



Doctoral Thesis

## Bautechnisch nutzbare Verbundfestigkeit von Boden und Wurzel

**Author(s):**

Tobias, Silvia

**Publication Date:**

1991

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000609827> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH Nr. 9483

**BAUTECHNISCH NUTZBARE VERBUNDFESTIGKEIT VON BODEN  
UND WURZEL**

**ABHANDLUNG**

zur Erlangung des Titels  
Doktorin der Technischen Wissenschaften  
der  
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von  
SILVIA TOBIAS  
Dipl. Kultur-Ing. ETH  
geboren am 9. Juli 1962  
von Rümlang (Zürich)

Angenommen auf Antrag von  
Prof. DDr. H. Grubinger, Referent  
Prof. Dr. F. A. Klötzli, Korreferent  
Prof. Dr. E. Landolt, Korreferent  
Prof. Dr. O. Pregl, Korreferent

Zürich 1991

## Zusammenfassung

Die Verwendung lebender Pflanzen gehört zu den ältesten Bauweisen im Erd- und Wasserbau. Parallel zur rasanten Entwicklung der Technik ist aber auch ein neues, verstärktes Umweltbewusstsein erwacht. Dadurch wird vermehrt nach der Anwendung naturnaher Bauverfahren getrachtet. Gleichzeitig ist die Verantwortung des Ingenieurs durch den hohen Lebensstandard (Ausdehnung der Siedlungsgebiete, Erschliessung durch Verkehrswege, Energieversorgung) gestiegen. Er muss bei jedem Bauvorhaben die Sicherheit und Tragfähigkeit nachweisen. Doch das ist bei ingenieurb biologischen Bauweisen in der gewohnten Weise nicht möglich. Es existieren keine Berechnungsgrundlagen, die im konkreten Fall zur Dimensionierung eines Schutzbauwerks ausreichen würden, weil sich lebende Pflanzen in jedem individuellen Fall den jeweiligen Standortfaktoren entsprechend entwickeln. Die Verwendung der richtigen Pflanzen in der richtigen Menge zur richtigen Zeit ist bis heute Erfahrungssache jedes Einzelnen.

Die vorliegende Arbeit beschränkt sich auf Probleme aus dem Erdbau. Es wird überprüft, ob sich bodenmechanische Ansätze zur Beschreibung und Quantifizierung der festigenden Wirkung der Vegetation eignen. Dabei geht es nicht nur um das Aufzeigen theoretischer Möglichkeiten, sondern auch um die Beurteilung der praktischen Anwendbarkeit in konkreten Fällen. Wesentlich ist, dass der durchwurzelte Boden als Einheit, in der Pflanze und Boden im Verbund wirken, verstanden wird.

Ein wesentlicher Teil der Arbeit beinhaltet die interdisziplinäre Synthese verschiedenartiger Fachliteratur, worin die für die Ingenieurbiologie wichtigen Aspekte hervorgehoben werden. Der sinnvolle Einsatz lebender Pflanzen zur Bodenfestigung kann nur unter engen Randbedingungen erfolgen. Bevor ingenieurb biologische Massnahmen zur Hangbefestigung in Erwägung gezogen werden, müssen die Art und Ursache der Massenbewegungen sowie die Tiefe der Schwächezonen sehr genau untersucht werden. Denn der Einflussbereich der Vegetation geht nicht tiefer als ihre Wurzeln reichen, das heisst in der Regel ein bis zwei Meter tief. Zudem müssen die Ansprüche der Pflanzen in physiologischer und ökologischer Hinsicht erfüllt sein, denn nur eine gesunde Pflanze kann im erforderlichen Mass zur Bodenfestigung beitragen. Dabei ist es besonders wichtig, dass das ökologische Umfeld der Pflanzen stimmt. Es sind nicht einfach für die technischen Anforderungen geeignete Pflanzenkombinationen einzubringen, sondern solche Pflanzengesellschaften, die am jeweiligen Standort zum entsprechenden Zeitpunkt natürlicherweise vorzufinden wären. Ansonsten werden gute Bodenfestiger, die in der Regel konkurrenzschwach sind, von weniger geeigneten Arten verdrängt. Wenn dadurch wenige Arten zur Vorherrschaft gelangen, hört auch die Bewurzelung in einer einheitlichen Tiefe abrupt auf, was zu einer gefährlichen Diskontinuität im Boden führen kann.

Zur bodenmechanischen Beschreibung der Verbundwirkung zwischen Wurzeln und Boden wird die Theorie der bewehrten Erde von VIDAL [1966] auf den durchwurzelten Boden übertragen. Das Bruchverhalten des durchwurzelten Bodens hat grosse Ähnlichkeit zu dem der bewehrten Erde. Aus Dimensionierungsansätzen für Bauwerke aus bewehrter Erde wurde deshalb ein theoretisches Modell abgeleitet, um den Armierungseffekt der Wurzeln analytisch zu erläutern. Für die Anwendung in konkreten Fällen enthält es aber zu viele schwer bestimmbare Parameter. Allerdings liesse sich an massstäblichen Modellböschungen aus bewehrter Erde das Bruchverhalten bewachsener Hänge studieren.

Die in dieser Arbeit vorgestellten klassischen bodenmechanischen Ansätze beziehen sich nur auf die Grösse der Spannungen im Bruchzustand, nicht aber auf die zugehörigen Deformationen. Ein wesentlicher Vorteil bewehrter Böden - sei es durch lebende Wurzeln oder synthetische Baustoffe - liegt jedoch in der grossen Verformbarkeit des Systems, bevor es endgültig bricht. Dadurch ist es auch im deformierten Zustand noch belastbar. Diese Duktilität kann aber nicht in die klassischen Sicherheitsbetrachtungen einbezogen werden. Somit kann man keine Aussage über tolerierbare oder gefährliche Deformationen machen.

Dennoch kann die festigende Wirkung der Vegetation anhand eines bodenmechanisch definieren Parameters quantifiziert werden, als Erhöhung der Scherfestigkeit. Für diese Arbeit wurden Feldversuche an krautigen Pflanzen durchgeführt, denn es war ein grosses Anliegen, natürliche Zustände wiederzugeben. Die Vegetation entwickelt sich den herrschenden Bedingungen entsprechend, daher kann das Verhalten eines natürlich bewachsenen Bodens nur direkt im Feld beobachtet werden. Einerseits wurden grosse Rahmen-Scherversuche durchgeführt, andererseits wurde ein neues Verfahren mit einer eigens entwickelten "Messegge" erprobt.

Die Rahmen-Scherversuche waren als Direkt-Scherversuche geplant. Es bildete sich jedoch in keinem Fall eine ebene Scherfläche an der Unterkante des Scherrahmens aus. Es kam stets zu einem passiven Bruch als Folge der Probengrösse (50 cm x 50 cm x 8 cm) und der Bewurzelung. Die Resultate ergeben daher nicht die Scherfestigkeit in einer gewissen Tiefe, sondern über die ganze Dicke einer bestimmten Bodenschicht. Die Messungen fanden an der Bodenoberfläche, das heisst unter extrem kleinen Spannungen, statt. Unter diesen Umständen ist die Scherfestigkeit keine lineare Funktion der Scherparameter  $\phi$  und  $c$ . Zudem beeinflusst die Vegetation beide Parameter in unbestimmtem Masse. Daher kann die Scherfestigkeit nur als integrale Grösse angegeben werden. Eine Aufsplitterung in die einzelnen Scherparameter hat wenig Sinn. Die Vegetation trägt aber nicht nur durch die anmierenden Wurzeln zur Erhöhung der Scherfestigkeit bei, sondern auch durch die Saugspannung und die Förderung der Aggregatbildung durch Wurzelabscheidungen. Alle drei Effekte spielen eng zusammen und können nicht getrennt untersucht werden.

Bei den Messeggen-Versuchen ist der Bruchvorgang sehr viel komplizierter als bei den Rahmen-Scherversuchen. Es ist nicht klar, welche physikalische Grösse gemessen wird, und es kann kein Bezug zur Scherfestigkeit hergestellt werden. Somit kann die Messegge nicht zur Bestimmung der Scherfestigkeit empfohlen werden. Demgegenüber hat sich das Rahmen-Schergerät in seiner relativ einfachen Bauweise bewährt.

Zwischen den einzelnen Kulturen liessen sich Festigkeitsunterschiede feststellen. Höhere Scherfestigkeiten wurden in der Regel bei ausdauernden Untergräsern, die zur dichten Rasenbildung fähig sind, gemessen. Zum Teil zeichnen sich diese durch besondere Trittfestigkeit aus (*Poa pratensis*, *Agrostis stolonifera*). Das flachwurzelnde *Lolium multiflorum* (Italienisches Raygras), ein typisches Futtergras, ist hingegen für Befestigungszwecke ungeeignet. Im Grunde genommen bestätigen die Messungen die Erfahrungen qualitativer Beobachtungen. Bei altbekannten Bodenfestigern wie *Poa pratensis* (Wiesenrispe), *Agrostis stolonifera* (Flechtstrausgrass), *Festuca pratensis* (Wiesenschwingel) und *Festuca rubra* (Rotschwingel) wurden relativ hohe Werte für die Scherfestigkeit gemessen. Es sind Gräser, die natürlicherweise an Standorten mit häufigen Bodenbewegungen vorzufinden sind. Als Beispiel sei *Festuca pratensis* (Wiesenschwingel) erwähnt, welche typischerweise auf subalpinen Futterwiesen an Rutschhängen vorkommt. Das heisst, aus Naturbeobachtungen bekannte Tatsachen sind durch einen in der Ingenieurtechnik gebräuchlichen Parameter - die

Scherfestigkeit - nachweisbar. Das bedeutet ebenfalls, dass die natürliche Selektion auch nach der mechanischen Belastbarkeit erfolgt. Daher ist schon nach rein technischen Gesichtspunkten die Pflanzengesellschaft, die von Natur aus am jeweiligen Standort zum gegebenen Zeitpunkt auftritt, anzustreben. Ingenieurbiologie verlangt die Auseinandersetzung mit der Natur.

## Summary

The use of living plants is one of the oldest techniques in construction engineering. Parallel to the fast industrial development, people have grown a new, strong environmental awareness, thereby bio engineering is becoming more popular. At the same time the responsibility of the engineer has increased because of the high standard of living (expansion of settlements, traffic ways, energy support), and he has to guarantee safety at any construction project. With bio engineering techniques, this is not possible in the usual manner. There are however no rules for dimensioning an individual case because living plants develop very distinctly according to their habitat. The choice of the right species in the right quantity at the right time results from the personal experience of each bio engineer.

Problems discussed in this work are limited on earth construction. It was to be examined, if soil mechanical approaches are sufficient to describe and quantify the tightening effect of vegetation. It is not the matter of showing theoretical possibilities only, but also judging if they are applicable to distinct cases. The essential idea is that the soil containing roots is considered as a unit where the interaction between soil and roots causes a bond strength.

An essential part of the work contents an interdisciplinary synthesis of various technical literature where the aspects important for bio engineering are pointed out. The use of living plants for soil stabilization makes sense only under narrow conditions. Before bio engineering techniques are applied for slope stabilization, the type and the cause of mass movements such as the depth of the weak zone that needs to be studied very carefully. For the influence of vegetation does not go deeper than their roots, to a maximum of one or two meters depth. Moreover the physiological and ecological needs of the vegetation must be satisfied since only healthy plants contribute to soil stabilization. It is especially important that the plants are set in a surrounding that agrees with their ecology. It is not the question of combining those species that meet the technical requirements best but to bring in the communities that would grow naturally on a particular site at the appropriate time. Otherwise species which are good at soil fixation are displaced by more competitive species which are less apt at stabilizing purposes. If few species dominate, all roots end at the same level which could provoke a dangerous discontinuity in the soil.

For the soil mechanical description of the soil and root interaction, theory of reinforced soil by VIDAL [1966] is transferred to the soil root bond system. The soil root system behaves very similarly to reinforced soil in rupture. A theoretical model was deduced from the dimensioning of constructions of reinforced soil to describe the reinforcing effect of the roots analytically. But for practical use it contains too many parameters that are difficult to measure. However physical models of reinforced soil could be useful to study the behavior of slopes covered by vegetation.

The classical soil mechanical approaches presented in this work define only the values of tension in the case of rupture but not the accompanying deformations. An essential advantage of reinforced soil - either by living roots or by synthetic material - is its ductility. The system deforms very strongly before it breaks definitely. Therefore it can endure strain even after deformations. This ductility cannot be respected in classical stability estimation, and there is no method to judge tolerable or dangerous deformations.

However stabilizing effect of vegetation can be quantified by a measurable parameter well known in soil mechanics as an increase of shear strength. In this work in situ tests were made

in herbaceous vegetation because it was a strong option to reproduce natural circumstances. Vegetation develops according to the given conditions and therefore the behavior of a naturally grown sod can only be observed in situ. For observations great shear tests were run and at the same time a new method with a special "test-harrow" was examined.

The shear tests were planned as direct shear tests, but in none of the cases there was a horizontal shear plane at the bottom of the shear frame. At each time a passive rupture occurred as a consequence of the large shear box (50 cm x 50 cm x 8 cm) and the roots. So the results do not represent the shear strength at a certain depth but in the whole thickness of the soil layer. Measurements took place at the soil surface where extremely small tensions occur. Under these circumstances the shear strength is not a linear function of the shear parameters  $\phi$  and  $c$ . Moreover vegetation has an undefinable influence on both parameters. Therefore the shear strength can only be mentioned as an integral value, splitting it into the distinct parameters makes little sense. Vegetation contributes to shear strength increase not only by its reinforcing roots but also by suction and promoting soil aggregation by root secretions. All three effects play closely together and cannot be studied separately.

The test-harrow causes a much more complicated rupture mechanism than the shear box. It is not evident which physical parameter is measured and there is no relationship to the shear strength. After the experiences made in this work, the test-harrow cannot be recommended for shear strength measurements. On contrary simple construction of the shear apparatus has proved its applicability.

The measurements showed differences in shear strength between the individual cultures. Higher values were generally measured with grass that stay short, survive for several years, and tend to build dense lawns. Some show a high resistance against step (*Poa pratensis*, *Agrostis stolonifera*). *Lolium multiflorum*, a typical component in cattle food, is not apt for stabilizing purposes. Basically the measurements prove the experiences of qualitative observations. Relatively high values were measured with well known soil stabilizers like *Poa pratensis*, *Agrostis stolonifera*, *Festuca pratensis*, and *Festuca rubra*. At their natural habitats these grass are often confronted the soil movement which indicates that facts observed in nature can be proved by the shear strength, a parameter which is common in engineering techniques. Also it shows that there is a natural selection after mechanical strain capacity. Therefore for technical reasons the plant community that would naturally occur on the particular site at the given time is to be selected. Bioengineering demands the arrangement with nature.