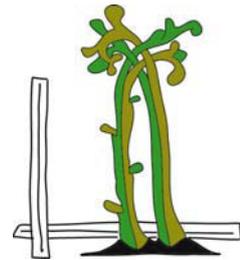




Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau
Department für Bautechnik und Naturgefahren
Universität für Bodenkultur, Wien



Einfluss der Vegetation auf die Stabilität des Bodens

**Eine Literaturstudie
zum aktuellen Stand der Forschung**

Masterarbeit
zur Erlangung des akademischen Grades
Diplomingenieurin der Kulturtechnik und Wasserwirtschaft

Eingereicht von:
Christine Weinberger Bakk. techn.

Betreuung:
O. Univ. Prof. Dr. Florin Florineth
DI Walter Lammeranner

Wien, Mai 2011

Danksagung

Besonderer Dank gebührt O. Univ. Prof. Dr. Florin Florineth für die Diplomarbeitenbetreuung und seine lehrreichen Worte in diversen Vorlesungen und Praktika. DI Walter Lammeranner danke ich ebenfalls für die Betreuung während der Diplomarbeitserstellung.

Auf diesem Weg möchte ich mich außerdem bei allen meinen Wegbegleitern während der Studienzeit bedanken. Dies sind natürlich meine Eltern, welche mir das Studium erst ermöglichten, und meine mich immer unterstützenden Schwestern.

Einem besonderen Menschen in meinem Leben möchte ich für die liebevolle Unterstützung danken, vor allem wenn ich Probleme im LaTeX oder mit meinem Computer hatte. Ein riesengroßes Dankeschön widme ich hier auch meiner Studienkollegin und Mitbewohnerin für die lustigen und unterhaltsamen Stunden. Ich werde unser gemeinsames Studentenleben nie vergessen! - Danke

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit den stabilisierenden Wirkungen der Vegetation auf den Boden. Bei der Zusammenstellung relevanter Fachliteratur wird besonders auf die Erhöhung der Scherfestigkeit durch Pflanzen eingegangen. Abhängig vom Wurzelgehalt und der räumlichen Aufteilung der Bewurzelung steigern die Pflanzen die Scherfestigkeit verglichen mit einem wurzellosen Boden um bis zu 50%. Wovon diese Steigerung genau abhängt, ist bisher noch nicht restlos geklärt. Es wurden hierzu in der Literatur verschiedene Modelle entwickelt um den Einfluss der Vegetation besser quantifizierbar zu machen.

Großes Forschungspotential liegt sicher noch in der Modellentwicklung. Dafür wäre eine Standardisierung der Versuchsmethoden wünschenswert, damit die Ergebnisse unterschiedlicher Autoren besser vergleichbar werden. Ziel dieser zukünftigen Arbeiten sollte ein einfaches Modell sein, welches die Sicherheit eines bepflanzten Bodens gegenüber Rutschungen mit geringem Aufwand möglichst genau berechnen kann.

Abstract

This thesis deals with the ground stabilizing effects of vegetation. The literature search was focused on the enhancement of the soil shear strength. Thus roots can, dependent on root content and the branching of the roots, increase the shear strength up to 50% compared to bare soil. But this enhancement has not been explained exactly yet.

To quantify the influence of the vegetation a lot of models have been developed, but there is still some work to do. At the moment the results of different authors are not comparable, therefore a standardization of test methods should be aimed. The effort of the future research work should preferable result in a simple model, which can calculate the stability of the rooted soil as precisely as possible.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	2
2.1	Pflanzenanatomie	2
2.1.1	Aufbau der Pflanzenwurzel	2
2.1.1.1	Wurzel im primären Zustand	2
2.1.1.2	Wurzel im sekundären Zustand	4
2.1.1.3	Festigungselemente	4
2.1.2	Wurzelmorphologie	6
2.1.2.1	Wurzelsysteme	7
2.1.2.2	Umwelteinflüsse	8
2.1.3	Aufgaben der Wurzel	10
2.1.4	Symbiosen	11
2.2	Bodenmechanik	13
2.2.1	Spannungen und Kohäsion	13
2.2.2	Scherfestigkeit von Böden	14
2.2.3	Messung der Scherfestigkeit	19
2.2.3.1	Direkter Scherversuch	19
2.2.3.2	Feldrahmenscherversuch	21
2.2.3.3	Triaxialversuch	22
3	Stabilität durchwurzelter Böden	25
3.1	Einflussfaktoren	25
3.1.1	Biologische Faktoren	25
3.1.2	Hydrologische Faktoren	26
3.1.3	Mechanische Faktoren	28
3.2	Scherfestigkeit	29
3.2.1	Zugfestigkeit der Wurzel	34
3.2.2	Verbundfestigkeit zwischen Boden und Wurzel	36
3.2.3	Länge und Verzweigung	40
3.2.4	Scherfestigkeitsmodelle	43
3.2.4.1	Soil Root Model	43
3.2.4.2	Fiber Bundle Model	44
3.2.4.3	Modell der virtuellen Dichte	46

3.2.4.4 Theorie der bewehrten Erde	46
3.3 Gewölbebildung	48
3.4 Zusätzliche Auflast	50
3.5 Erosion	51
3.6 Eigenschaften festigkeitsfördernder Pflanzen	53
4 Resümee	56
Abkürzungsverzeichnis	58
Abbildungsverzeichnis	60
Tabellenverzeichnis	63
Literaturverzeichnis	64

1 Einleitung

In der Ingenieurbiologie werden lebende Pflanzen als Erosionsschutz, Uferschutz an Flüssen und zur Stabilisierung von Böschungen eingesetzt. Besonders Rutschungen gefährden den Lebensraum des Menschen und werden seit Jahrhunderten durch vielseitige Maßnahmen versucht zu verhindern. War vor einigen Jahrzehnten der Einsatz von Beton modern und beliebt, greift man heute wieder auf natürliche Maßnahmen zurück. Man lernte von der Natur und stellte fest, dass die Vernachlässigung der Pflege der Vegetation oder Abholzungen zu erheblichen Schäden führten.

Die Ingenieurbiologie versucht durch den Einsatz lebender Baustoffe die Eigenschaften der Pflanzen gezielt zu nutzen. Besonders oberflächennahe Bodenbewegungen können durch richtiges Anwenden der Bepflanzung verhindert werden. Da der Sicherheit des Menschen und dessen Lebensraums aber immer größere Bedeutung zukommt, soll die Wirkung der Pflanzen quantifizierbar sein. Aus diesem Grund wurden in der Vergangenheit einige Modelle entwickelt, um die Erhöhung der Scherfestigkeit durch Vegetation zu berechnen.

Diese Arbeit soll einen Überblick über die bisherigen Forschungsergebnisse in der Stabilisierung von Böden mittels Vegetation geben. Hierzu werden im Kapitel 2 die Grundlagen der Pflanzenanatomie und der Geotechnik erläutert. Im darauffolgenden Kapitel sollen die Ergebnisse der Literaturstudie präsentiert und erörtert werden. Besonderes Augenmerk liegt auf den unterschiedlichen Versuchsmethoden zur Bestimmung der Scherfestigkeit, da diese die Stabilität des Bodens am Besten zu repräsentieren vermag. Es werden vier Scherfestigkeitsmodelle genauer beschrieben, welche in der Literatur am häufigsten vorzufinden waren. Außerdem werden die physiologischen Merkmale der Pflanzen aufgelistet, welche eine gute Stabilisierung zur Folge haben.

Im Resümee sind die wichtigsten Punkte der Arbeit nochmals kurz zusammengefasst und wichtige Bereiche für zukünftige Forschungsarbeiten genannt.

2 Grundlagen

2.1 Pflanzenanatomie

In diesem Kapitel sollen kurz die Grundlagen des Wurzelbaus dargestellt werden, um die verfestigende Wirkung der Wurzeln auf den Boden nachvollziehen zu können.

Die jeweiligen Erklärungen geben nur einen groben Überblick über den Aufbau der Wurzeln. Für genauere Angaben wird auf die Literatur von STRASBURGER (1991) und NULTSCH (2001) verwiesen, welche hier Anwendung fand.

2.1.1 Aufbau der Pflanzenwurzel

Die Wurzel kann verschiedenartig gestaltet sein. Abhängig von der direkt anstehenden Umwelt ergeben sich Unterschiede im inneren Aufbau (primärer und sekundärer Zustand), in der Art der Verzweigung (echte Seitenwurzeln und sprossbürtige Wurzeln) und wie sie morphologisch aufgebaut sind (heterogen und homogen). All diese Eigenschaften und deren Deutung sind wichtig um die Zusammenhänge zwischen Wurzel und Boden zu verstehen.

2.1.1.1 Wurzel im primären Zustand

Im primären Zustand erfolgt eine rasche Vermehrung der Zellen. Das Spitzenwachstum der Wurzel und somit deren Längenwachstum beschränkt sich gemeinsam mit dem geotropen Richtungswachstum fast ausschließlich auf die Primärwurzel. Die Beziehung zur Umwelt ist in diesem Stadium sehr ausgeprägt.

Die Wurzelspitze ist immer primär, sie ist für das Wachstum und das Vordringen in den Boden verantwortlich. Im Längsschnitt wird diese in 4 Zonen eingeteilt, welche in Abb. 2.1 zu erkennen sind. An der vordersten Spitze befindet sich die **Wurzelhaube** (Kalyptra). Die Zellen der Kalyptra verschleimen und schützen so den dahinter liegenden Wurzelscheitel vor mechanischer Beschädigung. Durch die Quellkräfte des Schleims und die Vergrößerung der Zellen durch Wasseraufnahme werden Druckkräfte erzeugt, welche das Vordringen der Wurzel in den Boden erleichtern. Die dahinter liegenden Zellen müssen außerdem durch die Wurzelhaube vor Wassereintritt geschützt werden, da diese noch nicht zur Aufnahme befähigt sind.

Nach der Zone der Wurzelhaube folgt die meristematische Zone oder **Wachstumszone**, wo vermehrt Zellteilungen erfolgen. In der darauffolgenden **Streckungszone** werden die Zellen gestreckt und teilweise auch vermehrt.

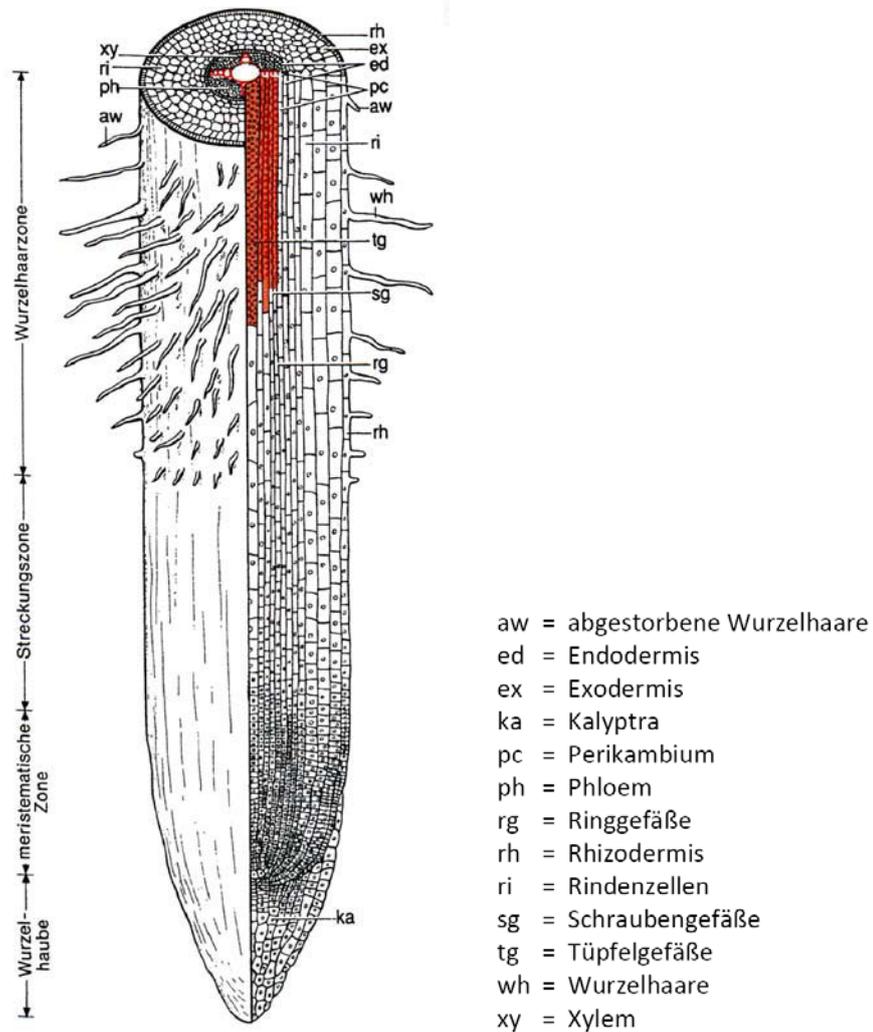


Abbildung 2.1: Bau der Wurzelspitze im Raumdiagramm. (NULTSCH 2001)

Der für die Wasseraufnahme wichtigste Teil der Wurzelspitze befindet sich in der Differenzierungszone, auch **Wurzelhaarzone** genannt. Die Wurzelhaare, die bis zu 10 mm lang werden können, vergrößern einerseits die Oberfläche zur Wasseraufnahme, andererseits erlaubt die Zartheit der Wände das Eindringen symbiontischer Knöllchenbakterien und Pilzhyphen.

Verantwortlich für den Aufbau der Gewebe und für das Richtungswachstum sind die Bereiche hinter der Wurzelhaube. Die Zellen sind sehr empfindlich, deshalb ist deren Weiterentwicklung abhängig von Umwelteinflüssen und Wasserangebot.

Im Bereich der Wurzelhaarzone erfolgt die innere Ausdifferenzierung der Gewebe. Die Leitelemente Xylem und Phloem sind im **Zentralzylinder** radiär angeordnet, wobei sich in der Mitte entweder Xylem befindet, oder es wird durch sklerenchymatische Zellen er-

setzt. Durch diese zentrale Lage wird Biugsamkeit bei hoher Zugfestigkeit gewährleistet.

Der Zentralzylinder wird vom **Pericycel** umschlossen, welcher auch als Perikambium bezeichnet werden kann. Diesem folgt die **Endodermis**. Sie kontrolliert den Durchtritt des Wassers und der darin gelösten Salze in den Zentralzylinder. Die relativ massiv entwickelte **Rinde** umgibt die Endodermis und dient als Speichergewebe.

Als Abschlussgewebe fungiert die **Exodermis**, eine oft schwach verkorkte Zelllage. Die eigentlich abschließende **Rhizodermis** ist sehr kurzlebig und wird von der Exodermis abgelöst.

In Abb. 2.2 A ist schematisch der Aufbau der Wurzel im primären Zustand zu erkennen. Es wurde bereits das Kambium (rot) eingezeichnet, was somit den Übergang zum sekundären Zustand einleitet.

2.1.1.2 Wurzel im sekundären Zustand

Wenn sich die Wurzel im sekundären Zustand befindet, spricht man auch vom sekundären Dickenwachstum. Dies rührt daher, dass erst ab jetzt die Wurzel beträchtlich an Durchmesser gewinnen kann. Die Möglichkeit zum sekundären Dickenwachstum haben einige Pflanzen der Nacktsamer (Gymnospermen) und der Zweikeimblättrigen (Dikotylen) erlangt.

Gleichzeitig mit dem sekundären Dickenwachstum des Sprosses beginnt auch jenes der Wurzeln. Anfangs bildet sich das **Kambium**, ein sekundäres Bildungsgewebe, zwischen Xylem und Phloem sternförmig aus (Abb. 2.2 A). Dieses scheidet nach innen sekundäres Xylem (**Holz**) und nach außen sekundäres Phloem (**Bast**) aus, es kommt zur Verbreiterung der Wurzel. Der anfangs sternförmige Holzteil wird schließlich rund, im Zentrum bleibt das primäre Leitsystem bzw. etwaig vorhandene Sklerenchyme erhalten und das Phloem wird nach außen geschoben (Abb. 2.2 B). Da die Exodermis, die Rinde und die Endodermis dem steten Dickenwachstum nicht folgen können, zerreißen sie, und das nun außen liegende Perikambium bildet ein sekundäres Abschlussgewebe, das Periderm, dessen Zellen verkorkt sind.

2.1.1.3 Festigungselemente

Aufgrund der überwiegenden Zugbeanspruchung der Wurzeln sind die Festigungselemente zentral angeordnet (siehe Kap. 2.1.1.1 und Kap. 2.1.1.2). Diese können aus eigens entwickelten Festigungsgeweben oder auch aus Leitgeweben bestehen.

Das **Festigungsgewebe** ist nur für die mechanische Festigkeit der pflanzlichen Organe verantwortlich. Erreicht wird dies durch ein besonders starkes Dickenwachstum der Zellwände und durch Einlagerungen von Lignin. Einerseits kann Lignin Druck- und

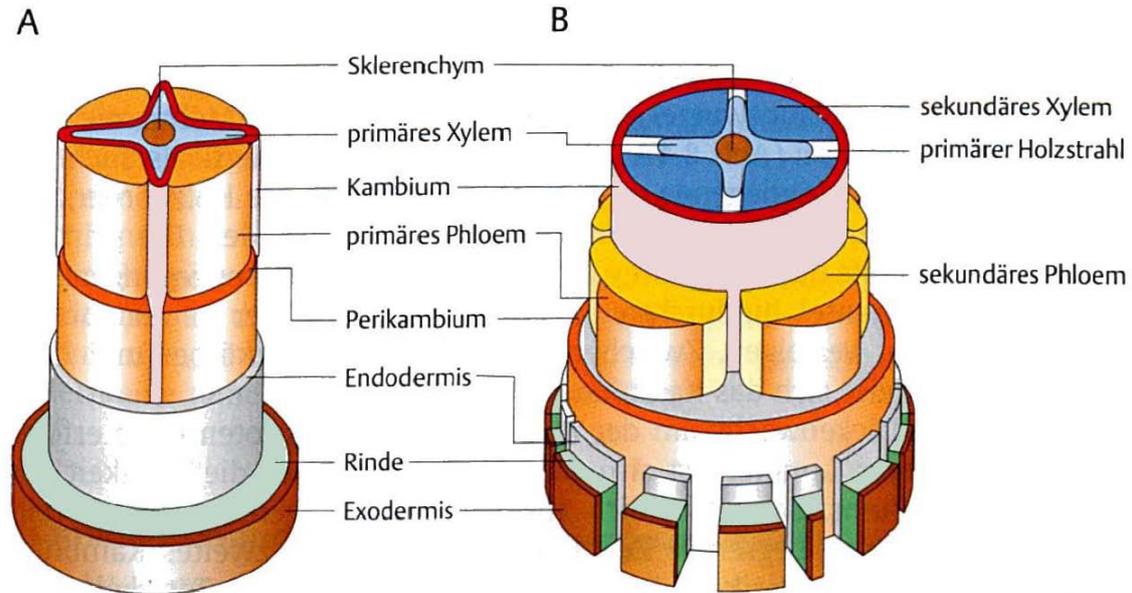


Abbildung 2.2: Vergleich des Wurzelbaus im primären (A) und im sekundären Zustand (B). (NULTSCH 2001)

Zugkräfte aufnehmen, andererseits erschwert es den biologischen Abbau, was wiederum den toten Festigungselementen zugute kommt. Es wird generell zwischen Kollenchyme und Sklerenchyme unterschieden.

Die prosenchymatischen (langgestreckten) Zellen des **Kollenchyms** bleiben meist lebend und teilungsfähig. Bereits die Primärwände besitzen Zellwandverdickungen, diese beschränken sich aber auf bestimmte Bereiche, wie Kanten oder einzelne Wände. Die Wandverdickungen bestehen aus abwechselnden Schichten von Cellulose und pektinartigen Stoffen. Es findet keine Verholzung statt, das heißt, es wird kein Lignin eingelagert. Die dadurch erreichte Festigkeit ist mäßig.

Die Zellen des **Sklerenchyms** sterben nach der Fertigstellung meist ab. Die Wandverdickungen bestehen aus Sekundärwandmaterial, daher ist das Sklerenchym nur in ausgewachsenen Pflanzenteilen zu finden. Häufig wird Lignin eingelagert, wobei die Verdickung der Wände gleichmäßig erfolgt. Die Zellen können isodiametrisch oder palisadenförmig sein (Steinzellen) oder aber auch prosenchymatisch (Sklerenchymfasern). Letztere besitzen eine hohe Elastizität, da ihre Wände unverholzt bleiben. In den Wurzeln befinden sich die Fasern entweder zentral oder in Form von Strängen über den ganzen Querschnitt verteilt.

Das **Leitgewebe** ist in den Wurzeln, im Gegensatz zum Spross, im Zentralzylinder zusammengefasst. Unterschieden wird zwischen dem Phloem und den Xylem, deren Zellen

grundsätzlich prosenchymatischer Form sind.

Die Zellen des **Phloems** (Siebteil) sind lebend und unverholzt. Sie dienen der Leitung von Assimilaten und tragen nur mäßig zur Festigung bei.

Das **Xylem** (Holzteil) ist abgestorben und verholzt. Es wird unterschieden zwischen Tracheen (nur bei Angiospermen) und Tracheiden. Primäre Aufgabe beider Zellen ist die Leitung von Wasser und der darin gelösten anorganischen Stoffe. Aufgrund des entstehenden Unterdrucks in den Zellen bei der Transpiration der Pflanze ist ein Schutz vor Kollabierung vonnöten. Dieser wird durch die Einlagerung von Lignin in den Zellwänden erreicht. Die Festigkeit der gesamten Pflanze wird somit sekundär erhöht.

Die Libriformfasern, auch Holzfasern genannt, ähneln im Aufbau den Sklerenchymfasern, gelten aber als Weiterentwicklung der Tracheiden. Sie dienen ausschließlich der mechanischen Festigung.

2.1.2 Wurzelmorphologie

Die Morphologie ist bestimmt durch den anlagebedingten Bauplan. Das heißt Abwandlungen durch Umwelteinflüsse sind nur innerhalb der Wandelbarkeit des Bauplans möglich.

Generell stehen der Pflanze verschiedene Möglichkeiten der Verzweigung zur Verfügung. Die **Seitenwurzeln** entstehen aus dem Pericycel der Mutterwurzel, welche sich zumindest noch teilweise im primären Zustand befindet. Die leitenden Elemente des Holzes der Seitenwurzel stehen mit denen der Mutterwurzel in Verbindung. Anders ist es bei den **Sprosswurzeln**, oder sprossbürtige Wurzeln genannt. Sie entstehen durch die Umwidmung der Zellen der Sprossachse, die Verbindung der Wurzel mit dem Leitgewebe des Sprosses erfolgt durch Umdifferenzierung von Sprossgewebe. Ob es zur Bildung solcher Wurzeln kommt und wie ergiebig diese ist, ist anlagebedingt. In Abb. 2.3 ist erkennbar, wie fein die sprossbürtigen Wurzeln ausgebildet werden können. Eine Sonderart der Sprosswurzeln sind die **Adventivwurzeln**. Sie entstehen aus sogenannten schlafenden Augen auf der Sprossachse oder gelegentlich auch aus Blättern. Eine besondere Art der Verzweigung bildet die **Wurzelknospe**. Sie entsteht ebenfalls wie die Seitenwurzel aus dem Pericycel und steht mit den Leitelementen der Mutterwurzel in Verbindung. Die Wurzelknospen können auch im sekundären Zustand der Mutterwurzel gebildet werden, treiben aus und entwickeln sich zu einem neuen Spross.

Allgemein kann gesagt werden, dass die Bildung von Seitenwurzeln, Sprosswurzeln und Wurzelknospen davon abhängig ist, welche Phytohormone (Wachstumsstoffe - Hemmstoffe) das Wachstum beeinflussen.

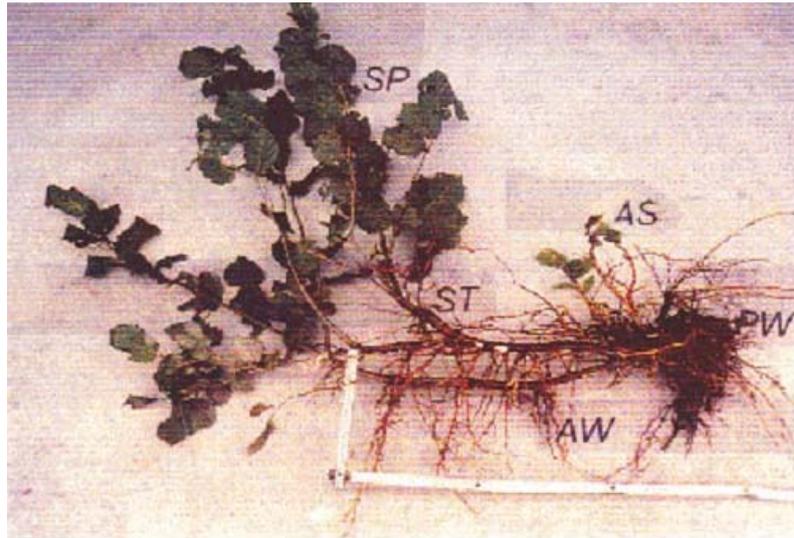


Abbildung 2.3: Sprossbürtige Wurzeln bei der Hasel (*Corylus avellana*). (MOGG 1996, in FLORINETH 2005)

2.1.2.1 Wurzelsysteme

Aufgrund ihrer Entwicklung werden grundsätzlich zwei Wurzelsysteme unterschieden: das heterogene und das homogene Wurzelsystem.

Beim **heterogenen** (oder allorrhizen) Typ wächst die Keimlingswurzel zur Hauptwurzel heran (Abb. 2.4 rechts). Es wird eine Pfahlwurzel gebildet, von welcher sich Seitenwurzeln 1. Ordnung in schräger oder horizontaler Richtung verzweigen. Seitenwurzeln von höherer Ordnung wachsen unabhängig von der Schwerkraft in alle Richtungen. Die meisten Bäume besitzen ein heterogenes Wurzelsystem, manche behalten das vorerst ausgebildete Pfahlwurzelsystem bei. Andere bilden ein Herz- oder Flachwurzelsystem aus.

Beim **homogenen** (oder homorrhizen) Typ kann zwischen primärer und sekundärer Homorrhizie unterschieden werden. Es werden stets sprossbürtige Wurzeln gebildet.

Primär homorrhize Wurzelsysteme bilden bereits eine seitlich angelegte Primärwurzel, welche durch sprossbürtige Wurzeln ergänzt wird. Dieser Typ tritt bei samenlosen Pflanzen auf. Die Samenpflanzen hingegen, besonders die grasartigen Pflanzen, sind Vertreter der **sekundären Homorrhizie** (Abb. 2.4 links). Die Keimlingswurzel verkümmert frühzeitig und wird durch zahlreiche sprossbürtige Wurzeln ersetzt.

Je nach Wurzelsystem kann der Widerstand gegen Windwurf variieren. DUPUY et al. (2005b) errechnete, dass besonders Flachwurzler auf Sandböden und Herzwurzler auf Tonböden die jeweils größte Kippresistenz aufweisen.



Abbildung 2.4: Sekundär homogenes Wurzelsystem der Gräser (links) und das heterogene Wurzelsystem der Distel (rechts).

2.1.2.2 Umwelteinflüsse

Äußere Einflüsse wie Wärme, Feuchtigkeit und Nährstoffe beeinflussen die Anzahl der **Wurzelverzweigungen**. So verursachen grobkörnige Böden öfter Wurzelkrümmungen, was eine größere Wurzelverzweigung zur Folge hat. Der Grund liegt an der Häufung von Seitenwurzeln an der Konvexseite der Krümmungen (KUTSCHERA & LICHTENEGGER 2002).

An feuchten Standorten sind die Wurzeln länger und weniger stark verzweigt. Außerdem ist der Wurzelkörper ausdauernder Arten an wechselfeuchten oder wechsellückigen Standorten T- oder Hantelförmig. An trockenen Standorten hingegen bildet sich ein verkehrt U-förmiges oder zylinderförmiges System aus. Allgemein kann man sagen, dass die Anzahl der Verzweigungen mit der Stärke der Wurzeln abnimmt.

Jede Pflanze hat zunächst das Bestreben, die Bewurzelung nach ihrer artspezifischen Weise zu formen. Die schlussendlich gebildete Wurzelform hängt allerdings davon ab, wie sehr die Pflanze an ihren ökologischen Randbereich gedrängt wird. So können diverse Umweltfaktoren Einfluss auf die **Wurzelform** nehmen:

Licht: Das Licht beeinflusst die Photosynthese-Aktivität der Pflanze und somit das Wurzelwachstum. Da im Licht ein Assimilateüberschuss herrscht, ist eine erhöhte Wur-

zelmasse gegenüber der Sprossmasse zur Speicherung vonnöten. Die Durchwurzelungstiefe nimmt demnach mit zunehmender Beschattung ab.

Wärme: Nach KUTSCHERA (1984, in KUTSCHERA & LICHTENEGGER 2002) werden die größten Wurzeltiefen erreicht, *„wenn Licht und Wärme nach Ausmaß und Dauer der Einwirkung, sowie stärkere Schwankungen von Temperaturen und relative Feuchte das Wachstum und den positiven geotropen Verlauf der Wurzeln fördern.“* Demnach bewirkt eine tiefreichende Wärmeschwankung und Bodenerwärmung einen großen Wurzeltiefgang.

Die für das Wurzelwachstum günstigsten Bodentemperaturen würden sich im Sommer befinden, allerdings wird dies aufgrund des oberirdischen Wachstums eingeschränkt. Deshalb erfolgt das stärkste unterirdische Wachstum im Frühjahr und besonders im Herbst.

Wasser: Die Wasseraufnahme erfolgt über die Wurzelhaare und über die Streckungszone, welche sich direkt hinter der Wurzelspitze befindet. Ist die Saugkraft des Bodens allerdings größer als die der Wurzeln, kann kein Wasser aufgenommen werden. Diese betroffenen nicht mehr aktiven Zonen verkorken und werden abgestoßen. Zur Neubildung der Wurzeln kommt es, wenn wieder ausreichend Wasser vorhanden ist (KUTSCHERA 1960). Deshalb ist der Feinwurzelanteil bei stark wechselnden Feuchteverhältnissen einem ständigen Wandel unterworfen.

Prinzipiell sind die Wurzeln an trockenen Standorten stärker verzweigt, was sich bei zu großer Trockenheit allerdings wieder umkehrt. Somit liegt das Wurzel-Spross-Verhältnis bei zunehmender Trockenheit zugunsten des Wurzelanteils.

Das Tiefenstreben dominiert in trockenen und warmen Gebieten gegenüber der seitlichen Verbreitung. Können die Niederschläge aber nicht in den Boden eindringen, wird das Tiefenstreben eingeschränkt.

Luft: Die Luft ist als Sauerstoffspender lebensnotwendig für die Pflanze. Besonders empfindlich gegenüber O₂-Mangel sind die Wurzelspitzen und die aktiv wasseraufnehmenden Abschnitte. Deshalb verzweigen sich nicht angepasste Arten extrem in den durchlüfteten Bodenschichten und/oder dringen gar nicht in luftarme Schichten vor.

Weiden und die Schwarzerle bilden Aerenchyme und können so in durchnässte Schichten vordringen. Eine andere Anpassung wäre die Bildung sprossbürtiger Wurzeln am Stamm.

Nährstoffe: Die Verfügbarkeit der Nährstoffe und daher das Wurzelwachstum sind abhängig von der Höhe des Mineralstoffangebots aus den humusfreien Bodenschichten.

ten und von der Intensität der Mineralisierung der organischen Substanz. Diese wiederum sind abhängig von Feuchte und Wärme.

Allgemein bedingt ein Mangel oder Überschuss an Nährstoffen verschiedenste Auswirkungen auf das Wachstum von Spross und Wurzel. So nimmt die Zahl der Wurzelspitzen bei Düngung des Waldes ab (PERSSON 1980, in KUTSCHERA & LICHTENEGGER 2002). Ist Humus vorhanden, so wird dieser bevorzugt durchwurzelt, und es kommt dort zu einem höheren Feinwurzelsbesatz. Versauerte Böden bieten ungünstige Bedingungen für das Wurzelwachstum. Nährstoffe werden leicht ausgewaschen oder es kommt zu starken Wurzelschäden. Unter diesen Bedingungen ist die Symbiose mit Pilzen unerlässlich, damit die Nährstoffquellen besser erschlossen werden können.

In kalkreichen Schichten wiederum wird durch den Überschuss an Calcium die Zellwand frühzeitig verdickt. Das Wachstum und die Zellstreckung werden erschwert, was eine Reduzierung des Längenwachstums und ein Verdicken und starkes Verzweigen der Wurzeln zur Folge hat.

Durch Reibung der Wurzeln aneinander können **Wurzelverwachsungen** entstehen. Es kommt zum Abscheren der Rinde und zur Vereinigung des Bindegewebes und der Leit-elemente. Wurzelverwachsungen sind möglich zwischen Wurzeln desselben Baumes, verschiedener Bäume gleicher Art oder verschiedener Arten. Am häufigsten treten sie in der Nähe des Wurzelstockes auf, wobei bevorzugt Wurzeln von mehreren Centimeter Durchmesser verwachsen.

Als Vorteile von Wurzelverwachsungen sind der Widerstand gegen Windwurf und die bessere Konkurrenzkraft gegenüber anderen Bäumen zu nennen. Es ist ein besserer Nährstoffausgleich und somit ein besseres Wachstum gegeben. Nachteilig ist, dass schädliche Keime und Stoffe leichter von Pflanze zu Pflanze übertragen werden können.

2.1.3 Aufgaben der Wurzel

Die Wurzeln einer Pflanze haben eine Vielzahl an Aufgaben zu erfüllen. Folgende Auflistung bietet eine ausführliche Übersicht (zit. nach KUTSCHERA & LICHTENEGGER 2002).

1. Aufnahme der vom Spross zeitweise im Überschuss gebildeten Assimilate
2. Ausscheidung von Stoffen zur Erschließung von Nährstoffen im Boden
3. Aufnahme von Wasser mit den darin gelösten Stoffen und deren Weiterleitung
4. Speicherung von Assimilaten und Wasser mit den darin gelösten Stoffen

5. Tägliche - und/oder in größeren zeitlichen Abständen - Rückführung von Assimilaten in den Spross
6. Austausch von Luft mit dem Spross, angereichert mit CO₂ oder O₂
7. Fallweise Assimilation
8. Verankerung der Pflanzen im Boden oder an festen Gegenständen im Luftraum
9. Symbiose mit Pilzen zur besseren Aufschließung von Stoffen aus dem Abfall der Pflanzen
10. Symbiose mit Bakterien zur Bindung von Luftstickstoff
11. Bildung von Wurzelknospen zur Erhaltung und Vermehrung der Pflanzen
12. Erschließung des Bodens bzw. des Luftraumes durch das Richtungswachstum der Wurzelspitzen

2.1.4 Symbiosen

NULTSCH (2001) definiert die Symbiose als „*Zusammenleben zweier artverschiedener Organismen in enger morphologischer Verknüpfung*“. Es existiert ein wechselseitiger Nutzen beider Symbionten und keiner der beiden wird geschädigt oder gar getötet.

Eine besonders wichtige Symbiose ist die zwischen Wurzel und Pilz und wird **Mykorrhiza** genannt. Dieser Begriff wurde 1885 durch FRANK geprägt und bedeutet „Pilzwurzel“.

Während der Pilz von der Wurzel Kohlenhydrate erhält, baut er totes Pflanzenmaterial ab und es werden Nährstoffe wie Stickstoff und Mineralstoffe frei. Die Wurzel profitiert von der Nährstoffanreicherung, aber auch von der Vergrößerung der resorbierenden Oberfläche durch die Hyphen und dem Schutz gegen das Eindringen von Pathogenen. Die Pilzhyphen sind feiner im Durchmesser als Wurzelhaare und können so den Boden besser erschließen. Der Einzugsbereich beträgt mehrere Centimeter.

Die Spitze der Mutterwurzel bleibt unverpilzt, weil diese das Wurzelgerüst aufbaut. Seitenwurzeln hingegen sind verpilzt, wobei das Längenwachstum meist eingeschränkt wird (KUTSCHERA & LICHTENEGGER 2002). Auf nährstoffarmen Böden ist die Bildung von Mykorrhizen unerlässlich, auf nährstoffreichen Böden hingegen wird diese Symbiose zur Seltenheit.

Das Eindringen der Pilzhyphen erfolgt meist über das Wurzelhaar (Abb. 2.5 rechts). Entsprechend der Ausbildungsform der Hyphen unterscheidet man 3 große Mykorrhiza-Typen.

Der **Endomykorrhiza** wächst intrazellulär, also innerhalb der Zellen. Eine Wurzelhaarbildung wird nicht unterdrückt, da die Wurzel nur von einem lockeren Hyphennetz umgeben wird (NULTSCH 2001). Als besondere Form der Endomykorrhiza wird die Vesiculär-arbuskuläre Mykorrhiza, oder kurz VA-Mykorrhiza, gesehen. Sie verdankt ihren Namen der Form der Pilzhyphen, welche zu Vesikeln (Bläschen) anschwellen und sich bäumchenartig verzweigen (lat. „arbuscula“ = Bäumchen).

Die **Ektomykorrhiza** wächst nur zwischen den Zellen (interzellulär). Das dichte Hyphengeflecht umschließt die Rindenzellen der Seitenwurzeln 2. und 3. Ordnung und ersetzt funktionell die Wurzelhaare (Abb. 2.5 links).

Als Mischtyp geht die **Ekt-Endo-Mykorrhiza** hervor. Hierbei handelt es sich um Übergänge zwischen Ekto- und Endomykorrhizen.

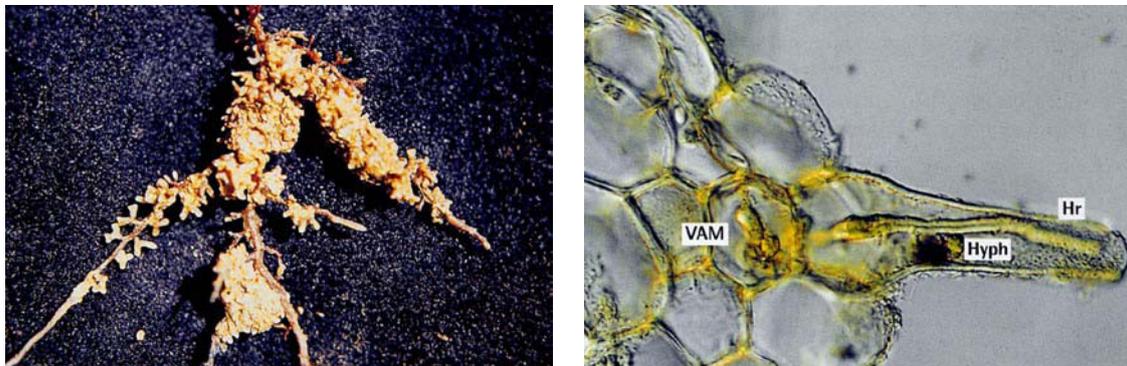


Abbildung 2.5: Durch Mykorrhiza verpilzte Wurzeln der Wald-Kiefer (links). Die Pilzhyphe dringt über das Wurzelhaar ein (rechts). VAM = vesiculär-arbuskuläre Mykorrhiza, Hyph = Hyphe, Hr = Haarwurzel. (KUTSCHERA & LICHTENEGGER 2002)

Wird die Wurzel mit Knöllchenbakterien infiziert, kommt es zur Ausbildung sogenannter **Wurzelknöllchen**. Die Bakterien dringen meist durch die Wurzelhaare in einem Infektionsschlauch, der von der Wurzel gebildet wird, in das Rindengewebe ein. Folglich kommt es zu einer Vermehrung und Vergrößerung der Wirtszellen und das Wurzelknöllchen entsteht (Abb. 2.6). Die Bakterien bilden sich zu Bakteroiden, wandeln Luftstickstoff in pflanzenzugängliches NH_4^+ um und erhalten als Gegenleistung Assimilate der Pflanze, meist in Form von Kohlenhydraten. Diese Art der Symbiose kommt bei Leguminosen und Holzgewächsen vor.

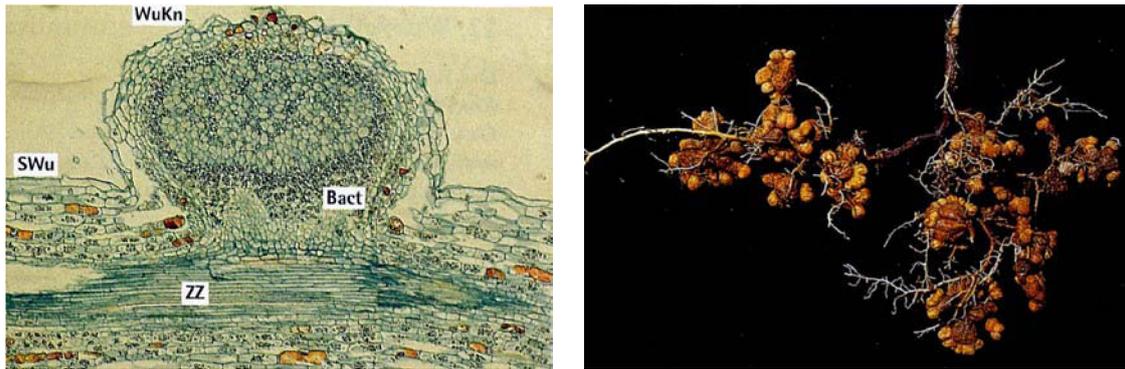


Abbildung 2.6: Bakterien dringen in die Wurzel ein (links) und bilden Wurzelknöllchen (rechts). WuKn = Wurzelknöllchen, SWu = Seitenwurzel, Bact = Bacterioide, ZZ = Zentralzylinder. (KUTSCHERA & LICHTENEGGER 2002)

2.2 Bodenmechanik

Die Bodenmechanik ist die Lehre von den Kräften im Boden und deren Wirkungen und bildet somit die Grundlage für die Errichtung jedes Bauwerks. Auch bei der Anwendung ingenieurbioologischer Maßnahmen ist das Wissen um die Bodenmechanik von essentieller Bedeutung.

In diesem Kapitel soll daher auf die Grundlagen der Spannungsverhältnisse, der Formänderungs- und Festigkeitseigenschaften des Bodens eingegangen werden.

2.2.1 Spannungen und Kohäsion

Auf ein Bodenelement, welches sich in gewisser Tiefe unter der Geländeoberfläche befindet, wirken Spannungen (Abb. 2.7). Diese resultieren aus der Auflast (σ_1), und dem Seitendruck (σ_2 und σ_3). Im homogenen, isotropen Boden gilt $\sigma_2 = \sigma_3$, bzw. kann σ_2 aufgrund eingehender Untersuchungen vernachlässigt werden (LANG et al. 2007).

Grundsätzlich sind totale und effektive Spannungen zu unterscheiden. **Totale Spannungen** σ ergeben sich aus der gesamten aufgetragenen Vertikalbelastung N (Auflast) und der belasteten Fläche A :

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (2.1)$$

Wird ein gesättigter oder teilgesättigter Boden dermaßen belastet, dass das Wasser nicht austreten kann, entsteht der Porenwasserdruck u . Die Spannungen werden dadurch einerseits vom Wasser, andererseits vom Korngerüst des Bodens getragen. Wird nur der Anteil des Korngerüsts betrachtet, spricht man von **effektiven Spannungen** σ' (auch wirksame Spannungen). Es ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\sigma' = \sigma - u. \quad (2.2)$$

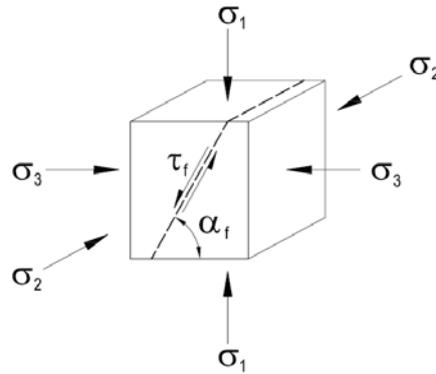


Abbildung 2.7: Räumlicher Spannungszustand im homogenen, isotropen Boden und nach Bildung einer Bruchfuge im Scherwinkel von α_f . (nach RICHWIEN & LESNY 2004)

Bei konsolidierten Böden gilt $\sigma = \sigma'$, da bei der Konsolidation der Porenwasserdruck bereits abgebaut werden konnte.

Wird das Bodenelement nicht belastet, also wenn $\sigma = 0$, existiert nur eine **Kohäsion**. Diese ist das Resultat der zwischen den Körnern des Bodens wirkenden Haftkräften, und wird daher auch als Haftfestigkeit bezeichnet. Die Kohäsion ist eine Schubspannung und gilt als Sonderfall der Scherfestigkeit, da sie den Ordinatenabschnitt auf der τ -Achse markiert (siehe Abb. 2.12 in Kap. 2.2.2).

Ihre Größe ist von vielen verschiedenen Faktoren abhängig. GRAY & MEGAHAN (1980, in GRAY & LEISER 1989) teilen daher die Kohäsion in mehrere Bereiche ein: Die Kohäsion durch Tonteilchen wird auch echte Kohäsion genannt und entsteht durch die Wirkung der Oberflächenkräfte der feinsten Bodenteilchen. Als zweites wird die kapillare Kohäsion unterschieden. Sie ist bei nichtbindigen Böden eine Folge des im Unterdruck stehenden Kapillarwassers (Saugsspannung). Diese Art der Kohäsion wird auch als scheinbare Kohäsion bezeichnet und geht sowohl bei Austrocknung als auch bei vollständiger Wassersättigung gegen null. Zuletzt wird als Beitrag zur Kohäsion die Zementierung durch Oxide aus dem Niederschlag und die Wurzelbewehrung genannt.

2.2.2 Scherfestigkeit von Böden

Wird ein Bodenkörper so dermaßen belastet, dass kein Gleichgewicht mehr zwischen den angreifenden und widerstehenden Kräften möglich ist, wachsen die Verformungen unbegrenzt an und es kommt zu einem plastischen Versagen. Dieses äußert sich entweder in einem Zonenbruch oder in der Ausbildung einer Scherfuge (Abb. 2.8).



Abbildung 2.8: Scherfuge und Zonenbruch. (SIMMER 1994)

Bei der Betrachtung eines rechteckigen Bodenelements wirken die Hauptspannungen σ_1 und σ_3 , wobei $\sigma_1 > \sigma_3$ (Abb. 2.9).

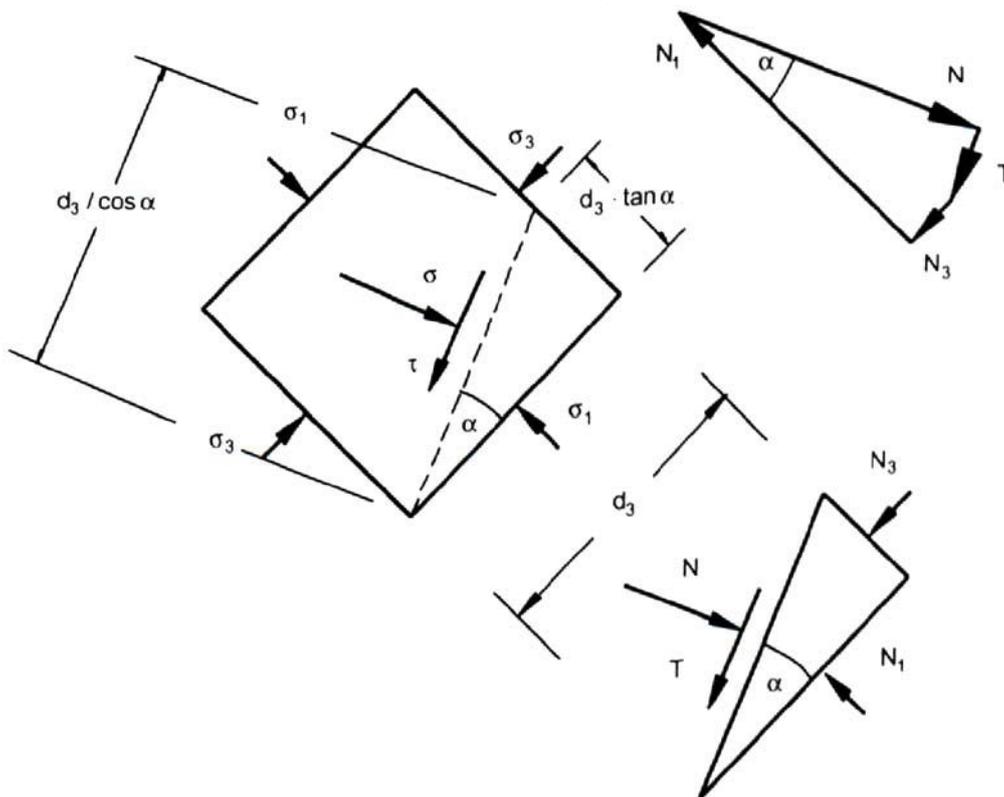


Abbildung 2.9: Spannungen und Schnittkräfte an einem Bodenelement im Gleichgewicht. (RICHWIEN & LESNY 2004)

Die Kräfte, welche auf den unteren Teil des Rechtecks wirken, werden wie folgt beschrieben (mit α = Scherwinkel, d_3 = Breite des Bodenelements):

$$N_1 = \sigma_1 \cdot d_3 \quad N_3 = \sigma_3 \cdot d_3 \cdot \tan \alpha \quad (2.3)$$

$$N = \frac{\sigma \cdot d_3}{\cos \alpha} \quad T = \frac{\tau \cdot d_3}{\cos \alpha} \quad (2.4)$$

Das Gewicht des Bodenelements ist vernachlässigbar.

Die Kräfte N_1 , N_3 , N und T stehen miteinander im Gleichgewicht, daher ist

$$N = N_1 \cdot \cos \alpha + N_3 \cdot \sin \alpha \quad (2.5)$$

und

$$T = N_1 \cdot \sin \alpha - N_3 \cdot \cos \alpha \quad (2.6)$$

Die Normalspannung σ bzw. die Schubspannung τ ergeben sich aus der Umwandlung von Glg. 2.4 und durch Einsetzen der Glg. 2.5 bzw. der Glg. 2.6 zu

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{N \cdot \cos \alpha}{d_3} \\ &= \cos \alpha \cdot \left(\sigma_1 \cdot d_3 \cdot \cos \alpha + \sigma_3 \cdot d_3 \cdot \frac{\sin^2 \alpha}{\cos \alpha} \right) \cdot \frac{1}{d_3} \\ &= \sigma_1 \cdot \cos^2 \alpha + \sigma_3 \cdot \sin^2 \alpha \end{aligned} \quad (2.7)$$

und

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{T \cdot \cos \alpha}{d_3} \\ &= \cos \alpha \cdot \left(\sigma_1 \cdot d_3 \cdot \sin \alpha - \sigma_3 \cdot d_3 \cdot \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} \cdot \cos \alpha \right) \cdot \frac{1}{d_3} \\ &= (\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \end{aligned} \quad (2.8)$$

Durch Anwendung der Summensätze ($\sin 2\alpha = 2 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha$ bzw. $\cos 2\alpha = \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha$) kann weiters gekürzt werden zu

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cdot \cos 2\alpha \quad (2.9)$$

und

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cdot \sin 2\alpha \quad (2.10)$$

Die grafische Darstellung der beiden zuletzt genannten Ausdrücke erfolgt durch den **Mohrschen Spannungskreis** in Abb. 2.10.

Werden nun mehrere Versuche mit dem selben Boden bei verschiedenen Seitendrücken σ_3 bis zum Bruch durchgeführt, ergeben sich verschiedene Mohrsche Spannungskreise (Abb. 2.11). Diese können von einer Umhüllenden eingeschlossen werden, wobei die Schubspannungen τ am Berührungspunkt von Spannungskreis und Umhüllender die **Scherfestigkeit** τ_f darstellt. Die Größe der Scherfestigkeit ist immer vom Spannungszustand abhängig, welcher durch den Mohrschen Spannungskreis repräsentiert wird.

Die Scherfestigkeit ist demnach die Schubspannung im Grenzzustand (=Bruchzustand des Bodens). Sie wird für erdstatische Berechnungen wie die Böschungsstabilität benötigt.

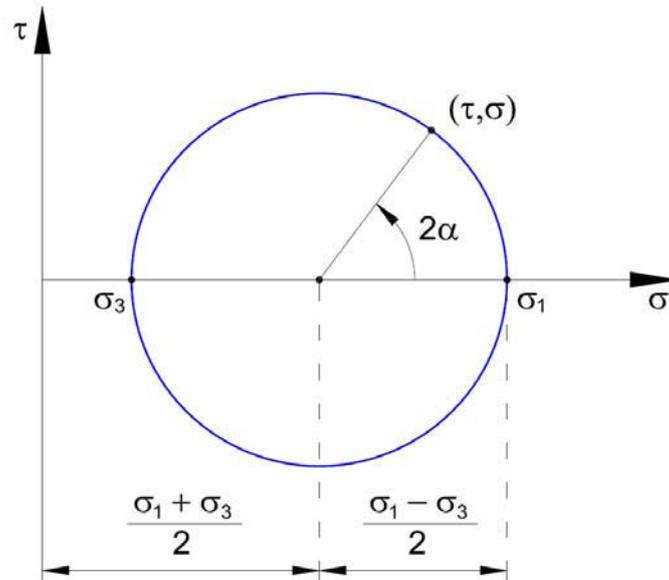


Abbildung 2.10: Mohrscher Spannungskreis. (nach RICHWIEN & LESNY 2004)

Um die Abhängigkeit der Scherfestigkeit τ_f von der Normalspannung σ im Grenzzustand des Bodens beschreiben zu können, bedient man sich einer Grenzbedingung. Die mathematische Beschreibung der Mohrschen Umhüllenden ist denkbar kompliziert, deshalb existieren mehrere verschiedene Vereinfachungen. Am geläufigsten ist die Ausgleichsgerade von Coulomb, welche auch **Coulombsche Grenzbedingung** genannt wird:

$$\tau_f = \sigma \cdot \tan \varphi + c \quad (2.11)$$

Ein Spezialfall der Coulombschen Grenzbedingung ist die **Mohr-Coulombsche Grenzbedingung**. Sie lässt sich durch das Einsetzen von Glg. 2.9 und Glg. 2.10 in Glg. 2.11 herleiten, und ist in Abb. 2.12 dargestellt:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \cdot \sin \varphi + c \cdot \cos \varphi \quad (2.12)$$

Die in den Grenzzustandsgleichungen Glg. 2.11 und Glg. 2.12 auftretenden Parameter sind der Winkel der inneren Reibung φ und die Kohäsion c . Diese werden als **Scherparameter** bezeichnet und stimmen für übliche erdstatische Berechnungen in beiden Gleichungen überein.

Üblicherweise wird sowohl die Mohrsche Grenzbedingung als auch die Mohr-Coulombsche Grenzbedingung mit effektiven Spannungen σ' formuliert ($\sigma' = \sigma - u$, siehe Kap. 2.2.1). Die so ermittelten wirksamen Scherparameter werden mit einem Strich indiziert und heißen demnach φ' und c' .

Wird ein undrainierter Versuch durchgeführt, also wenn das Porenwasser nicht austreten kann, sind nur die totalen Spannungen σ bekannt ($\sigma = \sigma' + u$), nicht aber deren Komponenten σ' und u . Die undrainierten Scherparameter werden sodann φ_u und c_u genannt. Ist kein Seitendruck vorhanden ($\sigma_3 = 0$), ist die Bestimmung der einzelnen Komponenten φ und c nicht möglich. Die Scherfestigkeit kann nur spannungsunabhängig mit der undrainierten Scherfestigkeit c_u angegeben werden ($\tau_f = c_u$).

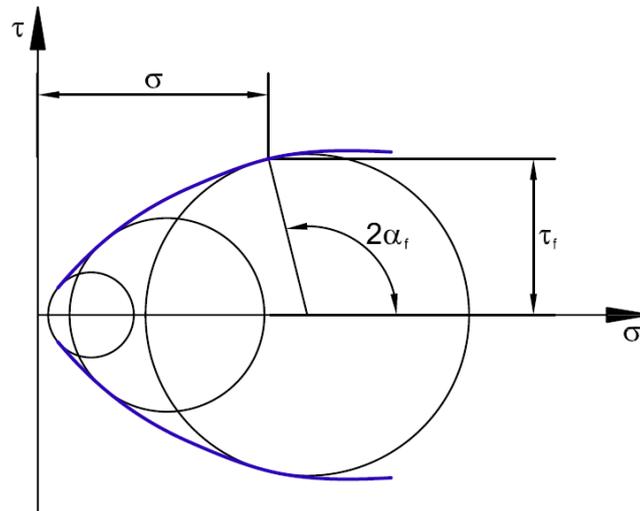


Abbildung 2.11: Verschiedene Mohrsche Spannungskreise mit Umhüllender. (nach RICHWIEN & LESNY 2004)

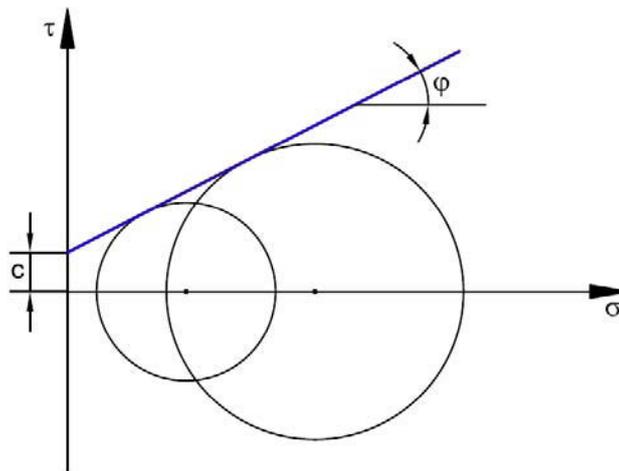


Abbildung 2.12: Mohr-Coulombsche Grenzbedingung. (nach RICHWIEN & LESNY 2004)

2.2.3 Messung der Scherfestigkeit

Bodenmechanische Versuche haben das Ziel die Scherparameter, welche zur Formulierung der Grenzbedingungen notwendig sind, zu bestimmen. Je nach Art der zu lösenden Grundbauaufgabe müssen entweder die wirksamen Scherparameter φ' und c' oder die undrainierte Scherfestigkeit c_u bestimmt werden.

Die undrainierte Scherfestigkeit wird auch als Anfangsscherfestigkeit bezeichnet, sie kann durch den **einaxialen Druckversuch** oder die **Flügelsondierung** ermittelt werden. Sie ist notwendig für die Beurteilung der Tragfähigkeit und Befahrbarkeit eines erstmals belasteten Untergrunds.

Zur Ermittlung der Standsicherheit von Böschungen sind die wirksamen Scherparameter von größerer Bedeutung. Diese können nur im **direkten Scherversuch** (bzw. im Feldrahmenscherversuch) und im **Triaxialversuch** bestimmt werden und sollen deshalb in weiterer Folge näher besprochen werden.

2.2.3.1 Direkter Scherversuch

Ein direkter Scherversuch verläuft als Kreisringerscherversuch oder als Rahmenscherversuch. Zuletzt genannter wird je nach Probengröße in einem Kleinrahmenschergerät (Abb. 2.13) oder in einem Großrahmenschergerät (Abb. 2.14) durchgeführt. In all diesen Versuchen wird die Lage der Scherfläche durch die Apparation bereits vorgegeben, es kann sich also keine natürliche Scherfuge einstellen.

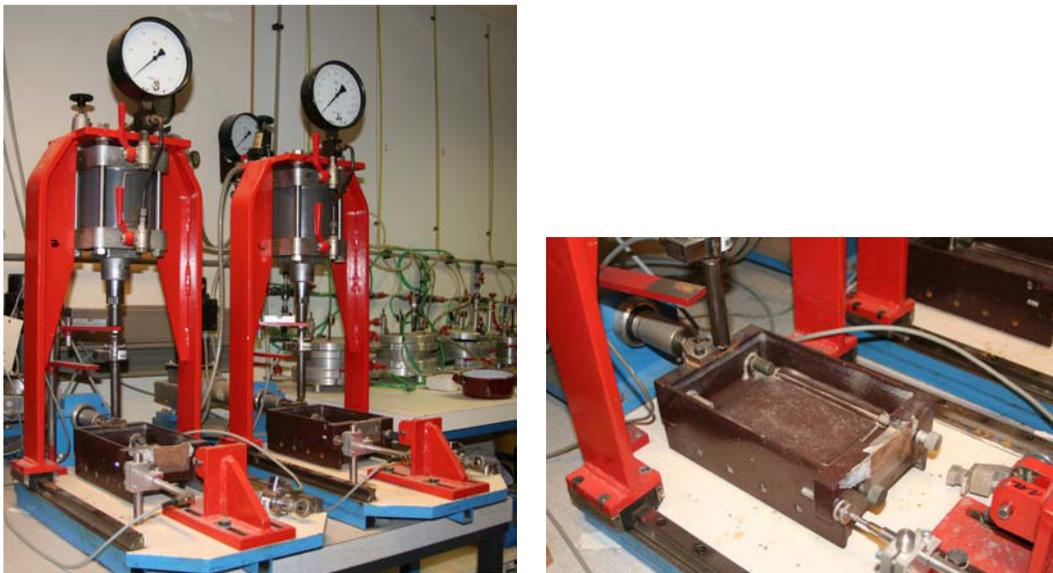


Abbildung 2.13: Zwei Kleinrahmenschergeräte (links) mit jeweils einer Scherbox der Größe 15 x 15 cm (rechts). Institut für Geotechnik, Boku Wien.



Abbildung 2.14: Großrahmenschergerät mit einer möglichen Probengröße von 50 x 50 cm. Der untere Rahmenteil ist beweglich während der obere fixiert ist. Institut für Geotechnik, Boku Wien.

Beim **Kreisringscherversuch** wird eine kreisringförmige Probe in die beiden starren Rahmen eingebaut und anschließend durch gegenseitige Verdrehung um ihre Mittelachse abgeschert. Nachteil gegenüber dem Rahmenschergerät ist, dass nur aufbereitete und rekonsolidierte Böden eingebaut werden können.

Im **Rahmenscherversuch** wird der Probekörper durch die relative Verschiebung der quadratischen oder runden Rahmen abgeschert. Abhängig von der Art des Gerätes ist entweder der obere oder der untere Rahmen beweglich.

Beim direkten Scherversuch werden, je nachdem welcher Boden vorliegt und in welcher Abhängigkeit die Scherfestigkeit angegeben werden soll, 3 bzw. 5 Einzelversuche bei unterschiedlicher Auflast empfohlen. Der Boden wird bei jedem Einzelversuch neu eingebaut, mit der Auflast F belastet und anschließend konsolidiert. Um ein Austrocknen vor allem bei bindigen Böden während der Konsolidierung zu vermeiden, werden sie zuvor geflutet.

Nach einer gewissen Konsolidierungsdauer folgt der Abschervvorgang. Dabei ist zu beachten, dass alle Einzelversuche mit der selben Schergeschwindigkeit durchgeführt werden.

Während des Versuchs werden die Scherkraft T , die horizontale Verschiebung s , die Hebung Δh und die Setzung während der Konsolidierung gemessen. Das Versuchsende ist erreicht, wenn der Maximalwert der Scherbelastung deutlich überschritten wird, oder wenn die Verschiebung 15% der Probenlänge erreicht hat.

Sollen bepflanzte Bodenproben im Direktscherversuch im Labor abgeschert werden, müssen hierzu vorgefertigte Kisten bepflanzt werden, welche nach einer gewissen Vegetationszeit in die Apparatur eingelegt werden. Beim Einbau der Bodenproben kann es dann leicht zur Beschädigung der Boden-Wurzel-Matrix kommen. Außerdem kommt es bei der Bepflanzung kleiner Volumina oft zu unnatürlichen Wurzelausbildungen und

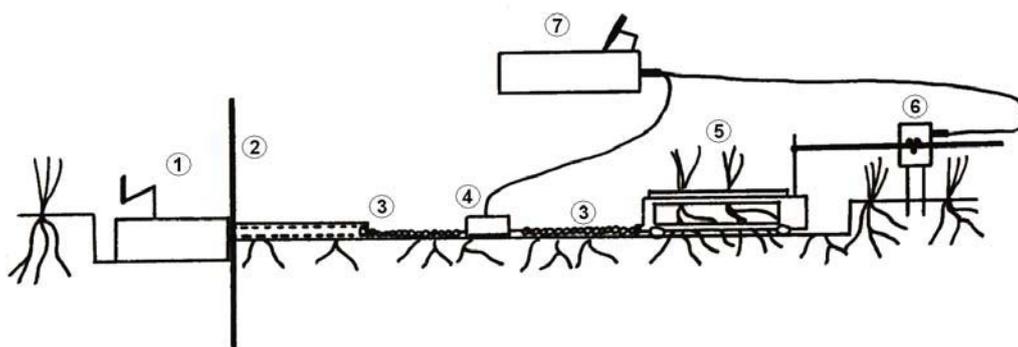
folglich zu Randwirkungen.

Ein genereller Nachteil von Direkt-Scherversuchen liegt in der Tatsache, dass keine Möglichkeit besteht den Porenwasserdruck während dem Abscheren zu messen. Die korrekte Versuchsdurchführung ist allerdings nur dann gegeben, wenn kein Porenwasserüberdruck in der Probe herrscht (RICHWIEN & LESNY 2004).

2.2.3.2 Feldrahmenscherversuch

Der Feldrahmenscherversuch ist im Grunde eine Sonderform des Rahmenscherversuchs (Kap. 2.2.3.1). Wie der Name schon sagt wird er im Feld, also in-situ, durchgeführt. Der Unterschied zu den direkten Scherversuchen im Labor ist, dass ein gewachsener Boden mit unter natürlichen Bedingungen entstandener Vegetation abgesichert werden kann.

In der Literatur werden unterschiedliche Formen von Apparaturen angewandt (WALDRON 1977, ABE & IWAMOTO 1986, TOBIAS 1991, VAN BEEK et al. 2005, CAMMERAAT et al. 2005). Grundsätzlich wird ein quadratischer Metallrahmen (Seitenlänge 50 cm bis 1 m) bis in eine gewisse Tiefe in den Boden geschlagen und rundherum das restliche Bodenmaterial abgetragen. Um den Probekörper vertikal zu belasten und so eine Normalspannung zu initiieren, werden Betonplatten oder Bleiplatten verwendet. Die horizontale Last wird entweder über Zugketten und einem Zugapparat übertragen, oder der Boden wird durch Wegdrücken abgesichert. In jedem Fall muss die aufgebrachte Last über einen Kraftaufnehmer gemessen werden. Die Messung der Verschiebung übernimmt ein Wegaufnehmer. In Abb. 2.15 wird der schematische Versuchsaufbau von TOBIAS (1991) skizziert.



- | | |
|------------------|-------------------------------|
| 1 Zugapparat | 5 Probekörper |
| 2 Verankerung | 6 Wegaufnehmer |
| 3 Zugketten | 7 Computer oder x/y-Schreiber |
| 4 Kraftaufnehmer | |

Abbildung 2.15: Schematischer Aufbau des Feldrahmenscherapparates. (TOBIAS 1991)

Wie im direkten Scherversuch im Labor wird auch im Feldrahmenscherversuch die Scherfläche bereits vorgegeben, der Bruch erfolgt somit nicht in der schwächsten Stelle der Boden-Wurzel-Matrix.

2.2.3.3 Triaxialversuch

Triaxialversuche haben einen sehr hohen apparativen und zeitlichen Aufwand, bieten allerdings die Möglichkeit einer freien Scherfugenausbildung und einer Gesamtbetrachtung von Spannungs- und Formänderungsverhalten.

Die zylindrischen Probekörper können entweder ungestört von bindigen Böden ausgestochen bzw. ausgeschnitten oder aus dem Bodenmaterial direkt in den Probekörperformen erstellt. Bei einer Versuchsdurchführung mit bepflanzten Bodenproben bietet sich die Möglichkeit die Pflanzen direkt in den Zylindern zu ziehen, oder Proben aus einem bereits gewachsenen Boden auszustechen. Danach wird der Probekörper mit einer Gummihülle überzogen und in die Druckzelle eingebaut.

Beim Triaxialversuch werden allseitige Belastungen aufgebracht. Die radialen Hauptspannungen ($\sigma_2 = \sigma_3$) erfolgen durch unter Druck stehendes Wasser, die vertikalen Spannungen (σ_1) werden mit Hilfe des Druckstempels erzeugt. Eine Übersicht der Versuchsanordnung ist in Abb. 2.16 und Abb. 2.17 zu sehen.

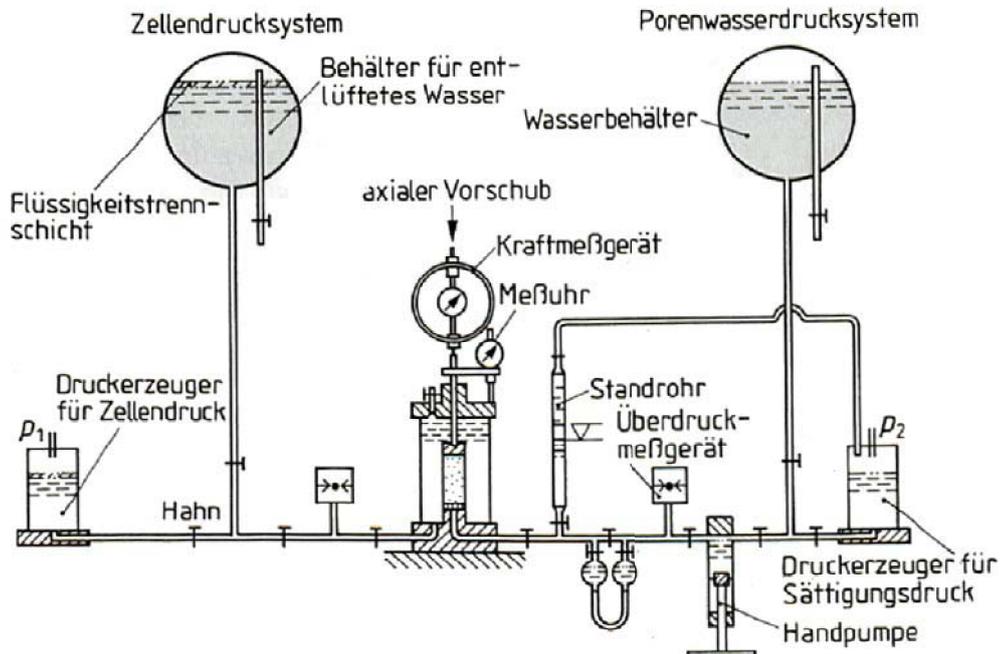


Abbildung 2.16: Versuchsanordnung für Triaxialversuche. (SIMMER 1994)



Abbildung 2.17: Druckzelle des Triaxialversuchs mit den Steuerventilen. Institut für Geotechnik, Boku Wien.

Es sollten mindestens 3 Einzelprobenversuche mit verschiedenen Seitendrücken σ_3 durchgeführt werden, um die Scherparameter bestimmen zu können.

Der Versuchsvorgang gliedert sich allgemein in 3 Phasen. Zu Beginn erfolgt die **Sättigung** des Probenkörpers, damit während des Versuchs der Porenwasserdruck gemessen werden kann. Die Sättigung wird durch die Erhöhung des Drucks im Porenwasserdrucksystem erreicht.

Wird ein konsolidierter Versuch durchgeführt, folgt nun die **Konsolidierung**, d.h. eine zeitlich verzögerte Zusammendrückung des Bodens infolge einer Lasterhöhung. Ziel ist den für das Abscheren notwendigen Anfangszustand herzustellen, welcher den natürlichen Gegebenheiten gleich sein soll. Die Konsolidierung erfolgt meist isotrop ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_c$), wobei die Konsolidationsspannung σ_c je Einzelversuch variiert.

Danach folgt der **Abschervorgang**. Dabei wird der Zelldruck σ_3 konstant gehalten, während die Stempelkraft σ_1 entweder kraft- oder weggesteuert kontinuierlich bis zum Bruchzustand gesteigert wird.

Der Triaxialversuch kann auf 4 verschiedene Arten durchgeführt werden, je nachdem welche Scherparameter ermittelt werden sollen. Eine Auflistung findet sich in Tab. 2.1.

Beim UU-Versuch wird dem Probekörper keine Zeit zur Konsolidierung gegeben, es wird also direkt nach der Lastaufbringung abgeschert. Undrainiert bedeutet, dass die Drainageleitungen während des Abschervorgangs geschlossen bleiben, sodass sich Porenwasserdrücke bilden. Der CU-Versuch wird ebenfalls undrainiert durchgeführt, allerdings wird davor unter den Versuchsspannungen konsolidiert. Wird das Volumen beim

Versuchsart	Abkürzung	bestimmbare Parameter
unkonsolidiert, undrainiert	UU	c_u, φ_u
konsolidiert, undrainiert	CU	c', φ'
konsolidiert, drainiert		
mit konstant gehaltenem Volumen	CCV	c', φ'
konsolidiert, drainiert	D	c', φ'

Tabelle 2.1: Versuchsarten des Triaxialversuchs.

Abschervorgang konstant gehalten, spricht man von einem CCV-Versuch. Die Drainageleitungen bleiben geschlossen, während der Zelldruck σ_3 so geregelt wird, dass der Porenwasserdruck u konstant bleibt.

Der D-Versuch ist der zeitaufwändigste aller Versuchsarten, da dem Probekörper Zeit zur Konsolidierung gegeben werden muss und die Laststeigerung von σ_1 so langsam erfolgt, dass keine Porenwasserdrücke auftreten.

Auf jeden Fall müssen bei jedem Versuch die Zeit t , die Zusammendrückung Δh , die Stempelkraft P und der Zelldruck σ_3 gemessen werden. Bei undrainierten Versuchen muss zusätzlich der Porenwasserdruck u und bei drainierten Versuchen die Volumenänderung ΔV des Porenwassers aufgezeichnet werden (RICHWIEN & LESNY 2004).

3 Stabilität durchwurzelter Böden

3.1 Einflussfaktoren

Im Grunde können die Faktoren, welche die Stabilität beeinflussen in 3 Bereiche aufgeteilt werden: biologische, hydrologische und mechanische Faktoren. Werden allerdings lebende Pflanzen als Baustoff verwendet, wird das Fundament von einem sich entwickelnden Boden gebildet und es zeigen sich die Zusammenhänge und Abläufe als sehr komplex und dynamisch (GRAF & GERBER 1997). Aus diesem Grund ist eine 100%ige Trennung kaum möglich.

3.1.1 Biologische Faktoren

GRAF (1997) und GRAF & GERBER (1997) sind der Ansicht, dass besonders **Mykorrhiza** einen wichtigen Bestandteil bei der Entwicklung des Bodens darstellen und für ein intaktes Keimbeet verantwortlich sind. Das Wachstum der Pflanze wird sowohl unterirdisch als auch oberirdisch gefördert, was zu einer indirekten Beeinflussung der Scherfestigkeit führt.

Wird Mykorrhiza dem reinen Boden (ohne Bepflanzung) injiziert, kann dies den Zusammenhalt der Bodenteilchen erhöhen, die beste Aggregatstabilität wird allerdings durch das Zusammenspiel von Pflanze und Pilz erreicht (FREI et al. 2002). Schon THORNTON et al. entdeckte 1956, dass die Kohäsion der Bodenteilchen bei Böden mit Mycelbildung größer war. Genauere Untersuchungen diesbezüglich waren allerdings erst in den beiden letzten Jahrzehnten möglich. So stellte TISDALL et al. (1997) durch Injektion des Bodens mit Saprophyten und Mykorrhizahyphen fest, dass Mikroaggregate ($< 250 \mu\text{m}$) zu größeren Aggregaten zusammengefügt wurden. Die Mikroaggregate werden durch das Umgarnen der losen organischen und mineralischen Teilchen von Pilzhyphen gebildet. Es kommt in weiterer Folge zu einer mechanischen Verfestigung durch das Hyphennetzwerk und zu einer chemischen Verfestigung durch das Ausscheiden von Stoffwechselprodukten in Form von Polysacchariden und Polyuroniden (Abb. 3.1). Der Vorteil einer höheren Aggregatstabilität liegt in der Erhöhung der Festigkeit des Bodens und in der Steigerung der Speicherkapazität von Wasser und Nährstoffen (RICKLI et al. 2004).

Die Tatsache, dass durch Mykorrhiza Bodenaggregate geformt werden, bildet unter Anderem die Grundlage für die Theorie von BÖLL & GRAF (2001). Sie nehmen an, dass die Vegetation den Scherwinkel φ' beeinflusst. Die Berechnung erfolgt auf Grundlage der Stabilität der Bodenaggregate, welche eben vom Vorhandensein der Mykorrhizapilze abhängt. Eine genauere Beschreibung des Modells befindet sich in Kap. 3.2.4.3. Erste



Abbildung 3.1: Bildung von Mikro- und Makroaggregaten im Boden durch das Mycel-Netzwerk (●) und durch Pilz-Ausscheidungen (★). (BÖLL & GRAF 2001)

Beweise dieser Theorie bringt FREI et al. (2002) damit, dass er Grauerlen mit bzw. ohne Mykorrhiza auf tonigem Kies gepflanzt wurden, und nach 5 Monaten die Aggregatstabilität und die Wurzellängen verglichen wurden (Abb. 3.2). Durch den linearen Zusammenhang der beiden Größen wurde deren Abhängigkeit bestätigt. In Zukunft sollen weitere Versuche bezüglich Aggregatstabilität und Scherwinkel durchgeführt werden.

Dies ist einer der wenigen Versuche Vegetationseffekte als Grundlage für Berechnungen zu verwenden. Diese Tatsache rührt daher, dass die Zusammenhänge sehr komplex sind, die Datengrundlagen oft lückenhaft sind und diese nur unter bestimmten Voraussetzungen Gültigkeit haben.

Einen weiteren biologischen Faktor bildet die Art der **Ausbildung des Wurzelsystems** (siehe Kap. 2.1.2.1), welche ja einerseits genetisch bedingt ist, andererseits von Umwelteinflüssen (siehe Kap. 2.1.2.2) geprägt wird. Durch große Wurzeltiefen oder durch besonders feinverzweigte Wurzelsysteme wird der Auszugwiderstand beeinflusst und in weiterer Folge auch die Scherfestigkeit des durchwurzelten Bodeabschnitts. Auch der **Cellulosegehalt** in den Pflanzenwurzeln spielt bei der Erhöhung der Scherfestigkeit eine wichtige Rolle. Je nach Gattung und Alter kann dieser variieren und die Reißfestigkeit der Wurzeln steigern.

3.1.2 Hydrologische Faktoren

Der Wasserhaushalt des Bodens wird von Niederschlag, Abfluss und Verdunstung beeinflusst. Aufgrund der **Interzeption**, d.h. Auffangen der Regentropfen durch oberirdische Pflanzenteile, wird die Regenfallenergie absorbiert, das Auftreffen des Wassers auf den

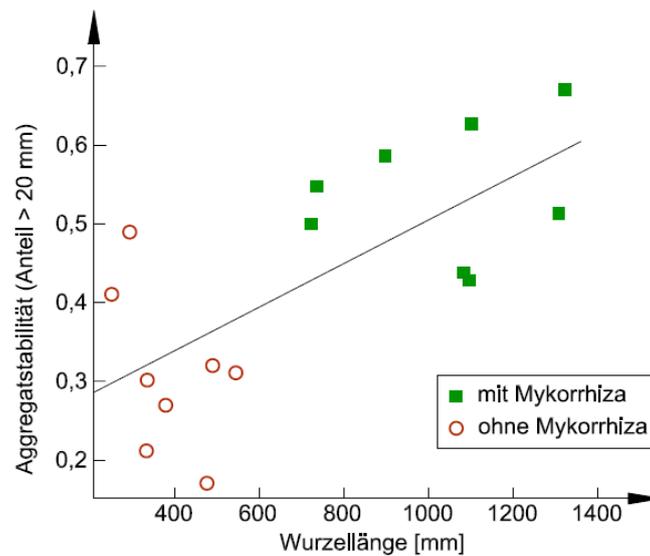


Abbildung 3.2: Linearer Zusammenhang zwischen Aggregatstabilität und Wurzellänge bei 5-monatigen Grauerlen. (nach FREI et al. 2002)

Boden verzögert und der Boden vor Verdichtung geschützt. Diese Eigenschaft betrifft hauptsächlich die Erosion, worauf noch genauer in Kap. 3.5 eingegangen wird. Man darf allerdings nicht vergessen, dass Bodenabtrag und Stabilität eines Hanges voneinander abhängen und auch gemeinsam betrachtet werden müssen.

Die **Infiltration** des Bodens wird bestimmt durch die Bodeneigenschaften, die Topologie, die Dauer und Intensität des Niederschlags und vor allem durch die Vegetation. Die Wurzeln der Pflanzen halten eine Porosität und Durchlässigkeit des Bodens aufrecht, wodurch ein Aufstauen des Wassers und das Auftreten hoher Porenwasserdrücke vermindert werden.

Der wichtigste hydrologische Faktor im Zusammenhang mit Hangstabilität ist wohl die Evapotranspiration. Wird der Boden entwässert, erhöhen sich die Saugspannungen und die Kohäsion (Kapillarkohäsion). Es kommt zu einer Steigerung des Reibungswiderstands und einer Verminderung sowohl des Porenwasserdrucks als auch des Gewichts, wodurch die Scherfestigkeit positiv beeinflusst wird. Erreicht wird der Entzug der Bodenfeuchte durch **Evaporation**, d.h. Verdunstung auf freien Oberflächen, und durch **Transpiration**. Durch die Transpiration entzieht die Pflanze über die Wurzeln dem Boden Feuchtigkeit und scheidet diese über die Spaltöffnungen wieder aus. Vorteil ist, dass auch tiefere Bodenschichten von der Erhöhung der Saugspannungen profitieren. Dies konnten auch KATZENBACH & WERNER (2007) mit ihren Saugspannungs-Sättigungsmessungen zeigen. Ein bepflanzter Dammkörper wies während der Vegetationsphase in einer Tiefe

von 3 m Saugspannungen bis zu 80 kN/m^2 auf. Im Vergleich dazu lagen die Messergebnisse von undurchwurzelten Zonen in selber Tiefe bei nur 3 kN/m^2 und 10 kN/m^2 .

GRAY & LEISER (1989) meinen, dass in Wäldern durch das Zusammenspiel von Interzeption und Transpiration die Böden trockener sind und bei Regen der Zeitpunkt der Sättigung verzögert wird (Abb. 3.3). Abgeholzte Flächen erreichen daher schneller die Feldkapazität und neigen auf Hangflächen eher dazu abzurutschen. Versuche von GRAY (1977, in GRAY & LEISER 1989) zeigten allerdings auch, dass der Wald während eines Starkregenereignisses nach dem Erreichen der Feldkapazität keinen Einfluss mehr auf die Bodenfeuchte hat.

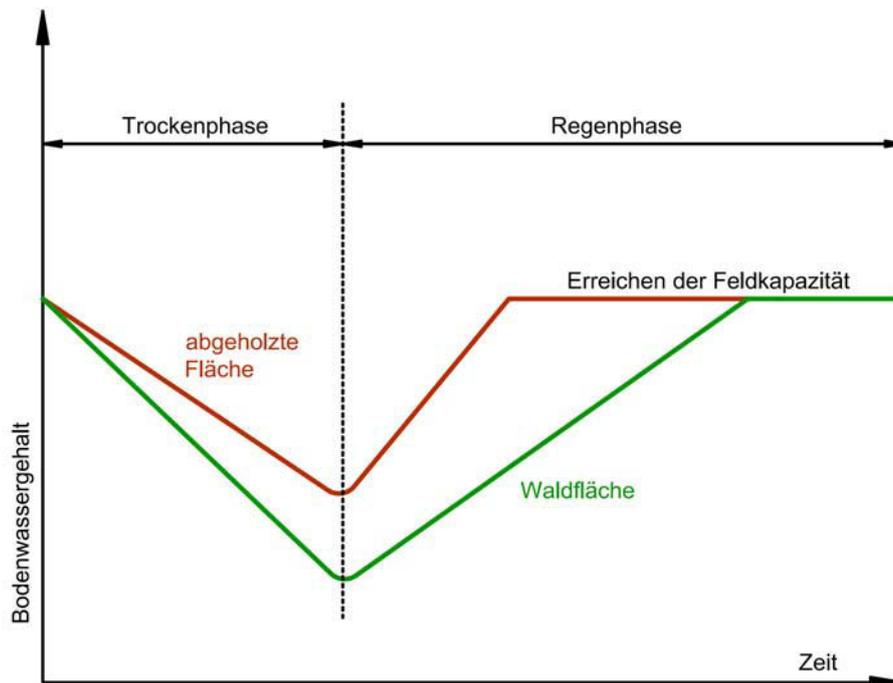


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung der Bodenfeuchte bewaldeter und abgeholzter Flächen bei Regen. (nach GRAY & LEISER 1989)

3.1.3 Mechanische Faktoren

Ein Boden muss den Belastungen entgegenwirken können, wenn er als stabil betrachtet werden soll, das heißt der Widerstand muss größer sein als die einwirkenden Kräfte. Der Widerstand wird durch Scherfestigkeit, Kohäsion und eine stabile Bodenstruktur gewährleistet.

Das Prinzip der Festigung durch Bewurzelung liegt darin, dem Boden die Komponente hinzuzufügen, die ihm fehlt, nämlich Zugkraft. Nur wenige Böden sind in der Lage

(geringe) Zugbeanspruchungen aufzunehmen, Druckbelastungen hingegen stellen kein Problem dar. Die Pflanzenwurzeln sind das genaue Gegenteil: stark bei Zug, schwach bei Druck. Kommt es nun zu einer vertikalen Belastung des Boden-Wurzel-Elements, kann die sonst auftretende Querdehnung durch die Wurzeln aufgenommen werden (Abb. 3.4). So kann die **armierende Wirkung der Wurzeln** die Scherfestigkeit verdoppeln (ABE & ZIEMER 1991b), näheres dazu im Kap. 3.2. Vergleichbare Anwendungen findet man beim Stahlbeton (Druck: Beton, Zug: Stahl) oder bei der bewehrten Erde (Druck: Boden, Zug: Geotextil).

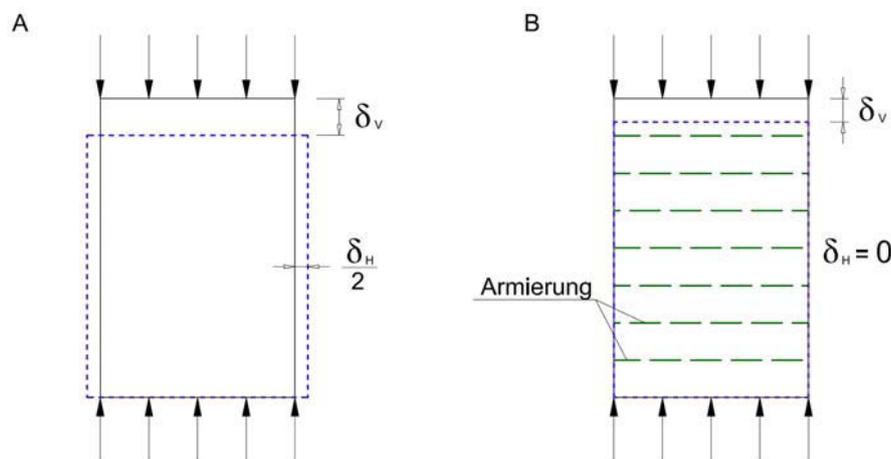


Abbildung 3.4: Effekt der Wurzelbewehrung (B) im Vergleich zum wurzellosen Boden (A). (nach GRAY & LEISER 1989)

Das Funktionsprinzip Wurzelbewehrung hält natürlich nicht jeder Belastung stand, sondern versagt, wenn eines der drei Probleme auftritt: Versagen des Bodens, Reißen der Wurzel oder Ausgleiten der Wurzel aus dem Boden (DUPUY et al. 2005a). Einige Versuche dazu findet man in Kap. 3.2.1, Kap. 3.2.2 und Kap. 3.2.3.

Andere mechanische Einwirkungen der Pflanzen auf den Boden sind die **Bogenwirkung** und das **Gewicht** der Pflanzen, welches sich sowohl positiv als auch negativ auswirken kann.

3.2 Scherfestigkeit

Um die Scherfestigkeit zu messen, können verschiedenste Versuche durchgeführt werden (Kap. 2.2.3). Bei der Beurteilung der Ergebnisse muss allerdings darauf geachtet werden, dass durch die unterschiedlichen Durchführungsmöglichkeiten die Werte nicht immer eins zu eins verglichen werden können.

ABE & IWAMOTO (1986) führten Direktscherversuche durch und stellten fest, dass durch die Bepflanzung eines Bodens sowohl der Reibungswinkel als auch die Kohäsion zunimmt (Abb. 3.5), was eine Erhöhung der Scherfestigkeit um 11 - 34 % bewirkt. Außerdem wurden Unterschiede im Spannungs-Dehnungs-Diagramm festgestellt. Bei hohen Normalspannungen (d.h. bei hoher Auflast) steigt die Kurve der bepflanzten Böden erst kurz vor dem Bruch über jene der unbepflanzten (Abb. 3.6 b und c). Niedrige Auflasten hingegen bewirken, dass während des ganzen Verlaufs der bewurzelte Boden bessere Eigenschaften aufweist (Abb. 3.6 a). Diese Feststellungen untermauern auch die Beobachtungen von TOBIAS (1991). Der maßgebende Spannungsbereich, in dem Wurzeln eine Verbesserung der Scherfestigkeit erreichen können, liegt im Mohr-Diagramm nahe dem Ursprung, da die Pflanzen nur in Bodenoberflächennähe, wo die Auflast geringer ist, wirksam sind.

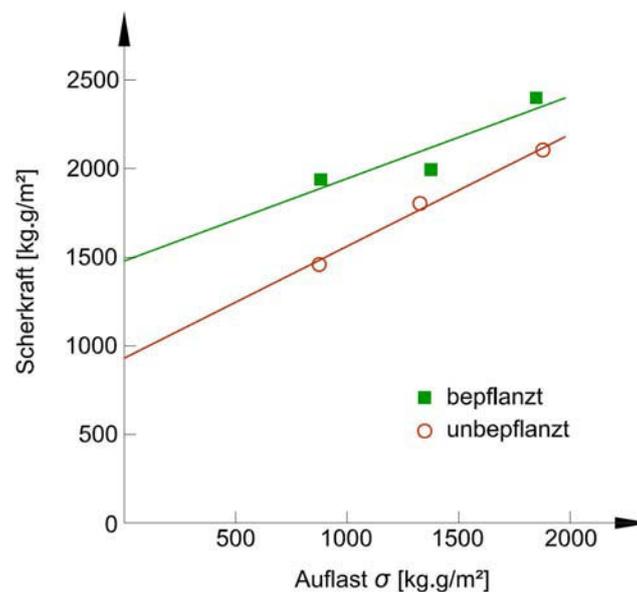


Abbildung 3.5: Scherfestigkeit des bepflanzten und des unbepflanzten Bodens ($g = \text{Erdbeschleunigung}$, $[\text{kg g/m}^2] = [\text{kN/m}^2]$). (nach ABE & IWAMOTO 1986)

In einem Großrahmenschergerät wurden die Versuche von KATZENBACH & WERNER (2007) durchgeführt. Abb. 3.7 zeigt die Ergebnisse, welche einen fast konstant bleibenden Reibungswinkel und eine Erhöhung der Kohäsion von 3,5 - 6,3 kN/m² durch Bewurzelung hervorbringen.

Die Möglichkeit mit Triaxialversuchen die Scherfestigkeit festzustellen haben bisher nur wenige Autoren genutzt. Grund dafür ist die aufwendige Versuchsdurchführung, Schwierigkeiten bei der Aufzucht der Pflanzen in den Probezylindern und die versuchstechnisch bedingten hohen Seitendrucke, wodurch große Messungenauigkeiten entste-

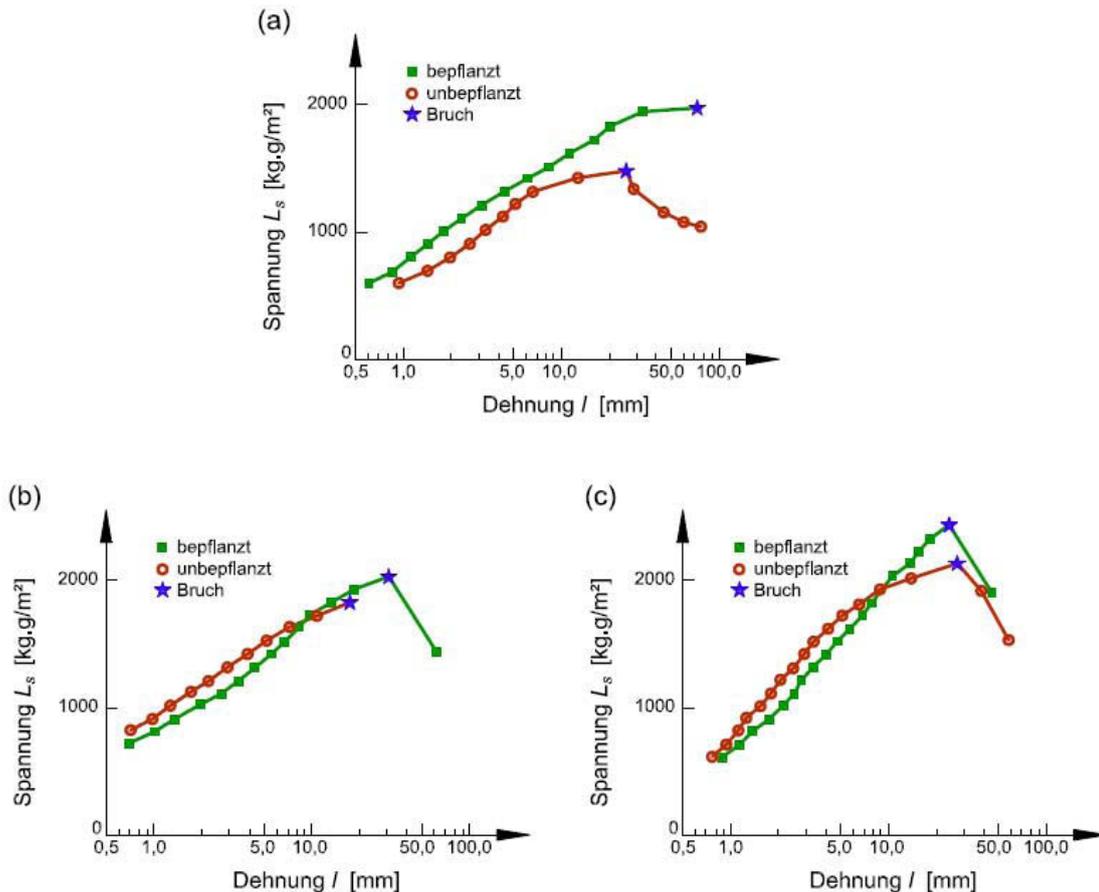


Abbildung 3.6: Vergleich bewurzelter und unbewurzelter Böden im Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei unterschiedlichen Normalspannungen. (a) $900 \text{ kg g}/\text{m}^2$ (b) $1400 \text{ kg g}/\text{m}^2$ (c) $1900 \text{ kg g}/\text{m}^2$ ($g = 9,81 \text{ m}/\text{s}^2$, Erdbeschleunigung). (nach ABE & IWAMOTO 1986)

hen (TOBIAS 1991). Erst im letzten Jahrzehnt gelang es einigen Autoren aussagekräftige Ergebnisse mit Triaxialversuchen zu erhalten. STÜCKELBERGER (2000) kam zu dem Schluss, dass die Erhöhung der Scherfestigkeit durch Bewurzelung markanter ist, je kleiner die Bodendichte und je geringer der Seitendruck σ_3 ist. Das heißt, in einem Boden, der ohnehin bereits eine hohe Scherfestigkeit aufweist, ist die Wirkung der Pflanzen unbedeutend.

FREI et al. (2003, in RICKLI et al. 2004) führte ebenfalls Triaxialversuche durch. Ziel seiner Untersuchungen war den Einfluss der Erhöhung der Aggregatstabilität durch Mykorrhiza auf den Scherwinkel zu testen. Die konsolidiert-undrainierten Versuche ergaben, dass bepflanzte mykorrhizierte Bodenproben einen um 2° höheren Scherwinkel aufweisen als bepflanzte unbehandelte Proben (Abb. 3.8 A). Außerdem ist bei niedrigen Bo-

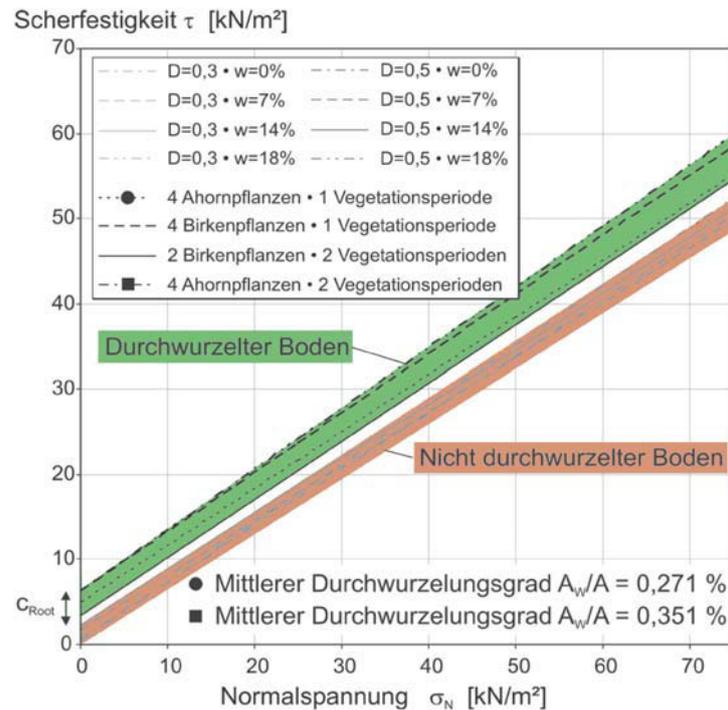


Abbildung 3.7: Ergebnisse des Großrahmenscherversuchs. Die mit Ahorn und Birken bepflanzen Böden wiesen eine Zunahme der Kohäsion von 1,1 - 4 kN/m² im Gegensatz zum nicht durchwurzelten Boden auf. D = Dichte, w = Wassergehalt. (KATZENBACH & WERNER 2007)

dendichten der Anteil stabiler Aggregate (> 20 mm) bei bepflanzt/mykorrhizierten Proben größer (Abb. 3.8 B).

Die Wissenschaft beschäftigt nun folgende Fragen: Welche Mechanismen und Eigenschaften der Wurzeln beeinflussen die Erhöhung der Scherfestigkeit? Können mit diesem Wissen Gesetzmäßigkeiten aufgestellt werden, wodurch in Zukunft wiederum auf die Scherfestigkeit geschlossen werden kann? TOBIAS (1991) stellte fest, dass die Wurzeln bei einer Scherbeanspruchung eine Kombination von Bruch und Ausgleiten erfahren. Demnach sind die Zugfestigkeit, der Auszieh Widerstand und die Länge der Wurzeln für genauere Betrachtungen der Mechanismen maßgebend.

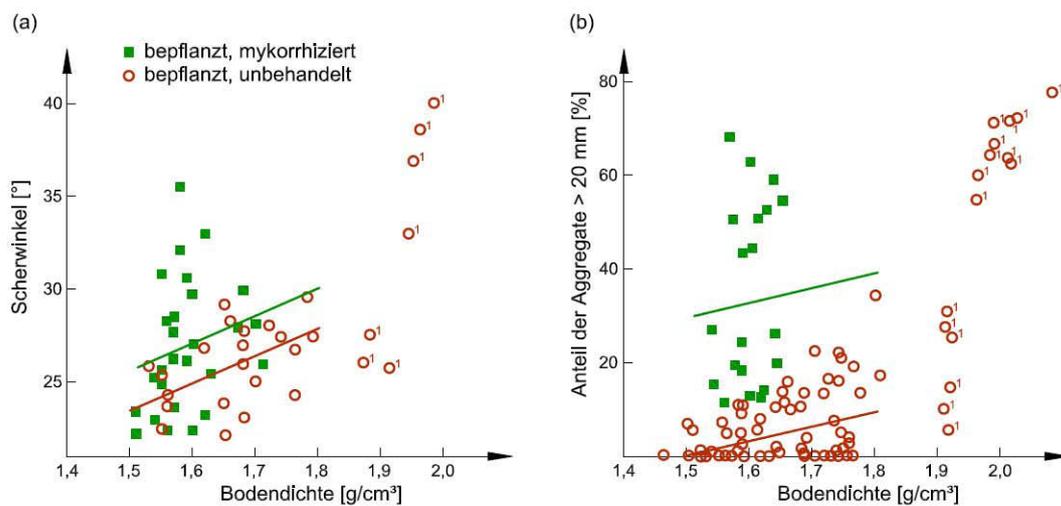


Abbildung 3.8: Bepflanzte/unbehandelte und bepflanzte/mykorrhizierte Bodenproben nach 20 Wochen Pflanzenwachstum im Vergleich. (a) Schervinkel in Abhängigkeit der Bodendichte. (b) Anteil der stabilen Bodenaggregate > 20 mm bei unterschiedlichen Bodendichten. ¹ unbehandelte Proben mit hoher Dichte wurden bei Bewertung nicht berücksichtigt. (nach RICKLI et al. 2004)

3.2.1 Zugfestigkeit der Wurzel

In situ-Schertests von VAN BEEK et al. (2005) zeigten, dass sowohl die Wurzelanzahl als auch die Scherfestigkeit mit der Tiefe im Boden abfällt. Er zog den Schluss, dass der Gehalt an Feinwurzeln, welcher in den oberen Bodenschichten größer ist, ausschlaggebend sein muss. Auch TOBIAS (1991) erkannte einen Zusammenhang zwischen Scherfestigkeit und Bewurzelungsdichte, welche als Wurzelmasse pro Probevolumen definiert ist. Eine grafische Darstellung der Versuchsergebnisse ist in Abb. 3.9 zu finden. Während der Versuchsdurchführung konnte die Autorin folgende Versagensarten feststellen: Kombination aus Ausgleiten und Bruch der Wurzel, Wurzel reißt direkt in der Scherfuge und manchmal konnte bei stärkeren Wurzeln ein Brechen der Wurzelhaut in der Scherzone beobachtet werden, dem ein Reißen des Wurzelkerns in tieferen Schichten folgte. Demnach dürfte die Reibung zwischen Wurzelkern und -haut sehr gering sein.

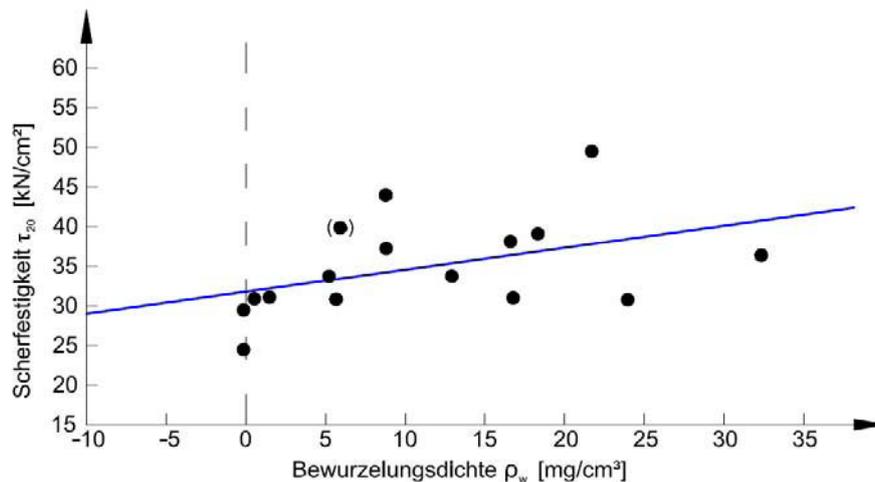


Abbildung 3.9: Scherfestigkeit τ_{20} bei einer Normalspannung von 20 kN/m^2 in Abhängigkeit von der Bewurzelungsdichte. Eingeklammelter Wert ist ein Spezialfall und wurde bei der Auswertung vernachlässigt. (nach TOBIAS 1991)

Um die Grenzen der Festigkeit von Wurzeln auszuloten, wurden mehrere Zugversuche durchgeführt. Hierzu wird die Pflanzenwurzel in eine Apparatur eingeklemmt, welche langsam eine Kraft aufbringt und misst. Kommt es zum Bruch, wird die maximale Wurzelkraft erreicht. Diese Kraft durch die Fläche des gerissenen Wurzelquerschnitts geteilt heißt Zugfestigkeit und wird in N/mm^2 (= MPa) angegeben. Verglichen mit dem jeweiligen Wurzelradius (Abb. 3.10) kann man erkennen, dass die Zugfestigkeit mit zunehmendem Durchmesser abnimmt, d.h. dünnere Wurzeln haben (bezogen auf ihren Querschnitt) eine höhere Festigkeit als dicke Wurzeln (GENET et al. 2005, MAT-

TIA et al. 2005, KATZENBACH & WERNER 2007). Der Grund für diese vorerst unerklärliche Erkenntnis dürfte ein höherer Cellulosegehalt in dünnen Wurzeln sein (GENET et al. 2005). Cellulose (siehe Kap. 2.1.1.3) wird zur Festigung in den Pflanzenzellen eingelagert und kann durchschnittlich 60 - 70 % des Wurzelmasseanteils betragen. GENET et al. (2005) führte Zugversuche mit *Pinus pinaster* (See-Kiefer) und *Castanea sativa* (Edelkastanie) durch und ermittelte danach deren Cellulose- und Hemicellulose-Gehalt bezogen auf die unterschiedlichen Durchmesser. Es stellte sich heraus, dass sowohl eine signifikante Beziehung zwischen Wurzelradius und Cellulosegehalt (Abb. 3.10) als auch zwischen Zugkraft und Cellulosegehalt (Abb. 3.11) besteht.

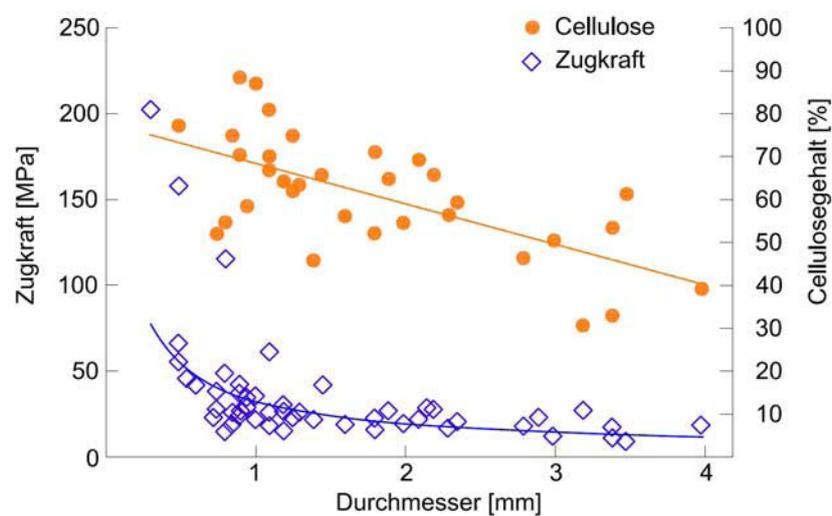


Abbildung 3.10: Sowohl die Zugkraft als auch der Cellulosegehalt nehmen mit steigendem Wurzelradius ab. (nach GENET et al. 2005)

Das Alter der Wurzeln dürfte auch die Festigkeit beeinflussen, so GENET et al. (2006). Während die Zugfestigkeit bei älteren Wurzeln größer ist, soll die Kohäsion des Bodens bei jüngeren Pflanzenwurzeln größer sein. Begründet wird dieses Verhalten durch den erhöhten Wurzelflächenanteil bei jungen Pflanzen. Auch ABE & ZIEMER (1991) stellten bei ihren Versuchen fest, dass die durch Wurzeln erhöhte Scherfestigkeit bis zum 20. Lebensjahr steigt, danach aber konstant bleibt.

Andere Autoren gehen sogar noch einen Schritt weiter und behaupten, dass die Zugfestigkeit in ausläuferbildenden Gräsern größer ist als in horstbildenden Arten (LICHTENEGGER 1985 in UMG & WPA 2004). Außerdem existiert eine Beziehung zwischen Wassergehalt und Zugfestigkeit. Je mehr Wasser, desto schlechter die Festigkeit.

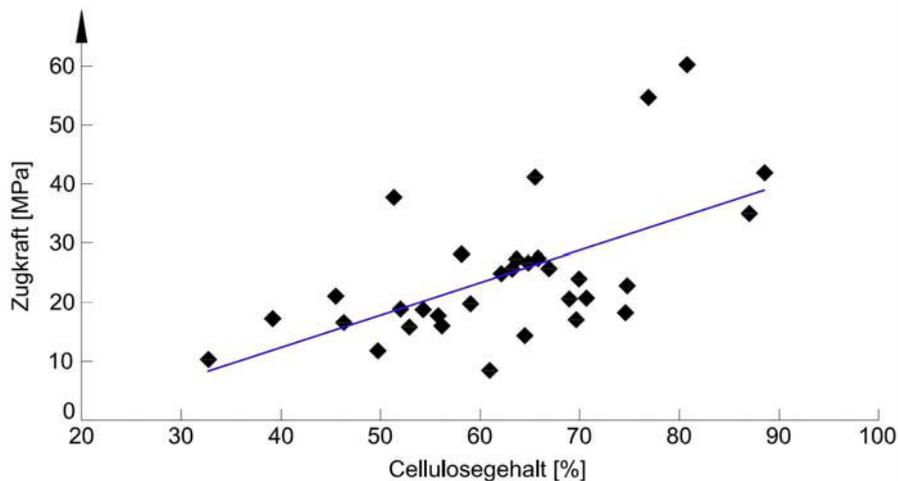


Abbildung 3.11: Die Wurzeln von *Castanea sativa* zeigten eine signifikante Abhängigkeit von Zugfestigkeit und Cellulosegehalt. (nach GENET et al. 2005)

GRAY & LEISER (1989) bestimmten die Zugfestigkeit der Wurzeln bereits abgeholzter Bäume. Je nach Spezies und Standort nimmt die Festigkeit unterschiedlich schnell ab. Ob sich die Scherfestigkeit des Bodens nach der Abholzung verschlechtert, hängt davon ab, wie schnell sich eine neue Vegetation im Gegensatz zum Absterben der Wurzeln entwickelt.

3.2.2 Verbundfestigkeit zwischen Boden und Wurzel

Wie bereits erwähnt, versagt die Wurzel nicht nur durch das Reißen, sondern auch durch das Ausgleiten aus dem Boden. Hierfür ist die Verbundfestigkeit zwischen Boden und Wurzel eine wichtige Kenngröße. Charakterisiert wird diese mithilfe des Auszugswiderstandes, welcher bei Auszugversuchen bestimmt wird. Laut Definition ist der Auszugswiderstand die Kraft, die benötigt wird die Pflanze aus dem Boden zu ziehen und eben diese Kraft beschreibt die Stabilität der Boden-Wurzel-Matrix (FLORINETH 2004).

Bei Hangrutschungen laut RIESTENBERG (1994) konnte man an den Deformationen der Wurzeln die jeweiligen Scherflächen diagnostizieren (Abb. 3.12). Das heißt, bei kleinen Rutschungen wird die Wurzel entlang der Scherzone verformt und in den Bereichen unterhalb aus dem Boden ausgezogen. Die Kraft, welche die Wurzel zum Ausgleiten veranlasst, spielt hier daher eine wichtige Rolle.

Die Einflussfaktoren auf den Auszugswiderstand sind vielfältig (FLORINETH 2004):

- Bodenbeschaffenheit (Korngrößenverteilung, Wassergehalt, ...)
- Wuchsbedingungen (Wasser, Licht, Nährstoffe, ...)

- Pflanzenart
- Alter

Als allgemeines Kriterium gilt, dass horstbildende Gräser und tiefwurzelnde Kräuter einen höheren Auszugswiderstand aufweisen als ausläuferbildende Arten (FLORINETH 2004).

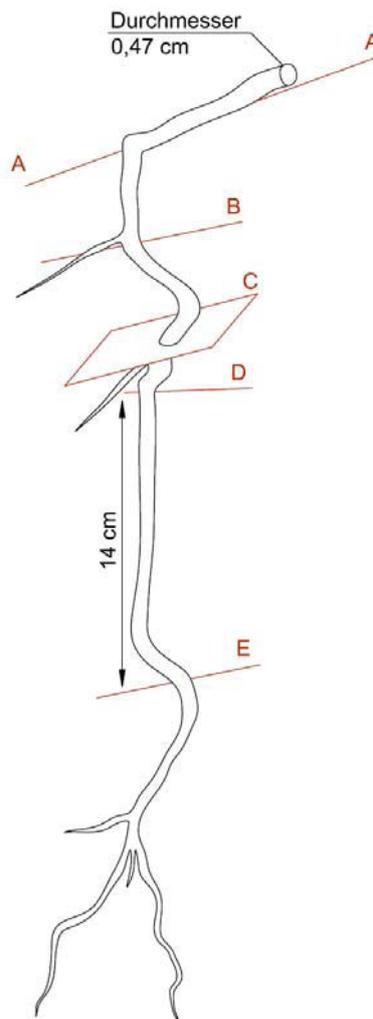


Abbildung 3.12: An fünf Scherzonen deformierte Wurzel. Der Winkel der Deformierung beschreibt die Richtung der Scherfläche. (nach RIESTENBERG 1994)

NORRIS (2005) versucht einen Zusammenhang zwischen Wurzeldurchmesser und Widerstand herzustellen. Versuche mit *Quercus robur* L. (Stiel-Eiche) und *Crataegus monogyna* Jacq. (Eingriffeliger Weißdorn) auf London Clay ergaben eine positive Korrelation, das heißt je größer der Durchmesser, desto größer ist der Auszugswiderstand (Abb. 3.13).

Schon RIESTENBERG (1994) bemerkte diesen Zusammenhang bei ihren Versuchen mit *Acer saccharum* M. (Zucker-Ahorn) und *Fraxinus americana* L. (Weiß-Esche) in Cincinnati (Abb. 3.14).

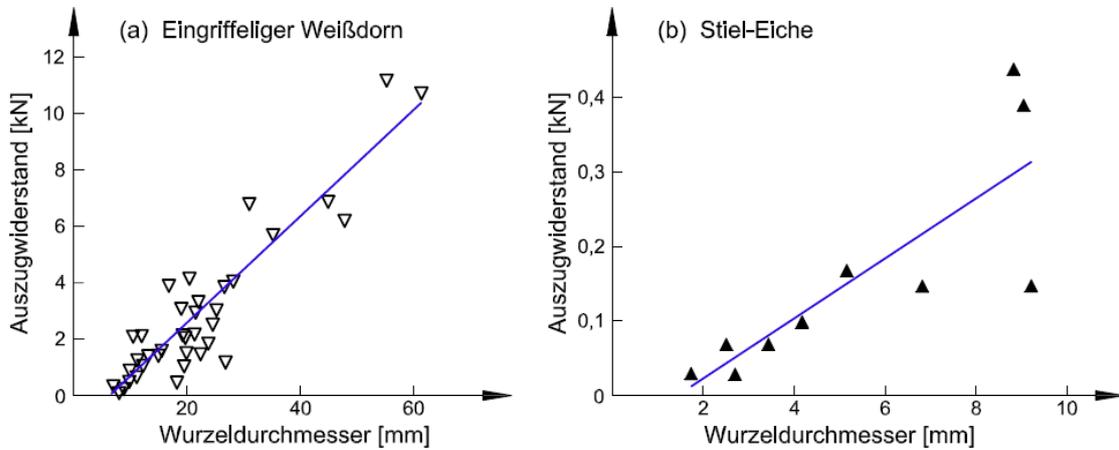


Abbildung 3.13: Auszugversuche mit Eingriffeligem Weißdorn (a) und Stiel-Eiche (b). Der Auszugswiderstand korreliert mit dem Wurzelumfang positiv. (nach NORRIS 2005)

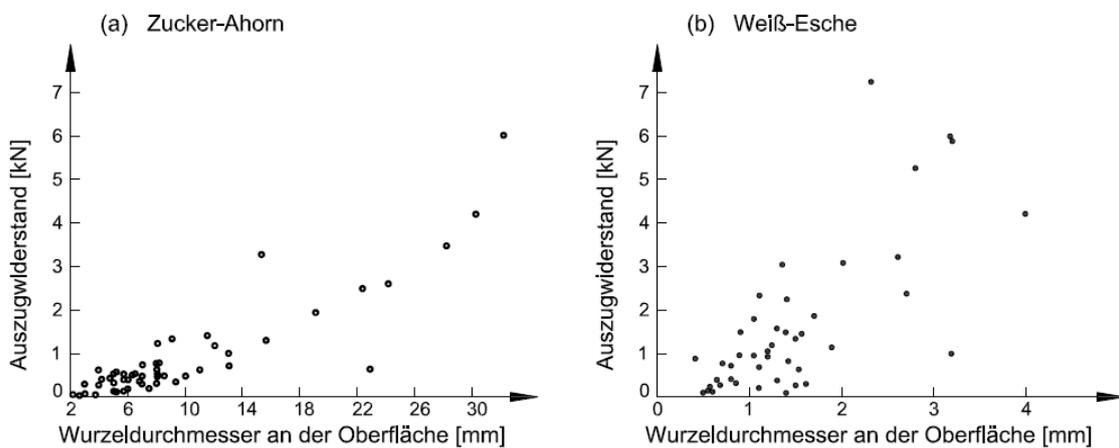


Abbildung 3.14: Auszugversuche mit Zucker-Ahorn, *Acer saccharum* M. (a) und Weiß-Esche, *Fraxinus americana* L. (b). Positiver Zusammenhang zwischen Wurzelumfang und Auszugswiderstand ist erkennbar. (nach RIESTENBERG 1994)

Eine der Fragen, die sich im Zusammenhang mit Auszugversuchen stellt ist, unter welchen Umständen es beim Versagen zum Ausgleiten oder zum Reißen der Wurzel kommt.

POLLEN (2007) stellte die Theorie auf, dass kleine Durchmesser eher ausgezogen werden, größere eher reißen (Abb. 3.15). Das heißt, dass bei kleinerem Wurzelradius die Kraft, welche zum Ausziehen benötigt wird, geringer ist als jene Kraft, die ein Abreißen der Wurzel verursacht.

Ab dem sogenannten „Grenzdurchmesser“ werden alle Wurzeln reißen. Dieser hängt von der Wassersättigung und der Scherfestigkeit des Bodens ab. Je höher die Scherfestigkeit, desto kleiner ist der Grenzdurchmesser. Es kommt also schon bei kleineren Durchmessern zum Abreißen. Bezüglich der Wassersättigung ist eine Verringerung des Grenzdurchmessers bei trockeneren Böden beobachtbar. Bei POLLEN (2007) wurde dies zwar statistisch nicht nachgewiesen, doch schon VAN BEEK et al. (2005) konnte in In situ-Schertests erkennen, dass bei gesättigten Böden das Ausgleiten zum dominierenden Fehlermechanismus wird. Um den Auszugswiderstand F_p einer einzelnen Wurzel berechnen

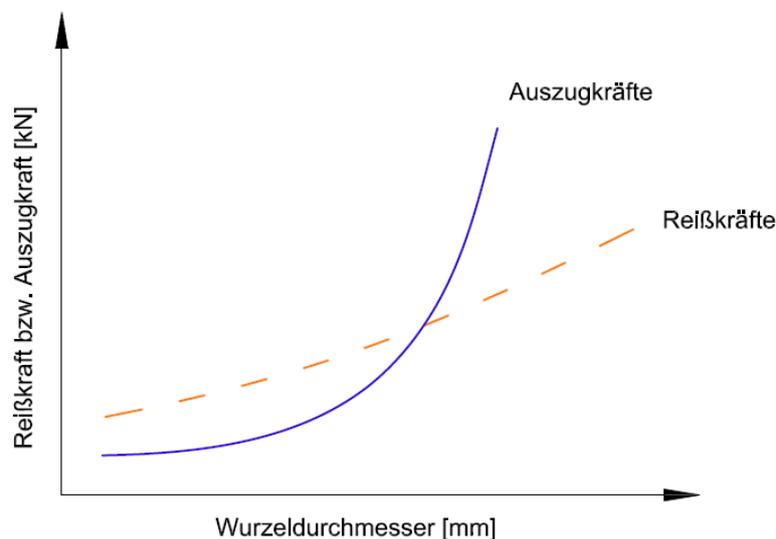


Abbildung 3.15: Vergleich der beiden Fehlermechanismen Ausziehen und Reißen mit dem Wurzelradius. (nach POLLEN 2007)

zu können, stellt ENNOS (1990, in POLLEN 2007) hierzu eine Formel auf, welche lautet:

$$F_p = S \cdot L \cdot 2\pi r \quad (3.1)$$

Wobei S die Scherfestigkeit des Bodens, r der Wurzelradius und L die Länge der Wurzel ist. Auch SCHWARZ et al. (2010) entwickelte ein Modell für die Berechnung des Auszugswiderstands. In das sogenannte „Root Bundle Model“ soll die Tortuosität, die dynamische Reibung zwischen Wurzel und Boden, und der Abstand der Wurzel vom Stamm miteingehen. Das Modell bedarf allerdings noch einer Weiterentwicklung, da die Daten von bisherigen Versuchen nicht ausreichend sind.

3.2.3 Länge und Verzweigung

TOBIAS (1991) bemerkte bei Direktscherversuchen mit bewurzelten Bodenproben, dass bei Belastung eine Wurzel nach der anderen versagt, somit wird der Zeitpunkt des Bruches vom Gesamtsystem hinausgezögert. Im Kraft-Weg-Diagramm der Scherversuche ist der Ort des Kraftmaximums bei durchwurzelten Böden nicht so stark ausgeprägt wie bei reinen Böden. Diese Eigenschaft wird Duktilität genannt und ist als positiver Effekt zu sehen, da duktile Materialien nicht plötzlich versagen. Das Diagramm in Abb. 3.16 lässt erkennen, dass der Scherweg mit der Wurzelmenge korreliert, d.h. höhere Wurzelmenge verursachen höhere Duktilität und verzögern den Bruch des Systems. Ähnliche Beobachtungen machten ABE & IWAMOTO (1986) bei ihren Direktscherversuchen. Sie erkannten, dass die Größe der Wurzelfläche und des Wurzelgewichts wahrscheinlich die Scherfestigkeit beeinflussen.

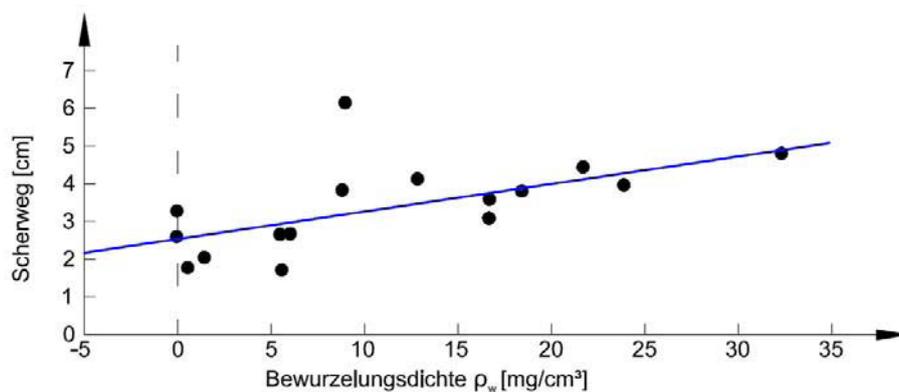


Abbildung 3.16: Der Scherweg bis zum Bruch ist bei Böden mit höherer Bewurzelungsdichte länger. (nach TOBIAS 1991)

Um die Bewurzelung der Bodenproben zu charakterisieren, fanden mehrere Werte in der Literatur Verwendung. Eine von vielen Möglichkeiten ist die sogenannte Bewurzelungsintensität, welche sich durch die Division von Wurzelvolumen durch das Probenvolumen ergibt. Eine andere Form der Quantifizierung ist die Bewurzelungsdichte als Wurzelmasse pro Gesamtvolumen (TOBIAS 1991). Am meisten dürfte sich allerdings die sogenannte „Root Area Ratio“ (RAR) durchgesetzt haben. Laut Definition ist die RAR (a_r) die Querschnittsfläche aller Wurzeln A_r pro gesamter Fläche A

$$a_r = \frac{A_r}{A} \quad (3.2)$$

und wird durch den unterschiedlichen Aufbau der Wurzelsysteme beeinflusst. Wie in Kap. 2.1.2.1 und Kap. 2.1.2.2 erwähnt, hängt der Aufbau von vielen Faktoren ab. Erfah-

rungsgemäß kann man aber trotzdem sagen, dass die RAR mit der Bodentiefe abnimmt (BISCHETTI et al. 2005, MATTIA et al. 2005). Im Diagramm der Abb. 3.17 lässt sich erkennen, dass eine positive Korrelation zwischen RAR und Scherfestigkeit besteht. Besonders erwähnenswert ist die Tatsache, dass schon eine kleine RAR ($\leq 0,1\%$) eine Erhöhung der Scherfestigkeit bewirkt (WALDRON 1977).

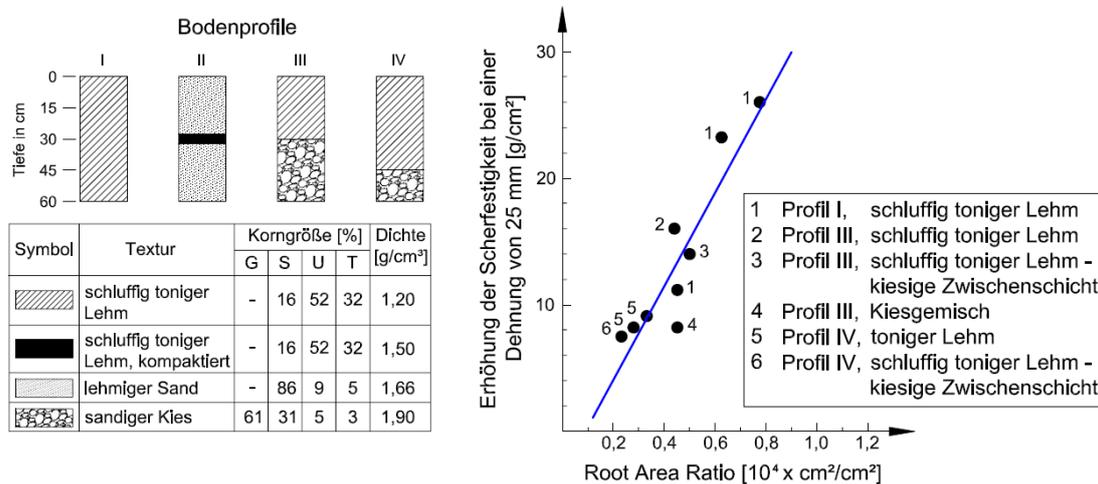


Abbildung 3.17: Die Scherfestigkeit nimmt mit der Root Area Ratio linear zu. Links sind die Bodenprofile zu den jeweiligen Versuchen beschrieben. (nach WALDRON 1977)

Durch die Größe und Anzahl der Verzweigungen eines Wurzelsystems wird die Kontaktfläche zwischen Wurzel und Boden beeinflusst, und so auch die Menge an Boden, welche beim Ausziehen mobilisiert wird (DUPUY et al. 2005a). WALDRON & DAKESSIAN (1981) stellten bei Auszugversuchen mit *Pinus ponderosa* (Ponderosa-Kiefer) und *Hordeum vulgare* (Wild-Gerste) fest, dass lange Wurzeln resistenter gegen Ausziehen sind als kurze. Genauere Untersuchungen bezüglich des Einflusses der Länge und Verzweigungen auf die Auszugkraft führten RIESTENBERG (1994) und NORRIS (2005) durch. Beide Autoren konnten 3 Wurzeltypen unterscheiden:

- Typ A: lange Wurzeln (ca. $> 0,7$ m), ohne/wenig Seitenwurzeln
- Typ B: kurze Wurzeln, sehr verzweigt, viele dünne Stränge
- Typ C: zweisträngig, im Winkel von 45° verzweigt, oder sehr verzweigt

In Abb. 3.18 lässt sich erkennen, dass die 3 Typen unterschiedliche Verläufe im Kraft-Dehnungsdiagramm aufweisen. Typ A zeigt ein starkes Ansteigen der Kraft und plötzliches Versagen und Typ B weist durch mehrere abgetreppte Maxima anhaltend hohe

Kräfte auf bis es zum Bruch kommt. Interessant ist Typ C, welcher 2 ausgeprägte Maxima bildet und dann versagt. NORRIS (2005) zieht daraus den Schluss, dass die Anzahl der Verzweigungen mehr Einfluss auf die Art des Versagens hat als die Wurzellänge.

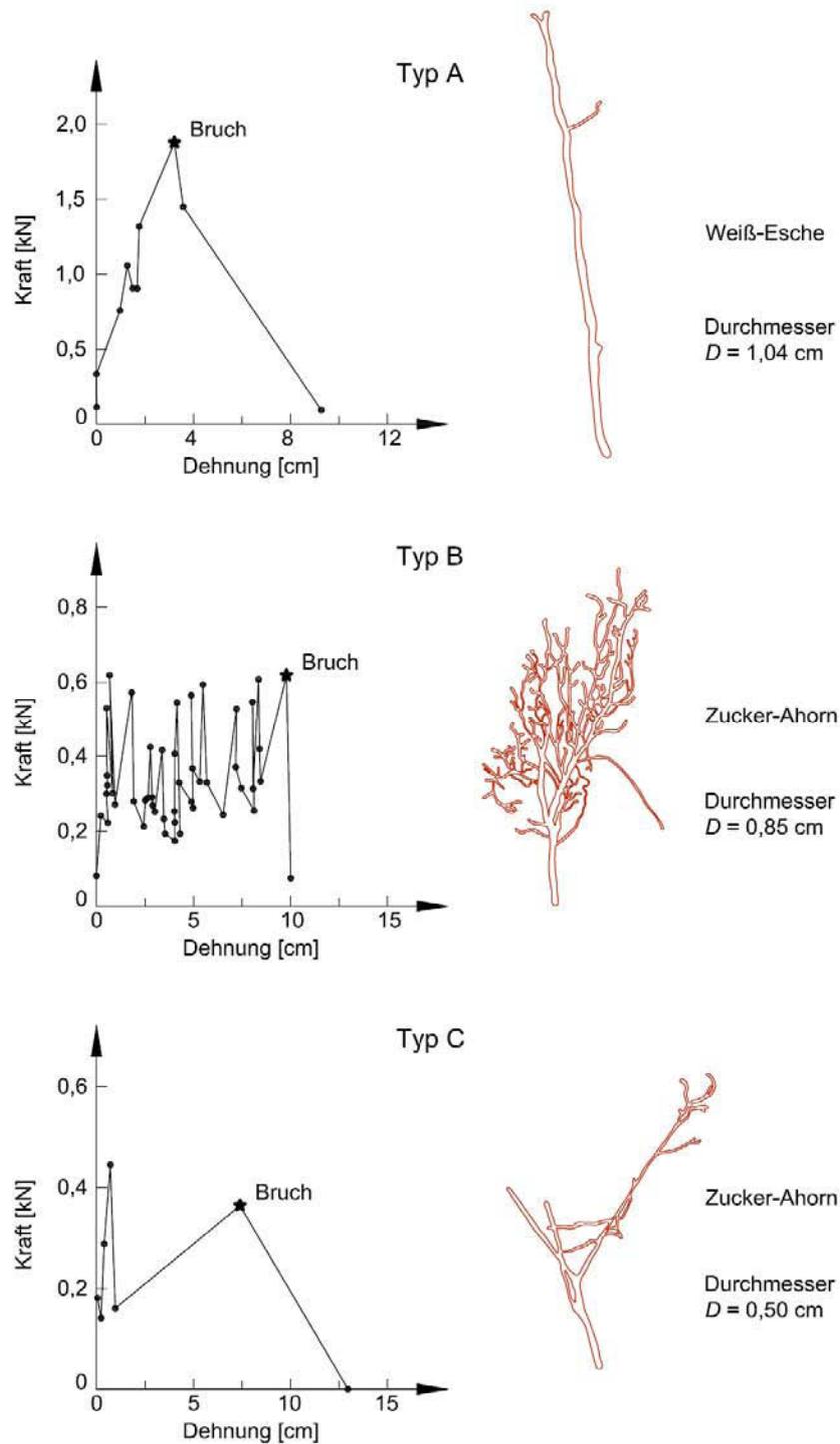


Abbildung 3.18: Einteilung der drei Wurzeltypen nach dem Verlauf im Kraft-Dehnungsdiagramm und der Wurzelform. (nach RIESTENBERG 1994)

3.2.4 Scherfestigkeitsmodelle

„Will man den Einfluss der Vegetation nachweisen, braucht es Kenngrößen zur Beschreibung ihrer Wirkungen, die sich in klassische Stabilitätsmodelle einfügen lassen“ (zit. nach BÖLL & GRAF 2001). Aufgrund dieser Tatsache beschäftigten sich in der Vergangenheit viele Autoren mit der Beschreibung verschiedenster Scherfestigkeitsmodelle, und die Forschung ist bis heute noch lange nicht abgeschlossen.

Die komplexen und vielfältigen Modellparameter lassen sich oft nur schwer ermitteln, was eine Vereinfachung notwendig macht. In den folgenden Kapiteln sollen die bekanntesten Modelle aus der Literatur vorgestellt werden.

3.2.4.1 Soil Root Model

Das Soil Root Model, auch „Single Root Model“ genannt, wurde von WALDRON (1977) und WU et al. (1979) unabhängig voneinander entwickelt (TOBIAS 1991, MICKOVSKY 2009, MATTIA et al. 2005). Die Idee ist, dass die Erhöhung der Scherfestigkeit durch Wurzeln allein auf einer Erhöhung der Kohäsion beruht. Der Reibungswinkel bleibt also von der Durchwurzelung unberührt.

Im Mohr-Coulomb-Diagramm bedeutet dies eine Parallelverschiebung der Coulomb-schen Bruchgeraden. Die Scherfestigkeit S berechnet sich demnach aus

$$S = c + \Delta S + \sigma_N \cdot \tan \phi \quad (3.3)$$

wobei sich die Erhöhung der Kohäsion durch die Wurzeln (ΔS) ergibt aus:

$$\Delta S = \delta \cdot T_N \cdot RAR \quad (3.4)$$

mit

$$\delta = (\sin \beta + \cos \beta \cdot \tan \phi) \quad (3.5)$$

β ist der Winkel der Wurzelverdrehung, welche durch die horizontale Verschiebung verursacht wird (Abb. 3.19). Weiters wird als ϕ der Reibungswinkel des Bodens bezeichnet, T_N ist die mittlere Zugfestigkeit und RAR ist die Root Area Ratio. WU et al. (1979) vereinfachte die Glg. 3.4 zu

$$\Delta S = 1,2 \cdot T_N \cdot RAR \quad (3.6)$$

was die Anwendung erheblich erleichtert.

Weiters wird im Soil Root Model angenommen, dass sich die Wurzeln nur normal auf die Scherzone ausdehnen. Diese Scherzone ändert ihre Dicke Z während des Abscher-vorganges nicht (Abb. 3.19). Außerdem wird vorausgesetzt, dass die Zugfestigkeit und die Querschnittsfläche über die gesamte Wurzellänge konstant ist und alle Wurzeln ihre

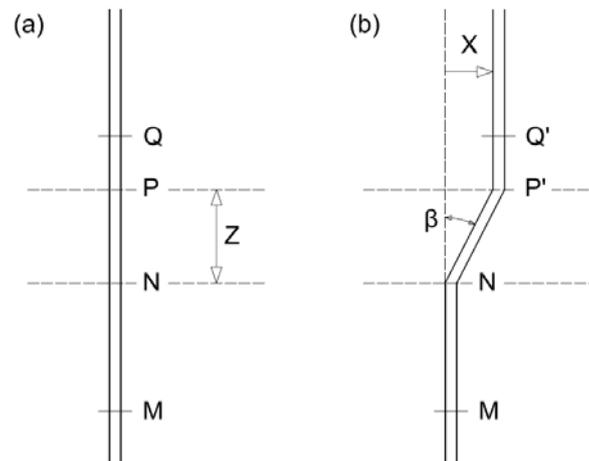


Abbildung 3.19: Modell einer Wurzel vor (a) und nach (b) einer Scherbelastung. Die Wurzel dehnt sich über die Scherzone Z von $MNPQ$ nach $MNP'Q'$ aus und dreht sich im Winkel β . (nach WALDRON 1977)

Zugfestigkeit zur selben Zeit mobilisieren. Andere Autoren stimmen dem nicht zu und führten deshalb Reduktionsfaktoren ein (SCHWARZ et al. 2010). WALDRON & DAKESIAN (1981) verwenden hierzu im eindimensionalen Bereich einen Faktor von 0,83 und HAMMOND (1992) den Faktor 0,56.

Vorteil des Soil Root Models ist die relativ einfache Umsetzung, da die Parameter mit gewissem Aufwand ermittelbar sind. Deshalb wird es oft als Grundlage vieler anderer Modelle verwendet (SCHWARZ et al. 2010).

3.2.4.2 Fiber Bundle Model

Der große Unterschied von Fiber Bundle Models im Gegensatz zu Single Root Models ist, dass immer ein ganzes Bündel von Wurzeln bei der Lastaufbringung betrachtet wird und nicht nur eine einzige Wurzel. POLLEN & SIMON (2005) entwickelten aus den Grundsätzen und Theorien der Materialwissenschaft das „RipRoot“-Modell. Dies ist ein Fiber Bundle Model, welches ein schrittweises Versagen der Wurzeln berücksichtigt, das heißt, dass schwache Wurzeln zuerst versagen. Nach jedem Bruch einer Wurzel wird diese aus dem rechnerischen System entfernt, weil diese die aufgebrachte Last nicht mehr mitträgt, und die Berechnung läuft weiter (POLLEN 2007, MICKOVSKY 2009). Damit das Modell funktioniert wurde folgendes angenommen:

- die Wurzeln liegen parallel zur Scherfläche

- die aufgebrachte Spannung ist über die Wurzeln gleichmäßig verteilt, d.h. dickere Wurzeln erhalten einen höheren Anteil der aufgebrachten Last

Die Bodeneigenschaften (Dichte, Wassergehalt,...) fließen in diesem Modell nicht mit ein. Folglich ist das Ergebnis bei ähnlicher Durchwurzelung von dichten und locker gelagerten Böden gleich.

MICKOVSKY (2009) verglich seine Versuchsergebnisse mit den Berechnungsergebnissen verschiedener Modelle. Zwei davon („Break Model“ und „Break and Stretch Model“) basieren auf der Theorie des Single Root Models. Als drittes Vergleichsmodell wurde ein Fiber Bundle Model herangezogen. Er kam zu dem Schluss, dass Modelle mit gleichzeitigem Versagen aller Wurzeln (vgl. WALDRON 1977, WU et al. 1979) im Durchschnitt eine um 33 % überhöhte Scherfestigkeit voraussagen. Fiber Bundle Models brachten mit Abstand die beste Näherung. Diagramme zu den Ergebnissen sind in Abb. 3.20 zu finden.

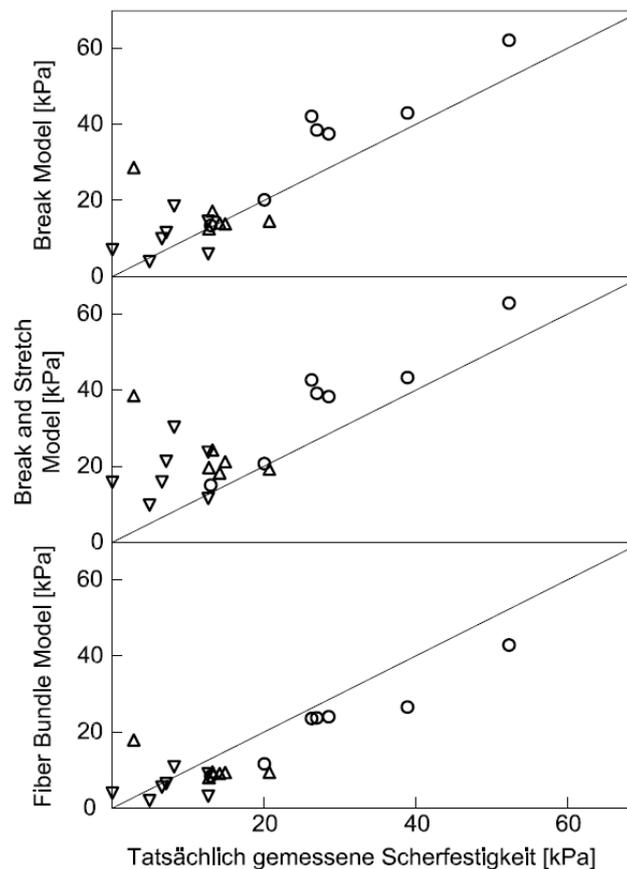


Abbildung 3.20: Vergleich der Ergebnisse von drei unterschiedlichen Modellen. Die Diagonale stellt die perfekte Näherung des Modells an die Versuchsergebnisse dar. (nach MICKOVSKY 2009)

3.2.4.3 Modell der virtuellen Dichte

Einen ganz anderen Weg, die Vegetationswirkung in Berechnungsmodelle aufzunehmen, gingen BÖLL & GRAF (2001). Ihre Theorie ist, dass die Wurzeln eine Erhöhung des Reibungswinkels verursachen, das heißt im Mohr-Coulomb-Diagramm kommt es zu einer Verdrehung der Coulombschen Bruchgeraden. Weil der Reibungswinkel erfahrungsgemäß mit der Dichte des Bodenmaterials steigt, wird in diesem Modell die Vegetationseinwirkung als „virtuelle Dichte“ in die Berechnung mitaufgenommen. Als virtuelle Dichte wird eine fiktive Erhöhung der Lagerungsdichte verstanden.

Folgende Hypothesen wurden demnach aufgestellt (siehe Abb. 3.21):

- es existiert eine Korrelation zwischen Aggregatstabilität und Dichte
- Proben mit Vegetation haben gleiche Aggregatstabilität wie unbehandelte Proben mit höherer Lagerungsdichte
- es existiert eine Korrelation zwischen (virtueller) Dichte und Scherwinkel

Erste Ergebnisse zu diesem Modell lieferte FREI et al. (2002), welche schon im Kap. 3.1.1 beschrieben wurden. GRAF et al. (2009) bestätigte mit Triaxialversuchen, dass ein signifikanter Unterschied des Reibungswinkels zwischen bepflanzten und unbepflanzten Böden besteht. Die Kohäsion zeigte allerdings keine Veränderung. Demnach wies ein bepflanzter, lockerer Boden den gleichen Reibungswinkel auf wie unbepflanzter dichter Boden.

Zur Bestätigung des Modells müssen in Zukunft aber noch weitere Versuche durchgeführt werden.

3.2.4.4 Theorie der bewehrten Erde

Als „bewehrte Erde“ wird ein Erdmaterial mit eingelegten Stahlstäben, -bändern oder Geotextilien verstanden. Diese Bewehrung verleiht dem Boden Zugfestigkeit, ähnlich wie Wurzeln. Großer Unterschied zu anderen Modellen ist die Beeinflussung der beiden Scherparameter φ und c je nach Belastung. Bei geringem Seitendruck ($< 100 \text{ kN/m}^2$) kommt es zu einer Vergrößerung des Reibungswinkels und bei größeren Belastungen wird lediglich die Kohäsion erhöht (Abb. 3.22).

TOBIAS (1991) versuchte die Theorie der bewehrten Erde von VIDAL (1966, in TOBIAS 1991) auf den durchwurzelteten Boden anzuwenden und darauf aufbauend selbst ein Berechnungsmodell zu entwickeln. Viele unbekannte Parameter, welche bei Versuchen nur aufwändig oder gar nicht zu ermitteln sind, erschweren allerdings die Anwendung.

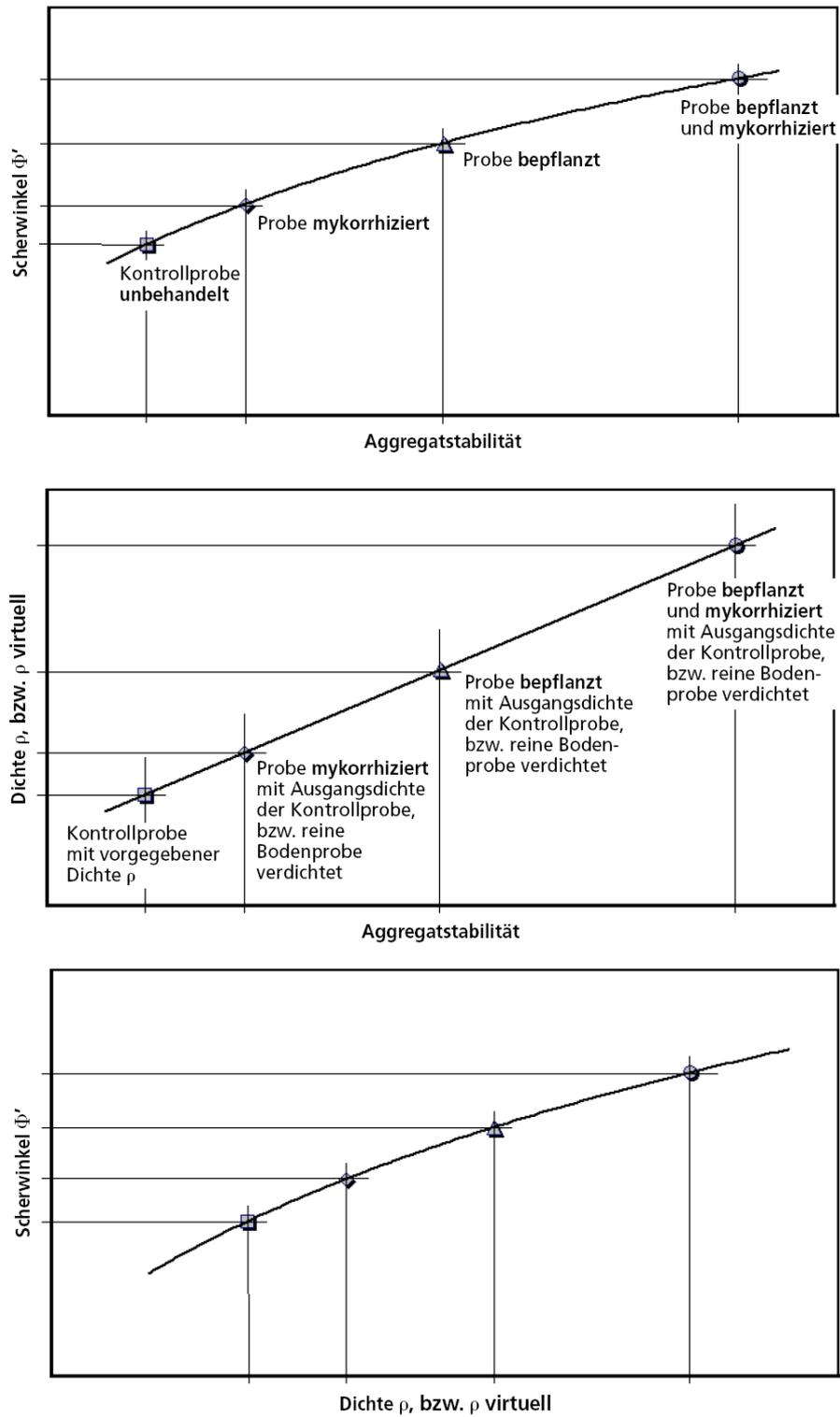


Abbildung 3.21: Graphische Darstellung der Hypothesen des Modells der virtuellen Dichte. (BÖLL & GRAF 2001)

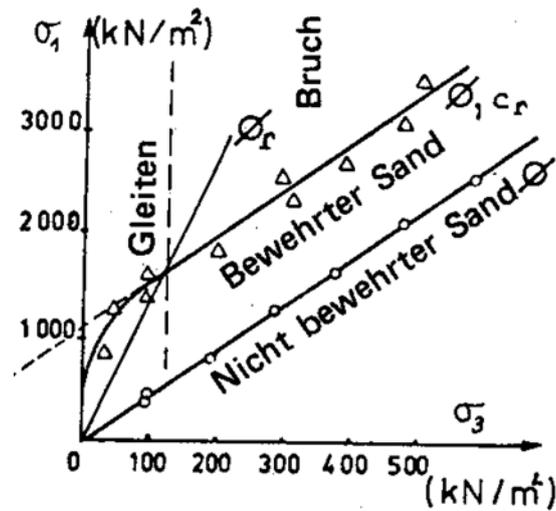


Abbildung 3.22: Veranschaulichung der Theorie der bewehrten Erde. (SCHLOSSER & GUILLOUX 1981, in TOBIAS 1991)

3.3 Gewölbebildung

Wenn ein unduktiler Boden versucht sich zwischen den Baumstämmen hindurchzubewegen, kann es zu einer Gewölbebildung kommen (GRAY & LEISER 1989). Diese bildet sich nur bei seichten Böden auf geneigtem Felsgrund oder bei sandigen Hängen, wo die Stämme durch Sandablagerungen bereits etwas eingegraben sind. Die hauptsächlich verankerten, steifen Baumstämme wirken wie freitragende Pfähle und bilden die Pfeiler der „Bodenbögen“ (Abb. 3.23). Auf die Baumstämme wirken sodann 2 Kräfte: das Gewicht des Bodens, welcher sich direkt hangaufwärts über dem Stamm befindet, und die Kraft des im Boden gebildeten Gewölbes, welches die benachbarten Stämme miteinander verbindet.

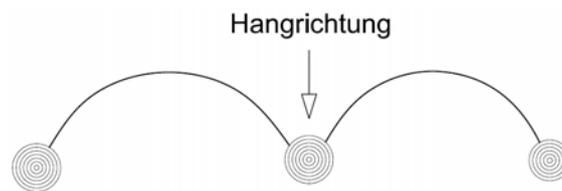
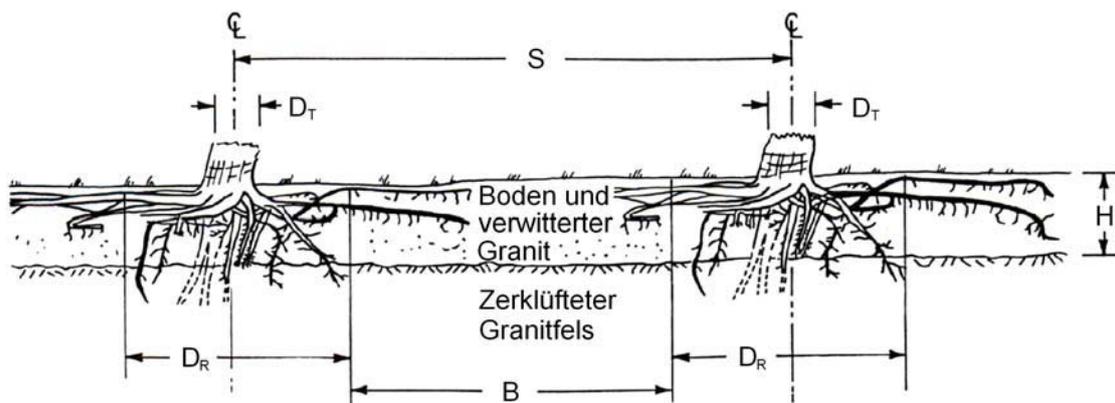


Abbildung 3.23: Schematische Darstellung der Gewölbebildung. Die Baumstämme wirken als Pfeiler, von denen ausgehend sich die Bögen hangaufwärts ausbilden. (nach GRAY & LEISER 1989)

Viele Faktoren bestimmen die Gewölbebildung, wie z.B. der Abstand der Bäume, der Stammdurchmesser, die Höhe und Neigung des duktilen Bodenanteils und die Scherfestigkeit. Auch DANJON et al. (2008) beobachtete die Auswirkungen bestimmter Konstellationen von Baumreihen auf die Stabilität von Hängen. Er stellte fest, dass sich alternierende Baumreihen im Gegensatz zu gleichmäßigen, rasterartigen Pflanzungen positiv auf die Hangstabilität auswirken.

Die Theorie der Gewölbebildung lässt sich nicht nur auf die Baumstämme, sondern auch auf das Wurzelsystem übertragen. Als „vertikaler Wurzelzylinder“ wird der etwa 5-fache Stammdurchmesser gewählt (CURTIS 1964, in GRAY & LEISER 1989), welcher in Abb. 3.24 dargestellt wird. Nach der „Soil Arching Theory“ von WANG & YEN (1974, in GRAY & LEISER 1989) kann nun ein kritischer Abstand B_{crit} zwischen den Wurzelzylindern berechnet werden. Das Diagramm in Abb. 3.25 stellt die grafische Ermittlung von B_{crit} unter bestimmten Bedingungen dar. Als Eingangsdaten werden die Kohäsion C_s und der Reibungswinkel ϕ der oberen Bodenschicht, wie auch die Kohäsion C_1 und der Reibungswinkel ϕ_1 zwischen den oberen beiden Schichten benötigt (GRAY & LEISER 1989).



- S = Abstand von Baummitte zu Baummitte
- D_T = Stammdurchmesser
- D_R = Durchmesser des vertikalen Wurzelzylinders
- B = Abstand zwischen den Wurzelzylindern
- H = Dicke der oberen Bodenschicht

Abbildung 3.24: Theoretische Annahme des vertikalen Wurzelzylinders. (GRAY & LEISER 1989)

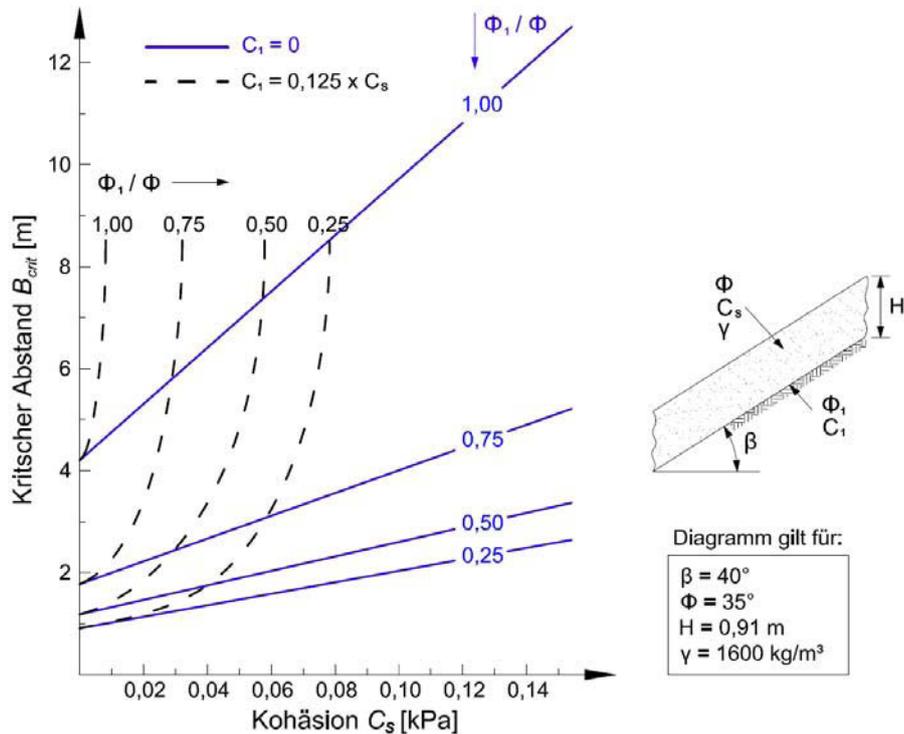


Abbildung 3.25: Theoretische grafische Ermittlung von B_{crit} . Grafik gilt nur für $\beta = 40^\circ$, $\phi = 35^\circ$, $H = 0,91$ m und $\gamma = 1600$ kg/m³. (nach GRAY & LEISER 1989)

3.4 Zusätzliche Auflast

Die zusätzliche Auflast auf den Boden, welche durch das Gewicht der Vegetation entstehen kann, steht häufig unter Verdacht, negative Auswirkungen auf die Hangstabilität auszuüben. Dies ist allerdings nicht immer korrekt. Unter bestimmten Bedingungen kann sogar ein positiver Effekt erzielt werden, nämlich bei geringer Kohäsion des Bodens c , hohem Reibungswinkel ϕ , hoher Standrohrspiegelhöhe H_w und bei relativ flachem Gefälle β . In Glg. 3.7 werden die genaueren Zusammenhänge klar (mit γ_w = Wichte des Wassers).

$$c < \gamma_w \cdot H_w \cdot \tan \phi \cdot \cos^2 \beta \quad (3.7)$$

STANGL (2008) errechnete eine oberirdische Trockenmasse eines hauptsächlich mit Erlen bewachsenen Hanges in Oberösterreich von 18 t/ha. Das entspricht einem Frischgewicht von etwa 36 t/ha. Im Durchschnitt ist die Auflast somit eher gering, aber die Frage ist, ob ein aussagekräftiger Mittelwert überhaupt gezogen werden kann, da die Bäume eher punktuelle Belastungen in den Boden einbringen. Während direkt unter einem Baum Kräfte um die 70 kPa auftreten können, befindet sich der errechnete Durch-

schnitt eines ganzen Hanges bei etwa 0,6 - 0,8 kPa (GRAY & LEISER 1989).

In Bezug auf die Kriechraten oder auf Berechnungen des Sicherheitsfaktors spielt die Auflast im Grunde aber eine so geringe Rolle, dass sie, egal ob positiv oder negativ einwirkend, vernachlässigbar ist. Der Einfluss des Windes dürfte allerdings bedeutender sein, da die horizontale Kraft auf die Krone über den Stamm in den Boden geleitet wird und dort zu Bewegungen führen kann.

3.5 Erosion

Die Erosion ist eine Zerstörung der Bodenstruktur und bewirkt in weiterer Folge ein Abtragen der Bodenpartikel. Auslöser für die Erosion können Wasser, Wind, Eis oder die Schwerkraft sein.

Bezüglich der **Wassererosion** hängt die Erosionsanfälligkeit eines Bodens von der Textur, dem Wassergehalt, dem pH-Wert, der Porenzahl und der chemischen Zusammensetzung des Wassers ab. Besonders organische Bestandteile und tonige Kornfraktionen erschweren das Erodieren. Als weitere Faktoren sind das Klima, die Topographie und die Vegetation zu nennen. Besonders dem pflanzlichen Bewuchs sind positive Effekte auf den Erosionswiderstand zuzuschreiben (GRAY & LEISER 1989):

- Interzeption
- Transpiration
- Abbremsen
- Aggregierung
- Infiltration

Ist ein Bedeckungsgrad von 70 % gegeben und der maximale Abstand der Vegetation zum reinen Boden (ohne Bewuchs) $< 0,3$ m, wird durch die Interzeption die Regenfallenergie gemindert und der Boden vor Verdichtung geschützt. Schon bei einem Abstand von 0,3 - 1,0 m werden Bodenpartikel durch Regentropfen zerteilt und aufgelöst. Ab 1,0 m Höhe kann die Vegetation die Erosion sogar erhöhen (MORGAN 2007). Das Diagramm in Abb. 3.26 zeigt die Bodenverlustrate in Bezug auf die Bodenbedeckung und die Höhe der Vegetation.

Kommt es durch Starkregenereignisse zum Abfluss auf der Bodenoberfläche, können Pflanzen durch die Erhöhung der Oberflächenrauigkeit die Fließgeschwindigkeit des Wassers verringern. Das Mitreißen von Bodenteilchen wird gemindert und es kommt zur Sedimentation. In diesem Zusammenhang sind besonders die Gräser zu erwähnen.

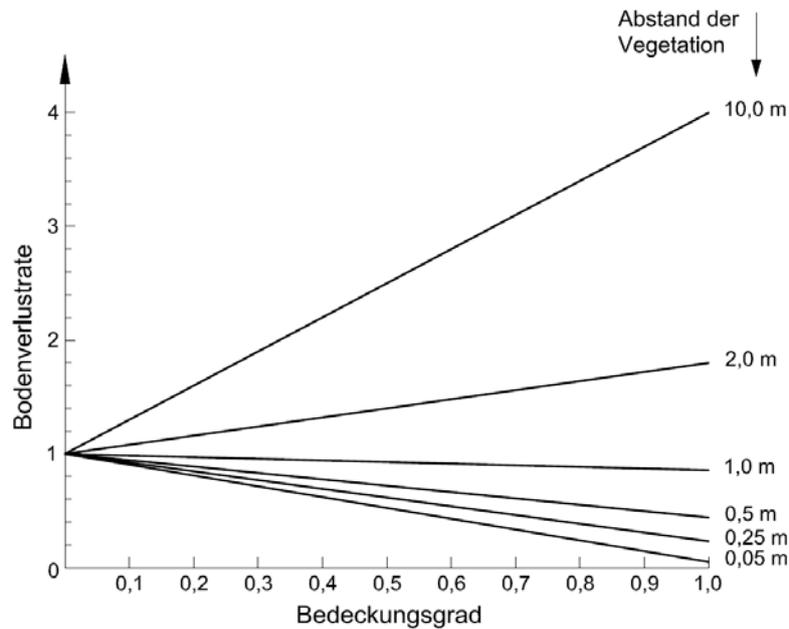


Abbildung 3.26: Bodenverlustrate durch Regentropfenerosion in Abhängigkeit von Bedeckungsgrad und Abstand der Vegetation vom reinen Boden. (nach MORGAN 2007)

Abhängig vom Gefälle wird bei einer Dichte von > 7500 Grashalme /m² die beste Wirkung erzielt. Wichtig ist eine gleichmäßige Verteilung der Gräser, damit es nicht zu einer Konzentration der Fließwege und in weiterer Folge zur Erhöhung der Fließgeschwindigkeit kommt.

Die Erhöhung der Aggregatstabilität durch Mykorrhiza wurde bereits besprochen (Kap. 3.1.1). GRAF & GERBER (1997) führten Erosionsversuche durch, indem sie 4 Boxen unterschiedlich bepflanzt und nach 3, 4 und 5 Monaten Wachstumszeit mit einer Intensität von 90 mm/h zweimal beregneten. Die erste Box blieb als Kontrolle unbepflanzt, die zweite wurde nur mit dem Ektomykorrhizapilz *Laccaria bicolor* beimpft, die dritte wurde mit *Dryas octopetala* L. (Silberwurz) bepflanzt, und die letzte Box wurde sowohl mit der Pflanze als auch dem Pilz bestückt. Wie in Abb. 3.27 zu erkennen ist, weist die Kombination von Pflanze und Mykorrhiza bei allen 3 Beregnungsserien den geringsten Materialverlust auf. Begründet wird dieses Erkenntnis damit, dass durch den Pilz sowohl das oberirdische als auch das unterirdische Wachstum gefördert wird, was zu einer besseren Bedeckung und einer höheren Aggregation führt.

Wird die Porosität und die Durchlässigkeit des Bodens aufrechterhalten, wird die Wassererosion vermindert. Wurzeln, Mykorrhiza und deren Ausscheidungen steigern die Aggregatstabilität und somit auch die Infiltration des Bodens.

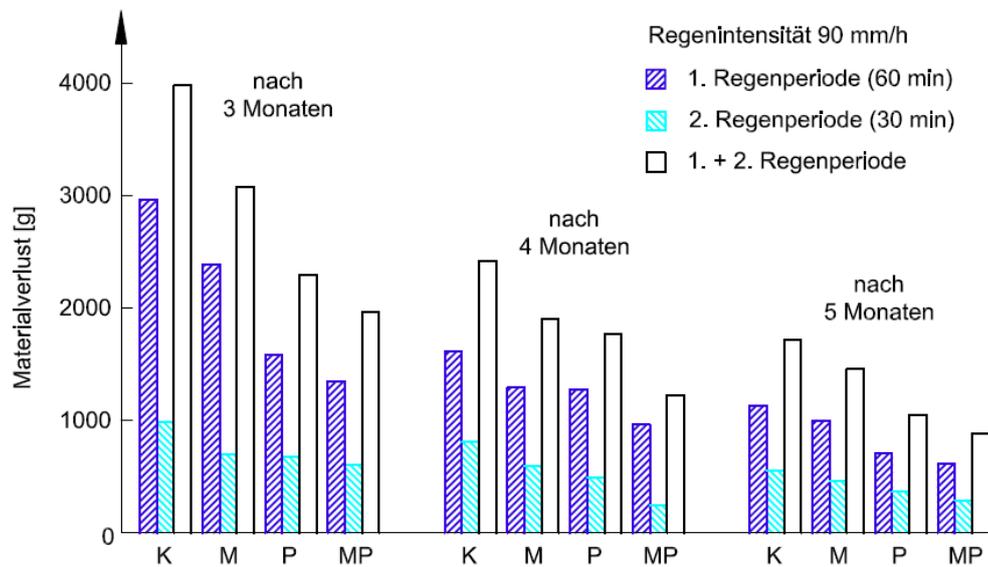


Abbildung 3.27: Materialverlust der 4 verschiedenen Boxen bei einer Regenintensität von 90 mm/h. K = Kontrolle, M = Mykorrhiza, P = Pflanze, MP = Mykorrhiza und Pflanze. (nach GRAF & GERBER 1997)

Bei der **Winderosion** werden Partikel $< 0,1$ mm (Feinschluff) durch den Wind vertragen, größere werden rollend oder hüpfend weiterbewegt. Ob und wie stark diese Form der Erosion angreift ist vom Klima, der Bodenpartikelgröße, dem Wassergehalt und der Oberflächenrauigkeit abhängig. Die Vegetation kann besonders auf die Rauigkeit Veränderungen ausüben, da sie je nach Art, Höhe, Dichte und saisonalen Veränderungen in der Bedeckung den Boden vor Windangriff schützen kann. Die meiste Winderosion findet bis zu einer Höhe von 1 m über dem Boden statt. In dieser Höhe ist die Vegetation gut in der Lage die Oberflächenrauigkeit zu erhöhen, den Wind dadurch abzuleiten und das weite Vertragen von Bodenpartikel zu behindern. Außerdem bindet die Vegetation (mit Mykorrhiza) die Bodenaggregate, wodurch die Partikel nur schwer aus ihrem Verband gerissen werden können (GRAY & LEISER 1989).

3.6 Eigenschaften festigkeitsfördernder Pflanzen

Die Ingenieurbiologie ist ein dynamisches System, das heißt die Pflanzen und deren Aufwuchsboden sind einer ständigen Wandlung unterworfen.

Jede Pflanze gedeiht unter den ökologischen Bedingungen am Besten, welche ihrem natürlichen Vorkommen am ähnlichsten sind. Daher sollte bei der Pflanzenwahl darauf ein besonderes Augenmerk gelegt werden. Die technischen Anforderungen sind stets

zweitrangig, denn selbst eine Pflanze mit der Anlage zu einem gut ausgeprägten Wurzelsystem gedeiht nicht auf einem für sie ungeeigneten Boden. Um einen Erfolg zu erzielen müssen Klima, Boden und eventuelle Krankheiten in der Umgebung beachtet werden. Bezüglich des Erosionsschutzes wird die Pflanzenwahl von der Ausbildungsart sowohl oberirdischer als auch unterirdischer Pflanzenteile abhängen (GRAY & LEISER 1989).

Um die Scherfestigkeit zu erhöhen haben sich generell Gräser mit folgenden Eigenschaften bewehrt:

- Fähigkeit, dichte Rasen zu bilden (häufig ausläuferbildende Arten)
- anfänglich langsames Aufkommen, dann aber über mehrere Jahre überdauernd
- meistens Untergräser (grüne Triebe, kurz, < 20cm)
- Trittfestigkeit

Die Konzentration an tiefen und verzweigten Wurzeln sollte hoch sein und die Wurzeln eine relativ hohe Zugfestigkeit aufweisen. Am Besten eignet sich jedoch eine Gräser-Kräuter-Mischung aus horst- und ausläuferbildenden Arten vermengt mit perennierenden Arten. Das damit erlangte System aus flachen und tiefen Wurzeln verhindert das Ausrieseln einerseits und das Ausziehen aus dem Boden andererseits.

WALDRON (1977) führte Direktscherversuche mit vier verschiedenen Pflanzen durch, und stellte fest, dass auf jedem der verwendeten Böden die Luzerne (*Medicago sativa* var. Sonora) das beste Ergebnis brachte (Abb. 3.28). Demnach scheint die Verwendung der oft tiefwurzelnden Luzerne zur Bodenstabilisierung eine gute Lösung zu sein. Generell soll darauf geachtet werden, dass die angepflanzte Vegetation der heutigen potentiell natürlichen Vegetation (HPNV) entspricht, da sich diese selbst reguliert. Die heimischen Pflanzen sind bereits an Klima, Boden, Insekten und Pilze angepasst und binden sich perfekt in die Umgebung ein. Aufgrund von Pflanzenmangel wird aber immer öfter zu „exotischen“ Arten gegriffen, welche sich oft in ihrer Entwicklung schwer tun und vielleicht sogar andere Krankheiten einschleppen (GRAY & LEISER 1989).

Von der Verwendung eines Düngers wird von FREI et al. (2002) abgeraten, da durch die Änderung der natürlichen Bodenflora und -fauna standortfremde Vegetation gefördert und der Boden nicht tief genug durchwurzelt wird.

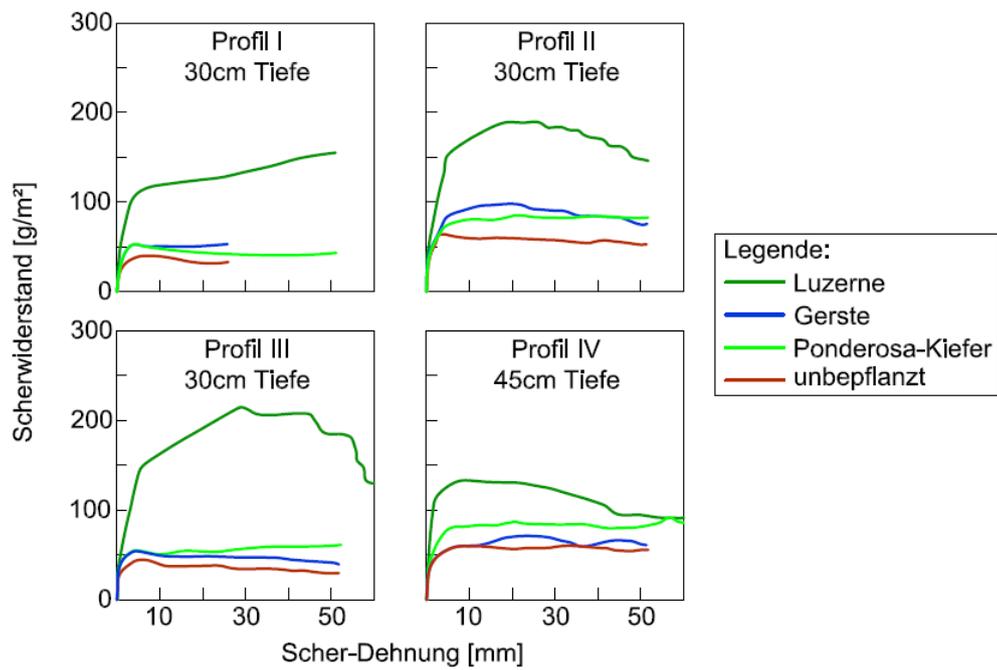


Abbildung 3.28: Vergleich des Scherwiderstandes von durchwurzelter (Luzerne, Gerste, Ponderosa-Kiefer) und undurchwurzelter Proben. Die verwendeten Bodenprofile wurden schon in Abb. 3.17 genauer erläutert. (nach WALDRON 1977)

4 Resümee

Die Festigung des Bodens durch Wurzeln ist ein wichtiger Punkt in der Ingenieurbiologie. Erst durch diese Armierung trägt ein lebendes Bauwerk zur Stabilisierung bei. Aus der Literatur sind diesbezüglich schon einige Forschungsergebnisse bekannt, allerdings durch den komplexen Aufbau der Boden-Wurzel-Matrix sind noch lange nicht alle Fragen beantwortet.

Die Art der Ausbildung des Wurzelsystems bestätigt die Komplexität des Systems. Nicht nur von der genetischen Abstammung abhängig, sondern auch von der Umwelt beeinflusst bilden sich die Wurzeln unterschiedlich aus. Diese Tatsache wirkt sich auf Auszugswiderstand und Reißfestigkeit aus, welche wiederum Veränderungen der Scherfestigkeit mit sich tragen. Die Umwelteinflüsse sind vielfältig doch versuchten einige Autoren Gesetzmäßigkeiten aufzustellen, unter welchen Umständen sich die Wurzeln oft gegen deren genetische Bestimmung entwickeln. In diesem Bereich ist sicher noch einige Forschungsarbeit zu leisten, besonders was die Wurzelbildung in vernässten Hängen betrifft, welche ja bekanntermaßen zu Rutschungen neigen.

Um den Wurzelgehalt in einem Bodenabschnitt zu quantifizieren wurden einige Definitionen eingeführt. Durchgesetzt haben dürfte sich die „Root Area Ratio“, kurz RAR. Als Wurzelquerschnittsfläche geteilt durch die gesamte Fläche beschreibt die RAR die Duktilität des Bodens. Ist die Duktilität hoch, wird der Bruch des gesamten Systems verzögert und die Scherfestigkeit bleibt lange erhalten.

Ob eine Stabilisierung des Bodens gewährleistet werden kann, hängt allerdings nicht nur von der Menge der vorhandenen Wurzeln ab, sondern auch von deren Beschaffenheit. Durch Zugversuche wurde ein Abnehmen der Festigkeit mit steigendem Wurzel-durchmesser festgestellt, Auszugversuche konnten einen höheren Auszieh-widerstand in größeren Durchmessern feststellen. Zusammen betrachtet werden in einem System die dünnen Wurzeln eher ausgezogen und dicke eher reißen. Warum es zu einer Verschlechterung der Festigkeit mit zunehmendem Durchmesser kommt, ist bisher nicht restlos geklärt. Erste Annahmen beruhen auf einem höheren Gehalt an Cellulose pro Wurzel-masse in dünnen Wurzeln, es existieren aber noch andere festigende Stoffe in der Wurzel wie Lignin. Forschungsbedarf besteht in diesem Zusammenhang also noch ausreichend, damit Fragen wie „Wovon hängt die Zugfestigkeit ab“ und „Welche Pflanzen können in welchem Alter die höchste Festigkeit mobilisieren“ beantwortet werden können.

Allerdings ist nicht nur der durchschnittliche Gehalt an Wurzeln im Boden sind ausschlaggebend für die stabilisierende Wirkung, sondern auch deren Verteilung im Raum. Anhand von Auszugversuchen konnten in der Literatur drei unterschiedliche Wurzelty-

pen ausgemacht werden, welche sich in ihrem Verlauf im Kraft-Dehnungs-Diagramm unterscheiden. Damit besser vorhergesagt werden kann wie sich ein Bruch gestalten wird, wäre interessant zu erforschen unter welchen Bedingungen sich welche Wurzeltypen bilden. Dies stellt sicher eine der schwierigsten Aufgaben dar, weil Genetik, Bodenbeschaffenheit und Klima die Durchwurzelung bestimmen.

Mykorrhizapilze erlangen in der Forschung immer mehr Aufmerksamkeit. Durch ihr Vorhandensein im Boden kommt es zu einer besseren Entwicklung der Pflanze sowohl oberirdisch als auch unterirdisch. In weiterer Folge kommt es zu einer Vergrößerung der RAR und außerdem zu einer Erhöhung der Stabilität der Bodenaggregate. Diese Eigenschaften verbessern nicht nur die Scherfestigkeit des Bodens, sondern auch den Erosionswiderstand. Sowohl bei Wasser- als auch bei Winderosion werden größere und gut zusammenhaftende Partikel nicht so leicht vertragen. Weiters bedeckt die Vegetation den Boden, sodass Regentropfen mit verminderter Energie auf den Boden treffen und weniger Partikel durch den Aufschlag getrennt werden können. Es ist dabei aber auf einen nicht zu großen Abstand der Blätter vom Boden zu achten. Bezüglich der Winderosion ist auf eine Bepflanzung im Bereich bis zu 1 m über dem Boden zu achten, da hier laut Messungen die meiste Erosion stattfindet.

Die zusätzliche Auflast der Vegetation, besonders großer Bäume, wurde bisher meist als negative Einwirkung auf die Hangstabilität betrachtet. Es stellt sich die Frage, in welchen Fällen die Vorteile und wann die Nachteile der Pflanzen überwiegen. Grobe Gesetzmäßigkeiten konnten in der Literatur bereits festgestellt werden.

Um nun die Frage zu klären, wie die Vegetation die Stabilität des Bodens beeinflusst, wurden in der Literatur unzählige Scherversuche dokumentiert. Das größte Problem stellt allerdings die Vergleichbarkeit der Ergebnisse dar. Abgesehen von den Bodeneigenschaften wie Kornverteilung, Dichte und Wassergehalt sind die Art der Vegetation und die Wurzelverteilung für das Ergebnis ausschlaggebend. Selten nur wurde bei unterschiedlichen Autoren mit der gleichen Pflanze oder dem gleichen Boden gearbeitet. Abgesehen davon, wurden die Versuche mit unterschiedlichen Geräten (Großrahmenschergerät, Feldrahmenschergerät, Triaxialgerät) und Abmessungen durchgeführt. Dementsprechend vielfältig sind die Versuchsergebnisse, welche insgesamt gesehen nur einen Trend markieren können. Es besteht hier also der Bedarf nach einer Standardisierung der Versuchsmethoden. Auf jeden Fall sollten bei den Versuchen alle Boden- und Pflanzeigenschaften mitprotokolliert werden, denn nur so können Ergebnisse untereinander verglichen und Gesetzmäßigkeiten aufgestellt werden.

Die Scherfestigkeit wird durch Bewurzelung erhöht, in welchem Ausmaß ist allerdings im Grunde noch ungeklärt. Im Laufe der Zeit wurden einige Modelle aufgestellt, welche die Scherfestigkeitszunahme darstellen sollen. Jedes Modell setzt aber bestimmte Me-

chanismen oder Parameter voraus, die unter allen Umständen gleich sein sollen. Diese Vereinfachungen sind nötig, um die Modelle anwendbar zu machen, es stellt sich aber immer die Frage, welche Vereinfachung die Natur am wenigsten verfälscht. Das „Soil Root Model“ geht von einem gleichzeitigem Reißen aller Wurzeln aus und beschreibt die Scherfestigkeitserhöhung rein durch eine Steigerung der Kohäsion. Das „Modell der virtuellen Dichte“ wiederum führt die Zunahme der Scherfestigkeit auf eine Erhöhung des Reibungswinkels zurück. Außerdem wird angenommen, dass Proben mit Vegetation die gleiche Aggregatstabilität haben wie vegetationslose Proben mit hoher Lagerungsdichte. Das „Modell der bewehrten Erde“ macht die Änderung der jeweiligen Scherparameter auflastabhängig, großes Problem ist allerdings die Anwendbarkeit, da die Ermittlung der dafür notwendigen Werte kompliziert ist. Das vorerst am besten passende Modell scheint das „Fiber Bundle Model“ zu sein, welches als Grundidee ein Versagen der Wurzeln je nach Durchmesser nacheinander verfolgt. Die Bodeneigenschaften werden hier allerdings vernachlässigt.

Jedes dieser Modelle fand bzw. findet in der Literatur Anklang und jedes wurde auf seine Weise verifiziert, obwohl sie unterschiedlicher nicht sein können. Es scheint, dass je nachdem welches Modell der jeweilige Autor vertritt, seine Interpretation der Ergebnisse anders ausfällt. Oft ist dies auf die geringe Anzahl der Versuche zurückzuführen, oder weil die Versuche unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt wurden.

Die Forschung im Bereich der Modellentwicklung ist also noch lange nicht abgeschlossen. Das perfekte Modell sollte einfach anzuwenden sein und die Natur gut widerspiegeln. Ziel der Bemühungen wäre, die Stabilität eines bepflanzten Hanges berechnen zu können bzw. Anhaltspunkte für die Auswahl der Vegetation zur Sicherung eines Hanges mit bestimmten Bodeneigenschaften zu erlangen.

Abkürzungsverzeichnis

A	gesamte (Scher-) Fläche	[m ²], [cm ²]
A_r	Querschnittsfläche aller Wurzeln	[cm ²]
a_r	Root Area Ratio, $a_r = \frac{A_r}{A}$	[cm ² /cm ²]
B_{crit}	kritischer Abstand zwischen Wurzelzylinder	[m]
c	Kohäsion	[kN/m ²]
c'	effektive/wirksame Kohäsion	[kN/m ²]
c_u	undrainierte Kohäsion, undrainierte Scherfestigkeit	[kN/m ²]
D	Dichte des Bodens	[kN/m ³]
F, N, σ_1	Auflast	[kN/m ²]
g	Erdbeschleunigung, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$	[m/s ²]
H_w	Standrohrspiegelhöhe	[m]
Δh	Hebung, Zusammendrückung	[kN/m ²]
L	Wurzellänge	[mm]
N, F, σ_1	Auflast	[kN/m ²]
r	Radius der Wurzelquerschnittsfläche	[mm]
RAR	Root Area Ratio, $RAR = \frac{A_r}{A}$	[cm ² /cm ²]
S	Scherfestigkeit	[kN/m ²]
ΔS	Erhöhung der Kohäsion durch Wurzeln	[kN/m ²]
s	Verschiebung	[mm]
T	Scherkraft	[kN/m ²]
T_N	mittlere Zugfestigkeit	[kN/m ²], [MPa]
t	Zeit	[s]
u	Porenwasserdruck	[kN/m ²]
V	Volumen	[cm ³]
ΔV	Volumenänderung	[cm ³]
w	Wassergehalt	[%]
Z	Dicke der Scherfläche	[mm]

α_f, α	Scherwinkel	[°]
β	Wurzelverdrehung (bei WALDRON 1977)	[°]
β	Gefälle	[°]
γ	Wichte (des Bodens)	[kN/m ³]
γ_w	Wichte des Wassers	[kN/m ³]
δ	Vereinfachung des Ausdrucks ($\sin \beta + \cos \beta \cdot \tan \phi$)	[°]
δ_V	vertikale Dehnung	[mm]
δ_H	horizontale Dehnung	[mm]
π	Kreiszahl, $\pi = 3,14$	[/]
ρ	Bodendichte	[g/cm ³]
ρ_w	Bewurzelungsdichte	[mg/cm ³]
σ	Normalspannung, totale Spannung, $\sigma = \sigma' + u$	[kN/m ²]
σ'	effektive/wirksame Spannungen, $\sigma' = \sigma - u$	[kN/m ²]
σ_1, N, F	erste Normalspannung (Auflast)	[kN/m ²]
σ_2, σ_3	zweite bzw. dritte Normalspannung (Seitendruck)	[kN/m ²]
σ_c	Konsolidationsspannung	[kN/m ²]
τ	Schubspannung	[kN/m ²]
τ_{20}	Scherfestigkeit bei einer Normalspannung von 20 kN/m ²	[kN/m ²]
τ_f, S	Scherfestigkeit	[kN/m ²]
φ, ϕ	Winkel der inneren Reibung, Reibungswinkel	[°]
φ', ϕ'	effektiver/wirksamer Reibungswinkel	[°]

Abbildungsverzeichnis

2.1	Bau der Wurzelspitze im Raumdiagramm. (NULTSCH 2001)	3
2.2	Vergleich des Wurzelbaus im primären (A) und im sekundären Zustand (B). (NULTSCH 2001)	5
2.3	Sprossbürtige Wurzeln bei der Hasel (<i>Corylus avellana</i>). (MOGG 1996, in FLORINETH 2005)	7
2.4	Sekundär homogenes Wurzelsystem der Gräser (links) und das heterogene Wurzelsystem der Distel (rechts).	8
2.5	Durch Mykorrhiza verpilzte Wurzeln der Wald-Kiefer (links). Die Pilzhyphe dringt über das Wurzelhaar ein (rechts). (KUTSCHERA & LICHTENEGGER 2002)	12
2.6	Bakterien dringen in die Wurzel ein (links) und bilden Wurzelknöllchen (rechts). (KUTSCHERA & LICHTENEGGER 2002)	13
2.7	Räumlicher Spannungszustand im homogenen, isotropen Boden und nach Bildung einer Bruchfuge im Scherwinkel von α_f . (nach RICHIEN & LESNY 2004)	14
2.8	Scherfuge und Zonenbruch. (SIMMER 1994)	15
2.9	Spannungen und Schnittkräfte an einem Bodenelement im Gleichgewicht. (RICHIEN & LESNY 2004)	15
2.10	Mohrscher Spannungskreis. (nach RICHIEN & LESNY 2004)	17
2.11	Verschiedene Mohrsche Spannungskreise mit Umhüllender. (nach RICHIEN & LESNY 2004)	18
2.12	Mohr-Coulombsche Grenzbedingung. (nach RICHIEN & LESNY 2004)	18
2.13	Zwei Kleinrahmenschergeräte (links) mit jeweils einer Scherbox der Größe 15 x 15 cm (rechts). Institut für Geotechnik, Boku Wien.	19
2.14	Großrahmenschergerät mit einer möglichen Probengröße von 50 x 50 cm. Der untere Rahmenteil ist beweglich während der obere fixiert ist. Institut für Geotechnik, Boku Wien.	20
2.15	Schematischer Aufbau des Feldrahmen-Scherapparates. (TOBIAS 1991)	21
2.16	Versuchsordnung für Triaxialversuche. (SIMMER 1994)	22
2.17	Druckzelle des Triaxialversuchs mit den Steuerventilen. Institut für Geotechnik, Boku Wien.	23
3.1	Bildung von Mikro- und Makroaggregaten im Boden durch das Mycel-Netzwerk (●) und durch Pilz-Ausscheidungen (★). (BÖLL & GRAF 2001)	26

3.2	Linearer Zusammenhang zwischen Aggregatstabilität und Wurzellänge bei 5-monatigen Grauerlen. (nach FREI et al. 2002)	27
3.3	Schematische Darstellung der Bodenfeuchte bewaldeter und abgeholzter Flächen bei Regen. (nach GRAY & LEISER 1989)	28
3.4	Effekt der Wurzelbewehrung (B) im Vergleich zum wurzellosen Boden (A). (nach GRAY & LEISER 1989)	29
3.5	Scherfestigkeit des bepflanzten und des unbepflanzten Bodens ($g = \text{Erdbeschleunigung, [kg g/m}^2] = [\text{kN/m}^2]$). (nach ABE & IWAMOTO 1986)	30
3.6	Vergleich bewurzelter und unbewurzelter Böden im Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei unterschiedlichen Normalspannungen. (nach ABE & IWAMOTO 1986)	31
3.7	Ergebnisse des Großrahmenscherversuchs. (KATZENBACH & WERNER 2007)	32
3.8	Bepflanzte/unbehandelte und bepflanzte/mykorrhizierte Bodenproben nach 20 Wochen Pflanzenwachstum im Vergleich. (nach RICKLI et al. 2004)	33
3.9	Scherfestigkeit τ_{20} bei einer Normalspannung von 20 kN/m ² in Abhängigkeit von der Bewurzelungsdichte. Eingeklammerter Wert ist ein Spezialfall und wurde bei der Auswertung vernachlässigt. (nach TOBIAS 1991)	34
3.10	Sowohl die Zugkraft als auch der Cellulosegehalt nehmen mit steigendem Wurzeldurchmesser ab. (nach GENET et al. 2005)	35
3.11	Die Wurzeln von <i>Castanea sativa</i> zeigten eine signifikante Abhängigkeit von Zugfestigkeit und Cellulosegehalt. (nach GENET et al. 2005)	36
3.12	An fünf Scherzonen deformierte Wurzel. Der Winkel der Deformierung beschreibt die Richtung der Scherfläche. (nach RIESTENBERG 1994)	37
3.13	Auszugversuche mit Eingriffeligem Weißdorn (a) und Stiel-Eiche (b). Der Auszugwiderstand korreliert mit dem Wurzeldurchmesser positiv. (nach NORRIS 2005)	38
3.14	Auszugversuche mit Zucker-Ahorn, <i>Acer saccharum</i> M. (a) und Weiß-Esche, <i>Fraxinus americana</i> L. (b). Positiver Zusammenhang zwischen Wurzeldurchmesser und Auszugwiderstand ist erkennbar. (nach RIESTENBERG 1994)	38
3.15	Vergleich der beiden Fehlermechanismen Ausziehen und Reißen mit dem Wurzeldurchmesser. (nach POLLEN 2007)	39
3.16	Der Scherweg bis zum Bruch ist bei Böden mit höherer Bewurzelungsdichte länger. (nach TOBIAS 1991)	40
3.17	Die Scherfestigkeit nimmt mit der Root Area Ratio linear zu. Links sind die Bodenprofile zu den jeweiligen Versuchen beschrieben. (nach WALDRON 1977)	41

3.18	Einteilung der drei Wurzeltypen nach dem Verlauf im Kraft-Dehnungsdiagramm und der Wurzelform. (nach RIESTENBERG 1994)	42
3.19	Modell einer Wurzel vor (a) und nach (b) einer Scherbelastung. Die Wurzel dehnt sich über die Scherzone Z von MNPQ nach MNP'Q' aus und dreht sich im Winkel β . (nach WALDRON 1977)	44
3.20	Vergleich der Ergebnisse von drei unterschiedlichen Modellen. Die Diagonale stellt die perfekte Näherung des Modells an die Versuchsergebnisse dar. (nach MICKOVSKY 2009)	45
3.21	Graphische Darstellung der Hypothesen des Modells der virtuellen Dichte. (BÖLL & GRAF 2001)	47
3.22	Veranschaulichung der Theorie der bewehrten Erde. (SCHLOSSER & GUILLOUX 1981, in TOBIAS 1991)	48
3.23	Schematische Darstellung der Gewölbebildung. Die Baumstämme wirken als Pfeiler, von denen ausgehend sich die Bögen hangaufwärts ausbilden. (nach GRAY & LEISER 1989)	48
3.24	Theoretische Annahme des vertikalen Wurzelzylinders. (GRAY & LEISER 1989)	49
3.25	Theoretische grafische Ermittlung von B_{crit} . (GRAY & LEISER 1989)	50
3.26	Bodenverlustrate durch Regentropfenerosion in Abhängigkeit von Bedeckungsgrad und Abstand der Vegetation vom reinen Boden. (nach MORGAN 2007)	52
3.27	Materialverlust der 4 verschiedenen Boxen bei einer Regenintensität von 90 mm/h. (nach GRAF & GERBER 1997)	53
3.28	Vergleich des Scherwiderstandes von durchwurzelter (Luzerne, Gerste, Ponderosa-Kiefer) und undurchwurzelter Proben. Die verwendeten Bodenprofile wurden schon in Abb. 3.17 genauer erläutert. (nach WALDRON 1977)	55

Tabellenverzeichnis

2.1 Versuchsarten des Triaxialversuchs. 24

Literaturverzeichnis

- Abe K., Iwamoto M. (1986).** Preliminary Experiment on Shear in Soil Layers with a large Direct-Shear Apparatus. *Journal of the Japanese Forestry Society*, 2: 61-65.
- Abe K., Ziemer R.R. (1991).** Effect of Tree Roots on Shallow-Seated Landslides. *USDA Forest Service General Technical Report*, 130: 11-20.
- Bischetti G.B., Chiaradia E.A., Simonato T., Speziali B., Vitali B., Vullo P., Zocco A. (2005).** Root strength and root area of forest species in Lombardy. *Plant and Soil*, 278: 11-22.
- Böll A., Graf F. (2001).** Nachweis von Vegetationswirkungen bei oberflächennahen Bodenbewegungen – Grundlagen eines neuen Ansatzes. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 152, 1: 1-11.
- Cammeraat E.R., van Beek R., Kooijman A. (2005).** Vegetation succession and its consequences for slope stability in SE Spain. *Plant and Soil*, 278: 135-147.
- Danjon F., Barker D.H., Drexhage M., Stokes A. (2008).** Using Three-dimensional Plant Root Architecture in Models of Shallow-slope Stability. *Annals of Botany*, 101: 1281-1293.
- Dupuy L., Fourcaud T., Stokes A. (2005a).** A numerical investigation into factors affecting the anchorage of roots in tension. *European Journal of Soil Science*, 56: 319-327.
- Dupuy L., Fourcaud T., Stokes A. (2005b).** A numerical investigation into the influence of soil type and root architecture on tree anchorage. *Plant and Soil*, 278: 119-134.
- Florineth F. (2004).** *Pflanzen statt Beton*. Handbuch zur Ingenieurbiologie und Vegetationstechnik. Patzer Verlag, Berlin Hannover.
- Florineth F. (2005).** *Ingenieurbiologie*. Studienblätter zur Vorlesung. Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Department für Bautechnik und Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien.
- Frei M., Graf F., Böll A. (2002).** Mykorrhiza und Bodenstabilität, *Zeitschrift Ingenieurbiologie*, 3/2002:5-10.
- Genet M., Stokes A., Salin F., Mickovski B., Fourcaud T., Dumail J.F., van Beek R. (2005).** The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots. *Plants and Soil*, 278: 1-9.
- Genet M., Stokes A., Fourcaud T., Hu X., Lu Y. (2006).** Soil fixation by tree roots: changes in root reinforcement parameters with age in *Cryptomeria japonica* D. Don. plantations. In: Marui H., Marutani T., Watanabe N., et al. eds. *Interpraevent 2006: Disaster*

- Mitigation of Debris Flows, Slope Failures and Landslides*. September 25–27, 2006, Niigata, Japan. Tokyo: Universal Academy Press, Inc., 535–542.
- Graf F. (1997)**. Mykorrhizapilze im Einsatz auf alpinen Erosionsflächen. *Zeitschrift Ingenieurbioogie*, 2/1997: 26-28
- Graf F., Frei M., Böll A. (2009)**. Effects of vegetation on the angle of internal friction of a moraine. *Forest, snow and landscape research*, 82, 1: 61-77.
- Graf F., Gerber W. (1997)**. Der Einfluss von Mykorrhizapilzen auf die Bodenstruktur und deren Bedeutung für den Lebendverbau. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 148, 11: 863-886.
- Gray D.H., Leiser A.T. (1989)**. *Biotechnical slope protection and erosion control*. Malabar, Krieger Verlag.
- Katzenbach R., Werner A. (2007)**. *Erhöhung der Standsicherheit von Deichen und Dämmen durch Bewuchs*. Departmentkongress Bautechnik und Naturgefahren, Mai 2007, Universität für Bodenkultur Wien. Online: <http://www.baunat.boku.ac.at/10042.html> - Stand: 25.03.2010
- Kutschera L. (1960)**. *Wurzelatlas mitteleuropäischer Ackerunkräuter und Kulturpflanzen*. DLG-Verlag, Frankfurt am Main.
- Kutschera L., Lichtenegger E. (2002)**. *Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher*. 6. Band der Wurzelatlas-Reihe, Graz, Leopold Stocker Verlag.
- Lang H.J., Huder J., Amann P., Puzrin A.M. (2007)**. *Bodenmechanik und Grundbau*. Das Verhalten von Böden und Fels und die wichtigsten grundbaulichen Konzepte, 8. Auflage, Springer Verlag.
- Mattia C., Bischetti G.B., Gentile F. (2005)**. Biotechnical characteristics of root systems of typical Mediterranean species. *Plant and Soil*, 278: 23–32.
- Mickovski S.B., Hallett P.D., Bransby M.F., Davies M.C.R., Sonnenberg R., Bengough A.G. (2009)**. Mechanical Reinforcement of Soil by Willow Roots: Impacts of Root Properties and Root Failure Mechanism. *Soil Science Society of America Journal*, 73, 4:1276-1285.
- Morgan R.P.C. (2007)**. Vegetative-based technologies for erosion control. In: Stokes A., Spanos I., Norris J.E., Cammeraat L.H., eds. (2007). *Eco- and ground bio-engineering: the use of vegetation to improve slope stability*. Developments in plant and soil sciences, Vol. 103. Dordrecht: Springer: 265-272.
- Norris J.E. (2005)**. Root reinforcement by hawthorn and oak roots on a highway cut-slope in Southern England. *Plant and Soil*, 278: 43–53.

- Nultsch W. (2001).** *Allgemeine Botanik*, 11. Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart.
- Pollen N. (2007).** Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks: Accounting for soil shear strength and moisture. *Catena*, 69, Issue 3: 197-205.
- Richwien W., Lesny K. (2004).** *Bodenmechanisches Praktikum*. Auswahl und Anwendung von bodenmechanischen Laborversuchen. Studienunterlagen für das Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik an der Universität Duisburg-Essen. 11. Auflage, Verlag Glückauf, Essen.
- Rickli C., Graf F., Gerber W., Frei M., Böll A. (2004).** Der Wald und seine Bedeutung bei Naturgefahren geologischen Ursprungs. *Forum für Wissen*, 2004: 27-34.
- Riestenberg M.M. (1994).** Anchoring of thin Colluvium by Roots of Sugar Maple and white ash on hillslopes in Cincinnati. *U.S. Geological Survey, Bulletin* 2059-E.
- Schwarz M., Lehmann P., Or D. (2010).** Quantifying lateral root reinforcement in steep slopes – from a bundle of roots to tree stands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35: 354-367.
- Simmer K. (1994).** *Grundbau 1. Bodenmechanik und erdstatische Berechnungen*. 19. Auflage, B.G.Teubner, Stuttgart.
- Stangl R. (2008).** *Alnus ssp. zur Rutschungsaufforstung am Beispiel der Stambachmure, Oberösterreich*. Eine Quantifizierung der ingenieurbioologischen Leistung von Erlenbeständen. Dissertation, Boku Wien.
- Strasburger E. begr. (1991).** *Lehrbuch der Botanik für Hochschulen*. 33. Auflage, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- Stückelberger J. (2000).** *Scherfestigkeit in durchwurzelten Bodenproben*. Zwischenbericht, ETH Zürich. Online: <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/eserv/eth:30678/eth-30678-01.pdf> - Stand: 25.03.2010
- Tisdall J.M., Smith S.E., Rengasamy P. (1997).** Aggregation of soil by fungal hyphae. *Australian Journal of Soil Research*, 35: 55-60.
- Thornton R.H., Cowie J.D., McDonald D.C. (1956).** Mycelial Aggregation of Sand Soil under *Pinus radiata*. *Nature*, 177: 231-232.
- Tobias S. (1991).** *Bautechnisch nutzbare Verbundfestigkeit von Boden und Wurzel*. Hochschulschrift, Zürich, Eidgenössische Techn. Hochsch., Diss.
- UMG Umweltbüro Grabher, wpa Beratende Ingenieure (2004).** *Auswirkungen der Bewirtschaftung und der bodenkundlichen Verhältnisse auf die Böschungs-Grasnarbenstabilität der Rheindämme*. Phase 1: Einfluss der Bewirtschaftung und der Standorteigenschaften auf die Durchwurzelung des Bodens. Im Auftrag der Internationalen Rheinregu-

lierung. Online: http://www.umg.at/projekte/Rheindamm_Stabilitaet.pdf - Stand: 25.03.2010

van Beek L.P.H., Wint J., Cammeraat L.H., Edwards J.P. (2005). Observation and simulation of root reinforcement on abandoned Mediterranean slopes. *Plant and Soil*, 278: 55–74.

Waldron L.J. (1977). The Shear Resistance of Root-Permeated Homogeneous and Stratified Soil. *Soil Science Society of America Journal*, 41: 843-849.

Waldron L.J., Dakessian S. (1981). Soil reinforcement by roots: calculation of increased soil shear resistance from root properties. *Soil Science*, 132, 6: 427-435.

Wu T.H., McKinnell W.P., Swanston D.N. (1979). Strength of tree roots and landslides on Price of Wales Island, Alaska. *Canadian Geotechnology Journal* 16: 19–33.