleichbar. Die Übertragung solcher Werte auf die Wurzeln im Boden würde wenig besagen, da es ja kaum eine rein axiale Zugbewegung geben wird. In einem nächsten Schritt müssten bestimmt werden:

- Die Festigkeit des Systems Boden-Wurzel eines Pflanzenbestandes in situ, also im ungestörten natürlichen Zustand,
- die Grösse der zur Mobilisierung der durch die Wurzeln erzeugten zusätzlichen Festigkeit erforderlichen Deformationen.

Bild 5. Auswirkungen der Bodenbefestigung mit Wurzeln der *Alnus firma* auf die Scherfestigkeit, unter der Voraussetzung der Wassersättigung des Bodens nach [13]

## Die Verbundfestigkeit der Boden-Wurzel-Matrix

Vergleichende Zug-, Scher- und Biegeversuche an einzelnen Wurzeln sind trotz der Unschärfe der Versuchsbedingungen zweifellos pflanzenanatomisch interessant, für bodenmechanische Fragen aber zu wenig aussagekräftig. In allen Werken, die sich mit den Wurzeln der Pflanzen befassen, wird nur das Wurzelwerk der einzelnen Pflanzenart dargestellt und behandelt. Das – so oft beschworene – bodenfestigende Wurzelnetzwerk wird zwar für einzelne

Pflanzenarten, nicht aber für gleichaltrige oder ungleichaltrige Bestände unterschiedlicher Artenzusammensetzung auf verschiedenartigen Böden, geschweige denn auf Hanglagen unterschiedlicher Exposition und Neigung sichtbar gemacht. Ein erster Ansatz, das Wurzelwerk von Beständen zu zeigen, ist in einigen wenigen schematischen Darstellungen zu sehen [1,10] (Bild 2).

Versuche, das Wurzelgeflecht im natürlichen Verbund mit den Bodenpartikeln als *Verbundfestigkeit der Boden-Wurzel-Matrix* (*Grubinger*, Institut für Kulturtechnik ETH Zürich) zu bestimmen, sind 1981 von *Ziemer* durchgeführt worden [12]. Er hat die Scherfestigkeit von ausgedehnten kahlgeschlagenen und später wieder aufgeforsteten Waldflächen untersucht. Dabei ergab sich, dass die Scherfestigkeit der Boden-Wurzel-Matrix mit zunehmender Biomasse der lebenden Baumwurzeln etwa linear zunimmt. Drei Jahre nach dem Kahlschlag enthalten die Böden nur noch etwa einen Drittel der ursprünglichen Wurzelmasse, die Scherfestigkeit ist bereits stark abgefallen. Nach sieben Jahren natürlichen Aufkommens der Busch- und Strauchvegetation liegt die Scherfestigkeit bei etwa 40 Prozent der ursprünglichen Werte und erreicht bei vollausgebildeter Buschvegetation nach 12 bis 14 Jahren etwa 70 Prozent. Die Ergebnisse zeigen, dass ein an sich labiler Hang ohne weiteres instabil werden kann, wenn die Bestockung verschwindet, und dass umgekehrt seine Stabilität wieder zunehmen kann.

Der Japaner *Kobashi* [13] hat den experimentellen Nachweis erbracht, dass das Wurzelsystem die Bodenschersfestigkeit erhöht. Mit einem Direktscherapparat mass er die Differenz der Scherfestigkeit von bewurzelten (fünfjähriger Erlenbestand) und unbewurzelten Prüflingen unter der Voraussetzung der Wassersättigung des Bodens (Bild 5).

Im Bild 6 wird die Beziehung zwischen der Veränderung von  $\tan \varnothing$  und  $c$  einerseits und der Lagerungsdichte andererseits gezeigt. Bei geringer Lagerungsdichte wird die Scherbeanspruchung des Bodens als Zugspannung auf das Wurzelsystem übertragen. Dabei ist eine Erhöhung der Kohäsion  $c$  und damit eine Zunahme der Scherfestigkeit des durchwurzelten Bodens festzustellen. Bei dichter Lagerung ist das unterirdische Wurzelsystem enger mit den Bodenpartikeln verbunden. Die Wurzelbefestigung geschieht hier vor allem durch den Aufbau von Haftreibung an der Manteloberfläche der Wurzeln. Dies zeigt sich in der Erhöhung des inneren Reibungswinkels  $\tan \varnothing$ .

Über In-situ-Versuche berichtet *Haehne* 1985 [14], der mit einem Kasten-schergerät die Scherkräfte an mit Graswurzeln durchwachsenen Böden gemessen hat. Die Durchwurzelung macht sich bei den untersuchten Gräsern (*Festuca rubra*, *F. ovina*) noch in 15 cm Tiefe mit einer deutlichen Vergrößerung der Kohäsion bemerkbar.

Alle hier kurz skizzierten Versuche zeigen eine Erhöhung der Scherfestigkeit von durchwurzelten Bodenschichten. Aufgrund der Tatsache, dass erst wenige Versuche durchgeführt wurden, fehlt die statistische Grundlage zur Quantifizierung der wurzelbedingten Erhöhung der Bodenschersfestigkeit. Deshalb kann das Wurzelwerk bei Standfestigkeitsberechnungen von Böschungen und Hängen vorläufig noch nicht mit einbezogen werden.

Erste Schritte, dieses Ziel zu erreichen, hat das Institut für Kulturtechnik der ETH Zürich (Prof. Dr. H. Grubinger) seit 1985 unternommen. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Grundbau und Bodenmechanik (Vorsteher: Prof. H.J. Lang) sind zur Zeit triaxiale Scherversuche im Gange. Sie dienen der Untersuchung der Scherfestigkeit durchwurzelter Proben, zur Klärung einiger grundlegenden Zusammenhänge und zur Eichung eines Feldgeräts, *Messegge* genannt (Bild 7), das den Widerstand eines natürlich gewachsenen und durchwurzelten Bodens angibt (Verbundfestigkeit). Dieses am Institut für Kulturtechnik konstruierte Gerät kommt dem immer wieder geäußerten Wunsch nach In-situ-Messungen an geneigten, verschieden durchwurzelten, gleichaltrigen oder ungleichaltrigen Beständen entgegen.

## Ausblick

Grundlage für den Erfolg im Grünverbau ist die Kenntnis der standörtlichen Voraussetzungen mit ihren jeweiligen pflanzenphysiologischen Gegebenheiten und den daraus abgeleiteten Bauweisen. Die sichersten Ergebnisse werden stets mit artenreichen Beständen erreicht, die sich sowohl aus Extensiv- als auch Intensivwurzeln zusammensetzen und damit alle Bodenschichten, ohne Ausbildung deutlicher Wurzelhorizonte, gut durchwurzeln. Dies verhindert die Entstehung bzw. das Wirksamwerden oberflächennaher Gleitflächen

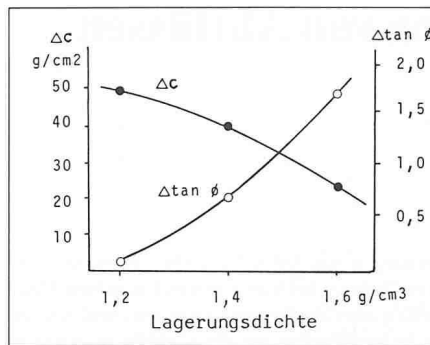


Bild 6. Beziehung zwischen der Lagerungsdichte und der Zunahme von  $c$  bzw.  $\tan \phi$  aus Bild 5:  $\Delta c = c(b) - c(u)$ ;  $\Delta \tan \phi = \tan \phi(b) - \tan \phi(u)$ , (b) Eigenschaften des bewurzelten, (u) des unbewurzelten Bodens

wie Schichtgrenzen, Sprünge der Lagerungsdichte und der Wasserleitfähigkeit.

Im Zusammenhang mit der Standsicherheit von Böschungen und Hängen stellen sich bezüglich der Vegetationsdecke mit ihrer Verbundfestigkeit der Boden-Wurzel-Matrix folgende Fragen:

- Wie tief reicht der mechanische Einfluss von Pflanzen in welchen Böden?
- Welche Intensität der Durchwurzelung hat gerade noch einen Einfluss auf die Scherfestigkeit der Böden?
- Wie verläuft die Änderung der Scherfestigkeit eines Wurzel-Boden-Verbundes als Funktion von Zeit und Tiefe?
- Welche Pflanzen erreichen in welchen Böden die grösste Scherfestigkeit?
- Wie gross sind die zur vollen Mobilisierung der Festigkeit erforderlichen Deformationen?

Der Umgang mit lebenden Bauelementen, die heute gezielt verwendet werden, verlangt vom Ingenieur Umdenken. Er muss sich vermehrt mit der Biologie vertraut machen. Der Biologe als Botaniker und Ökologe muss seinerseits lernen, die Erkenntnisse aus Anatomie und Physiologie der Pflanzen auf technische Einsatzmöglichkeiten hin auszuwerten.

Adresse des Verfassers: Dipl. Kulturing. ETH André M. Burkard, Institut für Kulturtechnik, ETH Höggerberg, 8093 Zürich.

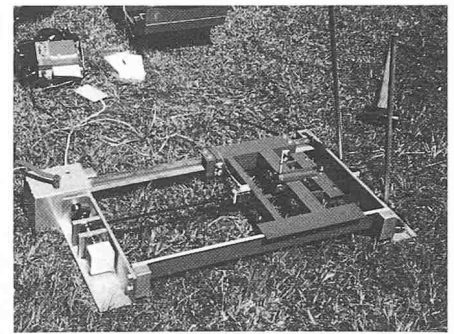


Bild 7. *Messegge* (Prototyp 2) mit x/y-Schreiber zur ersten Auswertung im Felde (Foto Ch. Kuhn)

## Literatur

- [1] Schiechtl, H. M. Sicherungsarbeiten im Landschaftsbau. München: Callwey-Verlag 1973
- [2] Lang, Huder. Bodenmechanik und Grundbau. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1985
- [3] Siedeck, P. Böschungssicherung. Strassen- und Tiefbau 19 (1965) Nr. 6, S. 696
- [4] Schaarschmidt, G. Zur ingenieurbio-logischen Sicherung von Strassenböschungen durch Bewuchs und Lebendverbau. Diss. RWTH Aachen 1974
- [5] Pauli, F. W. Bodenfruchtbarkeit - Gemeinschaftsleistung von Pflanzen und Mikroorganismen. Ruperto Carola 62/63 (1979) S. 78-82
- [6] Pauli, F. W. Lebendverbauung der Pflanzen-Boden-Grenzfläche in Hanglagen. Jahrbuch Gesellsch. f. Ingenieurbiol. Aachen: Sepia-Verlag 1985
- [7] Larcher, W. Ökologie der Pflanzen. Stuttgart: Ulmer 1973
- [8] Nassif, A. M. S. Der Einfluss organischer Bestandteile auf die physikalischen Eigenschaften, insbesondere auf die Scherfestigkeit bindiger Böden. Diss. TU München 1965
- [9] Bucher, F. Verfestigung von Böden durch Fasern. Mitteil. Schweizer. Gesellsch. f. Boden- und Felsmechanik, Nr. 103, Bern 1983
- [10] Schiechtl, H. M. Pflanzen als Mittel zur Bodenstabilisierung. Jahrbuch 1985 Gesellsch. f. Ingenieurbiol. Aachen: Sepia-Verlag 1985
- [11] Grubinger, H. Bodenbefestigung durch Grünverbau. Mitteil. Schweizer. Gesellsch. f. Boden- und Felsmechanik, Nr. 109, Zürich 1983
- [12] Ziemer, R.R. Schutzwald und Rutschungsstabilität. Nach A. Böll, NZZ v. 29.1.1986, Nr. 23, S. 75
- [13] Kobashi, S. The Role of Vegetation of Slope Stability. Beiträge zu Interpretation 1984, Bd. 1, S. 45. Forsch.-Gesellsch. f. vorbeugende Hochwasserbekämpfung, Klagenfurt 1984
- [14] Hähne, K. Scherversuche auf Rasennarben. Z. f. Vegetationstechn. (1985) Nr. 1, S. 19-24
- [15] Kuonen, V. Wald- und Güterstrassen. Pfaffhausen: Eigenverlag 1983