

Institut für Landschaftsbau - Fachbereich Landschaftsentwicklung -
der Technischen Universität Berlin

**Der Einfluß von Gräser- und Gehölzwurzeln auf die Scherfestigkeit
von Böden und damit auf die Standsicherheit von Hängen und
Böschungen**

vorgelegt von
Diplom -Ingenieur
Karl Hähne
aus Dresden

Vom Fachbereich 14 Landschaftsentwicklung
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs
genehmigte Dissertation

Berlin 1991
D 83

Institut für Landschaftsbau – Fachbereich Landschaftsentwicklung –
der Technischen Universität Berlin

**Der Einfluß von Gräser- und Gehölzwurzeln auf die Scherfestigkeit
von Böden und damit auf die Standsicherheit von Hängen und
Böschungen**

vorgelegt von
Diplom-Ingenieur
Karl Hähne
aus Dresden

Vom Fachbereich 14 Landschaftsentwicklung
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs
genehmigte Dissertation

Berlin 1991
D 83

INHALT

	Seite
0. VORWORT	4
1. EINLEITUNG	5
1.1 Vorbemerkung zur Bedeutung der Wurzelforschung	5
1.2 Abgrenzung und Ziel	6
2. ZUR BESONDEREN STELLUNG DER INGENIEURBIOLOGISCHEN BAUWEISEN	8
3. SCHUTZWIRKUNG DER BODENDURCHWURZELUNG AN HÄNGEN UND BÖSCHUNGEN	10
4. WURZELMORPHOLOGIE UND WURZELWACHSTUM	19
4.1 Bau der Wurzel	20
4.2 Wurzelwachstum und die unmittelbare Wirkung auf den Boden	22
5. MASSENBEWEGUNGEN AUS BODENMECHANISCHER SICHT	26
5.1 Berechnungsmodelle ohne Berücksichtigung von Pflanzenbewuchs	26
5.2 Berechnungsmodelle unter Berücksichtigung von Pflanzenbewuchs	30
6. ZUR SCHERFESTIGKEIT DES BODENS	36
6.1 Allgemeines	36
6.2 Scherfestigkeit des undurchwurzelten Bodens	36
6.2.1 Versuchseinrichtungen und Versuchsdurchführungen	36
6.2.2 Bruchbedingung nach COULOMB	39
6.2.3 Einflüsse auf die Scherfestigkeit	
6.3 Scherfestigkeit des durchwurzelten Bodens	45
7. ARBEITSHYPOTHESE	53
8. MATERIAL UND METHODEN	55
8.1 Versuchsanlagen und Vegetation	55
8.2 Boden	56
8.3 Witterung	58
8.4 Untersuchungsmethoden	61
8.4.1 Aufgabenstellungen der Meßreihen	61
8.4.2 Scherfestigkeitsmessungen in der Natur	63
8.4.3 Scherfestigkeitsmessungen im Labor	65
8.4.4 Erfassung des Gräserwurzelsystems	66
8.4.4.1 Methoden der Probenentnahme	66

	Seite
8.4.4.2 Maßzahlen zur Kennzeichnung der Durchwurzelung	67
8.4.4.3 Bestimmung des Durchwurzelungsgrades und der Durchwurzelungsintensität	70
8.4.5 Ergänzende bodenphysikalische Untersuchungen	71
8.4.6 Bodenchemische Untersuchungen	72
8.4.7 Statistische Grundlagen	75
9. SCHERFESTIGKEITSMESSUNGEN AN INTENSIV GEPFLEGTEM RASEN (MEßREIHE I)	77
9.1 Aufgabenstellung	77
9.2 Boden	77
9.2.1 Erdbauliche und bodenmechanische Kennwerte	77
9.2.2 Bodenchemische Kennwerte	79
9.3 Eignung des Schergerätes	80
9.4 Ergebnisse der Scherfestigkeitsmessungen	83
10. SCHERFESTIGKEITSMESSUNGEN AN EXTENSIV GEPFLEGTEM RASEN	88
10.1 Allgemeines	88
10.2 Standort	88
10.3 Durchwurzelung	91
10.3.1 Allgemeines	91
10.3.2 Durchwurzelung zur Meßreihe II	91
10.3.3 Durchwurzelung zur Meßreihe III	93
10.3.4 Durchwurzelung zur Meßreihe IV	93
10.4 Mechanische Materialkennwerte der Gräserwurzeln	93
10.5 Meßreihe II	101
10.5.1 Allgemeines	101
10.5.2 Auswahl geeigneter Wurzelkennwerte zur Beschreibung der Scherfestigkeit	102
10.5.3 Vergleich des Scherfestigkeitsverlaufes zwischen extensiv und intensiv gepflegtem Rasen	106
10.7 Meßreihe III	106
10.7.1 Allgemeines	106

	Seite
10.7.2 Bestimmung der minimalen Scherfestigkeit am Landschaftsrasen	108
10.8 Ergebnisse der Rahmenscherversuche	112
10.9 Meßreihe IV	118
11. SCHERFESTIGKEITSMESSUNGEN AN MIT GEHÖLZWURZELN DURCHWURZELTEM BODEN	122
11.1 Allgemeines	122
11.2 Standort, Material und Methoden	122
11.3 Ergebnisse der Scherfestigkeitsmessungen	125
11.3.1 Allgemeines	125
11.3.2 Schertiefe von GOK bis 0,3 m	126
11.3.3 Schertiefe zwischen 0,3 m und 0,5 m	126
11.3.4 Schertiefe unterhalb von 0,5 m	135
12. ZUSAMMENFASSENDE AUSWERTUNG UND AUSBLICK	136
12.1 Gräserdurchwurzelung	136
12.1.1 Beziehung zwischen Standort und Pflanze	136
12.1.2 Abhängigkeit der Durchwurzelungsinten- sität und des Humusgehaltes von der Tiefe	137
12.1.3 Verlauf der Scherfestigkeit mit zunehmender Tiefe	140
12.1.4 Bestimmung der maßgeblichen Scherfestigkeit unter Verwendung der Grenztiefe T_a	145
12.2 Gehölldurchwurzelung	147
12.3 Ausblick	149
13. ZUSAMMENFASSUNG	151
LITERATURVERZEICHNIS	153
A N H A N G	171
Verzeichnis der Abbildungen	172
Verzeichnis der Tabellen	177
Verzeichnis der Fotografien	197

0. VORWORT

Die Arbeit entstand unter der Betreuung von Frau Prof. Dr. H. Hiller im Fachgebiet Ingenieurbiologie sowie Herrn Prof. Dr. K. Pahlke aus dem Fachgebiet Erdbau des Instituts für Landschaftsbau der Technischen Universität Berlin, wofür ich an dieser Stelle danke. Ebenso danke ich den Mitarbeitern des Instituts für Landschaftsbau, insbesondere Frau Bonow und Frau Braune für das geduldige Zählen der Gräserwurzeln, das Messen der Wurzeldurchmesser und die Berechnung der Mittelwerte.

Ebenso danke ich allen Mitarbeitern der folgenden Institutionen, die mich mit ihrer Sachkenntnis sowie dem Zurverfügungstellen der Forschungseinrichtungen unterstützt haben:

- Institut für Grundbau und Baubetrieb (Fachbereich 7) der Technischen Universität Berlin,
- Bundesanstalt für Materialprüfung in Berlin,
- Institut für Maschinenkonstruktion (Fachbereich 11) der Technischen Universität Berlin,
- Zentrale Einrichtung für Biometrie und Datenverarbeitung (Fachbereich 15) der Technischen Universität Berlin und
- Dokumentationsstelle Obstbau der Universitätsbibliothek am Fachbereich 15 der Technischen Universität Berlin.

1. EINLEITUNG

1.1 Vorbemerkung zur Bedeutung der Wurzelforschung

Durch die umfangreichen Eingriffe in die Landschaft, sei es durch Baumaßnahmen oder infolge einer falschen Bodennutzung, wird der Bodenabtrag, auch verursacht durch Schädigung der Vegetation infolge Luftverschmutzung, immer größer.

Die Erosionsgesetzmäßigkeiten wurden unter anderem von KURON et al. (1956), RICHTER (1965), WISCHMEIER et al. (1978), ZUNKER (1953) und HOLY (1980) beschrieben. In diesen Arbeiten wird immer wieder der Zusammenhang zwischen Vegetationsdecken und Bodenabtrag herausgestellt und auf die immens hohe Bedeutung des Bodenschutzes für die Erhaltung unserer Kulturlandschaft hingewiesen. Von entscheidender Bedeutung ist nicht nur die Bodenbedeckung durch die Pflanzen sondern auch die Durchwurzelung des Bodens.

Während großflächig auftretende Erosionsschäden vornehmlich durch eine Nutzungsänderung und ggf. Reliefumgestaltungen zu bekämpfen sind, werden ingenieurbiologische Bauweisen hauptsächlich zur Sanierung extremer Standorte eingesetzt, z. B. von stark geneigten Hängen und Böschungen auch auf nährstoffarmen Rohböden.

Bei der Sanierung von Erosionsschäden hat man sich in den letzten Jahrzehnten sehr stark auf technische Bauwerke ohne Zuhilfenahme von Pflanzen verlassen. Gerade bei Standsicherheitsuntersuchungen von Böschungen wurde die Wirkung der Pflanzenwurzeln im Boden nicht zuletzt deshalb vernachlässigt, weil entsprechende Untersuchungen bisher in noch unzureichendem Maße vorliegen und schwierig durchzuführen sind.

Diese Arbeit soll einen Beitrag zur Erfassung des Einflusses von Pflanzenwurzeln auf die Standsicherheit von Böschungen und Hängen bieten. Der Baustoff "lebende Pflanze" wird sowohl als im technischen Sinne berechenbarer Baustoff als

auch als Lebewesen behandelt und mit den Gesetzmäßigkeiten der Bodenmechanik verknüpft. Die Auswahl biotechnisch geeigneter Pflanzenarten zur Sanierung vorhandener Schäden wie auch zur Vermeidung möglicher Schadstellen soll hiermit erleichtert werden.

Das Wurzelwerk ist ein wesentlicher Teil der biotechnischen Eignung des Baustoffs lebende Pflanze (BUSCHWALD, 1954). In den letzten Jahren hat die Erforschung der Wurzelsysteme von Pflanzen in folgenden Gebieten eine wachsende Bedeutung erfahren:

- Sicherung von Hängen und Böschungen bei Verkehrsbauten, Rekultivierung von Tagebauten und Abfalldeponien aller Art,
- Sicherung von See-, Flußdeichen und -dämmen,
- Stabilisierung von großen und langen unbewaldeten Hängen oder von Hängen, die z.B. durch Kahlschlag entwaldet wurden,
- Renaturierung kleiner Wasserläufe einschließlich Schutz von Gewässersohlen und -ufern.

Letztlich kann der kurzfristige wirtschaftliche Gewinn aus der Übernutzung einer Landschaft langfristig nicht durch die dadurch entstehenden Gefahren für die Bevölkerung und die hohen Sachschäden aufgewogen werden (vgl. u.a. SCHIECHTEL, 1973).

1.2 Abgrenzung und Ziel

Im Rahmen dieser Arbeit soll nur auf die im biologisch-technischen Bereich liegenden Sachverhalte eingegangen werden, die ausgehend von bodenmechanischen Gesetzmäßigkeiten das System "Wurzel - Boden" behandeln. Das Ziel der Untersuchungen ist die Gewinnung möglichst quantifizierbarer Ergebnisse, um zu einer realistischen Abschätzung der tatsächlich wirkenden Kräfte zu kommen. Die Erfassung der zwischen Pflanze und Boden wirkenden Naturgesetze entzieht sich noch

weitgehend unserer Kenntnis (LINKE, 1969), da die Mitberücksichtigung des Lebewesens "Pflanze" die Quantifizierung der technischen Zusammenhänge erheblich erschwert. SCHAARSCHMIDT hält es 1974 für unmöglich, den Einfluß von Bewuchs auf die Standsicherheit von Böschungen für verschiedene Standorte zahlenmäßig exakt zu erfassen. Er beklagt weiterhin das Fehlen von Versuchen "in situ" und Langzeitbeobachtungen. Deshalb sollen im versuchstechnischen Teil der Arbeit anhand von Scherfestigkeitsmessungen vor Ort quantitative Zusammenhänge zur statischen Wirkung lebender Gräser- und Gehölzwurzeln gewonnen werden. Dazu ist ein Großschergerät entwickelt worden, das Messungen direkt in der Landschaft erlaubt. Die Funktionsweise ähnelt derjenigen des in der Bodenmechanik üblichen Rahmenschergerätes, so daß ein Vergleich der Ergebnisse der beiden Geräte eher möglich ist als zwischen dem im Landschaftsbau üblichen Drehschergerät mit dem Rahmenschergerät.

Im theoretischen Teil der Arbeit werden statistische und besonders ausführlich bodenmechanische sowie biologische Grundlagen dargestellt. Abschließend erfolgt eine zusammenfassende Bewertung der Wirkung von Pflanzenwurzeln auf die Scherfestigkeit von Böden und somit auf die Rutschgefährdung von Böschungen.

2. ZUR BESONDEREN STELLUNG DER INGENIEURBIOLOGISCHEN BAUWEISEN INNERHALB DES INGENIEURBAUS

Ingenieurbiologische Bauweisen, gleichbedeutend mit dem Begriff "Lebendbauweisen" nach DIN 19657, bestehen im Gegensatz zu rein technischen Bauweisen aus biotischen (Pflanze) sowie abiotischen Faktoren (tote Baustoffe, Korngerüst des Bodens, Wasser und Klima). Lebendbauten unterliegen einer starken Veränderung mit fortschreitender Zeit nach Fertigstellung des Bauwerkes. Durch die Verwendung des anpassungsfähigen "lebenden Baustoffs Pflanze" tritt besonders die Standortgebundenheit eines Bauwerkes neben die rein technischen Gesetzmäßigkeiten der Bodenmechanik. Damit sind ingenieurbiologische Bauweisen auch im ökologischen Sinne wertvoll, da sie Schadstellen naturnah in das ökologische Wirkungsgefüge "Landschaft" eingliedern. Bei sachgemäßer Fertigstellung und Pflege gewinnt das Bauwerk im Laufe seiner Entwicklung eine zunehmende Stabilität und nachhaltige Funktionsfähigkeit (SCHAARSCHMIDT, 1974). Bei toten Bauweisen erhöht sich die Standsicherheit nicht oder nur unwesentlich gegenüber dem hohen Sicherheitszuwachs bei lebenden Bauweisen.

Die Grenzen des Lebendbaus sind einerseits durch Standortfaktoren, z.B. Licht und Wasser, festgelegt, andererseits können Pflanzenteile durch die auftretenden mechanischen Kräfte überfordert werden. Das Erkennen dieser Grenzen bedeutet für den Ingenieur immer noch die größte Schwierigkeit bei der Planung ingenieurbiologischer Bauweisen.

Beim Böschungsschutz ist z.B. immer noch unklar, wie tief die Durchwurzelung verschiedener Pflanzen auf verschiedenen Standorten noch statisch wirksam ist. In den "Empfehlungen für den Bau und die Sicherung von Böschungen" der DEUTSCHEN GESELLSCHAFT FÜR ERD- UND GRUNDBAU e.V. (1962) wird der Pflanze eine positive Wirkung hinsichtlich des Erosionsschutzes der Böschungsoberfläche mit beschränkter Tiefenwirkung zugeschrieben. Auch in der "Richtlinie der Anlage von Stra-

ßen, Teil: Landschaftsgestaltung, Abschnitt 3: Lebendverbau" der FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR DAS STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN (1983) kann noch keine Abgrenzung hinsichtlich der Tiefenwirkung von Pflanzenwurzeln gegeben werden. Zuletzt weisen FLOSS (1985) sowie SMOLTCZYK et al. (1985) auf dringend notwendige weitere Forschungen hin, um die statischen Eigenschaften des durchwurzelten Bodens kennenzulernen.

Die vorliegende Arbeit soll zur Klärung dieser Fragestellung beitragen. Für die Versuche sind biotechnisch bewährte Pionierpflanzenarten, Gräser und Gehölze, ausgewählt worden und zwar Schwingelarten (*Festuca* sp.) und Weidenarten (*Salix* sp.).

3. SCHUTZWIRKUNG DER BODENDURCHWURZELUNG AN HÄNGEN UND BÖSCHUNGEN

Seit Jahrhunderten spielt die Vegetation eine zentrale Rolle im Erosionsschutz an Böschungen und Hängen, besonders in den Bergregionen. Eindrucksvolle Untersuchungen des Zusammenhanges zwischen Erosion und Pflanzenbewuchs sind in der umfangreichen Literatur zur Bodenerosion auf landwirtschaftlich genutzten Flächen, wie z.B. bei BREBURDA (1983), zu finden.

Bereits STINY (1910) erkennt die wesentlich höhere Widerstandskraft gegen Rutschungen eines mit Bäumen bewachsenen Hangteiles gegenüber einem nicht mit Bäumen bestandenen Teils des gleichen Hanges. Einen unmittelbaren Zusammenhang zwischen Entwaldung und Bodenabtrag zeigt WANDEL 1951 für die Mittelgebirge auf. Im Auftrag des Landesamtes für Gewässerkunde und des Geologischen Landesamtes von Nordrhein-Westfalen untersucht WANDEL die Folgen der umfangreichen Waldabholzungen nach dem 2. Weltkrieg. Er beschreibt zunächst aus geschichtlicher Sicht die Entwicklung ehemals waldbestandener Flächen zu landwirtschaftlich genutzten und damit erosionsgefährdeten Flächen. Die bodenschützende Wirkung der Gehölzwurzeln sowie die kleinflächigen Hangflächenterrassierungen in Verbindung mit Hecken werden hervorgehoben:

Eine geschlossene, intakte Grasdecke bildet einen guten Schutz gegen Oberflächenabspülungen, was sich deutlich beim Übergang von Wald- zu Wiesenland durch einen fehlenden Niveauversatz zeigt, so wie er für die Wald-Ackerlandgrenze typisch ist.

WANDEL (1951) befürchtet durch die bereits im vorigen Jahrhundert einsetzende Vernachlässigung und Beseitigung der Hecken und Terrassen nicht nur Erosionsschäden, sondern auch wegen des höheren Oberflächenabflusses erhebliche negative Folgen für die Grundwasserneubildung in den Mittelgebirgsregionen. Im Zusammenhang mit daraus folgenden Klimaverände-

rungen wird auch eine Verödung landwirtschaftlich genutzten Bergregionen vorausgesagt.

GROTTENTHALER et al. (1973) beschreiben zunächst die Entstehung von Blaiken und das weitere Erosionsgeschehen im Leinbachtal. Die Blaikenbildung durch Zerreißen und Abrutschen der Bodendecke ist besonders in plenterartig bewirtschafteten Mischwaldresten in Form kleiner Translationsrutschungen zu beobachten. "Ist der artenreiche Mischwald jedoch durch eine mit Fichten locker überstellte Gras- und Krautvegetation ersetzt, so fehlt dem nur oberflächlich durchwurzelten Boden die Verankerung auf dem Stausediment durch tiefer hinreichende Tannenwurzeln und auch die intensive Lebendverbauung durch das dichte zusammenhaltende Wurzelwerk der Buchen. Die Pumpleistung der Vegetation nimmt ab, so daß sich nach größeren Niederschlägen ein stärkerer Hangwasserzug über dem undurchlässigen Stausediment bemerkbar macht. Dabei wird die Oberfläche schmierig, und der Boden beginnt auf ihr wie eine Schneedecke langsam zu gleiten." (vgl. GROTTENTHALER et al., 1973). Besonders an Hangkanten, wo die höchsten Zugspannungen innerhalb der Bodendecke entstehen, treten Bodenrisse auf. Ist die schützende Vegetation erst einmal abgetragen, weichen die entblößten Stausedimente durch Niederschläge auf und es kommt zu flächenhaftem Abspülen und Rinnenerosion auf der Blaike infolge Oberflächenwassers (Abb. 1 und 2).

An 183 Probekreisflächen mit 500 m² Flächeninhalt können GROTTENTHALER et al. hinsichtlich der Blaikenbildung zwischen folgenden Einflußgrößen Beziehungen herstellen:

- der Hangneigung und dem größtem Böschungswinkel, der auf mindestens einem Drittel der Probekreisfläche auftritt,
- der Oberhanglänge und dem Schrägabstand des Kreismittelpunktes von der Hangoberkante sowie
- der Grundflächenhaltung und der Summe aller in Brusthöhe

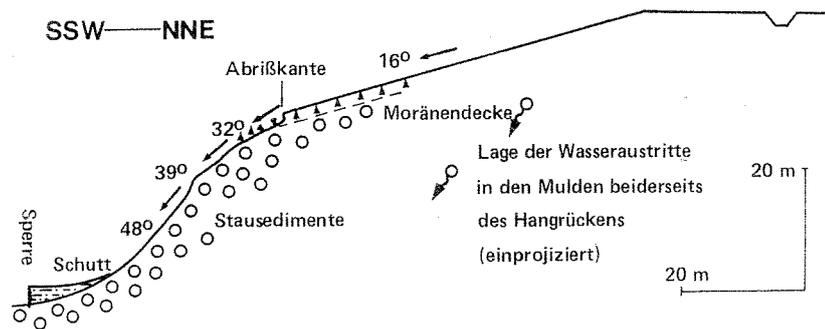


Abb. 1: Profilskizze der 17er-Reiße im Lainbachtal bei Benediktbeuren (GROTTENTHALER et al., 1973).

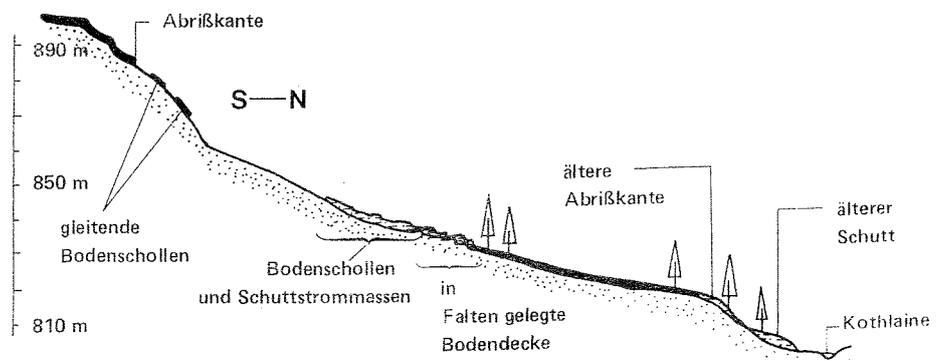


Abb. 2: Profilskizze der Söldner Alm - Rutschung (GROTTENTHALER et al., 1973).

gemessenen Baumquerschnittflächen.

Die Verfasser kommen mittels multipler Regression zu folgender Gleichung für die Größe der Blaikenfläche (y):

$$\log y = -0,576 + 0,047 \cdot (\text{Neigung}) + 0,001 \cdot (\text{Oberhanglänge}) \\ - 0,527 \cdot (\text{Grundflächenhaltung})$$

Trotz des geringen multiplen Bestimmtheitsmaßes von $R^2 = 0,39$ ist deutlich zu erkennen, daß, je kleiner die Grundflächenhaltung und je größer die Hangneigung und die Oberhanglänge sind, die Blaikenfläche im Probekreis umso größer ist.

"Unter den notwendigen Sanierungsmaßnahmen ist der Wiederaufbau des montanen Mischwaldes die vordringlichste Aufgabe. Erlenzpflanzungen und die Ansammlungen von Bergreitgras ermöglichen den Anflug und das Gedeihen der montanen Mischwaldarten. Die wichtigste Voraussetzung dafür ist ein wirksamer Schutz vor dem Verbiß durch Schalenwild. Die technische Verbauung der Erosionskessel durch Querwerke und das Abfangen aller Hangwässer aus den Einzugsgebieten der Blaiken sind weitere Voraussetzungen für die Wiederherstellung des gestörten Gleichgewichts." (vgl. GROTTENTHALER et al., 1973)

NEULAND untersucht 1980 insgesamt 163 stabile und instabile Hänge und Böschungen in den kolumbianischen Anden, wobei 35 Einflußgrößen bestimmt und diskriminanzanalytisch ausgewertet werden. Die Rutschungen werden im wesentlichen durch das Niederschlagswasser und ungünstige geologische Formationen hervorgerufen. Besonders die Vegetation wirkt sich mit zunehmender Durchwurzelungstiefe stabilisierend aus.

KARL und HÖTL beschreiben 1974 in ihrer "Analyse alpiner Landschaften in einem homogenen Rasterfeld mit einem Beitrag von MILLER" statistisch den Einfluß der Vegetation auf die Häufigkeit von Erosionsschäden. Ein Ergebnis ist, daß wasserwirtschaftlich günstige Vegetationsformen mit höheren Flußdichten und geringeren Erosionsschäden korrelieren. Ne-

ben schlechten Standorten, großen Höhenlagen (Kampfzone des Waldes) und überalterten Beständen werden die verjüngungshemmende Wirkung des überhöhten Schalenwildbestandes genannt.

In Queensland im Nordosten Australiens kam es infolge starker Regenfälle in den Jahren 1950 und 1951 zu zahlreichen Hangrutschten, die ELLISON und COALDRAKE (1954) auf fehlende Bodenbindung durch Pflanzenwurzeln zurückführen. Der australische subtropische Regenwald ist, beginnend um 1900, gefällt und gerodet worden. Besonders den Gehölzwurzeln wird ein hohes Festigungsvermögen zugewiesen. Hinter Baumstämmen staut sich erodiertes Bodenmaterial auf und verzögert die Bodenerosion (vgl. auch SCHIECHTL, 1973 b). Als Hinweis auf die Instabilität eines Hanges beschreiben ELLISON et al. die hangabwärts konvex gekrümmte Form von Baumstämmen. Bereits 1929 beobachtet MÜLLER ähnliche typische Wuchsformen junger Gehölze infolge Bodenbewegungen an Hängen (Abb. 3). Auch BECKER et al. (1942) erkennen im "Säbelwuchs" von Gehölzen einen Hinweis auf Hangbewegungen.

Damit sich ein Baumstamm auf die oben beschriebene Weise verdrehen kann, muß zumindest ein Teil der Wurzeln durch die Gleitfläche der rutschenden Bodenschicht in tieferen oder langsamer kriechenden Schichten verankert sein.

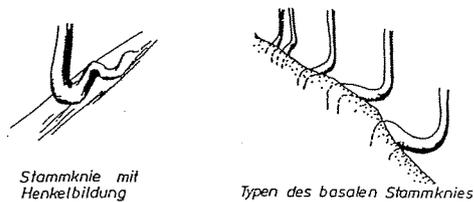


Abb. 3: Typisches Wurzelwachstum von Gehölzen an Böschungen (nach MÜLLER, 1929).

1947 bringen STINY, 1973 SCHIECHTL, 1966 HILLER und 1985 LICHTENEGGER die Wurzelzugfestigkeit qualitativ in Verbin-

dung mit Böschungsstabilität und geben Hinweise für die Auswahl geeigneter Pflanzen. Bodenmechanische Gesetzmäßigkeiten werden durch KAUL (1965), ENDO et al. (1968), WU (1979), WALDRON et al. (1977 - 1983) und ZIEMER (1981) beschrieben.

VIDAL (1966) entwickelt den Begriff "La terre armée" ("Bewehrte Erde"), indem er auf die zusätzliche Haftreibung der Erdteilchen an den Bewehrungselementen hinweist. Er stellt für ein einfach zu definierendes Armierungselement aus Metall eine Berechnung der Verbundwirkung der Bodenarmierung auf. Aus diesen Überlegungen entsteht, weiterentwickelt durch SCHLOSSER und LONG (1974) sowie FLOSS et al. (1977) in Deutschland die Bauweise der "Bewehrten Erde".

1977 veröffentlichen BURROUGHS und THOMAS eine Untersuchung über den zeitlichen Verlauf der Wurzelzugfestigkeit der grünen Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) sowie ihre Gebirgsvariante (var. *glauca*). Die Verfasser ermitteln auf kahlgeschlagenen Waldflächen verschiedenen Alters zunächst die verbliebene Wurzelanzahl pro m² in Abhängigkeit der Zeit nach dem Absterben der Bäume (Abb. 4). Auffallend ist der drastische Abfall Wurzelanzahl pro m² schon nach 3 bis 4 Jahren. Entsprechend schnell nimmt auch die Summe der Wurzelzugfestigkeit pro m² ab (Abb. 5). Eine überschlägige Berechnung der Kräfte unter Berücksichtigung aller Wurzelstärken einer umgezogenen Rotbuche (*Fagus silvatica*) durch HÄHNE (1985 a) ergibt eine Zugfestigkeit der oberen 1 m starken durchwurzelten Schicht von bis zu 66,7 kN/m². BURROUGHS et al. (1977) ermitteln unter Berücksichtigung der Durchmessergrößenklassen 0 bis 1 cm maximale Werte von ca. 17,0 kN/m² und fassen die festigende Wirkung des feinen Wurzelsystems zu folgenden drei Aussagen zusammen:

1. Die Feinwurzeln erhöhen innerhalb des Wurzelbereichs Abb. 4 + 5 eines Baumes die Zugfestigkeit des Wurzel-Boden-Gefüges erheblich.
2. Feine Wurzeln verankern den Wurzelteller eines Baumes

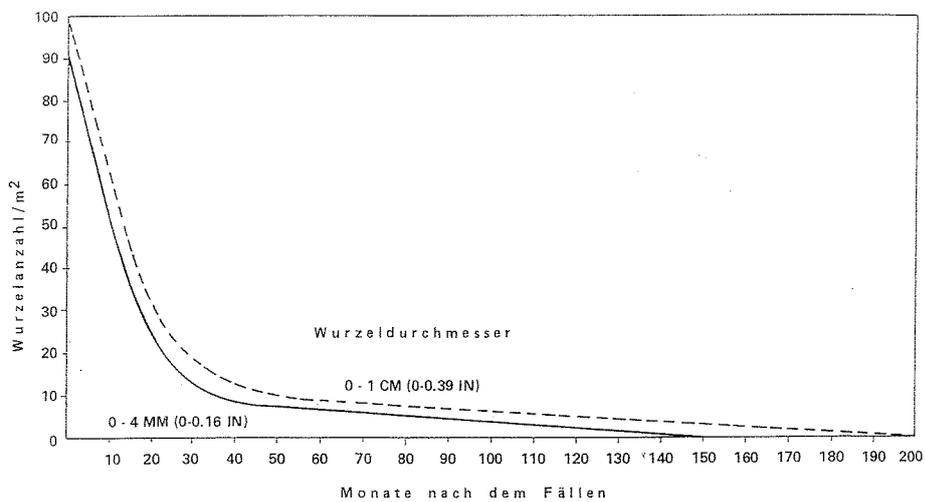


Abb. 4: Abfall der Wurzelanzahl bei Douglasien (Coast Douglas-fir) in Abhängigkeit der Zeit nach dem Fällen des Baumes entnommen an senkrechten Probeflächen bis 1 m Tiefe (BURROUGHS et al., 1977)

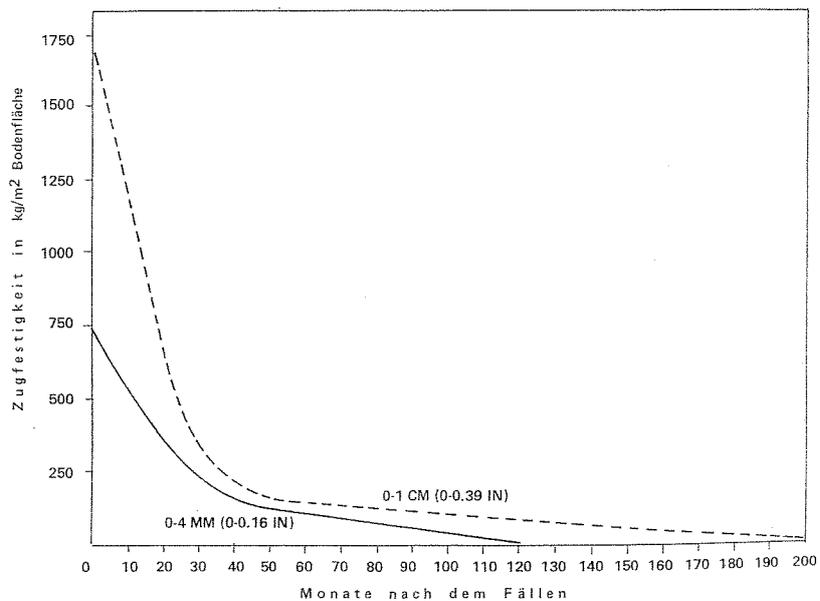


Abb. 5: Abfall der Wurzelzugfestigkeit (Coast Douglas-fir) (BURROUGHS et al., 1977).

in der darunterliegenden Bodenschicht, was die Scherfestigkeit des Bodens erhöht. (vgl. auch BARKER, 1978). An den Grenzen des Wurzelsystems benachbarter Bäume kommt es zur gleichzeitigen Durchwurzelung des Bodens durch Feinwurzeln, und ein kontinuierliches Wurzelnetzwerk entsteht. Weniger durchwurzelte Bodenschichten über sehr hartem, weniger klüftigem Fels werden so durch benachbarte, tiefgründigere, d.h. besser verankerte Bodenschichten gehalten.

Aus den Beobachtungen von GRESSWELL et al. (1976), der 120 Hangrutschungen in West-Origon untersucht hat, geht hervor, daß 65% der Hangrutschungen 0 bis 3 Jahre nach dem Kahlschlag, 29% zwischen dem 4. und 10. Jahr und 6% nach dem 11. Jahr nach dem Kahlschlag des Hanges erfolgen. BURROUGHS et al. sehen eine Übereinstimmung mit dem starken Abfall der Wurzelzugfestigkeit ca. 3 Jahre nach dem Absterben der Bäume und ziehen die Wurzelzugfestigkeit als nützlichen Index zur Beurteilung der Hangstabilität heran. KOMAMURA und WATANABE geben 1977 folgenden Zusammenhang für den Zugfestigkeitsabfall kurz nach dem Absterben von Gehölzwurzeln:

$$Q = Q_0 \cdot e^{-\alpha \cdot t}$$

α = Konstante

Die ursprüngliche Zugfestigkeit Q_0 vermindert sich exponentiell in Abhängigkeit von der Zeit t bis zu einer verminderten Zugfestigkeit Q zum Zeitpunkt t . Diese Überlegungen entwickelte ZIEMER (1981) weiter und gelangte anhand von Naturbeobachtungen zu einer Vorhersage des zeitlichen Ablaufs einer relativen Bodenstabilität durch Gehölzwurzeln (Abb. 6).

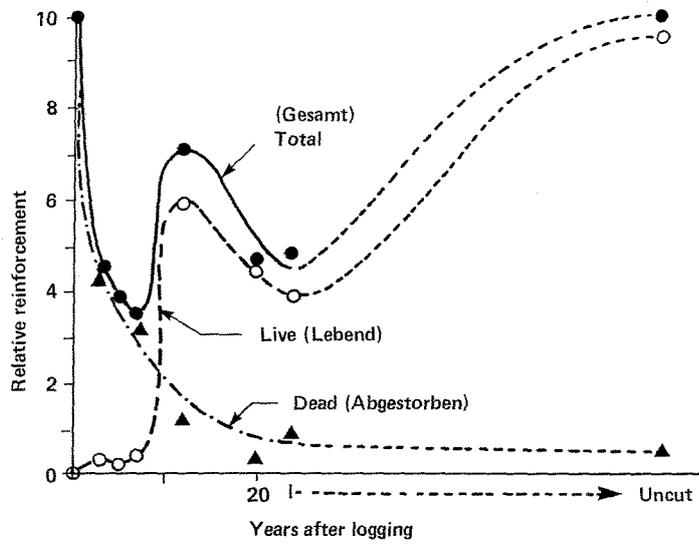


Abb. 6: Lebende Wurzeln erhöhen und abgestorbene Wurzeln erniedrigen die relative Bodenstabilität mit zunehmender Zeit nach einem Kahlschlag. Die gesamte Bodenstabilität berechnet aus lebenden und abgestorbenen Wurzeln sinkt nach einem anfänglichen Anstieg wieder auf einen Tiefpunkt nach etwa 7 Jahren ab (ZIEMER, 1981).

4. WURZELMORPHOLOGIE UND WURZELWACHSTUM

Nach STRASBURGER (1983) haben Pflanzenwurzeln im wesentlichen die Aufgabe der Verankerung der Pflanze im Boden (Ankerwurzeln), der Nahrungsaufnahme (Nährwurzeln) und der Speicherung von Reservestoffen (Speicherwurzeln). In der Regel werden alle Funktionen gleichzeitig erfüllt. Unter "Wurzelsystem" soll hier die Gesamtheit aller Wurzeln einer Pflanze verstanden werden, ohne zunächst auf morphologische Unterschiede zu achten. Die Wurzelform ist genetisch fixiert, wird aber durch Außenbedingungen erheblich variiert. Die Wurzel besitzt keine Blätter und keine Spaltöffnungen; jedoch sind die Wurzeln vieler Pflanzen in der Lage zu ergrünen und Wurzelsprosse zu bilden, die zu vollwertigen Pflanzen werden.

Die folgenden Ausführungen sind im wesentlichen aus STRASBURGER (1983), KÖSTLER/BRÜCKNER/BIBELRIETER (1968), OPITZ VON BOBERFELD (1978), KUTSCHERA (1960 und 1982), WEBER (1953) und WELLER (1965) entnommen. Dem interessierten Leser stehen in diesen Werken eine Fülle weiterführender Literaturhinweise zur Verfügung.

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit den der Abteilung Samenpflanzen zugeordneten Gehölzen und Gräsern. Die Samenpflanzen bewurzeln sich durch Ausbildung einer Primärwurzel, von der alle weiteren Wurzeln des Wurzelsystems abzweigen (allorrhize Bewurzelung). Jedoch haben ein Teil der Samenpflanzen, die einkeimblättrigen (monokotylen) Pflanzen, hierzu gehören die Gräser, die Fähigkeit der Sproßbewurzelung noch nicht verloren, indem frühzeitig die Primärwurzel unterdrückt und durch sproßbürtige Wurzeln ersetzt wird. Die Gräser bewurzeln sich also sekundär homorrhiz. Da den Gräserwurzeln die Fähigkeit des Dickenwachstums fehlt (OPITZ VON BOBERFELD, 1978), wird die Kapazität der Versorgungsgefäße dem Pflanzenwachstum durch zusätzliche Wurzeln angepaßt.

4.1 Bau der Wurzel

In Abb. 7 ist der prinzipielle Bau einer Wurzel dargestellt. Das Spitzenwachstum einer Wurzel erfolgt mittels eines Scheitel- oder Apikalmeristems (Meristem = Bildungsgewebe). Der Wurzelscheitel aus embryonalen Zellen bestehend (d.h. Zellen mit noch sehr wenig Zellulose) wird durch eine Wurzelhaube (Calyptra) umhüllt und damit geschützt. Die ältesten, äußersten Zellen verschleimen, lösen sich ab und verkleben mittels eines ausgeschiedenen Gels die unmittelbare Umgebung der Wurzeln. Die Hauptaufgabe der Wurzelhaube besteht in der Abschirmung der Spitze vor dem Kontakt mit Wasser, Luft und dem Schutz vor Schadstoffen und mechanischen Verletzungen. Das Streckungswachstum einer Wurzel ist auf eine sehr kurze, 5 bis 10 mm lange Streckungszone beschränkt. Trifft die Wurzel auf einen mechanischen Widerstand, verkürzt sich die Streckungszone, und der Wachstumsdruck erhöht sich. Kurz nach der Streckungszone entstehen in der Wurzelhaar- oder Zelldifferenzierungszone Wurzelhaare. Sie vergrößern erheblich die Wurzeloberfläche, um die Wasser- und Nährstoffaufnahme zu erleichtern. Gleichzeitig verankern die Wurzelhaare die Wurzel im Boden, bilden für die Wurzelspitze ein festes Widerlager, und der Wachstumsdruck wird recht genau durch die Längsachse der Wurzelspitze gelenkt. Auf diese Weise verkrümmt sich die Wurzel nicht.

Die Rhizodermis, die Außenhaut der Wurzelhaarzone, ist noch nicht verkorkt, da durch sie der größte Teil der Nährstoff- und Wasseraufnahme erfolgt. Mit zunehmendem Alter tritt eine Verkorkung ein, die die Wasser- und Nährstoffaufnahme weiter einschränkt. Die Wurzelhaare sterben nach ca. 2 bis 5 Tagen ab, und es entsteht eine neue Außenhaut, die Exodermis. Nach KUTSCHERA (1982) ist es immer noch schwierig, Beginn und Ende der einzelnen Zonen genau zu bestimmen. Gleichzeitig mit den Wurzelhaaren bilden sich die Rindenzellen und der Zentralzylinder. Die innerste Rindenschicht, die Endodermis, kontrolliert den Durchtritt von Wasser in den Zentralzylinder. Hier befinden sich Versorgungsgefäße wie das Xylem zum

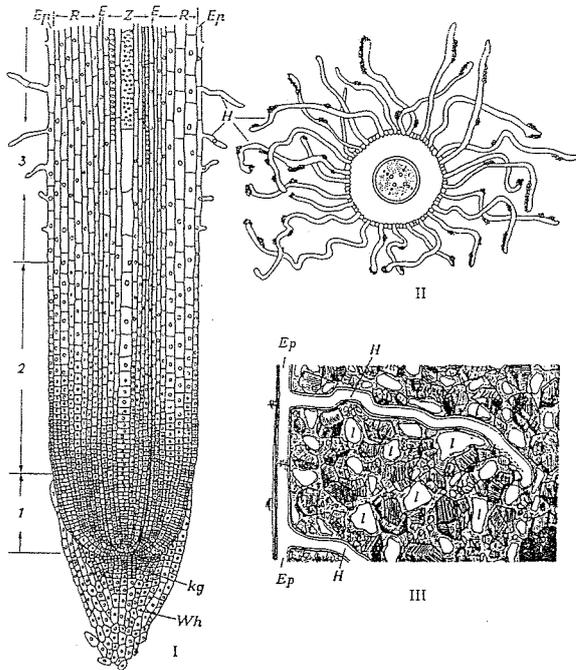


Abb. 7 : Längsschnitt durch eine junge Wurzel der Gerste (aus KUTSCHERA, 1960). 1 Zellvermehrungszone, von der Wurzelhaube Wh geschützt, kg deren Kalyptragen. 2 Zellstreckungszone, 3 Zelldifferenzierungszone mit Wurzelhaaren H. Z Zentralzylinder, E Endodermis, R Rinde, Ep Epidermis. II Querschnitt durch die Wurzelhaarzone. Die Haare sind mit Erdpartikelchen verhaftet. III Verlauf der Wurzelhaare im Erdboden. Schwarz von Wasserhäutchen (dünne Linien) umgebene Erdpartikelchen, l mit Luft erfüllte Hohlräume. (I n. HOLMAN und ROBBINS, II n. FRANK, verändert n. RAUH, III n. SACHS, alle aus RAUH).

Wassertransport, das Phloem zum Transport organischer Bestandteile, parenchymatische Zellen dienen dem Lufttransport und sklerenchymatische Zellen bilden das Festigungsgewebe.

Die Pflanze wird in der Regel - vergleichbar den technischen Bauwerken - durch Zug-, Druck- und Torsionskräfte beansprucht. Die Natur hat entsprechend der mechanischen Belastung spezialisierte "Bausteine" (pflanzliche Zellen) hervorgebracht. Nach STRASBURGER (1985) sind Steinzellen (Skle-

reiden) besonders geeignet, Druckkräfte aufzunehmen wegen ihres polyedrischen Baus und ihrer stark verholzten starren Wände. Sklerenchymfasern hingegen, die hauptsächlich Zugkräfte aufnehmen, bleiben bis zum vollendeten Längenwachstum sehr elastisch aufgrund geringer oder fehlender Verholzung. Diese Zellen sind ungewöhnlich lang (bis zu 30 cm, Brennesel bis 7,5 cm) und durch seilartige Verschlingungen ihrer Enden besonders fest miteinander verbunden. Da die Wurzel vornehmlich durch Zug belastet wird, finden sich hier fast ausschließlich Sklerenchymzellen. Tab. 1 zeigt, daß pflanzliche Materialien sehr hohe Zugfestigkeiten erreichen und zudem eine weit höhere Elastizität besitzen als technische Materialien. Ankerwurzeln im botanischen Sinne sind nicht diejenigen Wurzeln, die durch äußere Zugkräfte belastet werden; vielmehr sind Wurzeln gemeint, die aktiv durch Verkürzung ein Samenkorn oder eine ganze Pflanze in die optimale Bodentiefe ziehen (STRASBURGER, 1985). Im bautechnischen Sinne sind diese Wurzeln vorgespannt. Demgegenüber werden durch äußere Zugkräfte belastete Wurzeln als "Zugwurzeln" bzw. im bodenmechanischen Sinne als schlaffes Zugglied betrachtet und mit "Verankerungswurzeln" bezeichnet. Die Festigungsfasern der Wurzeln sind in der Mitte, dem Zentralzylinder, angeordnet, damit sie bei außermittiger Zugbelastung möglichst gleichmäßig beansprucht werden. Die unmittelbare Verbindung von Leitungs- und elastischen Festigungszellen garantiert ein Höchstmaß an Sicherheit gegen Zerreißen und Verletzungen der lebenswichtigen Versorgungsorgane. ELLENBERG beschreibt 1979 und 1982 anschaulich die Wechselwirkungen zwischen Standort und Pflanzenmorphologie. Besonders der Wurzeldurchmesser und die Anzahl der Wurzelhaare hängen von den Feuchtigkeitsverhältnissen ab.

4.2 Wurzelwachstum und die unmittelbare Wirkung auf den Boden

Auf die Erläuterung der innerpflanzlichen Vorgänge bei der Bildung einer Wurzel wird verzichtet und es werden nur die

jenigen Vorgänge dargestellt, die unmittelbar für das mechanische Wirkungsgefüge "Boden - Wurzel" interessant sind.

Aus einem Vegetationskegel z.B. eines Steckholzes hat sich eine sproßbürtige Wurzel gebildet, die in den Boden eindringt. Sie benutzt unter Verlängerung ihrer Streckungszone ihren Ursprung als Widerlager (hier: das Steckholz, bei Samenkeimungen das Gewicht des Samenkornes). In dieser ersten Phase zwingt sich die Wurzelspitze unter Überwindung eines Eindringwiderstandes in die Bodenporen und erweitert sie durch ein späteres Dickenwachstum (Auflockerung, vgl. HARDKE, 1985). In der Wurzel können Drücke bis zu 10 bar entstehen ($= 1,0 \text{ MN/m}^2$), so daß sogar nicht allzu feste Gesteinsverbände gesprengt werden können (MÜCKENHAUSEN, 1985). Gelartige Ausscheidungen verkleben die unmittelbare Umgebung der Wurzel und erhöhen die Reibung zwischen Wurzelwand und Boden (Verfestigung). Gleichzeitig wird die Wurzel vor Austrocknung geschützt (WEBER, 1953).

Messungen des Eindringwiderstandes der Wurzel in den Boden haben bereits 1883 PFEFFER und 1968 STOLZY und BARLEY durchgeführt. BOUGUSLAWSKI (1981) verweist auf den Zusammenhang zwischen Bodenwiderstand, ermittelt durch Rammsondierung, und der Wurzeleindringung. Im Landschaftsbau wird der Eindringwiderstand mit einem statisch wirkenden Penetrometer gemessen.

Ab einer bestimmten Länge wachsen senkrecht zur Wuchsrichtung der Wurzel Wurzelhaare, die ihrerseits einen erweiterten Bereich um die Wurzel herum durch Ausscheidungen verfestigen. Gleichzeitig bilden nun die Wurzelhaare ein neues Widerlager, das der Wurzelspitze auf kurzer Distanz nachfolgt, damit eine Verkrümmung aufgrund des Eindringwiderstandes vermieden wird. Seitenwurzeln verdichten das Wurzelnetz. Die Bodenpartikel werden nicht nur verklebt, sondern zusätzlich von einer Art zugfester Bewehrung durchwachsen. PAULI beschreibt 1985 die Folgen des Wurzelwachstums folgendermaßen: "Im Verlaufe eines Jahres ist der Boden einem

ständigen Wechsel von Wurzelquellungen und -schrumpfungen ausgesetzt. Die zusätzliche Besiedlung der Wurzel-Boden-Grenzfläche durch Mikroorganismen, deren erste Energiequelle das von den Pflanzen ausgeschiedene Gelmaterial ist, bildet die Grundlage für das Pflanzenwachstum erstrebenswerte Krümelgefüge des Bodens."

Es entsteht ein Wurzelkanal, der wegen seines hohen Anteils an Humus einen günstigen Wasser-, Luft- und Nährstoffhaushalt gewährleistet. Zur Entstehung des Krümelgefüges tragen aber auch der Tongehalt, Temperaturwechsel (Frost) sowie das Quellen und Schwinden des Bodens infolge wechselnden Wassergehaltes bei (KLAPP, 1941; MÜCKENHAUSEN, 1985; SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL, 1984).

Böden mit zunehmendem Gehalt an organischer Substanz weisen eine höhere Scherfestigkeit auf und sind elastischer (HARDKE, 1978; HORN, 1981; SPORER, 1985). HORN (1981) weist eine signifikante Scherfestigkeitserhöhung unter anderem infolge eines höheren Humusgehaltes sowie fortgeschrittenen Aggregierungsgrades nach. Es wurden leider keine Angaben über den Durchwurzelungsgrad gemacht. Die hier gemessenen Scherfestigkeitswerte beziehen sich folglich besonders bei Durchwurzelung mit stärkeren Wurzeln nur auf den Boden zwischen den Wurzeln, dürfen also nicht als Gesamtscherfestigkeit des durchwurzelten Bodens aufgefaßt werden.

In der Klebewirkung sieht PAULI (1985) die erste Stufe einer Lebendverbauung; andererseits treten infolge der Verklebung hohe Adhäsionskräfte auf, so daß winzige Splitter aus Gesteins- und Mineraloberflächen herausgerissen werden. Im Verbund mit Säuren beginnt eine erste biologische Verwitterung.

Die bodenlockernde Wirkung besonders der tiefwurzelnden Pflanzen wurde seit langem in der Landwirtschaft durch den Anbau einer Zwischenfrucht benutzt. In der Forstwirtschaft bereitet ein Vorwald den Standort für nachfolgende an-

spruchsvollere Baumarten vor, und in der Ingenieurbiologie bedient man sich standortgemäßer Pionierpflanzen. Die jeweils nachfolgenden Pflanzen benutzen die Wurzelkanäle ihrer Vorgänger als Leitbahnen (KÖSTLER et al., 1968, GAISER, 1952).

5. MASSENBEWEGUNGEN AUS BODENMECHANISCHER SICHT

5.1 Berechnungsmodelle ohne Berücksichtigung von Pflanzenbewuchs

In der Bodenmechanik sind möglichst detaillierte Modellvorstellungen notwendig, um Baumaßnahmen bemessen oder Schadensabläufe rekonstruieren zu können. Zur Berechnung der Standsicherheit endlicher Böschungen ist für rollige Böden in erster Annäherung die Annahme eines dreieckförmigen Bruchkörpers oder nach DIN 4084 (1981) eines Kreissegmentes hinreichend genau (Abb. 9, s. folgende Seite). Die Standsicherheit \mathcal{M} einer Böschung ist definiert als das Verhältnis der haltenden Kräfte (Scherkraft T des Bodens) zu den treibenden Kräften (Vorhandene Scherkraft aus der Eigenlast G des Bodenkörpers):

$$\mathcal{M} = \frac{\text{treibende Kräfte}}{\text{haltende Kräfte}} \quad (1)$$

Die für natürliche Hänge sehr häufig vorkommende Massenbewegung ist eine translatorische Bewegung, wobei das Verhältnis t/L (d.h. Schollendicke zu -länge) in der Größenordnung von $0,1 - 0,01$ liegt (BUNZA, 1976). Eine einzige Scholle gleitet unter geringfügigen Verformungen auf einer zur Hangoberfläche etwa parallel verlaufenden Gleitfläche ab (SKEMTON und HUTSHINSON, 1969) in BUNZA (1976) (Abb. 8).

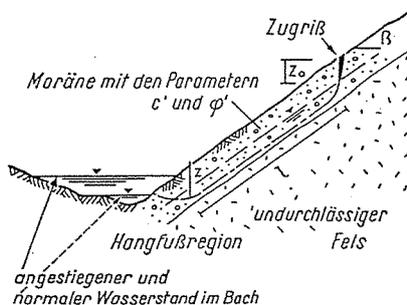
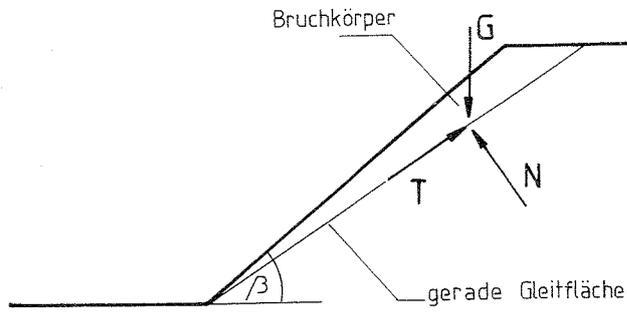


Abb. 8: Skizze der hier betrachteten Bodenscholle der Länge l

a



b

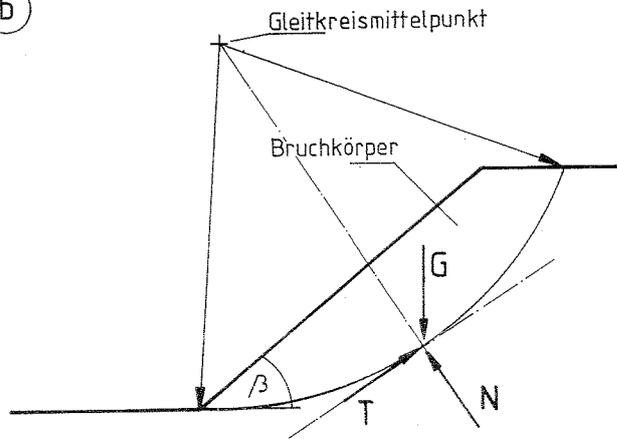


Abb. 9: Modellvorstellung eines Bruchvorganges an einer endlichen Böschung für einen kohäsionslosen Boden

Zum Nachweis der Standsicherheit eines sehr langen Hanges wird das Kräftegleichgewicht an einem herausgeschnittenen Bodenelement betrachtet (Abb. 10). Das Bodenelement der Länge l und der Höhe H steht auf einer hangoberflächenparallelen Gleitfläche. Die zu beiden Seiten angreifenden Erd drücke werden überschläglich als horizontal angreifend angenommen und heben sich damit gegenseitig auf. Die Eigenlast G wird in seine Komponenten T_f parallel und N_f senkrecht zur Gleitfläche zerlegt. Die Kräfte T und C' werden aus der vorhandenen Scherfestigkeit des Bodens berechnet.

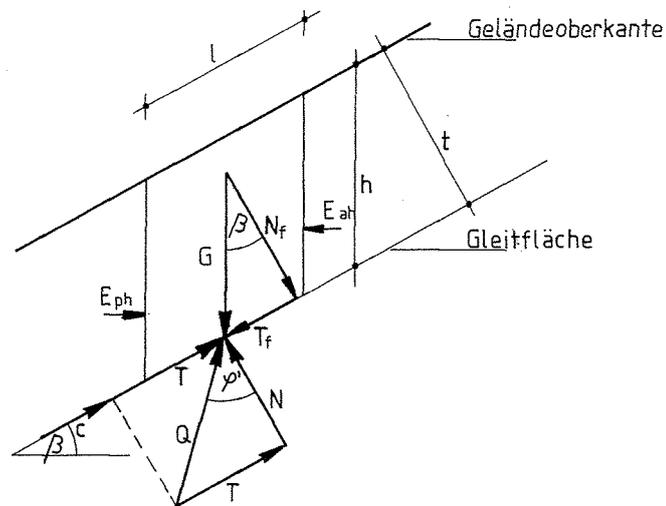


Abb. 10: Kräfteverteilung an einem Bodenelement eines "unendlichen Hanges".

Hierbei sind:

- h = Höhe der Gleitschicht in m,
- l = Länge des betrachteten Bodenelementes in m,
- b = Breite des betrachteten Bodenelementes ($b = 1$ m),
- t = Dicke der Gleitschicht senkrecht z. Gleitebene in m,

- β = Geländeneigung = Neigung der Gleitebene in Altgrad,
 γ = Wichte des feuchten Bodens in kN/m^3 ,
 c' = wirksame Kohäsion in kN/m^2 ,
 φ' = wirksamer Scherwinkel in Altgrad,
 G = Eigenlast des Bodenkörpers in kN ,
 T_f = Scherkraft infolge Bodenauflast in kN ,
 N_f = Normalkraft infolge Bodenauflast in kN ,
 Q = Reaktionskraft, zerlegt in die Scherwiderstandskraft T und die Normalkraft N in kN ,
 C' = wirksame Kohäsionskraft in kN ,
 $E_{a,h}$ = horizontale Kraft aus aktivem Erddruck und
 $E_{p,h}$ = horizontale Kraft aus passivem Erddruck in kN .

Danach läßt sich der folgende Standsicherheitsnachweis für "unendlich" lange Hänge ohne Berücksichtigung des Böschungsfußes durchführen:

Treibend: $T_f = G \cdot \sin \beta = \gamma \cdot l \cdot t \cdot \sin \beta = N_f \cdot \tan \beta$

Haltend: $T + C' = N \cdot \tan \varphi' + C'$

Sicherheit gegen Gleiten:

$$\eta = \frac{(N \cdot \tan \varphi' + C')}{(N_f \cdot \tan \beta)} \quad (2)$$

In die Berechnung der Standsicherheit einer Böschung gehen als Bodenkennwerte der Scherwinkel φ' , die Kohäsionskraft C' und die Wichte des Bodens γ ein.

Tatsächlich entstehen bei instabilen Hängen zunächst Zugrisse (Abb.8), so daß der aktive Erddruck auf die darunterliegende Bodenscholle unwirksam wird. Die Scholle wird dann nur noch vom passiven Erddruck an ihrem Fuß sowie dem Gleitwiderstand in der Gleitfuge gehalten. Die folgende Aufstellung zeigt den anteiligen Gleitwiderstand, hervorgerufen durch den Böschungsfuß, an der Gesamtstandsicherheit, nach BUNZA et al. (1976):

Länge L der Bodenscholle in m	10	20	30	50	100	1000
antelliger Widerstand des Böschungsfußes in % der Gesamtstand-sicherheit	40	25	17	12	6	< 1

Die Tabelle zeigt, daß erst ab einer Schollenlänge von etwa 100 m der Widerstand des Böschungsfußes an der Gesamtstand-sicherheit vernachlässigbar gering wird. Der o.g. Standsicherheitsnachweis für unendliche Hänge sollte ohne Berücksichtigung des Böschungsfußes erst für Hänge mit einer Böschungslänge von $L > 100$ m verwendet werden.

5.2 Berechnungsmodelle unter Berücksichtigung von Pflanzenbewuchs

Zur Berechnung des Langzeitkriechens von natürlichen Hängen aus bindigem Boden stellt 1963 TER-STEPHANIAN aufbauend auf TAYLOR (1948) besonders die Wirkung der Auflast auf einer Böschung im Zusammenhang mit Porenwasserdruck heraus. Eine Beispielrechnung zeigt, daß bei niedrigem Grundwasserstand der Boden einer Böschung ohne Auflast langsamer kriecht, als derjenige einer belasteten Böschung. Umgekehrt kriecht bei hohem Grundwasserstand eine unbelastete Böschung schneller als eine belastete Böschung. Damit ist die oft geäußerte Meinung, rutschgefährdete Bodenschollen müsse man von ihrer Auflast, dem Wald, befreien, schon aus bodenmechanischen Gründen nicht in jedem Falle richtig. Zudem spielt die Baumart, d.h. ihre Wurzelausbreitung eine entscheidende Rolle.

Aufbauend auf TER-STEPHANIAN haben BROWN und SHEU (1975) den durch Wurzeln bewehrten Boden, die vertikale Auflast durch Vegetation, den Scherkräfte und Momente erzeugenden Wind, den Bodenwassergehalt sowie den Grundwasserstand in ihre Berechnungen mit einbezogen und kommen zu folgenden Ergebnissen:

Sicherheit gegen Gleiten:

$$\mathcal{M} = \frac{(a + b + f \cdot (1 - d) + d \cdot (e - 1)) \cdot h'}{b + f \cdot (1 - d) + e \cdot d + j}$$

$$a = \frac{\sigma_1 + \sigma_r}{\gamma_w \cdot H \cdot \cos^2 \beta} \quad (\text{Beiwert zur Berücksichtigung der Durchwurzelung})$$

$$b = \frac{q_0}{\gamma_w \cdot H} \quad (\text{Beiwert zur Berücksichtigung der vertikalen Auflast})$$

$$d = \frac{H_w}{H} \quad (\text{Beiwert zur Berücksichtigung des Wasserstandes im Boden})$$

$$f = \frac{\gamma}{\gamma_w} \quad (\text{Beiwert zur Berücksichtigung des Wassergehaltes im Boden})$$

$$e = \frac{\gamma^s}{\gamma_w} \quad (\text{Beiwert zur Berücksichtigung der Wassersättigung des Bodens})$$

$$j = \frac{T_s}{\gamma_w \cdot H \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} \quad (\text{Beiwert zur Berücksichtigung von Wind})$$

$$h' = \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \quad (\text{Beiwert zur Berücksichtigung des Scherwinkels und der Hangneigung})$$

Hierbei sind:

σ_1 = Zugfestigkeit des Bodens,

σ_r = Zusätzliche Zugfestigkeit durch Wurzeln,

γ_w = Spezifisches Gewicht von Wasser,

H = vertikale Stärke des Bodenmantels,

β = Hangneigung,

q_0 = vertikale Auflast durch Bäume,

H_w = vertikale Höhe des Grundwasserspiegels über einer undurchlässigen Schicht,

γ = Wichte des feuchten Bodens,

γ^s = Wichte des wassergesättigten Bodens und

T_s = Scherkraft pro Hangflächeneinheit durch Windlast.

Ausgehend von den üblichen Annahmen eines unendlichen Hanges

errechnen KOMAMURA et al. (1977) die treibende Kraft unter Einbeziehung der Auflast P infolge Gehölzbewuchs folgendermaßen :

Treibend: $T = (\gamma \cdot t \cdot l^2 + P) \cdot \sin \alpha$

l^2 ist hier der von einem Baum durchwurzelte Teil der Scherfläche, und α der Neigungswinkel des Hanges. Zur Berücksichtigung des Zugwiderstandes legen KOMAMURA et al. (1977) die Zugkraft der senkrecht aus dem Boden herausgezogenen Wurzel zugrunde und korrigieren diese mit dem empirischen Faktor m, da die Wurzel in der Rutschrichtung herausgezogen wird:

$$Q' = \frac{m \cdot Q}{\cos \alpha} \quad (3)$$

Der Rutschwiderstand setzt sich somit aus den üblichen Bodenkennwerten Auflast, Scherwinkel und Kohäsion sowie einem Additionsglied zur Berücksichtigung der Wurzeln zusammen.

Haltend:

$$R = (\gamma \cdot t \cdot l^2 + P) \cdot \cos \alpha \cdot \tan f' + \frac{l^2 \cdot c}{\cos \alpha} + \frac{m \cdot Q}{\cos \alpha}$$

Für den Gleichgewichtsfall $T = R$ und durch Auflösung nach $(\gamma \cdot t) / c$ ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\frac{\gamma \cdot t}{c} = \frac{1}{\cos^2 \alpha (\tan \alpha - \tan f')} + \frac{m \cdot Q \cdot (1 - (k/m) \cos^2 \alpha (\tan \alpha - \tan f'))}{c \cdot l^2 \cdot \cos^2 \alpha (\tan \alpha - \tan f')}$$

Wenn $k = P/Q$ ein bestimmtes Verhältnis annimmt, so daß das zweite Glied zu Null wird, wird die erhöhte Rutschsicherheit durch Baumeigengewicht wieder aufgehoben.

Als Rechenbeispiel wird von KOMAMURA et al. eine Japanische Zeder mit einem Eigengewicht von 0,5 t, einem senkrechten Auszieh-widerstand Q des Wurzelblocks von 2 t und dem Korrekturbeiwert $m = 1,0$ zugrunde gelegt. Der Auszieh-widerstand ist durch Messungen belegt worden, jedoch in dieser Veröf-

fentlichung nicht dargestellt. Die Kantenlänge des Bodenblocks l wird zu $1,0 \text{ m}$, die Kohäsion c mit $1,0 \text{ t/m}^2$ angenommen. Es sind drei Berechnungsschritte mit den Scherwinkeln von 0° , 10° und 15° durchgeführt worden. Die in Abb. 11 dargestellten Ergebnisse lassen folgende Schlüsse zu:

1. Je steiler die Hangneigung ist, desto kleiner ist der Stabilitätsfaktor ($\gamma \cdot t / c$).
2. Der Stabilitätsfaktor eines Hanges mit Bäumen ist größer als derjenige eines Hanges ohne Bäume.
3. Der Stabilitätsfaktor steigt mit zunehmendem Scherwinkel.
4. Der Einfluß von Gehölzwurzeln auf den Stabilitätsfaktor nimmt mit zunehmender Hangneigung sehr stark ab.
5. Je größer der Scherwinkel ist, desto höher ist auch die zusätzliche Sicherungswirkung von Gehölzen.

GRAY gibt 1978 weitere Hinweise zur Berechnung langer, mit Bäumen bestandener Hänge. 1975 haben BRUNNER und SCHEIDEGGER versucht das Rasengleiten auf großen Berghängen rechnerisch zu erfassen. Sie haben vor allem infolge starker Regenfälle und Schneeschmelze das Reißen der Vegetationsdecke knapp unterhalb von Geländekanten beobachtet. In weiterer Folge sind große Stücke der Rasendecke besonders auf steilen Hängen mit einer Neigung zwischen 40° und 45° abgeglitten. Die freigelegten Stellen werden nur sehr langsam wieder mit Vegetation besiedelt. Als Beispiele erwähnen BRUNNER et al. den Lesachriegel in Osttirol, Österreich, und das Abrißgebiet des Golder Bergsturzes in der Schweiz (Abb. 12). BRUNNER et al. (1975) versuchen, das Rasengleiten zu quantifizieren und legen besonderen Wert auf (Abb. 11 +12) die Klärung der Frage, weshalb die Grasdecke in einzelne Schollen zerreißt. Es wird eine dünne Rasenschicht der Dicke h auf einer um den Winkel β geneigten Böschung mit einer Fläche von 1 m^2 betrachtet. Der Fußwiderstand wird vernachlässigt, da sich die Scholle

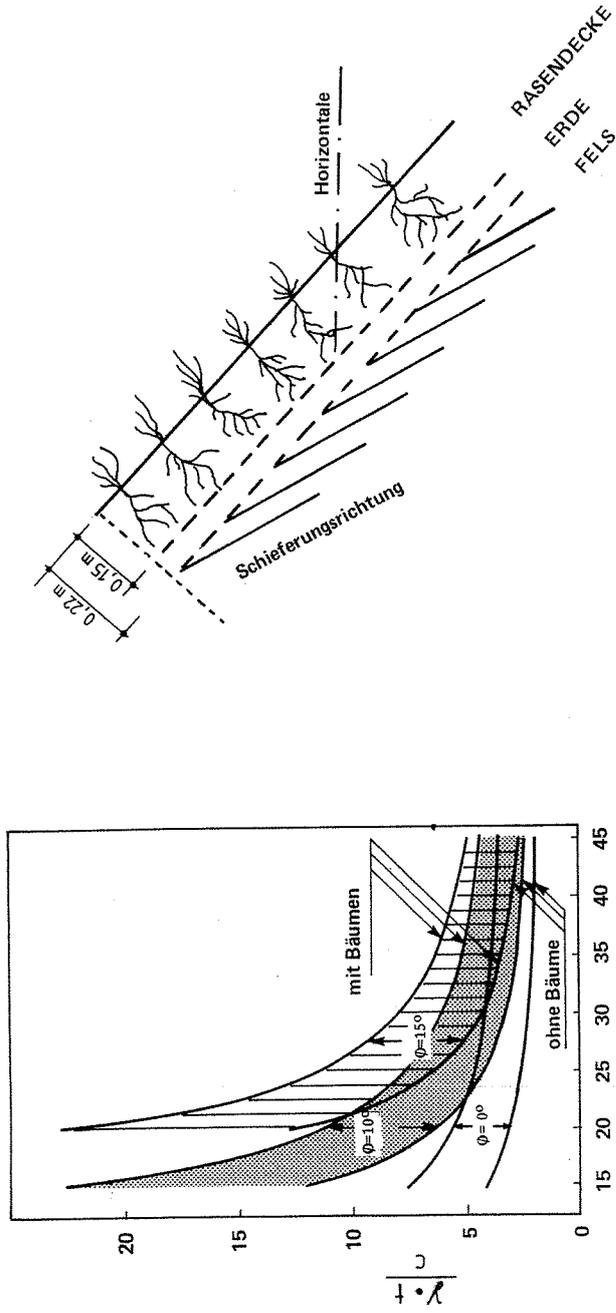


Abb. 11: Zusammenhang zwischen Stabilitätsbeiwert, Hangneigungswinkel und innerem Reibungswinkel eines bewachsenen und eines unbewachsenen Hanges (aus WATANABE, 1977).

Abb. 12: Schnitt durch eine Rasendecke an einer nicht verformten Stelle (BRUNNER et al., 1975)

aufgrund des geringen Biege­widerstandes ohnehin aufgewölbt oder zusammengestaucht hat. Die Gleichgewichtsbedingung wird folgendermaßen formuliert:

Haltende Kraft:

$$2 \cdot l \cdot h \cdot \tau_s + l \cdot h \cdot f_0 + \mu (\gamma_g \cdot h \cdot \cos\beta - p) l^2$$

Treibende Kraft:

$$h \cdot l^2 \cdot \gamma_g \cdot \sin\beta$$

Eine Division durch $h \cdot l^2$ ergibt:

$$(2/l) \cdot \tau_s + (1/l) \cdot f_0 + \mu (\gamma_g \cdot \cos\beta - (p/h)) \geq \gamma_g \cdot \sin\beta$$

Hierin bedeuten:

h = Dicke der Grasschicht in m,

l = Seitenlänge der Grasscholle, hier $l = 1$ m,

β = Hangneigung in Altgrad,

f_0 = Reißfestigkeit der Scholle am oberen Rand in kN/m^2 ,

τ_s = Scherfestigkeit an der seitlichen Begrenzung in kN/m^2 ,

γ_g = Dichte der Grasscholle in kN/m^3 ,

p = Porenwasserdruck in kN/m^2 und

μ = Reibungskoeffizient an der Unterseite der Grasscholle.

Aus der Gleichung ist zu erkennen, daß zunehmendes Gewicht (z.B. infolge Regens) Gleiten verursachen kann. Mit zunehmender Länge nimmt der Einfluß der Reiß- und Scherfestigkeit an der seitlichen Begrenzung sehr stark ab, während die Reibungs­festigkeit an der Unterseite der Scholle und der Porenwasserdruck die bestimmenden Faktoren sind.

6. SCHERFESTIGKEIT DES BODENS

6.1 Allgemeines

In Kapitel 5 ist gezeigt worden, daß als Bodenkennwerte zur Berechnung der Standsicherheit eines Hanges oder einer Böschung der Scherwinkel, die Kohäsion und die Wichte des Bodens benötigt werden. Die folgenden Ausführungen zur Scherfestigkeit eines Bodens beschränken sich bereits auf entsprechende Untersuchungsmethoden im Hinblick auf den im Untersuchungsgebiet anstehenden nichtbindigen Boden.

6.2 Scherfestigkeit des undurchwurzeltten Bodens

6.2.1 Versuchseinrichtungen und Versuchsdurchführungen

Im bodenmechanischen Versuchswesen sind zwei Arten der Versuchsdurchführung in Gebrauch (SCHULTZE/MUHS, 1967; STEIN, 1971):

1. Versuchsanordnungen mit kontrollierten Scherspannungen, erzwungener Lage der Scherfläche, mit vorgegebener Gestaltänderung und behinderter Seitendehnung der Probe ("Direkter Scherversuch"). Dies kann mit Flügelsonden, Rahmenschergeräten, großformatigen Kastenschergeräten oder Kreisringschergeräten durchgeführt werden. Alle Geräte besitzen eine starre Wandung.
2. Versuchsanordnung mit kontrollierten Hauptspannungen, freier Ausbildung der Scherflächen und unbehinderter oder teilweise behinderter Seitendehnung der Probe. Hierzu werden Zwei- oder Dreiaxialgeräte verwandt.

Beim direkten Scherversuch wird die Probe mit einer Vertikallast belastet und unter künstlicher Steigerung der Scherspannung mindestens bis zum Bruch abgeschert. Unter anderem hat sich das Rahmenschergerät von GOLDER (1942, zitiert in

SCHULTZE/MUHS, 1967) durchgesetzt, entwickelt auf der Grundlage eines Gerätes von CASAGRANDE (BUCHANAN, 1936, zitiert in SCHULTZE/MUHS, 1967). Das Schergerät nach GOLDER (Abb. 13) arbeitet, angetrieben durch einen Elektromotor, mit konstanter Verschiebungsgeschwindigkeit.

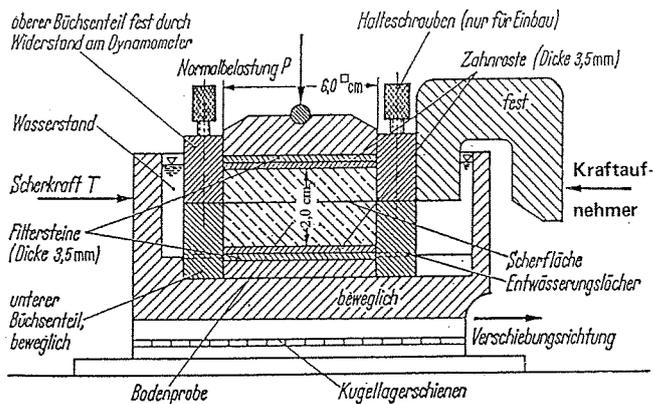


Abb. 13: Rahmenschergerät nach GOLDER (1942, zitiert in SCHULTZE/MUHS (1967))

Großformatige Kastenscherschergeräte, speziell zur Scherfestigkeitsmessung grobkörniger und/oder ungestörter Bodenproben entwickelt, sind ebenfalls prinzipiell in SCHULTZE/MUHS (1967) beschrieben. Eine weitere Entwicklung haben außer ENDO et al. (1968) KAIBORI und SASSA (1984) vorgestellt. Letztes Gerät zeichnet sich besonders durch seine einfache Handhabung aus. Weitere großformatige Schergeräte sind u.a. bei STEIN (1971) zur Untersuchung grobkörniger Schüttmaterialien im Staudambau und bei SMOLTZYK (1960) zur Untersuchung von Sand im Labor beschrieben worden.

Flügelsonden eignen sich am wenigsten zur Messung der Scherfestigkeit eines durchwurzeltten Bodens, da die Wirkung der vertikal gewachsenen Wurzeln kaum von den Flügeln erfaßt werden.

Die Nachteile des direkten Scherversuchs sind u. a. von

KREZDI (1964, zitiert in STEIN, 1971) zusammengefaßt worden:

- Die Scherfläche verändert sich während der Messung.
- Die Verteilung der Scher- und Normalspannungen ist sehr ungleichmäßig.
- Die Scherspannungen, berechnet als Quotient von Normalkraft und Scherfläche, ist lediglich ein grober Mittelwert.
- Der Bruchzustand tritt nicht gleichmäßig auf der ganzen Scherfläche auf, sondern zuerst am Rand derselben.
- Es entstehen starke Verzerrungen, somit liegt keine reine Scherung vor.
- Momente können auftreten, wenn es nicht gelingt, die Scherkraft genau in Höhe der Scherfuge einzuleiten.

Weitere Fehlerquellen sehen SCHULTZE/MUHS (1967) in der Übertragung der Meßergebnisse auf den Baugrund, da das Verformungsverhalten aufgrund der starren Wandungen verändert ist.

Die Vorteile des direkten Scherversuchs gegenüber den heute immer mehr verwandten Dreiaxialgeräten liegen in der unkomplizierten

- Versuchstechnik,
- Auswertung der Meßergebnisse,
- Herstellung des Gerätes und
- Anwendung in situ.

Gegenüber den einachsialen Rahmenscherversuchen haben sich in den letzten Jahren dreiachsiale Scherversuche durchgesetzt, da sie die den Verhältnissen in der Natur am nächsten kommen und vor allem der Porenwasserdruck meßbar ist. Dreiachsialversuche haben jedoch folgende Nachteile, so daß sie für die Scherversuche an durchwurzeltem Boden nicht herangezogen worden sind:

- Ihre aufwendige Versuchstechnik läßt keine große Wiederho-

lungszahl zu, die jedoch bei durchwurzeltem Boden notwendig ist.

- Vergleichsversuche in undurchwurzeltem, ungestörtem, rolligem Boden sind nahezu unmöglich.
- Dreiachsiale Versuche in situ gibt es nicht oder sind zu aufwendig.

6.2.2 Bruchbedingung nach COULOMB

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf die hier verwendeten direkten Rahmen- und Kastenscherversuche, da sich diese als die geeignetere Methode herausgestellt hat. Beim Abscheren entsteht eine erzwungene Gleit- oder Bruchfläche, in der die Scherkräfte übertragen werden. Eine qualitative Scherspannungs-Verschiebungskurve ist in Abb. 14 dargestellt. Man unterscheidet die folgenden charakteristischen Punkte:

1. Die "Bruchgrenze" B gibt die gesamte und gleichzeitig maximale Scherspannung ($\tau_f = \tau$) an (f = failure). Als Bruchkriterium kann außer der maximalen Scherspannung auch das Verhältnis oder die Differenz der Hauptspannungen sowie ein Verformungsmerkmal, z.B. die Verschiebung, herangezogen werden. Dies ist der Fall, wenn die Verschiebung so groß wird, daß sie vom Bauwerk nicht mehr ohne Schaden aufgenommen werden kann.
2. Die "Gleitgrenze" G gibt den Gleitwiderstand oder die Restscherfestigkeit ($\tau_s = \tau_r$) an.
3. Die "Proportionalitätsgrenze" P bezeichnet den Übergang vom elastischen zum plastischen Bereich eines Bodens. Dieser Punkt ist oft nur schwer zu bestimmen.

Nach dem Bruch sinkt die Scherfestigkeit bei dichten nichtbindigen Böden in der Regel mit wachsendem Verschiebungsweg bis zur Gleitfestigkeit oder Restscherfestigkeit des Bodens ab. Bei lockeren und weichen Böden erfolgt hingegen zunächst

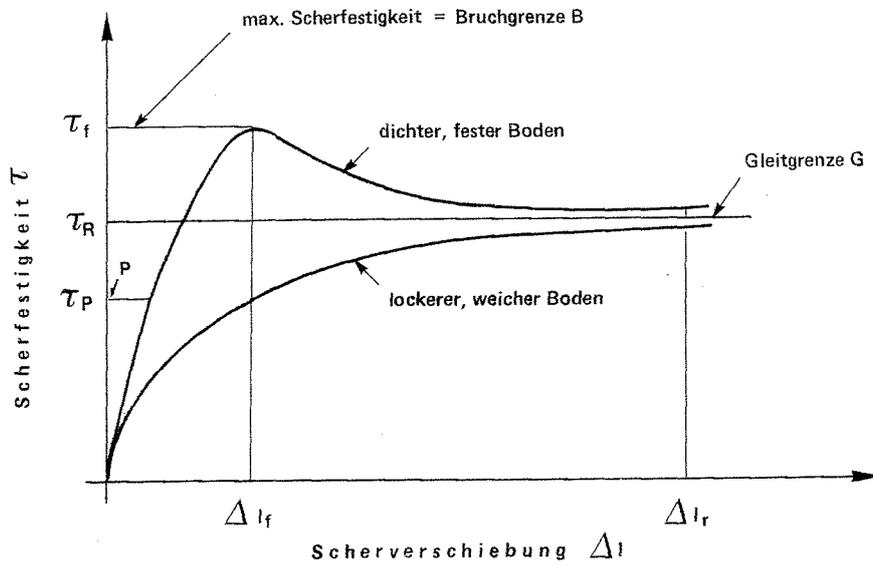


Abb. 14: Scherverschiebungsdiagramm eines dichten, festen und eines lockeren, weichen Bodens nach DIN 18137.

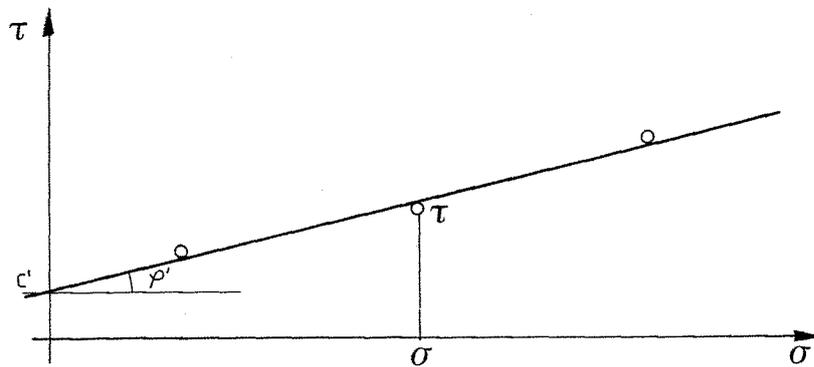


Abb. 15: τ - σ -Diagramm mit Meßpunkten nach DIN 18137 (1972).

eine Verdichtung und infolgedessen eine bessere Verzahnung der Körner. Die Scherspannungs-Verschiebungskurve strebt dann tangential der Restscherfestigkeit zu, die für diesen Fall gleich der Bruchscherfestigkeit ist ($\tau_f = \tau_r$).

Die Restscherfestigkeit des Bodens tritt bei nichtbindigen Böden in Verbindung mit einer kritischen Porenzahl e_{kr} auf, die sich in der Scherfläche nach langen Verschiebungswegen unabhängig von der Anfangsporenzahl einstellt. Die kritische Porenzahl ist besonders von der Vertikalspannung abhängig. TEFERRA (1975) gibt eine nach SCHULTZE (1968) erweiterte Zusammenstellung von nicht linearen Schergleichungen an, die im wesentlichen auf Potenz- und Logarithmusfunktionen beruhen.

Eine einzelne Messung reicht noch nicht aus, das Meßergebnis in Reibungsfestigkeit und Kohäsion zu trennen. Da in begrenztem Bereich der Zusammenhang zwischen Scherspannung und Normalspannung als Gerade vorausgesetzt wird, reichen theoretisch zwei Messungen aus. Im Regelfall werden mindestens drei Messungen durchgeführt, deren maximale Scherfestigkeiten in Abhängigkeit der Normalspannung aufgetragen, woraus eine Ausgleichsgerade errechnet wird. Alle Spannungszustände oberhalb dieser "Grenzgeraden" führen zum Bruch, die nach ihrem Entdecker als COULOMB'sche Bruch- oder Grenzbedingung bezeichnet wird (Abb. 15):

$$\tau_f = c' + \sigma' \cdot \tan \varphi' \quad \text{in kN/m}^2 \quad (5)$$

Die Bruchscherfestigkeit τ_f setzt sich aus der Kohäsion c' und dem eigentlichen Reibungsanteil $\sigma' \cdot \tan \varphi'$ zusammen, der durch den direkten Kontakt von Korn zu Korn entsteht. Zwar ist die Kohäsion bei rolligen Böden oft etwa gleich Null, jedoch ist bei feuchten Sanden mit einer scheinbaren Kohäsion c_k zu rechnen. Die COULOMB'sche Schergerade wird oft mit der Schergerade nach MOHR gleichgesetzt, die jedoch aus Dreiachsalversuchen ermittelt wird, und dann als Bruchbedingung nach COULOMB/MOHR bezeichnet. Da aber hier keine

Deiachsialversuche durchgeführt werden, handelt es sich um die Bruchbedingung nach COULOMB.

6.2.3 Einflüsse auf die Scherfestigkeit

Neben SCHULTZE/MUHS (1967) haben WITTKÉ (1962) und darauf aufbauend STEIN (1971) die vielfältigen Einflüsse auf die Scherfestigkeit nichtbindiger Böden, Kugelpackungen und grobkörniger Erdstoffe zusammengefaßt (Tab. 2). Aus der Gruppe, die das Einzelkorn betreffen, soll hier besonders die Korngröße und die Kornverteilung hervorgehoben werden. Der Einfluß der Korngröße wird in der Literatur sehr widersprüchlich diskutiert. Sie ist besonders für rollige, aber kaum für feinkörnige oder bindige Böden von Bedeutung (MANTJEV/KOLJEV, 1969, zitiert in STEIN, 1971). Damit sind bereits weitere wichtige Einflüsse angesprochen. Porenanteil und Porenzahl e beeinflussen den Scherwinkel stark. SCHULTZE (1966, 1967) sowie eine Vielzahl anderer Autoren haben diesen Zusammenhang für Sand und Kies quantifiziert. Der Wassergehalt w spielt bei nichtbindigen Böden als Adhäsionskraft zwischen den Körnern eine Rolle (auch als scheinbare Kohäsion bezeichnet, s.o.). Je bindiger ein Boden wird, desto größer wird der Einfluß des Wassergehaltes. So kann bei zu schnellem Abscheren Porenwasserdruck entstehen. Daher sollte bei Scherversuchen, falls der Porenwasserdruck nicht gemessen werden kann, die Schergeschwindigkeit soweit herabgesetzt werden, daß der Boden während des Schervorganges ausreichend drainiert wird. HORN (1964, zitiert in SCHULTZE/MUHS, 1967) schlagen hier ein langsames, entwässertes Abscheren 0,01 mm/min bis 0,1 mm/min vor.

Weiterhin spielt die Art und Weise der Beanspruchung eine große Rolle. Die Ergebnisse z.B. von Dreiaxialversuchen (räumliche Verformungen) können nicht mit Rahmenscherversuchen (ebene Verformung) verglichen werden. Die Beanspruchungsrichtung sollte derjenigen in der Natur entsprechen (WITTKÉ, 1962). Besonders in hohen Normalspannungsbereichen

(ab ca. 100 kN/m²) wird der Scherwinkel infolge verschiedener Verdichtungsverhältnisse stärker beeinflusst. Die absolute Größe der Belastung sollte so gewählt werden, daß eine möglichst lange Schergerade entsteht, die besser statistisch abgesichert werden kann. Von der Größe der Normalspannungen hängt nach SMOLTCZYK (1960) auch der Bruchscherweg entscheidend von der Größe der Normalspannungen ab.

Von wenigen Ausnahmen abgesehen sind bei großformatigen Scherversuchen Kastenschervergeräte mit quadratischen Probenabmessungen verwandt worden. RASSKASOYV (1963, zitiert in STEIN, 1971) weist allerdings darauf hin, "daß der infolge der horizontalen Verschiebungen der Probe auftretende Fehler kleiner ist, wenn die Probe ein Seitenverhältnis von Breite / Länge = 1 : 2 besitzt." Auch über das Verhältnis Höhe / Länge gibt es unterschiedliche Auffassungen. Nach SCHULTZE/MUHS (1967) sollte die Probenhöhe bei Laborgeräten möglichst klein sein, etwa 1 bis 1,5 cm, um ein Abscheren in der gewünschten Ebene zu erzielen und eine bloße Verformung zu verhindern. Mit zunehmender Höhe der Probe dürfte die Bruchzone stärker werden. BISHOP (1950) jedoch vertritt die Meinung, daß bei Probenhöhen kleiner als ein Viertel der Probenlänge keine einheitlichen Festigkeitswerte gemessen werden können. Als weitere Faktoren gehen die Verschiebungsgeschwindigkeit und die Belastungsgeschwindigkeit in die Scherfestigkeitsmessung eines Bodens ein. Je nach Belastungsfall unterscheidet man den weggesteuerten oder den kraftgesteuerten Scherversuch. Während beim weggesteuerten Versuch nur die Verschiebungsgeschwindigkeit geregelt wird, steuert man beim kraftgesteuerten Versuch nur den Belastungsanstieg. Eine erhöhte Belastungsgeschwindigkeit hat auch eine erhöhte Bruchlast zur Folge. In Abb. 16 sind großformatige Scherversuche an einem Sand mit gleicher Normalspannung und gleicher Dichte jedoch mit unterschiedlicher Belastungsgeschwindigkeit von SMOLTCZYK (1960) dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, daß eine höhere Belastungsgeschwindigkeit auch eine höhere Scherfestigkeit zur Folge hat (Abb. 16).

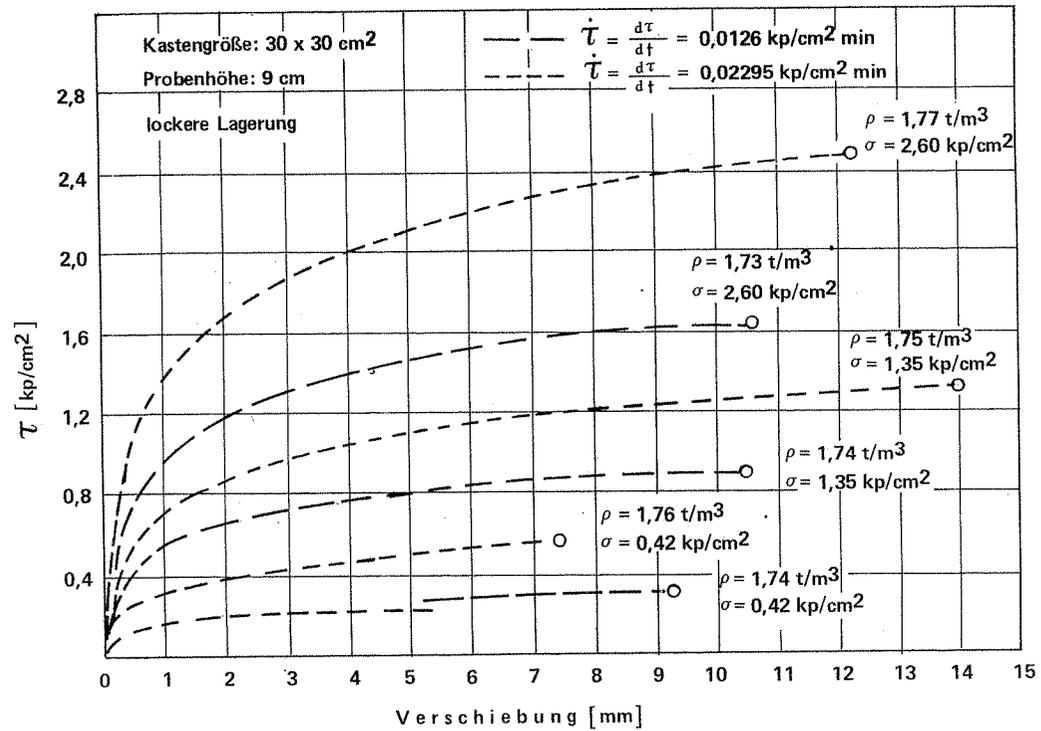


Abb. 16: Gegenüberstellung von Scherfestigkeitsmessungen mit einem großformatigen Schergerät in Abhängigkeit verschiedener Schubbelastungsgeschwindigkeit nach SMOLTZYK (1960).

6.3 Die Scherfestigkeit des durchwurzelten Bodens

Die Wissenschaftsgebiete, aus denen für diesen Fall der ingenieurbiologischen Forschung die Grundlagen entnommen worden sind, sind die bautechnische, die landtechnische Bodenmechanik sowie die Forstwissenschaft.

Die landtechnische Bodenmechanik hat sich besonders mit der Mechanisierung der Landwirtschaft entwickelt, wobei es notwendig gewesen ist, die Reibung zwischen Stahl und Boden, Gummi und Boden, aber auch innerhalb eines Bodens zu messen. Zu diesem Zweck hat SÖHNE (1953) nach der Anregung von KLOTH (zit. in SÖHNE, 1953) ein Ringschergerät entwickelt. Ausgehend von der COULOMB'schen Bruchbedingung $R = \mu \cdot N$ werden hier klare Beziehungen zwischen der Bruch- und Restscherfestigkeit sowie den Einflüssen des Wassergehaltes, des Porenvolumens, der Bodenart und der Normalspannung angegeben.

Ein ähnliches Drehschergerät, in DIN 18035 Bl. 5 (1973) (Sportplätze, Tennenflächen) beschrieben, ist nur zur Bestimmung der "Oberflächenscherfestigkeit" von Tennenbelagstoffen vorgesehen. Die Normalkraft soll während der Messung gleich Null sein, d.h. es wird nur die Kohäsion gemessen. Des weiteren soll das Prüfmateriale mit einem bestimmten Wassergehalt abgeschert werden, was bei nichtbindigen Bodenmaterialien eher zu höheren Kohäsionswerten als bei trockenem Bodenmaterial führt, da hier die scheinbare Kohäsion wirksam wird. Die so gewonnenen Meßwerte dürfen demnach nicht als Scherfestigkeit schlechthin angesehen werden und schon gar nicht bei Berechnungen unterhalb der Bodenoberfläche benutzt werden.

Es sei noch der Vorschlag von BERNHARDT und RICHTER (1978) erwähnt, die ein Gerät zur Schubfestigkeitsmessung von Ackerböden beschrieben haben, um den Landmaschineneinsatz weiter zu optimieren. Das Gerät mißt die Kraft, die notwendig ist, um mit einer in horizontaler Richtung beweglichen

Schubplatte einen Erdkeil aus einer senkrechten Schurfwand herausdrücken. Auch hier werden, wie bei SÖHNE (1953), in physikalisch fundierter Weise Scherfestigkeit, Kohäsion und der Scherwinkel ermittelt. Als Beispiel der landtechnischen Bodenmechanik in den USA wird die Arbeit von KAUL (1965) angeführt, die sich als eine der ersten speziell mit der Scherfestigkeit, aber auch mit der Zug- und Druckfestigkeit durchwurzelter Böden befaßt. Die zu den Versuchen verwandte Kolbenhirse (*Setaria italica*) ist teilweise in Versuchsgeläßen und auf ein Versuchsfeld in Reihen gesät worden, wo dann ungestörte Bodenproben entnommen worden sind. Alle Messungen sind mit dem gleichen universalen, serienmäßigen Zug- und Druckgerät ausgeführt worden. Zunächst findet KAUL einen statistischen Zusammenhang zwischen Scherfestigkeit und den unten aufgeführten Kennwerten:

$$\log \tau = 3,51231 + (R, w, \varepsilon) \cdot \begin{bmatrix} 9,433922 \\ -0,027126 \\ -0,030955 \end{bmatrix} + (R^2, w^2, \varepsilon^2) \cdot \begin{bmatrix} 0,0 \\ -0,00027 \\ 0,000003 \end{bmatrix} \\ + (R \cdot w, R \cdot \varepsilon, w \cdot \varepsilon) \cdot \begin{bmatrix} 0,262644 \\ 0,077803 \\ 0,00002 \end{bmatrix}$$

Hierbei ist:

τ = gesamte Scherfestigkeit in g/inch²,

R = Wurzelgewicht in g,

ε = Verschiebungsgeschwindigkeit in inch/min und

w = Wassergehalt in %.

Da hier die Normalspannung fehlt, können diese Werte nur im oberflächennahen Bereich Anwendung finden. Es geht in dieser Forschungsarbeit um die oberflächliche Bodenlockerung durch Maschinen, die mit möglichst geringem Energieaufwand arbeiten sollen. Die Anwesenheit von Wurzeln erhöht die Scher- und Zugfestigkeit des Bodens bei allen gemessenen Wasserge-

halten des Bodens. Außer einem mechanischen Modell hat KAUL auch ein mathematisches Modell entwickelt, daß angelehnt an rheologische Grundlagen die Scherfestigkeit in Abhängigkeit der Scherspannung zwischen Wurzel und Boden und der Verschiebungsgeschwindigkeit darstellt. Dabei ist die Formel aufgeteilt in die Zeiträume vor und nach Erreichen der maximalen Scherspannung. Bei höheren Wassergehalten nimmt die Mantelreibung der Wurzeln infolge des Feuchtigkeitsfilms stark ab.

Die höchste Energie muß zur Überwindung der Druckfestigkeit eines durchwurzelten Bodens aufgewendet werden. Danach folgt die Scherfestigkeit, und die wenigste Energie benötigt man zur Überwindung der Zugfestigkeit. Alle Energiesteigerungen infolge Durchwurzelung belaufen sich jedoch auf über 100%.

1981 hat ZIEMER seine Untersuchungen zur Scherfestigkeit an mit der Dreh- oder Murraykiefer (*Pinus contorta*) durchwurzeltem Sand veröffentlicht. Unter Hinweis auf frühere Scherfestigkeitsmessungen u.a. von O'LOUGHLIN (1972) wertet er seine Meßergebnisse statistisch aus. Nur die Biomasse lebender Wurzeln mit einem Durchmesser von < 17 mm = 64% der gesamten Biomasse haben einen signifikanten Einfluß auf die Scherfestigkeit.

$$\tau = 3,13 + 3,31 \cdot \text{Biomasse} \quad (R^2 = 0,79; n = 18)$$

Hier bedeuten:

τ = Scherfestigkeit in kPa,
Biomasse in kg/(m³ Boden) und
n = Anzahl der Wiederholungen.

Die Schergeschwindigkeit hat 1,27 cm/min betragen. Da hier die horizontalen Wurzeln erfaßt werden, zeigt dieser Zusammenhang den Einfluß der Durchwurzelung auf die Scherfestigkeit des Bodens entlang senkrechter Bruchflächen, wie sie besonders bei Setzungen (HILLER, 1966) oder in Fuß-, Kopf-

und in Randbereichen von Rutschungen auftreten (vgl. u.a. auch FLOSS, 1985).

Im forstlichen Bereich haben 1968 die Japaner ENDO und TSURUTA ein Großschergerät zur Messung der Scherfestigkeit in situ eines von Schwarzerlen (*Alnus glutinosa*) durchwurzelten Bodens beschrieben. Das Schergerät hat dazu gedient, einen Bodenblock auf einer Grundfläche von 50 x 50 cm² horizontal abzuscheren. Der Weg ist nicht gemessen worden, so daß auch keine Angaben über die Schergeschwindigkeit vorliegen. Die Verfasser haben ihre Ergebnisse 1980 noch einmal über eine multiple lineare Regression statistisch ausgewertet und folgenden Zusammenhang ermittelt:

$$S = 0,765 \cdot \sigma' + 41,5 \cdot D + 38,0 \quad (R^2 = 0,93; n = 37)$$

Hierbei sind:

S = Scherfestigkeit in kg/0,25 m²,
σ' = effektive Normalspannung in kg/0,25 m²,
D = Summe der Wurzelquerschnittflächen in cm²/0,25 m² und
n = Anzahl der Wiederholungen.

Der Anteil der Scherfestigkeit infolge Durchwurzelung ist hier zum ersten Mal als Kohäsion dargestellt worden. Leider fehlt noch eine Darstellung der Wurzelquerschnittfläche in Abhängigkeit der Schertiefe.

Die folgenden Arbeiten sind vor allem aufgrund der verheerenden Folgen des Kahlschlages riesiger Waldgebiete in den USA entstanden. 1979 stellen WU, Mc KINELL und SWANSTON die Ergebnisse ihrer Scherfestigkeitsmessungen in situ sowie im Labor vor. Die Labortests sind an ungestörten Bodenproben in einer 6,3 x 6,3 cm² großen Scherbüchse durchgeführt, die Messungen in situ mit einem 30,5 x 30,5 cm² großen Kasten. WU et al. weisen auf die Meßdaten von MANBEIAN (1973) hin, der nachgewiesen hat, daß die maximale Scherfestigkeit eines durchwurzelten Bodens erst nach einem Vielfachen derjenigen

Verschiebung eines undurchwurzelten Bodens auftritt. Die höhere Scherfestigkeit durchwurzelter Böden kann lediglich als Tendenz ermittelt werden. Die große Streuung der Meßergebnisse resultiert einmal aus der zu wechselhaften Vegetation eines natürlichen Hanges und zum anderen in der Schwierigkeit, Bodenproben in situ mit Wasser zu sättigen. Schematisch wird die Verformung von Wurzeln im Boden in Abb. 17 dargestellt. Es wird eine elastische Wurzel normal zur Scherfläche angenommen. Zwischen Boden und Wurzel treten Scherkräfte auf, die zunächst überwunden werden müssen, bevor die Wurzel auf Zug beansprucht wird.

Die Verfasser gelangen ausgehend von der COULOMB'schen Bruchbedingung

$$\tau_f = c' + \sigma' \cdot \tan \rho'$$

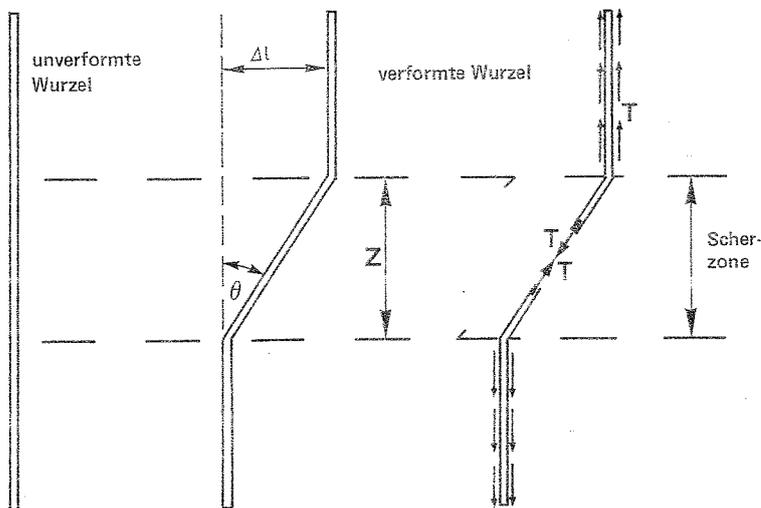


Abb. 17: Modell einer Wurzel in einer verformten und unverformten Scherzone nach WALDRON (1977)

zu folgenden Zusammenhängen, die für kleine Scherverschiebungen gelten:

$$\tau = \tau + \tau_w = c' + \sigma' \cdot \tan f' + \tau_w \quad (6)$$

$$\tau_w = (1/A) \cdot (F_{wT} + F_{wN} \cdot \tan f')$$

$$F_{wT} = \sigma_w \cdot A_w \cdot \sin \theta$$

$$F_{wN} = \sigma_w \cdot A_w \cdot \cos \theta$$

$$\tau_w = (1/A) \cdot \sigma_w \cdot A_w \cdot (\cos \theta \cdot \tan f' + \sin \theta)$$

$$\tau = c' + \sigma' \cdot \tan f' + (\sigma_w \cdot A_w/A) \cdot (\cos \theta \cdot \tan f' + \sin \theta) \quad (7)$$

Hier bedeuten:

- τ = gesamte Scherfestigkeit in kN/m^2 ,
- τ_w = Scherfestigkeit infolge Durchwurzelung in kN/m^2 ,
- σ_w = durchschnittliche Zugfestigkeit der Wurzel in kN/m^2 ,
- A_w = Wurzelquerschnittfläche in m^2 ,
- A = Scherfläche in m^2 ,
- θ = Winkel der Scherdeformation der Wurzel in Altgrad,
- F_{wT} = Zusätzliche Scherkraft infolge Durchwurzelung in kN ,
- F_{wN} = Zusätzliche Normalkraft infolge Durchwurzelung nach einer kleinen Scherverformung in kN ,
- c' = wirksame Kohäsion in kN/m^2 und
- σ' = wirksame Normalspannung in kN/m^2 .

Hier wird bereits der Zustand nach einer kleinen Scherverformung betrachtet, bei der die Wurzel um den Winkel θ ausgelenkt worden ist. Die nun wirksame Zugkraft der Wurzel läßt sich in einen Anteil senkrecht F_{wN} und einen Anteil parallel oder tangential zur Scherfläche F_{wT} zerlegen. Der Anteil senkrecht zur Scherfläche erzeugt auf der Scherfläche eine zusätzliche Normalkraft, die ihrerseits nach der COULOMB'schen Bruchbedingung einen zusätzlichen Scherwiderstand hervorruft.

Diese Überlegungen bilden die Grundlage für eine Reihe von weiteren Untersuchungen u.a. für diejenigen von WALDRON et al. (1977, 1981, 1982 und 1983). Er hat Scherversuche an durchwurzelten Bodenzylindern mit bis zu 1 m² großen Scherflächen ausgeführt. WALDRON hat zunächst die Ausbildung der Zugkraft in der Wurzel und ihre Übertragung auf den Boden untersucht. Es werden mathematische Zusammenhänge zur Berücksichtigung der Wurzeldehnung, der Mantelreibung zwischen Boden und Wurzel und der reißen den Wurzeln jeweils in Abhängigkeit der Scherverschiebung dargestellt. Eine Beispielrechnung zeigt eine gute Übereinstimmung mit Meßergebnissen in einem Scherverschiebungsbereich von 5 mm bis etwa 80 mm. Bei der Ableitung seiner Berechnungsformeln hat der Autor folgende Annahmen gemacht:

- Die Höhe der Scherzone Z bleibt unverändert und ist senkrecht mit Wurzeln durchwachsen.
- Die Wurzeln sind flexibel, linear elastisch und haben den gleichmäßigen Durchmesser d.
- Der Scherwinkel ist nicht durch Wurzeln beeinflusst.
- Die gedehnte Wurzellänge ist ungefähr gleich der ungedehnten Wurzellänge.
- Die maximale Mantelreibung zwischen Wurzel und Boden tritt bei Rutschbeginn auf.

An durchwurzelten Bodenzylindern mit einem Durchmesser von 1,22 m und 1,22 m Höhe untersucht WALDRON 1983 Scherfestigkeitsveränderungen infolge Kriechverformungen und unterschiedlicher Verschiebungsgeschwindigkeiten. Die von ihm entwickelten Schergleichungen stimmen besser mit den Meßergebnissen an den zuletzt genannten großen Bodenzylindern überein, als mit den Ergebnissen, die an den kleineren mit einem Durchmesser von 25 cm gemessen worden sind. In kleineren Probengefäßen entwickelte sich eine relativ höhere

Durchwurzelungsintensität. Ein großer Teil der Wurzeln wächst manchettenartig in der Trennfläche zwischen Boden und Gefäßwandung, sodaß die gemessenen Scherspannungen nicht mehr auf Freilandverhältnisse übertragbar sind.

Für große Scherverschiebungen kann nach BINQUET et al. (1975, zitiert in WU et al., 1988) mit der folgenden Gleichung gerechnet werden:

$$\tau = c + \sigma_w \cdot \tan \varphi + \sigma_{zw} \cdot A_w / A_s \quad (8)$$

mit

σ_{zw} = Wurzelzugfestigkeit und
 A_s = Scherfläche.

Da sich die Wurzeln bei großen Verschiebungen annähernd in Richtung der Scherverformung verschieben, kann ihre Zugkraft als zusätzliche Kohäsion abgeschätzt werden. Hier wird stillschweigend vorausgesetzt, daß die Wurzeln flexibel sind, d.h., nicht brechen und so gut verankert sind, daß sie nicht herausgezogen werden. WU (1988a und 1988b) erweitert die bisherigen Berechnungsansätze indem er zunächst versucht die Verformung der Wurzeln genauer zu erfassen. Er stellt dazu Scherfestigkeitsmessungen in situ sowie Auszieh- und Druckversuche vor, da z.B. Wurzeln, die an einem Hang entgegen der Scherrichtung gewachsen sind, auf Druck belastet werden. Weiterhin gibt er Formeln zur Berücksichtigung der Verzweigung einer Wurzel an.

Die Ergebnisse beruhen hauptsächlich auf Laboruntersuchungen und Scherversuchen in situ in der oberen organischen Bodenschicht, sodaß eine Übertragung auf die in die Tiefe gewachsenen, für die Verankerung eines Wurzeldeckwerkes verantwortlichen Wurzeln, durch weitere Untersuchungen untermauert werden muß.

7. ARBEITSHYPOTHESE

Als Ergebnis der Literaturlauswertung läßt sich folgendes herausstellen:

- Pflanzenwurzeln erhöhen die Scherfestigkeit des Bodens und damit die Stabilität von Hängen und Böschungen.
- Der Scherfestigkeitsanteil infolge Durchwurzelung läßt sich in Erweiterung bisher erkannter bodenmechanischer Gesetzmäßigkeiten an undurchwurzelten Böden rechnerisch erfassen.
- Die Meßmethoden zur Messung der Scherfestigkeit durchwurzelter Böden können auf der Grundlage der bisherigen Versuchstechnik entwickelt und geeignete Versuchsgeräte konstruiert werden.
- Es bestehen noch weitgehende Differenzen bei der Art und Weise der Erfassung der Durchwurzelung.
- Der Grenzbereich derjenigen Bodentiefe, bei der die festigende Wirkung der Durchwurzelung aufhört, ist noch weitgehend unerforscht.
- Das Hauptaugenmerk der Untersuchungen war bisher auf Scherfestigkeitsuntersuchungen bzw. auf theoretischen Berechnungsmöglichkeiten der Hangstabilität und zu wenig auf der Untersuchung der Durchwurzelung in Abhängigkeit der Bodentiefe und der bodenmechanischen Kenngrößen gerichtet.

Ausgehend von obigen Feststellungen ist es das Ziel dieser Arbeit, unter Berücksichtigung der in der Literaturübersicht bereits dargestellten Erkenntnisse folgende Fragen zu untersuchen:

1. Welches möglichst einfache Schergerät eignet sich be-

sonders zur Messung in situ der Scherfestigkeit an mit Gräsern und jungen Gehölzen durchwurzeltem Boden?

2. Sind kleinformatische, herkömmliche Laborschengeräte, wie z. B. das Rahmenschergerät, verwendbar und in wie weit sind die Meßergebnisse mit denen großformatiger Schergeräte vergleichbar?
3. Durch welche Kennwerte kann das Wurzelsystem mit vertretbarem Arbeitsaufwand so erfaßt werden, daß eine Einrechnung in bodenmechanische Gesetzmäßigkeiten möglich ist?
4. Bei welcher Tiefe und bei welcher Durchwurzelung hört der mechanische Einfluß auf die Scherfestigkeit auf?
5. Welcher funktionale Zusammenhang besteht zwischen der Scherfestigkeit, der Schertiefe, der Durchwurzelung sowie weiterer bodenmechanischer Kennwerte?

8. MATERIAL UND METHODEN

8.1 Versuchsanlagen und Vegetation

Zur Untersuchung der Wirkung von Gräserwurzeln auf die Scherfestigkeit eines Bodens wurden Narben von Pioniergräserarten ausgewählt. Alle Versuchsflächen, die zur Messung der Scherfestigkeit von durchwurzeltem Boden herangezogen oder angelegt wurden, befanden sich auf dem Gelände des Instituts für Landschaftsbau der Technischen Universität Berlin in Berlin-Dahlem.

Standortgemäße Pioniergrasarten mit weiter ökologischer Amplitude werden zum Erosionsschutz an Hängen und Böschungen zumindest als Sicherung vor der Ansiedlung von Gehölzen erfolgreich angesetzt. Zu den wichtigsten Pioniergräsern gehören der Rotschwingel (*Festuca rubra* ssp.) und der Schafschwingel (*Festuca ovina*, hier als formenreiche Sammelart bezeichnet). Beide Arten sind als tiefwurzelnde (bis 50 cm Tiefe nach OBERDORFER, 1983) und bestandsbildende Pflanzen des Landschaftsrasens (Definition gem. DIN 18917) bekannt. Ihre Verwendung und ihre Vorkommen als biotechnisch wertvolle Gräser (BUCHWALD, 1954) zum Böschungsschutz sind unter anderen von RÜMLER (1974) und HILLER (1976) untersucht und beschrieben worden (vgl. auch OBERDORFER, 1983, BUNDESSORTENAMT, 1982 und BUCHWALD/DUTHWEILER, 1973).

Die intensiv gepflegten, unbelasteten Gräserparzellen (3,32 m x 3,32 m) wurden vom 6. bis 8. Juni 1978 im Rahmen eines inzwischen abgeschlossenen Rasenversuchs angelegt. Narbendichte, Lückenanteile sowie Artenzusammensetzung zeigt die Tab. 3. Auf allen vier Flächen die für die Scherfestigkeitsmessungen herangezogen wurden, waren die Unterarten des Rotschwingels mit 27% bis 47% Bestandsanteil die bestandsbildenden Arten. Die übrigen Flächenanteile entfielen hauptsächlich auf Zwiebellieschgras (*Phleum bertolonii*), Rotes Straußgras (*Agrostis tenuis*), Leguminosen sowie Kräuter. Der Schnitt erfolgte je nach witterungsabhängigem Zuwachs 12 bis

19 mal pro Jahr. Gedüngt wurde mit 18 g Reinstickstoff pro m² und Jahr.

Die extensiv gepflegten Rasenparzellen (2,24 m x 2,24 m) gehörten zu einer inzwischen abgeschlossenen Sortenprüfung von Rasengräsern auf Landschaftsraseneignung im Auftrage des Bundessortenamtes, die im Juni 1980 angelegt wurde (Abb. 18). Die Narbendichte der Horstrotschwingelsorten war in einer letzten Vegetationsaufnahme vom 23. November 1982 mit "dicht" und "dicht bis sehr dicht" bewertet worden, außer einer Fläche, die die Bewertung "mittel" erhielt (Foto 1). Die Scherfestigkeitsmessungen wurden an verschiedenen Sorten des Horstrotschwingels (*Festuca rubra* ssp. *commutata*), des Ausläuferrotschwingels (*Festuca rubra* ssp. *rubra*) sowie des Schafschwingels (*Festuca ovina*, hier als "Sammelart" bezeichnet) durchgeführt. Auch geringe Anteile von Fremdarten wie *Trifolium repens*, *Trifolium dubium* und *Taraxacum officinale* waren vorhanden. Auch nach den drei Jahren der Sortenprüfung waren die Flächen weiterhin extensiv gepflegt worden, d. h. ohne zusätzliche Düngung und ohne Bewässerung sowie mit nur einem Schnitt im Hochsommer entsprechend der Pflegeextensität während der Prüfjahre.

Zur Messung der Scherfestigkeit von mit Gehölzwurzeln durchwurzeltem Boden wurde als Pioniergehölz die Gelbe Steinweide (*Salix balsamifera* mas., Klon SHS 55) ausgewählt und Mitte November 1982 gepflanzt. Die ein- bis zweijährigen Jungpflanzen waren aus Steckhölzern (Länge des Steckholzes: 22 cm, Durchmesser: 0,6 cm bis 1,5 cm) gezogen worden. Jeweils drei Pflanzen wurden in eine Parzelle gepflanzt, deren quadratische Fläche (50 cm mal 50 cm) derjenigen des Scherkastens entsprach, mit dem später die Scherfestigkeitsmessungen durchgeführt werden sollten (Foto 11).

8.2 Boden

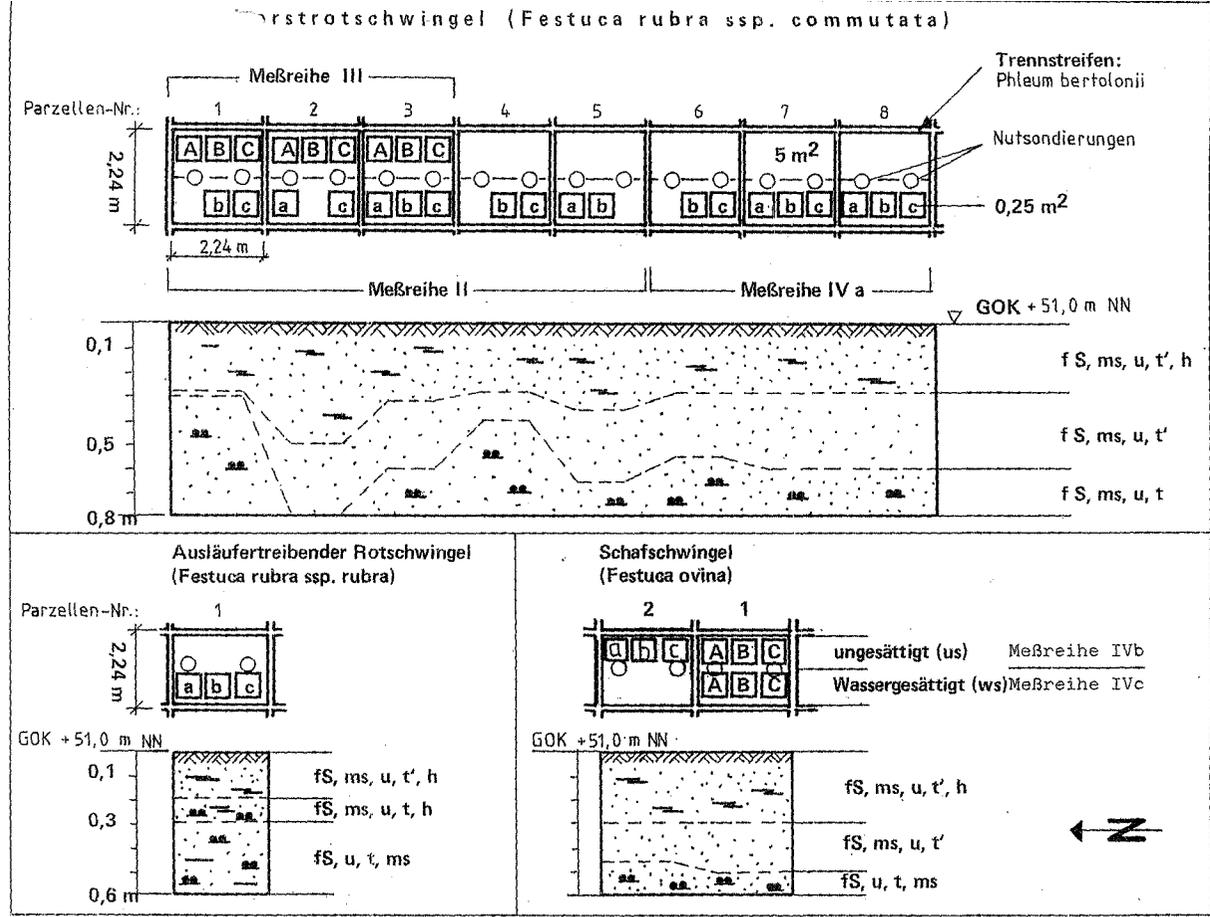
Die Versuchsflächen befanden sich geologisch gesehen auf

Horstrotschwingel (*Festuca rubra* ssp. *commutata*)

Maßreihe III

Trennstreifen:
Pitheum bertolonii

Abb. 18: Versuchsanlage und Bodenaufbau der extensiv gepflegten Landschaftsrasenparzellen



einem oberflächlich entkalkten Geschiebemergel als Folge einer pleistozänen Bildung der Weichseleiszeit.

In Abb. 18 wurde die Anordnung der Meßreihen der Landschaftsrassenparzellen und die Ergebnisse einer Bodenerkundung mit einer Nutsonde dargestellt. Grundsätzlich lag ein Feinsand vor, der mit zunehmender Tiefe schluffiger wurde. Durchschnittlich enthielt der Boden des Landschaftsrassens etwa 5% mehr Schluff als der Boden des intensiv gepflegten Rassens. Bis zur Bearbeitungstiefe war der Boden schwach humos. Je nach den vorangegangenen künstlichen Eingriffen, z. B. Aushebung einer Schürfe, schwankte die Schichtstärke des darunter anstehenden mittelsandigen, schluffigen Feinsandes zwischen 5 cm und 50 cm. Der darunter liegende Feinsand wies einen höheren Schluff- und Tonanteil auf.

Die Kornzusammensetzung des Bodens, auf dem die Gelbe Steinweide gepflanzt wurde, ähnelte bis zu einer Tiefe von 0,3 m derjenigen der Gräserparzellen, d. h., es lag ein mittelsandiger, schluffiger, schwach toniger und schwach humoser Feinsand vor. Zwischen 0,3 m und 0,5 m Tiefe waren schluffige bis schwach schluffige Fein- und Mittelsande anzutreffen. Darunter standen schluffige bis tonige Feinsande an.

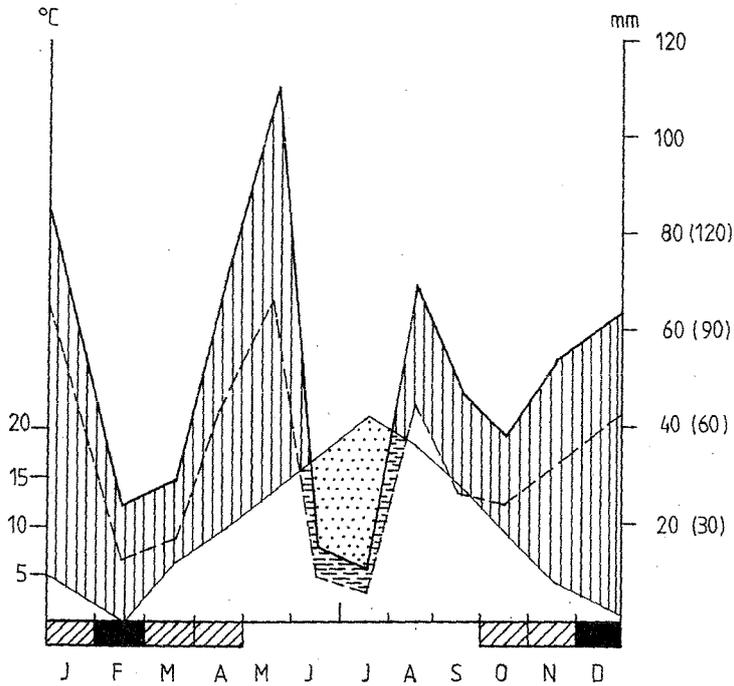
8.3 Witterung

Die Abb. 19 und 20 zeigen den Witterungsverlauf nach WALTER (1975) in den Jahren 1983 und 1984. Das Klima am Versuchsort war subkontinental beeinflusst. Nach der Beobachtungsperiode von 1909 bis 1969 betrug der Durchschnittswert der Jahrestemperatur +8,8 °C, die durchschnittliche Jahressumme der Niederschläge 596,3 mm; davon fielen während der Vegetationsperiode vom 1. April bis 31. Oktober 384,0 mm. Die durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit betrug in dieser 60jährigen Beobachtungsperiode 78%.

Im Meßjahr 1983 betrug das Mittel der Jahrestemperatur +9,9

BERLIN - DAHLEM
(1983)

MITTLERE JAHRESTEMPERATUR: + 8,8 °C
GESAMT - JAHRESNIEDERSCHLAG: 611,6 mm



ABSOLUTES MINIMUM: - 11,2 °C
MITTLERES MINIMUM DES KÄLTESTEN MONATS: - 3,5 °C

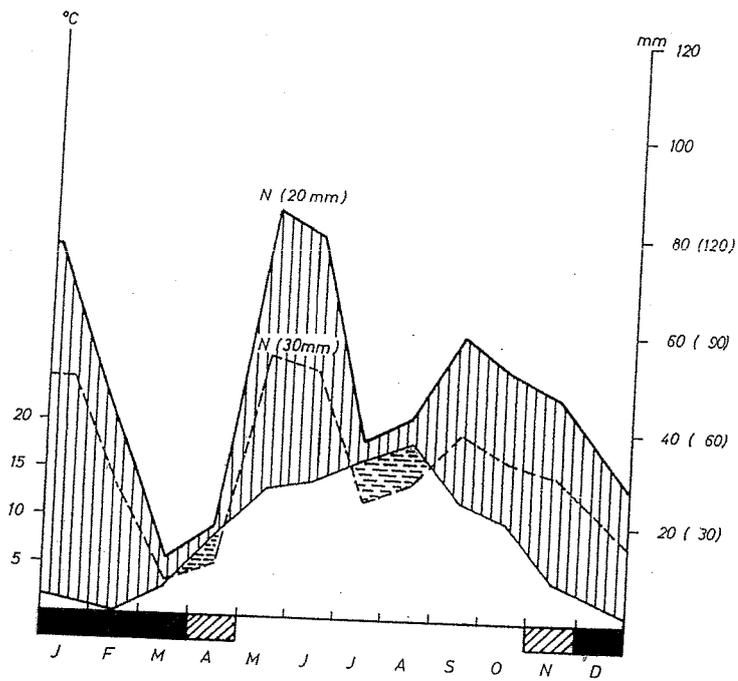
-  HUMIDE ZEIT
-  TROCKENZEIT
-  DÜRREZEIT
-  MONATE MIT MITTLEREN TEMPERATURMINIMA UNTER 0°
-  MONATE MIT ABSOLUTEN TEMPERATURMINIMA UNTER 0°
-  TEMPERATUR
-  NIEDERSCHLÄGE

Abb.19: Witterungsverlauf in Berlin-Dahlem im Jahre 1983

BERLIN - DAHLEM
(1984)

- 60 -

MITTLERE JAHRESTEMPERATUR: +8,7 °C
GESAMT - JAHRESNIEDERSCHLAG: 574,2 mm



ABSOLUTES MINIMUM: -8,4 °C
MITTLERES MINIMUM DES KÄLTESTEN MONATS: -1,9 °C

-  HUMIDE ZEIT
-  TROCKENZEIT
-  DÜRREZEIT
-  MONATE MIT MITTLEREN TEMPERATURMINIMA UNTER 0°
-  MONATE MIT ABSOLUTEN TEMPERATURMINIMA UNTER 0°
-  TEMPERATUR
-  NIEDERSCHLÄGE

Abb.20: Witterungsverlauf in Berlin-Dahlem im Jahre 1984

°C und lag damit 1,1 °C über dem langjährigen Durchschnittswert, während der Jahresniederschlag mit 611,6 mm um 15,3 mm über dem langjährigen Jahresmittel lag. In der Vegetationsperiode vom 1. April bis 31. Oktober 1983 fielen 360,3 mm Niederschlag und damit 23,7 mm weniger als im 60jährigen Mittel mit 340,0 mm.

Im Meßjahr 1984 betrug das Mittel der Jahrestemperatur +8,7 °C also 0,1 °C über dem langjährigen Durchschnittswert. Der Jahresniederschlag von 574,2 mm unterschritt das langjährige Jahresmittel um 22,1 mm. In der Vegetationsperiode vom 1. April bis 31. Oktober 1984 fielen 377,3 mm Niederschlag und damit 37,3 mm mehr als im 60jährigen Mittel mit 340,0 mm.

Das Klima in Berlin war demnach eher kontinental beeinflusst, d. h. heiße, trockene Sommer wechselten mit sehr kalten Wintern. Kennzeichnend waren auch die geringen mittleren Jahresniederschläge, die unter denjenigen des übrigen Bundesgebietes lagen. Das Jahr 1983 wies eine sehr ausgeprägte Dürrezeit (punktierter Bereich) auf und im Jahre 1984 waren für diese Region ebenfalls typische Trockenperioden (quergestrichelter Bereich) aufgetreten.

Betrachtet man die geringe Wasserspeicherfähigkeit von sandigen Böden sowie den mit etwa 11 m unter Flur für Gräser tief anstehenden Grundwasserspiegel, so sind auf solchen Standorten vor allem trockenheitsresistente Gräser und Kräuter standortgemäß.

8.4 Untersuchungsmethoden

8.4.1 Aufgabenstellungen der Meßreihen

Die Untersuchungen an den Gräserparzellen wurden in die Meßreihen I bis IV untergliedert. Die Meßreihe I umfaßte die Untersuchungen am intensiv gepflegten Rasen, während die Meßreihen II bis IV sowie die Rahmenscherversuche am exten-

siv gepflegten Rasen durchgeführt wurden. Die Ziele der einzelnen Meßreihen wurden hier zusammengestellt:

Meßreihe I:

- Erprobung des Scherkastens sowie einer mechanischen Kraft- und Wegmessung an grasdurchwurzeltem Boden und
- die Messungen der Scherfestigkeit des durch intensiv gepflegten Rasen durchwurzelten Bodens mit zunehmender Schertiefe.

Meßreihe II:

- Erprobung einer elektronischen Kraft- und Wegmessung im Feld,
- Ermittlung geeigneter Wurzelkennwerte und deren Einrechnung in die COULOMB'sche Bruchbedingung sowie
- der Vergleich der Scherfestigkeit in Abhängigkeit der Schertiefe zwischen intensiv und extensiv gepflegtem Rasen.

Meßreihe III:

- Bestimmung der Grenztiefe T_c , ab der Graswurzeln keinen Einfluß mehr auf die Scherfestigkeit des Bodens haben sowie
- der Vergleich der Meßwerte mit denjenigen von kleinformatigen Rahmenscherversuchen im Labor.

Meßreihe IVa, b und c:

- Vergrößerung der Datenbasis zur Ermittlung der wahrscheinlichen Schergerade des undurchwurzelten Bodens auf diesem Standort für den Horstrotschwingel.
- Vergrößerung der Datenbasis zu Beurteilung von Landschaftsrasen, der hauptsächlich aus Horstrot- und Schafschwingel besteht, sowie

- die Abschätzung der Scherfestigkeitsverminderung infolge Wassersättigung des Bodens.

8.4.2 Scherfestigkeitsmessungen in der Natur

Die meisten der bekannten Scherfestigkeitsmessungen in der Natur waren mittels großformatiger Kastenscherschergeräte ausgeführt worden. Ihre einfache Konstruktion und Handhabung gaben den Ausschlag für die Verwendung in dieser Forschungsarbeit.

Das vom Verfasser in Anlehnung an ENDO et al. (1969) konstruierte und in der Zentralwerkstatt der Technischen Universität Berlin hergestellte Kastenscherschergerät (Foto 2) bestand aus einem inneren Kasten (Höhen: 60 cm und 30 cm, Scherfläche: 50 cm x 50 cm) und einem äußeren Kasten mit Zughaken (Abb.21, Foto 3). Das Scherschergerät wurde zur Untersuchung des mit Gräsern und des mit Gehölzen durchwurzeltens Bodens verwandt. Der innere Kasten wurde durch seitliches Freigraben mit einem Dränspaten und mit leichten Schlägen eines Kunststoffhammers senkrecht in den Boden gedrückt (Foto 4) und der äußere Rahmen darüber gestülpt. Durch zusätzliche Gewichte wurde der Normalspannungsbereich auf bis zu 25 kN/m² auseinandergezogen, um die Schergerade statistisch möglichst genau bestimmen zu können. Mittels eines Zughubs wurde der Scherkasten dann horizontal gezogen (Foto 5). Der Zughub hatte einen drehbaren Hebel, so daß ein kontinuierliches Ziehen mit einer Schergeschwindigkeit von 2,3 mm/min möglich war. Zwei bis vier Leichtmetallheringe von etwa 70 cm Länge bildeten das feste Widerlager und wurden jeweils am Meßort neu eingeschlagen. Ein elektronischer Kraftaufnehmer (Foto 6) diente zur Messung der Scherkraft und ein elektronisches Wegmeßgerät (Foto 3, Vordergrund) zur Messung des Scherweges. Beide Meßwerte wurden von einem Zweikanallichtschreiber aufgezeichnet (Foto 2, links). Alle Bauteile waren für eine Höchstzugkraft von 10 kN bemessen worden.

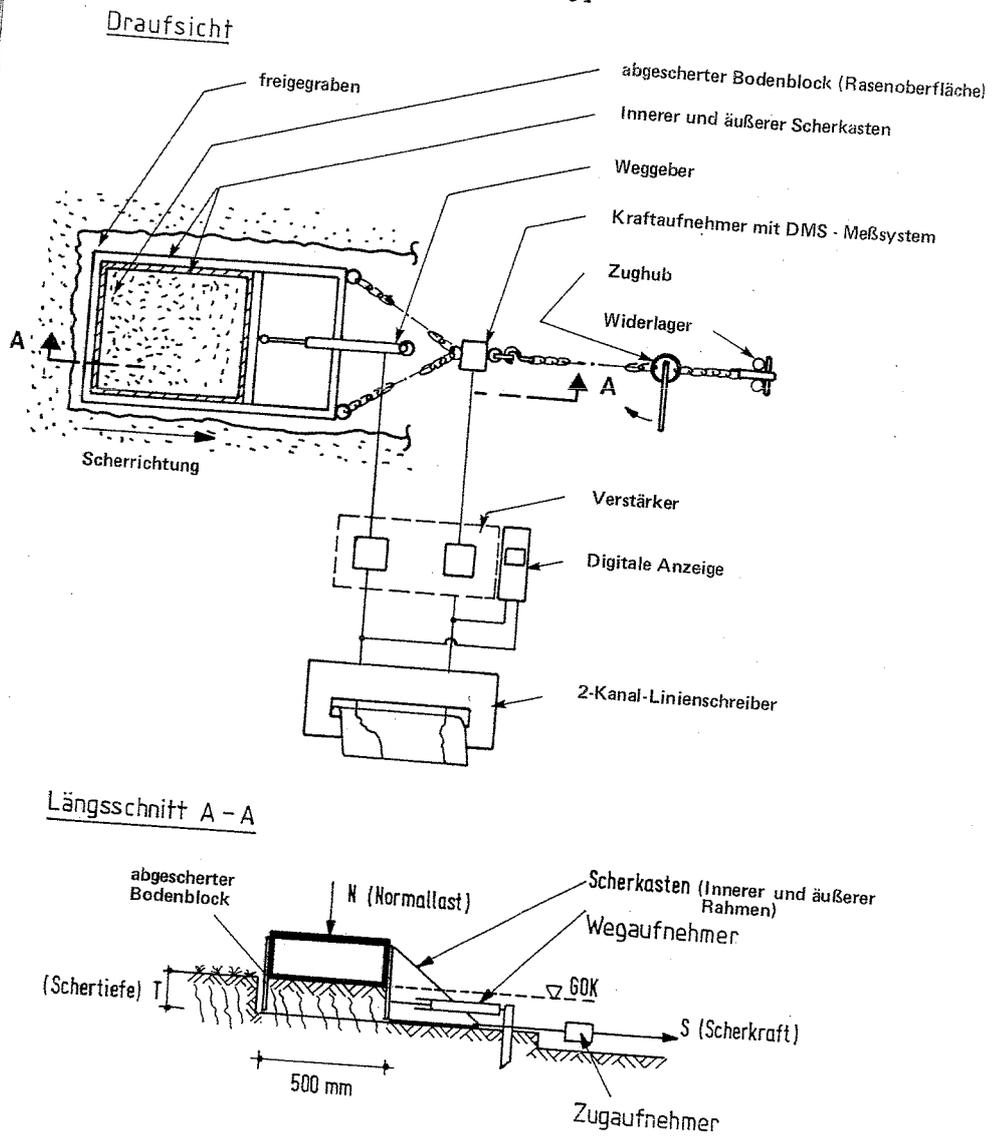


Abb. 21: Skizze der Meßanordnung des Kastenschergerätes

Die Scherflächengröße von $0,25 \text{ m}^2$ wurde einmal im Hinblick auf die spätere Verwendung für Messungen an jungen Gehölzen ausgewählt und zum anderen konnte durch die größere Scherfläche eine geringere Streuung der Meßwerte erwartet werden, was die notwendige Anzahl der Meßwiederholungen entscheidend verringerte.

8.4.3 Scherfestigkeitsmessungen im Labor

Die gebräuchlichen Laborgeräte wurden bereits in Kap. 6.2.1 beschrieben. Vergleichbar mit dem Kastenschерgerät war nur das Rahmenschерgerät nach GOLDER (1942, zitiert in SCHULTZE et al., 1967), das am Institut für Grundbau und Baubetrieb der Technischen Universität Berlin installiert war.

Jede Schergerade wurde normalerweise durch drei Scherversuche unter den drei Normallaststufen $0,1 \text{ MN/m}^2$, $0,2 \text{ MN/m}^2$ und $0,3 \text{ MN/m}^2$ gemessen. In den untersuchten Tiefen handelte es sich aber um einen Spannungsbereich von 0 kN/m^2 bis $8,1 \text{ kN/m}^2$. Dies erforderte jedoch einen Kraftaufnehmer mit einer weit geringeren Nennlast, da die Meßgeräte mit großen Nennlasten die niedrigen Meßwerte nicht genau genug wiedergaben. Ein solcher, für einen anderen Zweck umgebauter Versuchstand wurde dem Verfasser dankenswerter Weise vom Institut für Grundbau und Baubetrieb der Technischen Universität Berlin zur Verfügung gestellt. Die Nennlast des Kraftaufnehmers war $0,5 \text{ kN}$ entsprechend einem Meßbereich von 0 kN/m^2 bis $138,9 \text{ kN/m}^2$ für die hier verwandte Scherbüchse (Fläche: 6 cm mal 6 cm , Höhe: 2 cm). Eine digitale Kleinrechenanlage bereitete die Meßwerte auf und druckte die Scherspannungen aus.

Das Abscheren gestörter Proben diente zum einen zur Ermittlung der Schergerade des undurchwurzelten Bodens und zum anderen mußte festgestellt werden inwieweit der Boden bindiges Verhalten zeigte. Dazu wurden die groben Wurzeln aus der Bodenprobe herausgelesen und der Boden gut durchgemischt in

die Scherbüchse lagenweise mit einer Wichte des trockenen Bodens von $16,42 \text{ kN/m}^3$ eingebaut, was etwa der durchschnittlichen Wichte des trockenen Bodens in den Versuchspartellen vorort entsprach. Auf diese Weise wurde der Einfluß der Wurzeln ausgeschlossen.

Die Messungen wurden als überkonsolidierte bzw. konsolidierte, drainierte Versuche mit einer Verschiebungsgeschwindigkeit von $0,06096 \text{ mm/min}$ durchgeführt. Damit konnte der wirksame Scherwinkel φ' des undurchwurzelten Bodens bestimmt werden (Abb. 33).

Zur Gewinnung der ungestörten Proben wurden zunächst mit einem Stechzylinder (Durchmesser: 10 cm) aus den Versuchspartellen Bodensäulen herausgestochen (Foto 7). Die mittlere Querschnittfläche des Stechzylinders hatte in gleicher Tiefe wie die Scherfläche des Kastenschergengerätes gelegen. Im Labor wurde mittels einer hydraulischen Presse und eines quadratischen Rahmens aus diesem Bodenzylinder die abzuscherende Bodenprobe herausgestochen und in die Scherbüchse des Schergengerätes hineingedrückt.

Um die Rahmen- mit den Kastenscherversuchen vergleichen zu können, wurden die ungestörten Bodenproben mit natürlichem Wassergehalt eingebaut und mit einer Verschiebungsgeschwindigkeit von $1,21 \text{ mm/min}$ abgeschert.

8.4.4 Erfassung des Gräserwurzelsystems

8.4.4.1 Methoden der Probenentnahme

Zur Erfassung des Wurzelsystems von Gräsern existiert im Bereich des Landschaftsbaus bisher noch wenig Literatur. Eine umfassende Zusammenstellung gibt OPITZ VON BOBERFELD (1978), der seinerseits auch auf Quellen des forstlichen und landwirtschaftlichen Bereichs zurückgreift. Hier liegen reichhaltige bis ins 19. Jahrhundert zurückreichende Erfahrungen

vor. Er unterscheidet generell vier Gruppen von Methoden zur Wurzeluntersuchung, wobei er einräumt, daß die Grenzen nicht immer genau zu ziehen sind:

- visuelle Verfahren,
- gravimetrische Verfahren,
- radiometrische Verfahren und
- restliche Verfahren.

Die Wurzelanzahl wird am einfachsten mit visuellen Verfahren, entweder durch Schätzen oder Zählen, bestimmt. Weitere sehr detaillierte Zusammenstellungen von Wurzeluntersuchungsmethoden finden sich in BÖHM (1979) und KUTSCHERA (1960 und 1962).

8.4.4.2 Maßzahlen zur Kennzeichnung der Durchwurzelung

Vielfach wurden Gräserwurzeln mit gravimetrischen Verfahren, z. B. der Bestimmung des Aschegehaltes oder der Trockensubstanz, bestimmt. Diese Methoden dienen hauptsächlich der Quantifizierung der Wurzelmasse. Zusammenhänge der Wurzelmasse mit mechanischen Kennwerten der Wurzeln waren aber nicht bekannt. Die Gräserwurzeln wurden im vorliegenden Fall als Zugelemente angesehen, so daß die Wurzelanzahl in und der Anteil der Wurzelquerschnittfläche an der Scherfläche bekannt sein mußte. Es mußte also einmal

- die Durchwurzelungsintensität N_{wc} , d. h. die Summe der Wurzeln pro Scherfläche und zum anderen
- der Durchwurzelungsgrad A_{wc} , d. h. die Summe der Wurzelquerschnittsflächen pro Scherfläche

gemessen werden.

Für die Scherversuche war eine möglichst genaue Bestimmung der Durchwurzelung zum Zeitpunkt und am Ort des Schervor-

ganges notwendig. Es mußte mit einer hohen Streuung der Durchwurzelungskennwerte innerhalb ein und derselben Gräser-sorten, auf jeden Fall bei verschiedenen Gräserarten, gerechnet werden. Deshalb war auch von der Untersuchung mittels einer Schürfe abgesehen worden, wie es etwa BÖHM (1979) beschrieb. Die folgenden Methoden wurden angewandt :

1. Probenentnahme außerhalb der Scherfläche:
 - Methode A: mittels Erdbohrer,
2. Probenentnahme innerhalb der Scherfläche am abgesicherten Bodenblock:
 - Methode B1: mittels Stechrahmen,
 - Methode B2: mittels Stechzylinder.

Die Probenentnahme außerhalb der Scherfläche (Methode A) wurde bei der Meßreihe II angewandt. Dazu wurde ein Erdbohrer von 10 cm Durchmesser und 15 cm Höhe benutzt. Der Bohrer wurde per Hand drehend in den Boden gedrückt.

Erd- oder Strukturbohrer verschiedenster Konstruktion sind in Deutschland besonders durch ALBRECHT et al. (1953) entwickelt und eingesetzt worden (vgl. auch SIMON et al., 1956 und 1957; LIPPERT, 1959; SKIRDE, 1971; alle Verfasser zitiert aus BÖHM, 1979).

Es wurden jeweils unmittelbar neben der Scherfläche drei Bodensäulen von 10 cm bis 18 cm Länge herausgestochen, sodaß die Durchwurzelung in dreifacher Wiederholung bestimmt werden konnte. Der Vorteil lag, wie auch bei den folgenden Verfahren der Probenentnahme, in der Unabhängigkeit von der Witterung und der begrenzt möglichen Lagerfähigkeit der Proben. Die Wurzeln durften nicht zu sehr austrocknen, da sonst ihr Durchmesser schrumpfte.

Eine weitere Methode war die Probenentnahme innerhalb der Scherfläche am abgesicherten Bodenblock. Der abgesicherte Wurzel-Bodenblock konnte bis zu mehreren Tagen zwischengelagert

werden, ohne eine wesentliche Veränderung seiner Durchwurzelung zu erfahren. Die eigentlichen Proben zur Bestimmung der Durchwurzelung konnten unmittelbar aus der Scherfläche entnommen werden. So war es auch auf diese Weise möglich, unabhängig vom Wetter zu arbeiten.

Bei der Meßreihe IVa war zunächst mit einem einfachen quadratischen Stechrahmen (Fläche: 15 cm x 15 cm, Höhe: 5 cm) gearbeitet worden (Methode B1). Der Stechrahmen wurde in dem auf dem Kopf liegenden Bodenblock eingedrückt oder geschlagen. Ein weiteres angeschärftes Blech war kurz unterhalb der Bodenprobe zur vollständigen Herausstrennung derselben in den Bodenblock geschlagen worden. Der Bodenblock war seitlich mit Brettern, die durch Schraubzwingen angedrückt wurden, während des Ausstechvorganges vor dem Zerbröckeln bewahrt worden. So konnten jeweils vier Proben pro Scherfläche (50 cm x 50 cm) gewonnen werden. Statistisch sind die Ergebnisse weniger Stichproben schwer abzusichern. Die erwartete geringere Streuung der Mittelwerte aufgrund der großen Fläche stellte sich jedoch nicht ein. Ein weiterer Nachteil war der höhere Aufwand beim Herausstechen der Proben aus dem Bodenblock.

In der Meßreihe III und IVb wurden deshalb Stechzylinder mit einem Durchmesser von 6 cm und einer Höhe von 5 cm benutzt (Methode B2). Die kleineren Stechzylinder waren in der Handhabung vorteilhafter und wegen ihrer kleineren Fläche in größerer Zahl aus der Scherfläche zu gewinnen. Eine mißglückte Entnahme fiel zudem nicht so sehr ins Gewicht wie bei der Benutzung des Stechrahmens (Methode B1). Auch hier mußte der Bodenblock seitlich abgestützt werden, jedoch war nur der erste Zylinder schwierig, alle weiteren leicht zu entnehmen. Die Mittelwerte konnten selbst mit größerer Streuung besser statistisch abgesichert werden.

8.4.4.3 Bestimmung des Durchwurzelungsgrades und der Durchwurzelungsintensität

Die Wurzelzählung und damit die Bestimmung der Durchwurzelungsintensität durch verschiedene Untersuchungsmethoden ist in der oben aufgeführten Literatur beschrieben. Kaum bekannt sind jedoch Verfahren der Querschnittsbestimmung der sehr feinen Wurzeln der Gräser mit einfachen Mitteln, um den Durchwurzelungsgrad zu ermitteln. Zur Lösung dieser Frage wurde auf eine Methode von VETTER et al. (1964) zurückgegriffen. Er hatte ein Verfahren von HELLRIEDEL (1883) benutzt, wobei mit einem Strukturbohrer herausgestochene Bodensäulen in Segmente zerbrochen, die abgerissenen Wurzeln auf beiden Bruchflächen gezählt und die Querschnittsgrößenklassen geschätzt wurden. Somit war die Darstellung der Durchwurzelung über die Tiefe möglich.

Ausgehend von diesen Forschungsberichten und einem mündlichen Hinweis von Herrn OPITZ VON BOBERFELD (1984), wurde für den vorliegenden Fall das folgende Verfahren zur Bestimmung des Durchwurzelungsgrades entwickelt:

Bei der Methode A (Entnahme mit dem Erdbohrer) wurden die bis zu 17 cm langen Bodensäulen nicht zerbrochen, sondern mit einem glatten, großen Messer zerschnitten. Der Vorteil lag darin, daß die Untersuchungsfläche sehr genau plaziert werden konnte. Die Schnitte wurden in allen Bodensäulen in gleicher Tiefe so angeordnet, daß sie möglichst genau in der Schertiefe lagen. Die noch glatten Schnittflächen wurden mit einer nicht zu harten Bürste aufgerauht, so daß die Wurzelenden ca. 5 mm hervorstanden. Viele Wurzeln wurden erst nach diesem Arbeitsgang sichtbar und die weniger zugfesten humosen Anteile sowie abgestorbene Wurzeln entfernt. Die Wurzeln waren nach dem Abtrocknen vor dem noch feuchten, dunkleren Boden sehr gut zu erkennen und ihr Durchmesser konnte dann mit einer Schieblehre (Meßgenauigkeit: $\pm 0,01$ mm) gemessen werden. Auf diese Weise wurden nur die hier gefragten lebenden, langen und zugfesten Wurzeln erfaßt. Als

nützlich erwiesen sich eine große beleuchtete Lupe, ein Zählgerät und ein über die Schnittfläche gelegtes Drahtgitter, damit nicht Wurzeln doppelt gezählt wurden, falls die Arbeit unterbrochen werden mußte.

Bei den Methoden B1 und B2 (Stechrahmen und Stechzylinder) wurden außer dem hier nicht notwendigen Zerschneiden der Probe in gleicher Weise verfahren. Die Tiefen wurden um 1,5 cm nach oben verlegt, da die beim Abscheren sehr ungleichmäßig abgerissenen Wurzeln tiefer freigelegt und gleichmäßig abgeschnitten werden mußten, damit sie besser gezählt werden konnten.

Bei allen oben aufgeführten Wurzelermassungsmethoden wurden jeweils die Wurzeln der gesamten Probenfläche gezählt und bei der Meßreihe II stichprobenartig deren Durchmesser gemessen. Dazu wurden jeweils 30 Wurzeln, gleichmäßig über die Probenfläche verteilt, herausgegriffen.

Die Wurzelzählungen nach den Methoden A und B2 wurden von der gleichen Mitarbeiterin, die Zählungen nach Methode B1 aus organisatorischen Gründen von einer anderen Mitarbeiterin durchgeführt. Die Untersuchung des Einflusses verschiedener Bearbeiterinnen, wie es bei OPITZ VON BOBERFELD (1973) erwähnt wurde, wurde nicht durchgeführt.

Die Durchwurzelung der Gelben Steinweide wurde jeweils in der Scherfläche direkt nach dem Abscheren bestimmt und ebenfalls der Durchwurzelungsgrad bestimmt.

8.4.5 Ergänzende bodenphysikalische Untersuchungen

Aus den 14 die Scherfestigkeit beeinflussenden Kenngrößen (siehe Tab. 2 nach WITTKE, 1962) wurden die folgend beschriebenen ausgewählt und parallel zu jedem Scherversuch gemessen.

Die Kornverteilungen bzw. Körnungslinien wurden an gestörten Bodenproben nach Vornorm DIN 18123 (1971) als kombinierte Sieb- Schlämmanalyse bestimmt. Zu jeder Kornverteilung wurde der Ungleichförmigkeitsgrad U und die Krümmungszahl C_c berechnet. Die Korngrößenverteilung ist eine der entscheidenden Bodenkenngößen, die gleichzeitig die Scherfestigkeit und das Pflanzenwachstum beeinflussen, letztes besonders durch ihre Wirkung auf die Wasserdurchlässigkeit, Durchlüftung und den Nährstoffhaushalt eines Bodens.

Die Korndichte ρ_s wurde nach DIN 18124 Teil 1 (1973) ermittelt.

Die Wichte des feuchten Bodens γ und die Wichte des trockenen Bodens γ_a wurde an ungestörten Bodenproben bestimmt. Bei den intensiv gepflegten Parzellen wurden alle ungestörten Bodenproben mit einem Dreibeingerät nach DIN 19672 (1968) entnommen, um nicht durch Erschütterungen das Korngefüge zu stören. Es wurden danach an zwei Parzellen jeweils ungestörte Bodenproben mittels des Dreibeingerätes sowie durch Einschlagen eines Stechzylinderkopfes gewonnen. Es zeigte sich kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den beiden Verfahren, so daß die weiteren ungestörten Bodenproben durch das Einschlagen des Stechzylinderkopfes gewonnen wurden. Unmittelbar nach der Entnahme wurden die Bodenproben, die ein Volumen von 100 cm³ hatten, gewogen. Im Trockenofen wurden sie bei 105 °C getrocknet und nach DIN 18121 Teil 1 (1976) weiterbehandelt. Die Proben wurden in fünffacher Wiederholung unmittelbar neben der Scherfläche so entnommen, so daß die mittlere Querschnittsfläche des Zylinders höhen- gleich mit der Scherfläche war. Die Zugehörigkeit der Extremwerte zur Grundgesamtheit wurde über die Berechnung des Vertrauensbereiches des Mittelwertes für kleine Stichprobenumfänge bestimmt (WEBER, 1956). Mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % lagen nur wenige Meßwerte außerhalb des Vertrauensbereiches.

Aus der Wichte, dem Wassergehalt sowie der Korndichte des

Bodens wurden die weiteren Kennwerte zur Beurteilung des Porenvolumens des Bodens berechnet. Es handelte sich um den Gesamtporenanteil n , die mit Wasser als auch mit Luft gefüllten Porenanteile n_w und n_a , sowie die Anfangsporenzahl e_a . Der Grad der Wassersättigung des Bodens konnte mit dem ebenfalls berechneten Sättigungsgrad S_r nachgewiesen werden, der als das Verhältnis zwischen gemessenem Wassergehalt des Bodens im Feld und dem theoretisch maximal möglichen Wassergehalt berechnet wurde.

8.4.6 Bodenchemische Untersuchungen

Die Untersuchungen der bodenchemischen Kennwerte erfolgten parallel zu jeder einzelnen Scherfestigkeitsmessung an dem Boden, der direkt aus der Scherfläche entnommen wurde. Zunächst wurden die Gehalte der drei wichtigsten Pflanzennährstoffe Stickstoff, Phosphor und Kalium, sowie der Humusgehalt und die Bodenreaktion ermittelt. Die folgenden Ausführungen zur Wirkung der chemischen Bodeneigenschaften auf Pflanzen wurden im wesentlichen aus FINK (1979) entnommen.

Der Humusgehalt wird bei SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL (1984) als die gesamte organische Substanz im Boden definiert. Nach DIN 19684 Teil 2 (1977) versteht man im Gegensatz dazu unter Humus im Boden lediglich die abgestorbene organische Substanz. Der Verfasser schließt sich der ersten Definition an, da zwischen lebender und abgestorbener Substanz auf diesem Standort nicht unterschieden werden kann. Die organische Substanz wird durch die Bestimmung des Kohlenstoffes, im vorliegenden Falle mittels einer 2 N Kaliumdichromatlösung, ermittelt.

Die Wirkung des Humusgehaltes im Boden liegt im wesentlichen

- in der Erhöhung der Wasserspeicherfähigkeit; Humus bindet das drei- bis fünffache seines Eigengewichtes an Wasser,
- in der Verbesserung der Durchlüftung des Bodens,
- in der Erhöhung der Temperatur durch Verdunkelung der

Bodenfarbe,

- in der Sorbierung von Nährstoffen,
- in der Mobilisierung von Nährstoffen durch Humusabbau,
- in der Nährstoffsperrung durch vorübergehende Festlegung mineralischer Nährstoffe durch Mikroben beim Abbau mineralstoffarmer, organischer Substanzen; dies ist abhängig vom C/N-Verhältnis.

Der Stickstoffgehalt wurde als Gesamtstickstoff nach DIN 19684 Teil 4 (1977) bestimmt. Stickstoff ist in besonderem Maße neben Phosphor verantwortlich für das Wachstum der Gesamtpflanze. Folgende Reaktionen zeigen sich bei

- Stickstoffmangel: Verringerung von Wachstum und Ertrag, schwache Bestockung, vorzeitige Blüte und spärliche Fruchtbildung und bei
- Stickstoffüberschuß: blaugrüne Farbe der Blätter, starke Reifeverzögerung, mangelnde Standfestigkeit und starke Anfälligkeit gegen Schädlingsbefall aufgrund des schwach ausgebildeten Schutzgewebes.

Der Phosphorgehalt wurde als pflanzenverfügbarer Phosphor nach der Lactat-Methode nach EGNER/RIEM bestimmt (THUN et al., 1955). Pflanzen reagieren bei

- Phosphormangel mit Wachstumshemmung, schwacher Wurzelbildung und Bestockung, verzögerter Blüte und Reife und bei
- Phosphorüberschuß mit Festlegung des Eisens, so daß die Stickstoffaufnahme behindert werden kann.

Der Gehalt an pflanzenverfügbarem Kalium wurde genauso wie derjenige des pflanzenverfügbaren Phosphors bestimmt. Kalium trägt zur Steuerung des Wasserhaushaltes des Bodens und der Pflanze bei:

- Kaliummangel verringert die Aufbauleistung der Pflanze

sowie ihre Standfestigkeit und den Turgor.

- Kaliumüberschuß steigert die Salzkonzentration im Boden und erschwert die Wasseraufnahme der Pflanze.

Die Bodenreaktion wurde als $\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$ nach DIN 19684 Teil 1 (1977) gemessen. Die Bodenreaktion hat einen starken Einfluß auf die chemischen, physikalischen und biologischen Eigenschaften der Böden und der Pflanzen (z. B. die Verfügbarkeit vieler Nährstoffe, vgl. auch RIEM VIS (1980), RÜMMLER (1974), OPITZ VON BOBERFELD (1978)).

8.4.7 Statistische Grundlagen

Die statistische Auswertung der Meßdaten wurde auf dem Großrechner (CYBER) des Zentralen Rechenzentrums (ZRZ) der Technischen Universität Berlin durchgeführt. Die polynominalen Regressionen wurden mit dem Programm POLYRE und multiple Regressionen mit dem Programm MURAB (beide von HÜNECKEN, 1979) durchgeführt. Die Gleichungen der multiplen Regression hatten jeweils die folgende allgemeine Form:

$$y = a + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + \dots + b_i \cdot x_i$$

Die multiple Regression wurde hauptsächlich zur Bestimmung der Scherfestigkeit τ ($= y$) in Abhängigkeit der Variablen x_1 (Normalspannung), x_2 (Durchwurzelungsintensität), x_3 (Humusgehalt) bis x_i für weitere Kennwerte durchgeführt. Das absolute Glied a entsprach jeweils der Kohäsion c . Gleichzeitig wurden die partiellen Regressionskoeffizienten sowie eine Matrix der Korrelationskoeffizienten der Kennwerte untereinander mit ausgegeben, die es erlaubte evtl. Abhängigkeiten der Kennwerte untereinander zu erkennen und diejenigen Kennwerte, die voneinander abhängig waren, von weiteren Berechnungen auszuschließen. Alle Regressionskoeffizienten b_1, b_2, b_3 bis b_i einer Gleichung wurden mittels des t-Tests auf ihre Irrtumswahrscheinlichkeit hin überprüft. Zusammenhänge

mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 1 % bis 5 % wurden als "signifikant" [*] und < 1 % als "hochsignifikant" [**] bewertet. Statistische Zusammenhänge wurden erst weiterverwandt, wenn die folgenden beiden Kriterien erfüllt waren:

1. Alle Regressions- und Korrelationskoeffizienten sollten mit mindestens signifikanter Irrtumswahrscheinlichkeit gesichert sein.
2. Korrelationsgleichungen sollten ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 \geq 0,7$ aufweisen, d. h., der statistische Zusammenhang sollte zu mindestens 70 % gesichert sein.

9. SCHERFESTIGKEITSMESSUNGEN AN INTENSIV GEPFLEGTEM RASEN (MEßREIHE I)

9.1 Aufgabenstellung

Mit der Meßreihe I wurde das Kastenschergerät zunächst hinsichtlich seiner Eignung zur Messung der Scherfestigkeit von grasdurchwurzeltem Boden überprüft. Ein weiteres Ziel war die Messung der Scherfestigkeit von intensiv gepflegtem Rasen in Abhängigkeit der Schertiefe.

Die Vegetation ist bereits in Kap. 8.1 beschrieben und die Ergebnisse einer Vegetationsaufnahme in Tab. 3 aufgeführt worden. Die im folgenden beschriebenen Kennwerte sind in der Tab. 4 zusammengestellt.

9.2 Boden

9.2.1 Erdbauliche und bodenmechanische Kennwerte

In der Mehrzahl hatte es sich um eng gestufte Kornzusammensetzungen (Abb. 22) gehandelt (sehr ungleichförmiger Boden). Die drei weitgestuften Körnungslinien (Versuche: 2, 2b und 4b) zeichneten sich durch ihren Ungleichförmigkeitsgrad $U < 15$ und durch Tongehalte unter 5 % aus. Die übrigen, eng gestuften Kornverteilungen wiesen auch entsprechend höhere Tongehalte bis maximal 6,9 % auf. Der Schluffanteil streute in geringerem Maße als der Tongehalt.

Der Boden wurde als schluffiger bis stark schluffiger Sand eingestuft (DIN 18196, 1970). Damit ähnelte die Kornverteilung derjenigen der extensiv gepflegten Grasparzellen, so daß auch hier hinsichtlich des Verhaltens bei Scherbelastungen von einem nichtbindigen Boden ausgegangen werden konnte (vgl. Kap. 10.2). Es entstand kein Porenwasserdruck im Boden, sodaß mit dem Scherkasten in situ der wirksame Scherwinkel φ und die Kohäsion c gemessen wurde.

Da die Bestimmung der Lagerungsdichte nach VORNORM DIN 18126 (1981) aufgrund des Schluff- und Tongehaltes zu unbrauchbaren Ergebnissen geführt hätte, wurde die Lagerung des Bodens nach DIN 1055 Teil 2 (1976) aufgrund der mittleren Wichte des feuchten Bodens von $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ als locker gelagert eingestuft.

Im bodenkundlichen Sinne war die effektive Lagerungsdichte $L_d = \gamma_T + 0,009 \cdot \text{Tongehalt in \%}$ als "mittel" bis "hoch" einzustufen (ARBEITSGRUPPE BODENKUNDE, 1982).

Die berechneten Porenzahlen und -anteile entsprachen derjenigen gleichförmiger Sande (GRASSHOFF et al., 1982).

Der Wassergehalt $w = 9,6 \%$ bis $w = 13,6 \%$ war etwas höher, als es für schwach plastische Böden erwartet werden durfte. Der Wassergehalt hing von der Wichte, also auch vom Porenvolumen ab, und korrelierte mit Nährsalzen, Humusgehalt und Entnahmetiefe. Diese Zusammenhänge waren durchaus relevant, da die Messungen über einen längeren Zeitraum verteilt gewesen waren. Der unterschiedliche Wassergehalt des Bodens infolge von Niederschlägen pendelte sich immer wieder auf einen Gleichgewichtszustand ein.

9.2.2 Bodenchemische Kennwerte

Der Boden war mit den pflanzenverfügbaren Nährstoffen Kalium und Phosphat sowie mit dem Gesamtstickstoff, jeweils gemessen in mg/100 g Boden, gut bis sehr gut versorgt (Tab. 4). Die Bodenreaktion von 5,5 bis 5,8 zeigte eine saure bis schwach saure Reaktion und damit sehr gute Lebensbedingungen für Gräser an. Mit Humusgehalten von 1,3 % bis 1,6 % war der Boden als schwach humos einzustufen.

9.3 Eignung des Schergerätes

Die Scherfestigkeit wurde mit mechanischen Meßgeräten, d. h. die Scherkraft mit einem Dynamometer und der Weg mit einer Schieblehre gemessen. Die Benutzung mechanischer Meßgeräte war zunächst die einfachste Meßmethode im Feld.

Probemessungen hatten gezeigt, daß in der oberen Schicht des grasdurchwurzelten Bodens starke Verformungen auftraten. Deshalb wurde nicht nur die Verschiebung des gesamten Scherkastens, sondern auch die Verschiebung der vorderen (unbelasteten) Kante des Rasensodens gemessen, die der hinteren (scherkraftaufnehmenden) Kante gegenüberlag. Es zeigte sich, daß in den oberen etwa 8 cm des abzuscherenden Grassodens der durch die Scherkraft belastete Randbereich sehr stark zusammengedrückt wurde (Foto 9 und 10, abgescherter Bodenblock etwa 3,3 cm stark). Die unbelastete Kante des Grassodens hingegen, verschob sich erst kurz nachdem die maximale Scherkraft überschritten war. In den Abb. 23 und 24a, b wurden mit zunehmender Schertiefe die Scherverschiebungskurven aufgetragen. Beim mit 2 bezeichneten Scherspannungsverlauf handelte es sich um die auf die unverformte Scherfläche von $0,25 \text{ m}^2$ bezogenen Scherkräfte, während die jeweils auf die verkleinerte Scherfläche bezogenen durch den mit 1 gekennzeichneten Scherspannungsverlauf dargestellt sind.

Hieraus konnte geschlossen werden, daß in der oberen Schicht bis zum Bruch des Bodens nur ein kleiner Teil der gesamten Scherfläche zur Aufnahme der Scherkraft beitragen hatte. Hätte bereits bei Beginn des Schervorganges die gesamte Scherfläche zur Scherkraftübertragung beigetragen, so hätte sich die maximale Scherkraft wesentlich erhöht. Das bedeutete, daß die aufgrund der verkürzten Scherfläche berechneten Scherspannungen auf der sicheren Seite lagen und die weiteren Scherspannungen auf die gleiche Weise ermittelt werden konnten.

30

Abb.

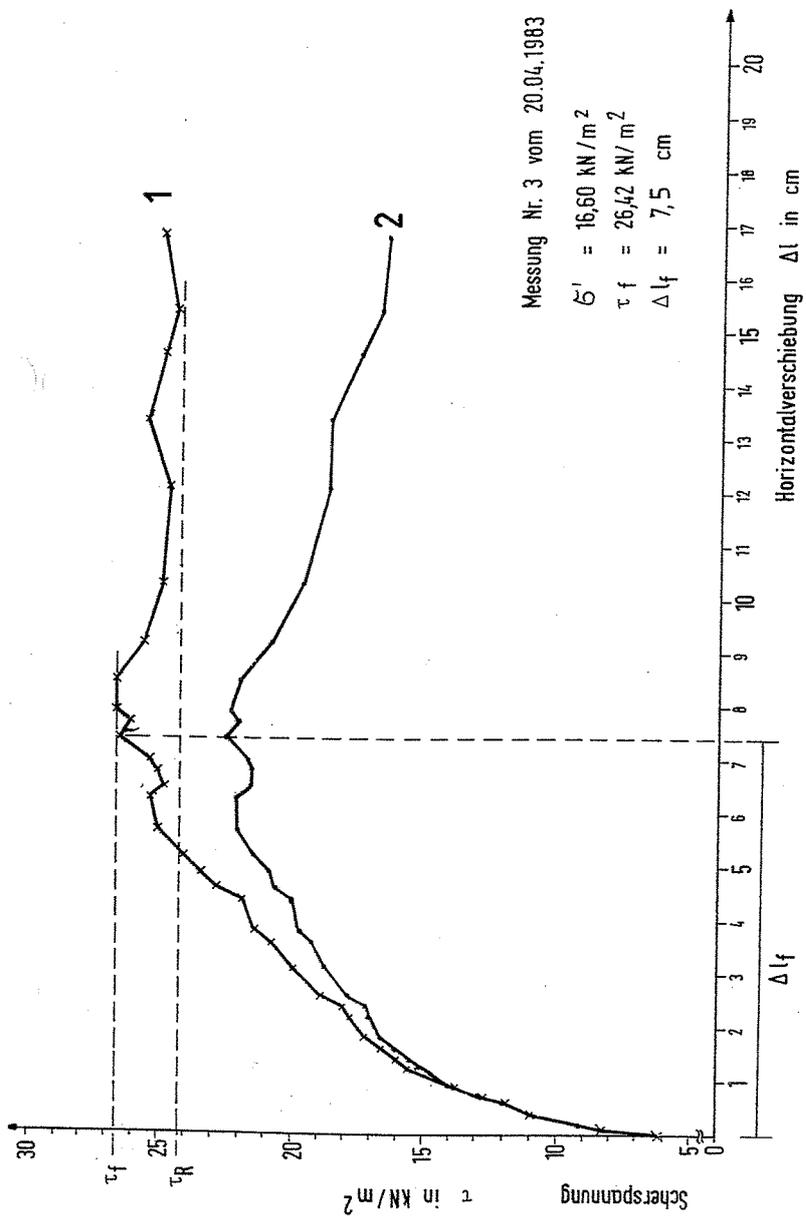


Abb. 23 : Scherverschiebungskurve eines durchwurzeltten Bodens in einer Tiefe von 3,4 cm.

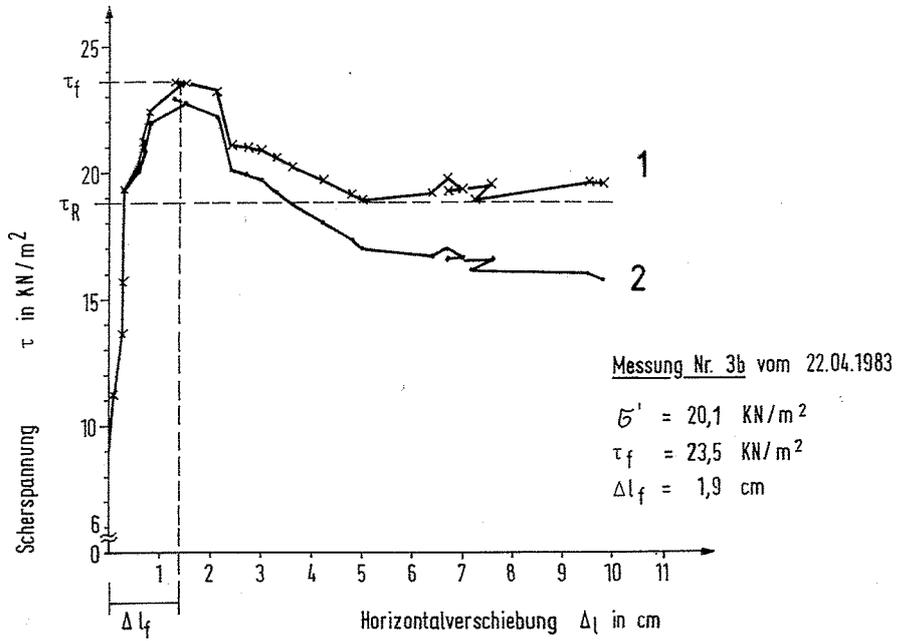


Abb. 24a: Scherverschiebungskurve eines durchwurzelten Bodens in einer Tiefe von 13,8 cm.

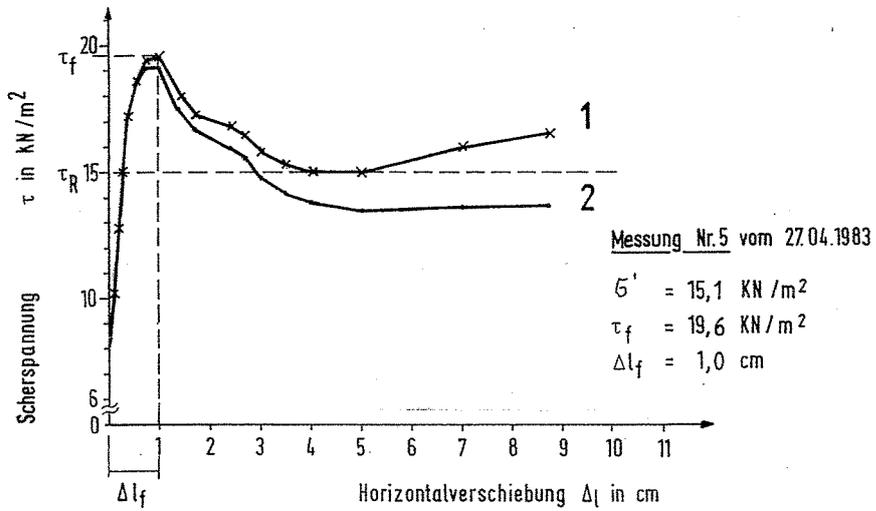


Abb. 24b: Scherverschiebungslinie eines durchwurzelten Bodens in einer Tiefe von 15,1 cm.

9.4 Ergebnisse der Scherfestigkeitsmessungen

Die dargestellten Scherspannungsverschiebungskurven zeigten deutlich, daß sich deren Form mit zunehmender Tiefe änderte. Daraus konnten folgende Schlüsse gezogen werden:

- Die maximale Scherspannung τ und die Gleitscherfestigkeit τ_r wurden mit zunehmender Tiefe deutlich geringer trotz steigender Normalkraft.
- Der Bruchschersweg Δl verkürzte sich mit zunehmender Tiefe.
- Die Fläche unter der Kurve, die in etwa ein Maß für die Scherarbeit darstellte, war in größeren Tiefen deutlich kleiner.
- Die Zusammendrückung des Bodenkörpers verringerte sich mit zunehmender Tiefe, d. h. die Elastizität nahm ab.

Zunächst wurden die maximalen Scherspannungen der gleichen Tiefenstufe in das in der Bodenmechanik übliche τ - σ -Diagramm (Abb. 25) eingetragen. Es zeigte sich, daß mit zunehmender Tiefe die Kohäsion sank und der Scherwinkel von $\varphi' = 49,5^\circ$ (Gl. 1) auf $\varphi' = 39,2^\circ$ (Gl. 3) abfiel. Aufgrund des noch zu geringen Meßwertumfanges konnte nicht von der wirksamen Kohäsion c' gesprochen werden, sondern vorerst von einem allgemeinen Kohäsionsglied c , da ein Einfluß aus der Durchwurzelung oder dem Humusgehalt nicht ausgeschlossen werden konnte.

Es kam nun darauf an, diejenigen Kennwerte herauszufinden, die neben der wirksamen Normalspannung für die Scherfestigkeit von signifikanter Bedeutung waren. In die multiple Ausgangskorrelation wurden folgende Kennwerte mit hinneingenommen (Bezeichnung der Formelzeichen vgl. Tab. 4):

$\sigma, T, \gamma_d, w, U, H_u, S_k, e_A$

Nach Variablenabbau und erneuter Berechnung ergab sich der folgende Zusammenhang (τ in kN/m^2):

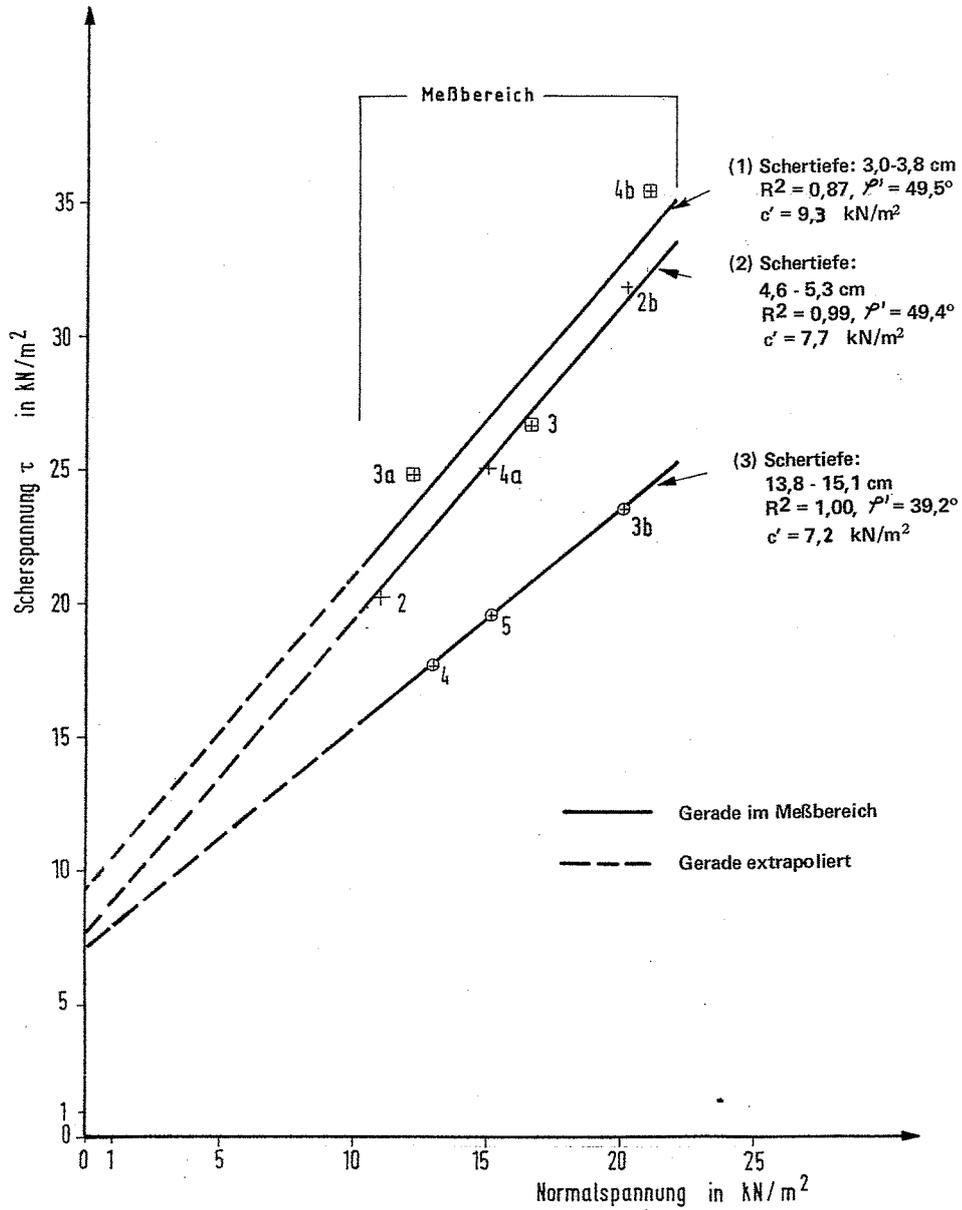


Abb. 25: Kastenscherversuche (in situ) an intensiv gepflegtem Rasen
(Meßreihe I vom 15.4. bis 27.4.1983)

$$\tau = 49,69 + 1,148 \cdot \sigma' - 0,691 \cdot T - 1,753 \cdot S_k \quad (9)$$

n = 11 Wiederholungen,

$$R^2 = 0,99$$

Die Scherfestigkeit sank mit zunehmendem Feinkorngehalt aber auch mit zunehmender Tiefe entgegen der Aussage der COULOMB'schen Bruchbedingung. Danach hätte mit zunehmender Tiefe, d. h. mit zunehmender Auflast, die Scherfestigkeit zunehmen müssen. Der Boden mußte also in den oberen Schichten gegenüber den unteren stark veränderte Eigenschaften aufweisen. Die Gleichung 9 hat aufgrund der geringen Wiederholungszahl ein sehr hohes Bestimmtheitsmaß, so daß hier noch kein relevantes Ergebnis erzielt wurde.

Vom Humusgehalt wurde hier ein wesentlich stärkerer Einfluß erwartet. Von vornherein hatte der Humusgehalt mit einem partiellen Regressionskoeffizienten von $r_p = 0,54$, das entsprach einem partiellen Bestimmtheitsmaß R^2_p von 29 %, den geringsten direkten Einfluß auf die Scherfestigkeit. Dieses Ergebnis war aber vergleichbar mit den Ergebnissen von SPORER (1985) und HORN (1981), die die Abhängigkeit der Scherfestigkeit von der organischen Substanz mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,4$, d. h., lediglich zu 40 %, nachgewiesen hatten. Der Humusgehalt ließ sich weiterhin in einem schwachen Zusammenhang mit dem Wassergehalt darstellen:

Ein weiterer Variablenabbau führte zu folgenden Ergebnissen (τ in kN/m^2 und Tiefe T in m):

$$\tau = 11,03 + 1,15 \cdot \sigma' - 0,654 \cdot T \quad R^2 = 0,91 \quad (10)$$

$$\tau = 5,358 + 1,2 \cdot \sigma' \quad R^2 = 0,58 \quad (11)$$

Der starke Abfall des Bestimmtheitsmaßes von Gleichung (10) nach Gleichung (11) zeigte den starken Einfluß der Tiefe auf die Scherfestigkeit. Die Tiefe T stand hier wahrscheinlich stellvertretend für die Durchwurzelung.

Für die praktische Berechnung stellte sich der folgenden Zusammenhang als vorteilhaft heraus:

$$\tau = 0,236 + 1,13^{**} \cdot \sigma' + 0,333^{**} \cdot (1/T) \quad (12)$$

n = 11 Wiederholungen

$$R^2 = 0,91$$

Eine Kurvendiskussion zeigte, daß die minimale Scherfestigkeit von 6,51 kN/m² in einer Tiefe von 0,128 m zu erwarten war (Abb. 34 in Kap. 10.5.2).

Nimmt man zusätzlich den Bruchschерweg Δl_f als Variable mit in die Berechnung hinein, so erhöht sich die Anpassung der Regression an die Meßwerte deutlich. Die Ausgangskorrelation mit den Kennwerten

σ' , T, Δl_f , w, U, H_u , Sk

führt zu folgenden gesicherten Zusammenhängen (τ in kN/m²):

$$\tau = 13,89 + 0,96^{*} \cdot \sigma' + 0,53^{*} \cdot \Delta l_f - 0,20^{*} \cdot U - 49,95^{*} \cdot w \quad (13)$$
$$R^2 = 0,99$$

$$\tau = 7,09 + 1,03^{*} \cdot \sigma' + 0,51^{*} \cdot \Delta l_f - 0,19^{*} \cdot U \quad R^2 = 0,98 \quad (14)$$

$$\tau = 1,62 + 1,14^{**} \cdot \sigma' + 0,47^{**} \cdot \Delta l_f \quad R^2 = 0,93 \quad (15)$$

$$\tau = 5,36 + 1,20^{*} \cdot \sigma' \quad R^2 = 0,58 \quad (16)$$

Die Schertiefe ließ sich nicht mehr statistisch absichern, da der Bruchschерweg, wie der Rechengang zeigte, ebenfalls von der Tiefe abhing, was mit der folgenden logarithmischen Funktion nachgewiesen werden konnte:

$$\ln(\Delta l_f) = 4,783 - 1,060 \cdot T$$

$$\Rightarrow \Delta l_f = e^{4,783 - 1,06 \cdot T} \text{ in cm}$$

$$R^2 = 0,96$$

Der Bruchschерweg Δl_f erschien neben der Normalspannung σ' hier als diejenige Variable, die den stärksten Zusammenhang mit der Scherfestigkeit aufwies.

Dieses auf den ersten Blick nicht ganz einleuchtende Ergebnis wurde aber durch einen Vergleich mit den Untersuchungen WALDRONs et al. (1981) verständlich, der die Scherkrafterhöhung unter anderem als Funktion der Scherverschiebung darstellte, welche wiederum von der Durchwurzelung abhängig war.

Die weiteren Untersuchungen mußten sich demnach auf die Erfassung und Einrechnung geeigneter Durchwurzelungskennwerte konzentrieren.

10. SCHERFESTIGKEITSMESSUNGEN AN EXTENSIV GEPFLEGTEM RASEN

10.1 Allgemeines

Die Untersuchungen am intensiv gepflegten Rasen hatten gezeigt, daß die Schertiefe neben der Normalspannung wesentlich stärker mit der Scherfestigkeit korrelierte als der Humusgehalt. Damit lag die Vermutung nahe, daß der Humusgehalt als Kennwert einer Gräserdurchwurzelung zur Bestimmung der Scherfestigkeit eines durchwurzelten Bodens nicht ausreichte. Es mußten demnach andere Werte zur Beschreibung der Gräserwurzeln im Boden gefunden werden. Deshalb wurden zunächst Methoden zur Ermittlung des Durchwurzelungsgrades und der Durchwurzelungsintensität der Gräserwurzeln im Boden in Abhängigkeit der Schertiefe entwickelt. Weiterhin wurden die Materialkennwerte von Einzelwurzeln ermittelt. Diese Kennwerte wurden jeweils parallel zu jeder weiteren Meßreihe ermittelt und in die Auswertung miteinbezogen, um denjenigen Wurzelkennwert zu finden, der möglichst schnell ermittelt werden konnte, aber dennoch besser mit der Scherfestigkeit korreliert als der Humusgehalt.

Das Ziel der Meßreihen II, III und VI an extensiv gepflegtem Landschaftsrasen war es demnach, den Zusammenhang zwischen Scherfestigkeit, einer quantitativen Abschätzung der Durchwurzelung und der Schertiefe herzustellen. Die Meßergebnisse wurden in den Tabellen 9 bis 14 aufgelistet und kennzeichnende statistische Maßzahlen angegeben, um die Anwendungsgrenzen der in den folgenden Kapiteln angegebenen Gleichungen zu beschreiben.

10.2 Standort

Hier handelte es sich um schwach humose, schwach tonige, schluffige Fein- und Mittelsande, deren Kornzusammensetzung parallel zu jedem Scherversuch überprüft wurde (Abb.26). An den Parzellen 3b des Horstrotschwingels, 1cus und 1cws

des Schafschwingels sowie 3c des Ausläufertreibenden Rot-schwingels sollte das bindige Verhalten des Bodens durch die Bestimmung der Plastizitätsgrenzen überprüft werden. Als besonders schwierig erwies sich die Bestimmung der Ausrollgrenzen, so daß der Plastizitätsbereich gar nicht oder nur sehr ungenau bestimmt werden konnte. Die Fließgrenze w_L lag zwischen 11 % und 18 %, entsprechend die Plastizitätsgrenze I_P unter 4 %, d. h., der Boden besaß keinen oder nur einen sehr geringen plastischen Bereich. Ein nennenswertes bindiges Verhalten konnte somit ausgeschlossen werden.

Die Lagerung wurde mit Hilfe des Proctorversuchs der Parzellen 3c des Horstrotschwingels und 1cus des Schafschwingels jeweils in einer Tiefe von 0,42 m bis 0,45 m bestimmt. Die Proctordichte ρ_{Pr} betrug für die Horstrotschwingelparzelle $2,0 \text{ g/cm}^3$ und für die Schafschwingelparzelle $2,04 \text{ g/cm}^3$ mit einem optimalen Wassergehalt w_{Pr} von 9,2 % und 7,7 %. Der Verdichtungsgrad D_{Pr} ist mit 82,8 % der Proctordichte, berechnet für die Mittelwerte der Meßreihen II, III und IVa, etwa gleich dem Verdichtungsbereich der Schafschwingelparzellen von 81,1 % bis 87,5 % der Proctordichte. Nach GRASSHOFF et al. (1982) handelte es sich hierbei um sandige und kiesige Schluffe.

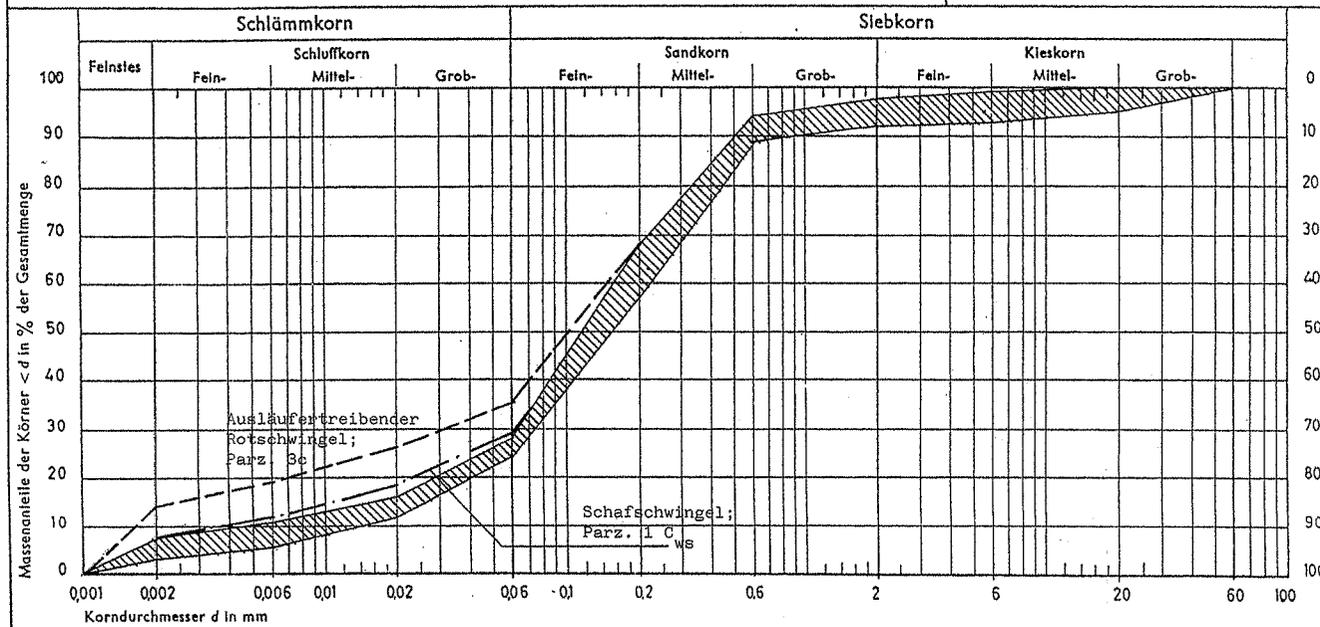
Zur Durchführung der Scherspannungsmessungen an wassergesättigtem Boden wurden die Bodenblöcke vor dem Abscheren innerhalb des Scherrahmens ca. 12 Stunden gewässert. Foto 13 und 14 zeigen deutlich die Grenze zwischen dem intensiv durchwurzelten oberen Teil und dem weniger durchwurzelten unteren Teil des Bodenblocks, woraus nach Entfernen des Stahlrahmens Boden ausgespült wurde. In der Scherfuge wurden Sättigungswerte S_r von 0,84 bis 0,86 erreicht. Nur in der oberen intensiver durchwurzelten Bodenschicht blieb der Boden trotz eines Wassergehaltes von bis zu 16,5 % aufgrund der Durchwurzelung formstabil. Daß bei den wassergesättigten Parzellen trotz gleichen Wassergehaltes höhere Sättigungswerte erreicht wurden, ist auf höhere Ton- und Schluffgehalte, d. h. weniger Poren, zurückzuführen.

Abb. 26: Körnungsband zu den Meßreihen II - IV und zum Ausläufertreibenden Rotschwingel

Probe entn. am: 9/83-10/85

Art der Entn.: gestört

Arbeitsweise: kombiniert



Bodenart:	siehe Text
Tiefe:	0,4 - 0,45 m
$U = d_{60} / d_{10}$:	siehe Tabellen 9, 10, 12, 13 + 14

In Tab. 11 sind die wichtigsten Kennwerte der Rahmenscher-
spannungsmessungen aufgeführt. Die Trockendichte war niedri-
ger und entsprechend das Porenvolumen höher als bei den Mes-
sungen im Feld. Der höhere Porenanteil konnte auch auf das
verfahrensbedingte mehrmalige Herausstechen der Bodenprobe
zurückzuführen sein.

Die Meßreihen II und III unterschieden sich hinsichtlich
ihrer erdbaulichen und bodenchemischen Kennwerte nur unwe-
sentlich voneinander.

10.3 Durchwurzelung

10.3.1 Allgemeines

Die Durchwurzelung der Gräser wurde beschrieben durch die
Durchwurzelungsintensität N_{wg} , d. h., die Wurzelzahl, und
den Durchwurzelungsgrad A_{wg} , d. h., die Wurzelquerschnitts-
fläche, beide bezogen auf einen m^2 einer horizontalen Scher-
fläche.

10.3.2 Durchwurzelung zur Meßreihe II

Die Gewinnung der Bodenproben zur Bestimmung der Durchwurze-
lung erfolgte nach Methode A, d. h. unter Verwendung eines
Erdbohrers (Tab. 5a bis d). Zu jeder der 11 Scherfestig-
keitsmessungen wurden drei Bodenzylinder entnommen und ent-
sprechend den vorgegebenen Schertiefen mindestens jedoch al-
le 2 cm untersucht. So waren pro Sorte und Tiefenstufe min-
destens 6 Stichproben gewonnen worden, wie es von OPITZ VON
BOBERFELD (1973) unter Hinweis auf entsprechende Literatur
gefordert wurde. Damit wurden insgesamt 48 Schnittflächen
untersucht, woraus jeweils an 3 mal 30 Wurzeln der Durchmes-
ser gemessen wurde. Zur Verkleinerung dieser Datenmenge war
es notwendig, alle Meßwerte zu Mittelwerten zusammenzu-
fassen, deren Zugehörigkeit zur gleichen Grundgesamtheit

über den T-Test für kleine Stichproben nachgewiesen wurde. In der Tab. 5a und c wurden die einzelnen Mittelwerte (quer überstrichen) der Durchmesser D, der Querschnittsflächen A der Wurzeln und die Wurzelanzahlen N zusammengestellt, die in der Querschnittsfläche des Erdbohrers (= 78,54 cm²) gemessen wurden. In den Tab. 5b und 5d wurden die Wurzelsummen mit dem Faktor 127,32 auf 1 m² umgerechnet und als Durchwurzelungsintensität N_w bezeichnet. Mit Hilfe der Durchwurzelungsintensität wurde die Summe der Durchmesserlängen pro m² und die Summe der Wurzelquerschnittsflächen pro m² bestimmt, die als Durchwurzelungsgrad A_w bezeichnet wurde. Da der Durchmesser quadratisch in die Fläche eingeht, wurde die Berechnung einer mittleren Wurzelquerschnittsfläche aus den jeweiligen einzelnen gemessenen Durchmessern berechnet und danach summiert. Die Berechnung der mittleren Querschnittsfläche aus einem mittleren Durchmesser hätte zu einem Fehler von bis zu 25 % bezogen auf den Maximalwert geführt und wurde deshalb vermieden. Die Ergebnisse sind in Tab. 5 aufgelistet, wobei sich die unterstrichenen Werte auf die jeweilige Schertiefe beziehen.

Die Wurzel Durchmesser und der Wurzelquerschnittsflächen hingen sehr deutlich von der Bodentiefe ab. Weiterhin waren deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Rasensorten besonders in den oberen Bodenschichten zu erkennen. Als besonders geeignet zur Beschreibung dieser Zusammenhänge erwiesen sich außer polynomischen Kurven auch Hyperbelkurven. Im Kap. 12.1.2 wurden einige Beispiele berechnet.

10.3.3 Durchwurzelung zur Meßreihe III

Hierbei wurden die Bodenproben nach Methode B2 (Stechzylinder) gewonnen. Aus der Erhöhung der Wiederholungen ergab sich die zu erwartende Verkleinerung (hier: Halbierung) des 95 % -Vertrauensbereiches gegenüber der Methode B1 (Stechrahmen) (Tab. 6). Die ungleichen Wiederholungszahlen waren

entweder auf einen einen fehlerhaften Bodenblock oder auf ein Zerbröckeln der Stechzylinder nach der Entnahme aus dem Bodenblock zurückzuführen. Die gemessenen Wurzelzahlen fügten sich gut in diejenigen der anderen Meßreihen ein. In einer Tiefe von 27 cm bis 30 cm hatte sich offenbar ein Wurzelhorizont ausgebildet, da hier die ehemalige Pflugsohle lag. Unterhalb von 30 cm Tiefe nahm die Durchwurzelung sehr schnell ab. Die große Differenz zwischen den Schafschwingelparzellen 1 und 2 konnte einmal sorten-, aber auch methodenbedingte Ursachen haben.

10.3.4 Durchwurzelung zur Meßreihe IV

Die Durchwurzelung der Meßreihe IV wurde nach Methode B1 ermittelt (Tab. 7 und 8). Die Durchwurzelung des Bodens durch den Schafschwingel war bis in 29,5 cm Tiefe konstant geblieben, während besonders die Wurzelzahl des Ausläufertreibenden Rotschwingels gegenüber dem Horstrot- und Schafschwingel mit zunehmender Tiefe sehr stark abnahm. Hier lag allerdings ein stark erhöhter Tonanteil im Boden vor, der das Wurzelwachstum beeinträchtigte (vgl. Tab. 7). Die Streubereiche der Ergebnisse, die mit den Methoden A und B2 erzielt wurden, hatten gleiche Größenordnungen, wie diejenigen, die mit der Methode B1 ermittelt wurden. (Tab. 8).

10.4 Mechanische Materialkennwerte der Gräserwurzeln

Über Zugfestigkeitsmessungen an Gräserwurzeln berichten u. a. BOSKOVIC (1975), SCHUBERT (1980), SCHIECHTL (1983) und LICHTENEGGER (1985). Es wurden hier lediglich Mittelwerte oder Größenbereiche der Zugfestigkeit von Gräserwurzeln angegeben, jedoch kein gesetzmäßiger Zusammenhang zwischen einem möglichst einfach zu bestimmenden Wurzelkennwert und der Wurzelzugfestigkeit oder der Wurzelzugkraft. Einen solchen Zusammenhang hatte TURMANIA bereits 1965 an Gehölzwurzeln dargestellt.

In Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Materialprüfung wurden Zugfestigkeitsmessungen an 32 Wurzeln von *Festuca rubra* ssp. *rubra*, Sorte "Barfalla", durchgeführt. Ein Bodenzylinder von 10 cm Durchmesser und 10 cm Höhe wurde ausgestochen und sofort in das Labor gebracht. An jeder der zwischen 40,1 mm und 50,8 mm langen Testwurzeln wurde mit einem Maßmikroskop (30-fache Vergrößerung) in 10-facher Wiederholung der kleinste Durchmesser D_{min} gemessen. So wurde diejenige Stelle bestimmt, wo die Wurzel am wahrscheinlichsten riß. Klemmbrüche traten nicht auf.

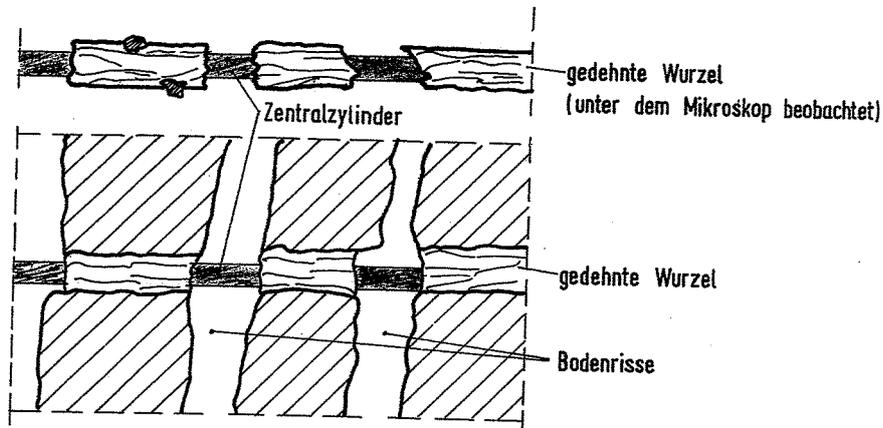


Abb. 27: Schutzmechanismus der Wurzel vor Verletzung bei Bodendeformationen

Unter dem Lichtmikroskop beobachtete der Verfasser, daß zunächst die äußere Schicht zerriß, wahrscheinlich die primäre Wurzelrinde (vgl. STRASBURGER, 1983). Bei weiterer Dehnung blieben die äußeren Bruchstücke als eine Art "Manschette" auf dem inneren elastischen Zentralzylinder, der sich bei Entlastung wieder in seine Ausgangsform zurückverformte, sich also ideal elastisch verhielt (Abb. 27). Dieser Mechanismus ist sehr nützlich bei leichten Deformationen des die Wurzel umgebenden Bodens. Die äußere zerrissene Rindenschicht wirkt wie eine Schutzmanschette, in der der innere

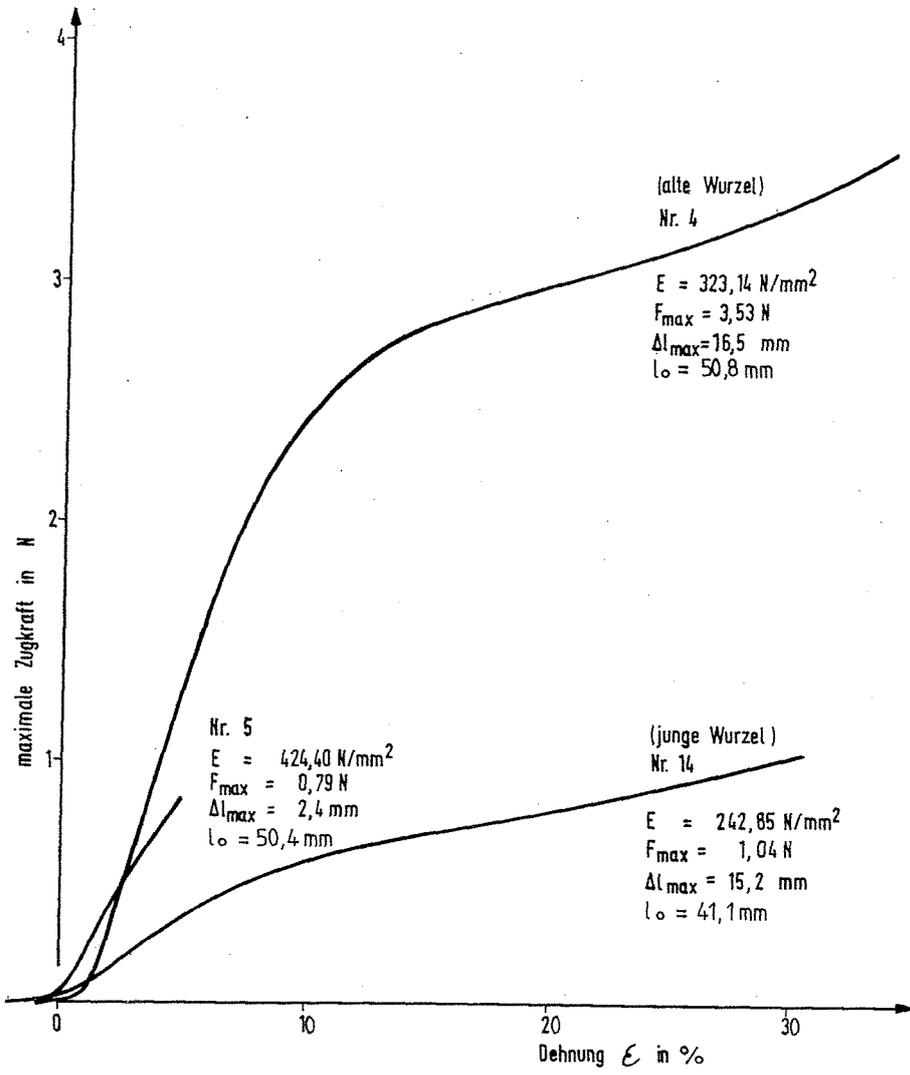


Abb.28: Typische Bruchdehnungslinien alter und junger Wurzeln (Horstrotschwengel, Sorte: Barfalla)

Teil der Wurzel mit einem sehr geringen Reibungswiderstand gleitet. Der Zentralzylinder reibt auf diese Weise nicht sofort oder gar nicht an festen rauhen Bodenpartikeln, wird nicht verletzt und bleibt, sofern die Bruchdehnung nicht überschritten wird, funktionsfähig.

Die Wurzeln wurden aufgrund ihrer Farbe und der Rindenbeschaffenheit in alte und junge Wurzeln eingeteilt. Als "jung" wurden dünne, helle Wurzeln angesehen, als "alt" starke grau-braune, wobei schon mit bloßem Auge deutlich die bastartige Wurzelrinde zu erkennen war.

Aus den Bruchdehnungskurven typischer alter und junger Wurzeln (Abb. 28) konnte hinsichtlich des Elastizitätsverhaltens geschlossen werden, daß mit zunehmendem Alter zwei verschiedene Zellschichten die Zugfestigkeit der Wurzeln beeinflussten. In der ersten Phase der Dehnung trug die gesamte Querschnittsfläche der Wurzel zur Zugfestigkeit bei. Nach dem Reißen einer ersten, weniger elastischen und offenbar auch weniger zugfesten Schicht blieb eine zweite, elastischere und zugfestere Schicht bis zum Bruch wirksam. Die innere elastischere und zugfestere Schicht war von Anfang an in der Wurzel vorhanden, während die äußere erste Schicht sich erst mit zunehmendem Alter ausgebildet hatte. Aus den Bruchdehnungskurven wurde der Elastizitätsmodul als Tangentenmodul bestimmt und in Abb. 29 in Abhängigkeit der minimalen Durchmesser aufgetragen. Auch hier wurde bereits ein gewisser Unterschied zwischen jungen und älteren Wurzeln deutlich, deren Elastizitätsmoduln größer sind, d.h. sie sind weniger elastisch als jüngere.

Der Unterschied zwischen älteren und jüngeren Wurzeln wird auch durch Abb. 30 erkennbar, wo die Bruchdehnung ϵ_B gegenüber der maximalen Zugspannung aufgetragen wurde. Die allgemeine Zuordnung BOSKOVICS (1975): Der Zusammenhang zwischen einer zunehmenden "Wurzeldeformation" und einer zunehmenden "spezifischen Festigkeit" konnte für diesen Fall bestätigt werden, faßte man alte und junge Wurzeln zusammen. Jüngere

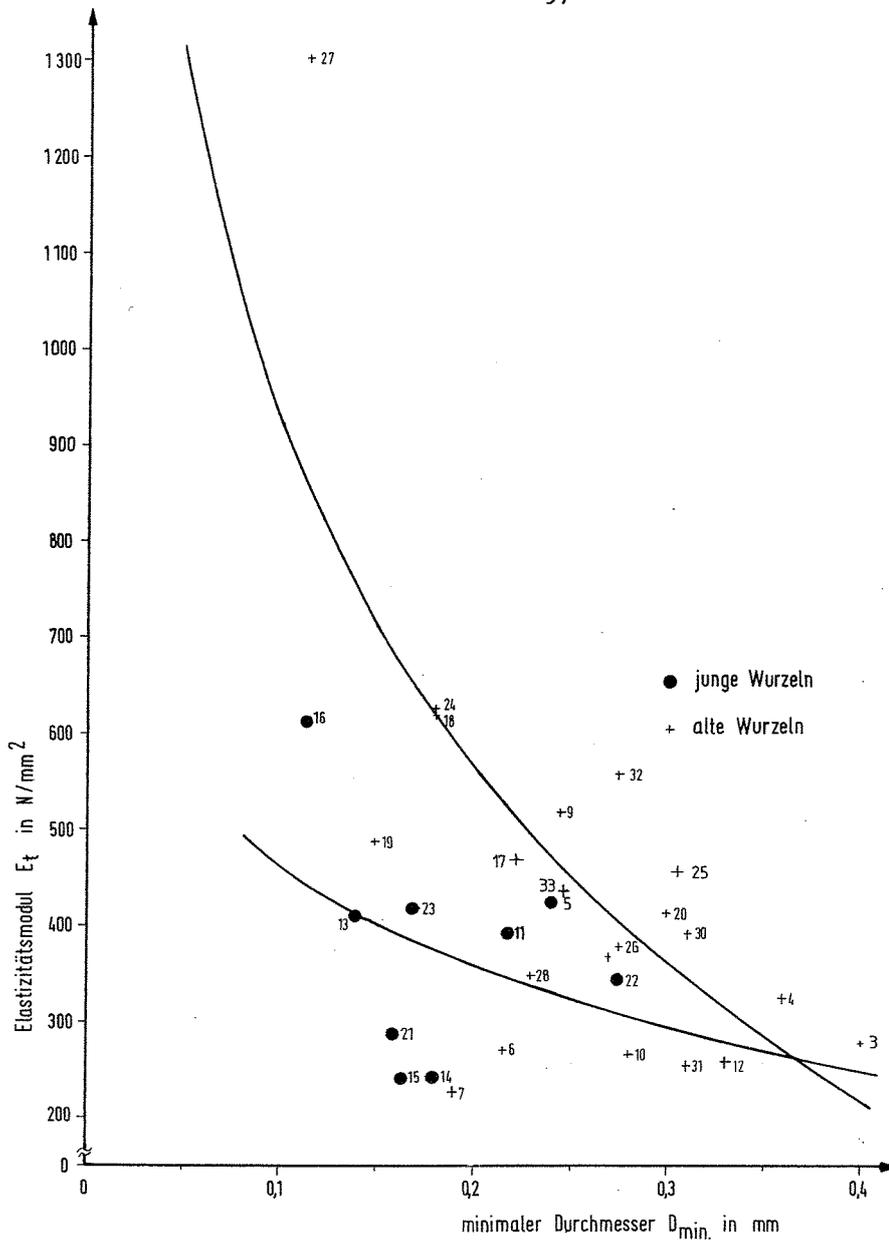


Abb. 29: Elastizitätsmodul E_t in Abhängigkeit der minimalen Durchmesser D_{min} von jungen und alten Wurzeln. (Horstrotschwengel, Sorte Barfalla). Die Kurven sind berechnet.

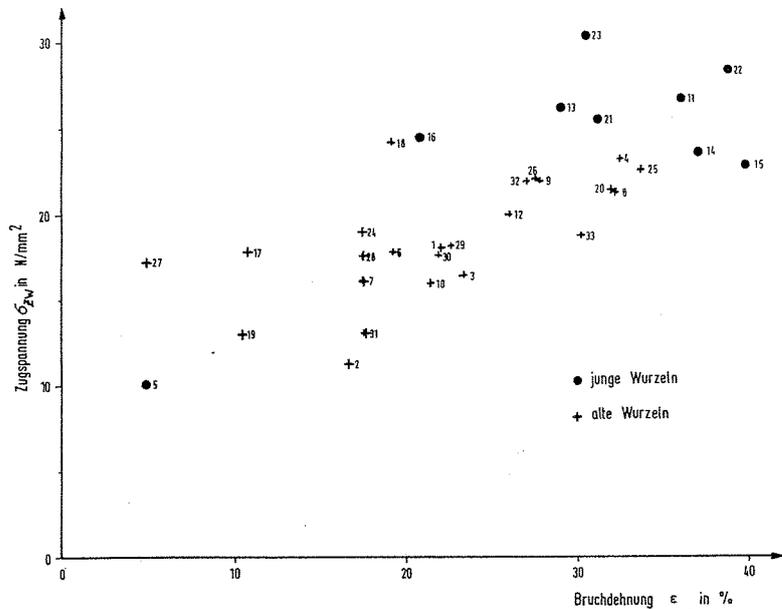


Abb. 30: Zugspannung am mittleren minimalen Querschnitt in Abhängigkeit der Bruchdehnung (Horstrotschwengel, Sorte Barfalla)

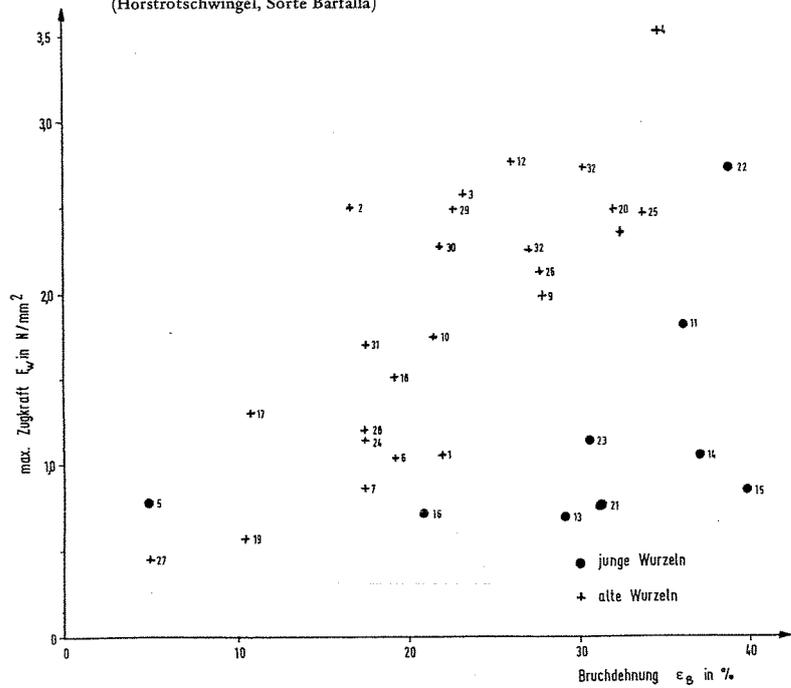


Abb. 31: Maximale Zugkraft in Abhängigkeit der Bruchdehnung (Horstrotschwengel, Sorte Barfalla)

Wurzeln wiesen bei gleicher Bruchdehnung eine wesentlich höhere Zugspannung σ_{zw} , jedoch eine geringere Zugkraft auf (Abb. 31). Die Wurzel Nr. 5 fügte sich nicht in die Gruppe der jüngeren Wurzeln ein. Dem Bruchverhalten zufolge (Abb. 27) war sie entweder verletzt oder hatte von vornherein einen geschwächten Querschnitt.

BOSKOWIC (1975) und SCHUBERT (1978) wiesen darauf hin, daß ein deutlicher Abfall der maximal aufnehmbaren Zugfestigkeit mit größer werdendem Durchmesser besteht. Dies gilt besonders für ältere Wurzeln. TURMANIA (1965) beschrieb diese Erscheinung ebenfalls und stellte die maximal aufnehmbare Zugspannung von Gehölzwurzeln in einen funktionalen Zusammenhang mit dem Durchmesser D der Wurzel:

$$\sigma_z = a + b (1 / D) \quad a, b = \text{Konstanten}$$

Ähnliche Zusammenhänge werden von einigen Verfassern auch in neuerer Zeit dargestellt (GREENWAY, 1987). Diese Untersuchungen beweisen, daß sich die Zugfestigkeit der Wurzeln mit zunehmendem Alter verringert. Man kann demnach nicht davon ausgehen, daß die Zugfestigkeit an jeder Stelle des Wurzelquerschnitts gleich ist, wie es bei toten Baustoffen der Fall ist. Im vorliegenden Fall stellte eine lineare Regression zwischen der Wurzelquerschnittsfläche und der maximalen Zugkraft in Newton den statistisch gesichertsten Zusammenhang dar (Abb. 32):

$$F_w = 0,3365 + 26,961^{**} \cdot A_{w, \min} \quad R^2 = 0,82 \quad (17) \\ n = 31$$

Hierbei ist A_{\min} die aus dem kleinsten gemessenen Durchmesser D_{\min} berechnete Querschnittsfläche in mm^2 .

Die Ergebnisse der bisherigen Zugfestigkeitsmessungen deuten jedoch darauf hin, daß die Festigkeitselemente der Gräserwurzeln mit zunehmendem Alter verhältnismäßig langsamer mitwachsen als z. B. die Versorgungszellen. Gerade in der

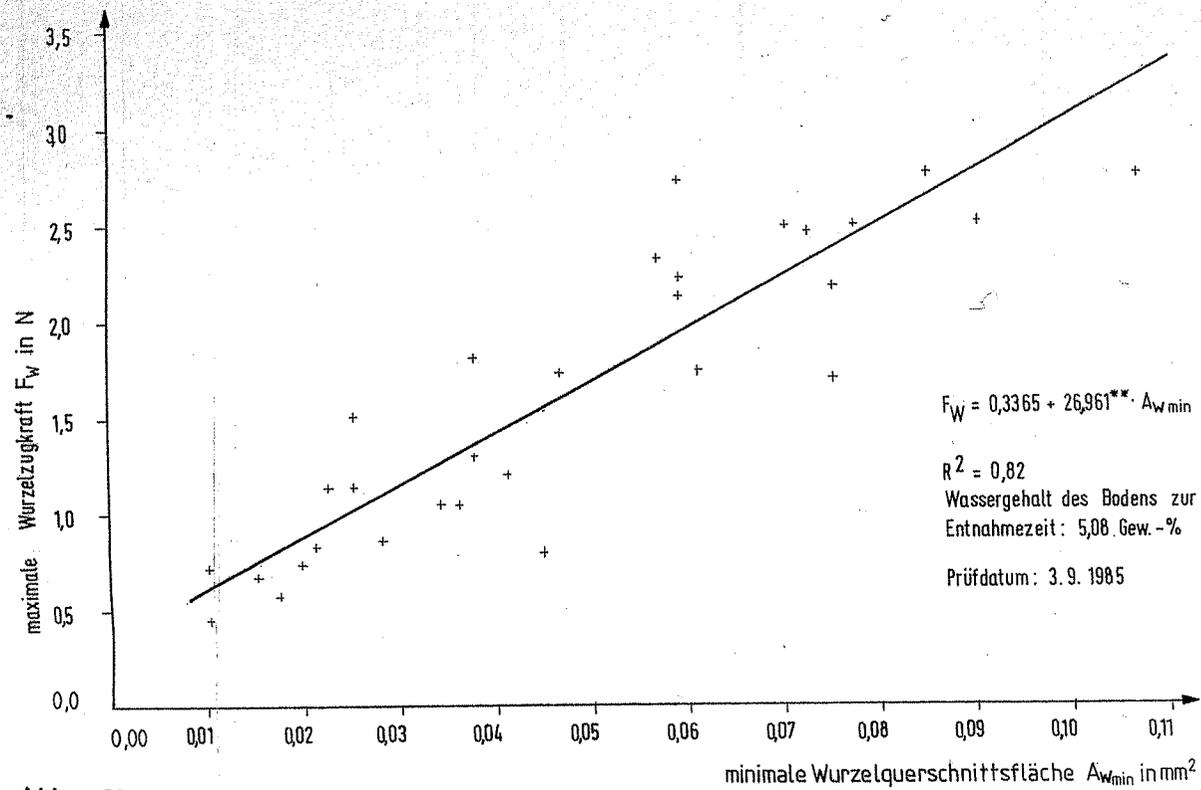


Abb. 32:

Lineare Regression zwischen der Wurzelquerschnittsfläche und der maximalen Zugkraft von
HORSTROTSCHWINGEL (Sorte "Barfalla")

Gemessen: Bundesanstalt für Materialprüfung

Jugend hatten die noch wenigen Wurzeln die vordringliche Aufgabe, die Pflanze im Boden zu verankern und Bodenbewegungen der oberen, lockeren Schichten auszugleichen. Es konnte angenommen werden, daß Bodenverschiebungen von ca. 3 mm bis 4 mm von Gräserwurzeln schadlos überstanden werden.

Die Zugfestigkeit der Gräserwurzeln hängt von sehr vielen Faktoren ab, z. B. vom Nährstoff- und Wasserhaushalt und erdbaulichen Kennwerten des Bodens. Daher sollten die gemessenen Wurzelzugfestigkeiten nur auf Gräser übertragen werden, deren Standort den hier beschriebenen entsprechen.

10.5 Meßreihe II

10.5.1 Allgemeines

Die Meßreihe II hatte neben der Erprobung einer elektronischen Kraft- und Wegmessung im Feld die folgenden Ziele :

- Auswahl eines geeigneten Kennwertes zur Beschreibung von Gräserwurzeln im Boden, deren Einrechnung in die COULOMB'sche Bruchbedingung und
- Vergleich des Scherfestigkeitsverlaufes mit zunehmender Schertiefe zwischen dem intensiv gepflegten und extensiv gepflegten Rasen (Landschaftsrasen).

Dabei dienten die extensiv gepflegten Horstrotschwingelparzellen Nrn. 1 bis 5 als Versuchsobjekte. Als zusätzliche Zielgrößen wurden der Bruchschерweg und die Probenstauchung mit angegeben. Beide Werte hingen proportional von der Durchwurzelung ab (Tab. 9). Die Anwendungsgrenzen der Kennwerte, die zur Berechnung der Scherfestigkeit aus den Korrelationsgleichungen dienen, wurden durch die Minimal- und Maximalkennwerte festgelegt. Die Schertiefe wurde zunächst auf maximal 17 cm beschränkt, um einen Vergleich mit den Messungen am intensiv gepflegten Rasen herstellen zu können.

10.5.2 Auswahl geeigneter Wurzelkennwerte zur Beschreibung der Scherfestigkeit

Die Ergebnisse der Meßreihe II wurden zunächst in Form einer Schar von Schergeraden in einem τ - σ - Diagramm in Abhängigkeit einzelner Tiefenstufen in Abb. 33 dargestellt. In der Vergrößerung des Scherwinkels und der Kohäsion mit zunehmender Durchwurzelung im Boden war deutlich die bewehrende Wirkung der Durchwurzelung zu erkennen.

Die Abhängigkeit der Scherfestigkeit von der Schertiefe konnte mit der folgenden Gleichung beschrieben werden:

$$\tau = c + a \cdot \sigma' + b \cdot (1/T) - d \cdot \gamma_a + f \cdot w - g \cdot T_{on} - i \cdot S_k + j \cdot H_u$$

n = 11 Wiederholungen,
a, b, c, ..., j = Konstanten

Als einfaches Rechenmodell mit einer immer noch hohen statistischen Sicherheit ließ sich mit nachstehender Gleichung angeben:

$$\tau = 3,38 + 0,998^{**} \cdot \sigma' + 0,628^{**} \cdot (1/T) \quad (18)$$

n = 11 Wiederholungen; $R^2 = 0,91$

Die Kurve ist Abb.34 auf der Seite 107 vergleichend zu der Scherfestigkeitskurve des intensiv gepflegten Rasens dargestellt. Die Ergebnisse zeigten, daß die Schertiefe als Kennwert zur Beschreibung der Durchwurzelung wesentlich besser geeignet war als der Humusgehalt, wie es bereits beim intensiv gepflegten Rasen festgestellt worden war. Damit ließ sich eine Scherfestigkeitskennlinie berechnen, die bis zu einer Grenztiefe T_g abfällt, danach wieder ansteigt und sich asymptotisch der Schergeraden des undurchwurzelten Bodens annähert. Eine Kurvendiskussion hat ergeben, daß die minimale Scherfestigkeit von 10,1 kN/m² in einer Tiefe von 0,187 m auftritt.

Scherspannung τ in kN/m²

4

3

30

25

20

15

10

5

1

0

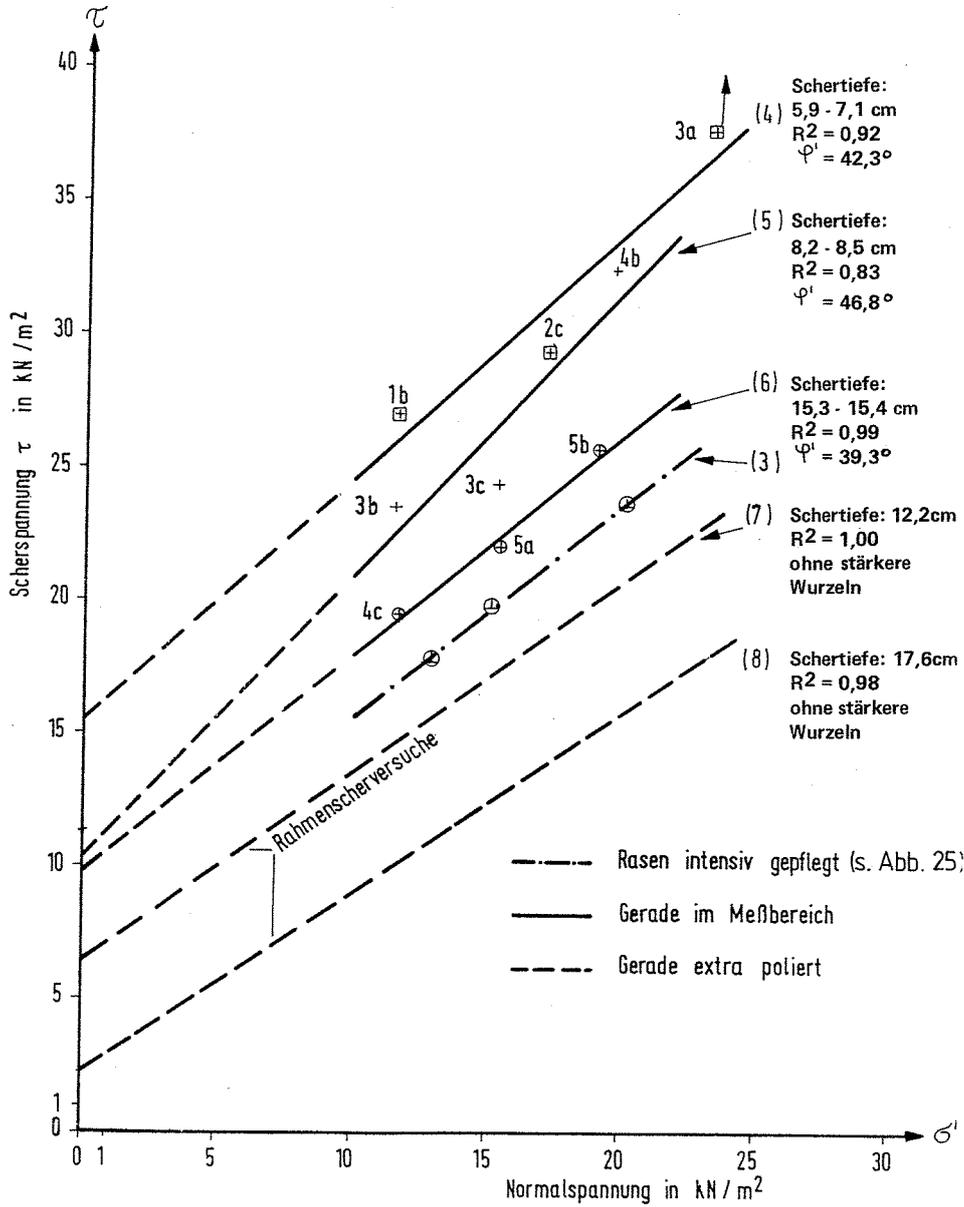


Abb. 33: Kastenscherversuche (in situ) und Rahmenscherversuche an extensiv gepflegtem Horst-Rotschwengel (Meßreihe II vom 12.7. bis 28.10.1983) Landschaftsrasen

Für baupraktische Berechnungen reicht die Angabe solcher Scherfestigkeitskennlinien bzw. Grenztiefen aus, die im Einzelfall vor Ort nachgewiesen werden müssen und rechnerisch als eine Art Kohäsion behandelt werden können.

Um nicht jedesmal eine solche große Anzahl von Scherversuchen vor Ort durchführen zu müssen, mußte nach Verfahren gesucht werden, die es erlaubten auch eine indirekte Beurteilung der Scherfestigkeit durchwurzelter Böden durchführen zu können. Ein solches Verfahren erleichterte auch die Unterscheidung der Wirkung der einzelnen zu den Scherfestigkeitsmessungen herangezogenen Gräserarten.

Als geeignete Kennwerte zur Beschreibung der Durchwurzelung erwiesen sich zunächst Durchwurzelungsgrad A_{wg} und die Summe der Wurzelzugkräfte pro m^2 (F_{wg}). Es wurden die folgenden Beziehungen gefunden:

$$\tau = 3,93 + 1,13 \cdot \sigma' + 0,00367 \cdot A_{wg} \quad R^2 = 0,88 \quad (19)$$

$$\tau = 2,10 + 1,16 \cdot \sigma' - 0,1249 \cdot F_{wg} \quad R^2 = 0,86 \quad (20)$$

n = 11 Wiederholungen

Hierbei sind:

A_{wg} = Durchwurzelungsgrad in mm^2 Wurzelquerschnittsfläche pro m^2 Scherfläche,

F_{wg} = $F_w \cdot N_{wg}$ = Summe der Wurzelzugkräfte pro m^2

mit Gleichung 17

$$F_w = (0,3365 + 26,961 \cdot A_w) / 1000 \text{ in kN}$$

und

\bar{A} = mittlere Wurzelquerschnittfläche in mm² nach

(Tab. 5a bis d) sowie

N_{wG} = Durchwurzelungsintensität bezogen auf 1 m².

Faßte man den Regressionskoeffizienten der Gleichung 19 des Durchwurzelungsgrades A_{wG} als σ_{zw} in kN/mm² auf, so ergab sich eine Zugfestigkeit von 3,67 N/mm². Da diese Zugfestigkeit erheblich unter der im Labor gemessenen mittleren Zugfestigkeit von $\sigma_{zw} = 20,2$ kN/mm² lag, (vergl. Abb. 30, Seite 98), kann hieraus geschlossen werden, daß nur ein Teil der Wurzeln zum Scherwiderstand beitrugen. Auch die Gleichung 20 zeigte, daß nur etwa 12,5 % des zur Verfügung stehenden Zugkraftpotentials der Wurzeln mobilisiert werden konnte.

Das bedeutet wiederum, daß die Summe der Wurzelzugkräfte im Boden nicht mit dem Faktor 1 in die Wurzelkohäsion umrechenbar war. Die Gründe hierfür konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht im einzelnen geklärt werden. Sehr viele Wurzeln wurden z. B. nur aus dem Boden herausgezogen ohne zu reißen (Foto 9).

Da die Ermittlung der Wurzelquerschnittsflächen sehr zeitaufwendig und arbeitsintensiv war und nach einfacheren Methoden der Ermittlung der Scherfestigkeit gesucht wurde, lag es nahe die sehr schnell zu bestimmende Durchwurzelungsintensität N_{wG} zur Grundlage der weiteren Untersuchungen zu machen. Hierzu wurde die folgende Beziehung gefunden :

$$\tau = 0,38 + 1,151 \cdot \sigma' + 0,00017 \cdot N_{wG} \quad (21)$$

n = 11 Wiederholungen

$R^2 = 0.81$

10.5.3 Vergleich des Scherfestigkeitsverlaufes zwischen extensiv und intensiv gepflegtem Rasen

Die Scherversuche der Meßreihe II waren in den gleichen Tiefenstufen durchgeführt worden wie diejenigen am intensiv gepflegten Rasen, sodaß die Messungen verglichen werden konnten (Abb.34). Der Verlauf der Scherfestigkeit stellte sich in der für durchwurzelte Böden typischen Hyperbelkurve dar. Ließ man die Schertiefe gegen Unendlich gehen, so bildete der lineare Teil der Gleichungen die Schergerade des undurchwurzeltten Bodens. Der intensiv gepflegte Rasen wies sein Scherfestigkeitsminimum in einer Tiefe von 12,8 cm mit einer minimalen Scherspannung von 5,45 kN/m² auf. Der Landschaftsrasen hingegen erreichte seine Grenztiefe erst bei 18,7 cm mit einer minimalen Scherfestigkeit von 10,1 kN/m². Da der aufsteigende Ast der Kurve aber noch nicht durch Messungen belegt wurde, waren weitere Messungen notwendig um die tatsächliche Grenztiefe der Scherfestigkeit des Landschaftsrasens festzustellen.

10.7 Meßreihe III

10.7.1 Allgemeines

Die Meßreihe II wurde durch die Meßreihe III ergänzt und zur Meßreihe II/III zusammengefaßt (Tab. 10). Die Meßreihe III wurde der Vergleichbarkeit halber an den Parzellen 1 bis 3 durchgeführt, die bereits für die Meßreihe II herangezogen wurden. Folgende Fragen sollten geklärt werden:

1. Nach Abb. 30 war das durchschnittliche Scherfestigkeitsminimum frühestens bei 0,20 m Tiefe zu erwarten. Deshalb war es notwendig die Grenztiefe T_g , bei der die Scherfestigkeit am extensiv gepflegten Rasen minimal wird, auch experimentell nachzuweisen. Hierzu wurde ein innerer Stahlrahmen von 60 cm Höhe verwendet.

Scherspannung in kN / m²
 τ_{Emin}^{10}
 τ_{min}^5

Abb. 34:

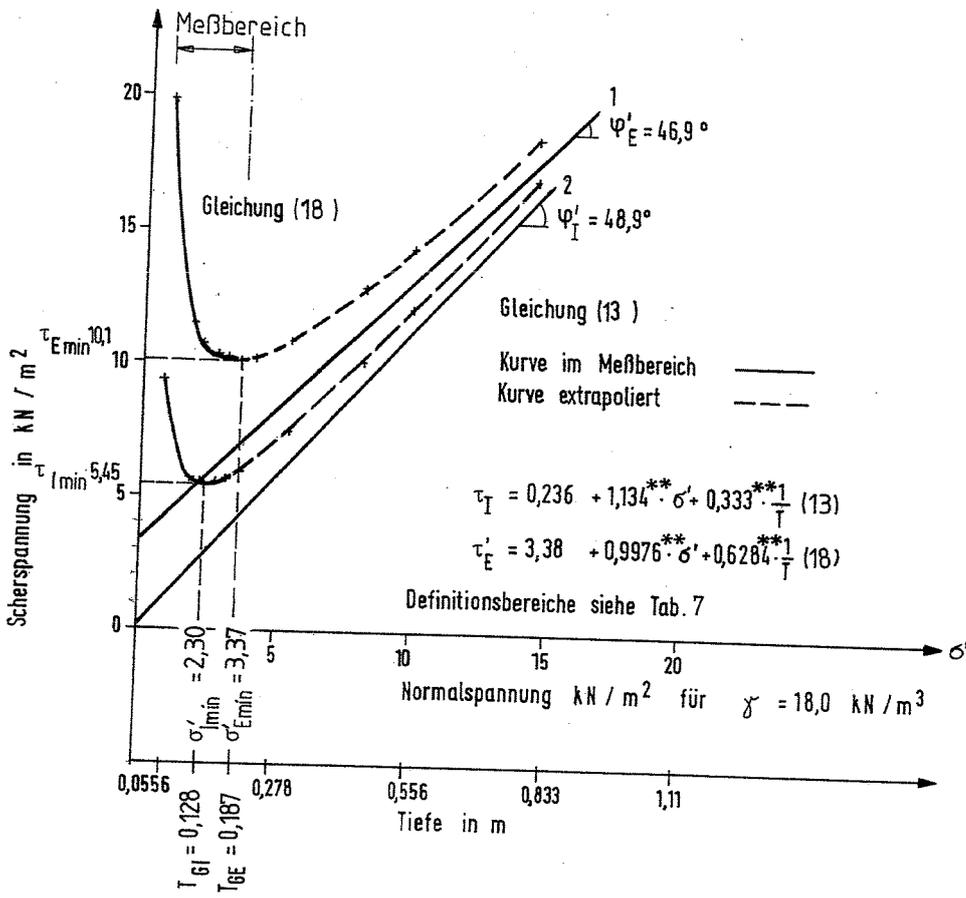


Abb. 34: Vergleichende Ermittlung der Grenztiefen T_G für intensiv und extensiv gepflegten Rasen.

2. Parallel zu den Kastenscherversuchen vor Ort wurden Rahmenscherversuche im Labor des Instituts für Grundbau und Baubetrieb der Technischen Universität Berlin durchgeführt und miteinander verglichen. Dazu wurde die Parzelle 3, die in den bisherigen Wurzeluntersuchungen den geringsten Durchwurzelungsgrad zeigte, zur Bestimmung der Untergrenzen der Scherfestigkeit herangezogen.

Als Auflast dienten im Gegensatz zur Meßreihe II nur die Gewichte des Schergeräts und dasjenige des jeweiligen Bodenblocks. Weiterhin wurden die drei Messungen in einer Tiefenstufe auch jeweils in der gleichen Parzelle durchgeführt, damit eventuelle Einflüsse verschiedener Sorten zumindest innerhalb einer Tiefenstufe ausgeschlossen werden konnten.

10.7.2 Bestimmung der minimalen Scherfestigkeit am Landschaftsrasen

Die Ergebnisse der Meßreihe III wurden zunächst wiederum in ein τ - σ - Diagramm (Abb. 35) eingetragen und für jede Tiefenstufe eine Schergerade berechnet. Die Ergebnisse zeigten, daß der Scherwinkel bis in eine Tiefe von etwa 30 cm nur geringfügig schwankte. Der Scherwinkel der Schergerade 3 in einer Tiefe von 0,44 m wich dagegen stark von den übrigen ab. Diese Differenz war nicht allein mit dem geringeren Durchwurzelungsgrad zu begründen. Vermutlich führte auch der erhöhte Tonanteil in Verbindung mit einer geringen (Vers. 3A) bzw. hohen Wassersättigung (Vers. 3C) zu einer relativ hohen bzw. niedrigen Scherfestigkeit. Da der Versuch 3B wegen eines starken Regens abgebrochen werden mußte, konnte die Gerade nur aus zwei Meßwerten berechnet werden. Ihr Ausgangswert wurde deshalb auch geringer eingestuft, als derjenige der übrigen Geraden.

Unter Einbeziehung der Daten der Meßreihe II wurde folgendes erweitertes Modell (Meßreihe II/III) berechnet, daß die Abschätzung der Scherfestigkeit bis in eine Tiefe von 45 cm

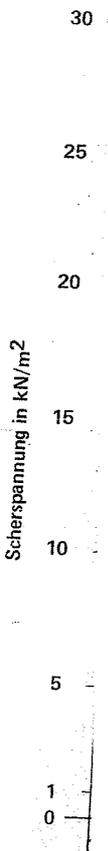


Abb. 3

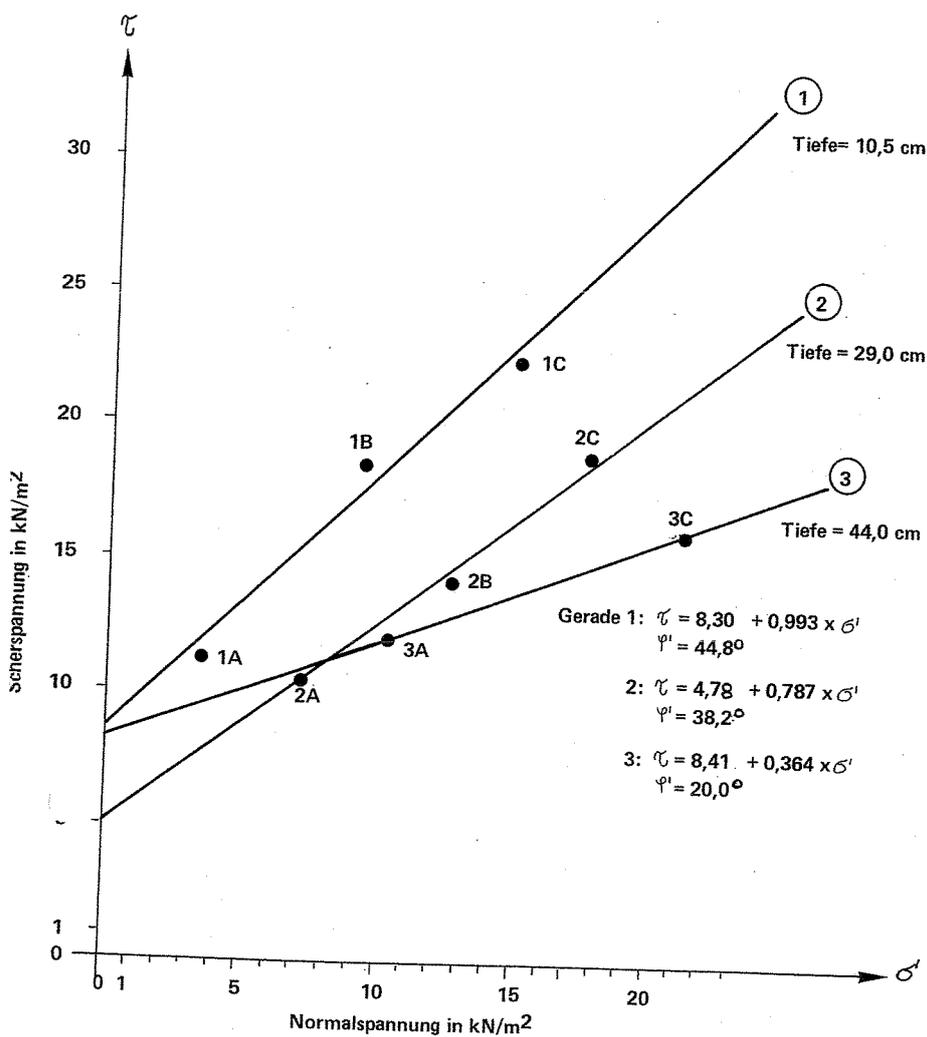


Abb. 35: Kastenscherversuche (in situ) an extensiv gepflegtem Horstrotschwingel
(Meßreihe III vom 1.10. bis 6.12.1984) (Landschaftsrasen)

erlaubte:

$$\tau = -0,4 + 0,945 \cdot \sigma' + 0,00026753^{**} \cdot N_{wg} \quad (22)$$

$$n = 19 \text{ Wiederholungen;} \quad R^2 = 0,87$$

Die Scherfestigkeit konnte damit auf zwei verschiedenen Wegen berechnet werden:

- A Durch Einsetzen einzelner gemessener Durchwurzelungsintensitäten und
- B durch Einsetzen eines funktionalen Zusammenhanges zwischen der Durchwurzelungsintensität N_{wg} und der Bodentiefe.

In Abb. 36 wurden aus allen bisher ermittelten Durchwurzelungsintensitäten nach obiger Gleichung Scherfestigkeitskennlinien der jeweiligen Parzellen berechnet und in ein $\tau-\sigma$ -Diagramm eingetragen. Darunter wurde die Schergerade des undurchwurzelten Bodens eingezeichnet. Wahrscheinlich wurde der Scherwinkel von $43,4^\circ$ des undurchwurzelten Bodens überschätzt. Der Grund war in dem überproportional höheren Anteil von Messungen aus den oberen, stärker durchwurzelten Schichten, die einen höheren Scherwinkel besaßen, zu suchen. Auch die nicht realistische negative Kohäsion war ein Indiz dafür. Aufgrund der Kornverteilung hätte man eher eine scheinbare Kohäsion erwarten können.

Mit zunehmender Tiefe nahm die Durchwurzelung der Gräser, besonders unterhalb von 10 cm Tiefe, sehr schnell ab. In einer Tiefe von 45 cm wurden in der Parzelle 3 des Horstrot-schwingels immer noch 9,8 % derjenigen Wurzelanzahl gefunden, die in einer Tiefe von 4 cm gezählt wurden. Demgegenüber traten, wie in Abb. 36 die Auswertung der Gleichung 22 zeigte, wahrscheinlich die minimalen Scherspannungen in einer Tiefe zwischen 15 cm und 25 cm auf. In 30 cm Tiefe

23
22
20
15
10
5
1
0
-0,396
-1
Abb.

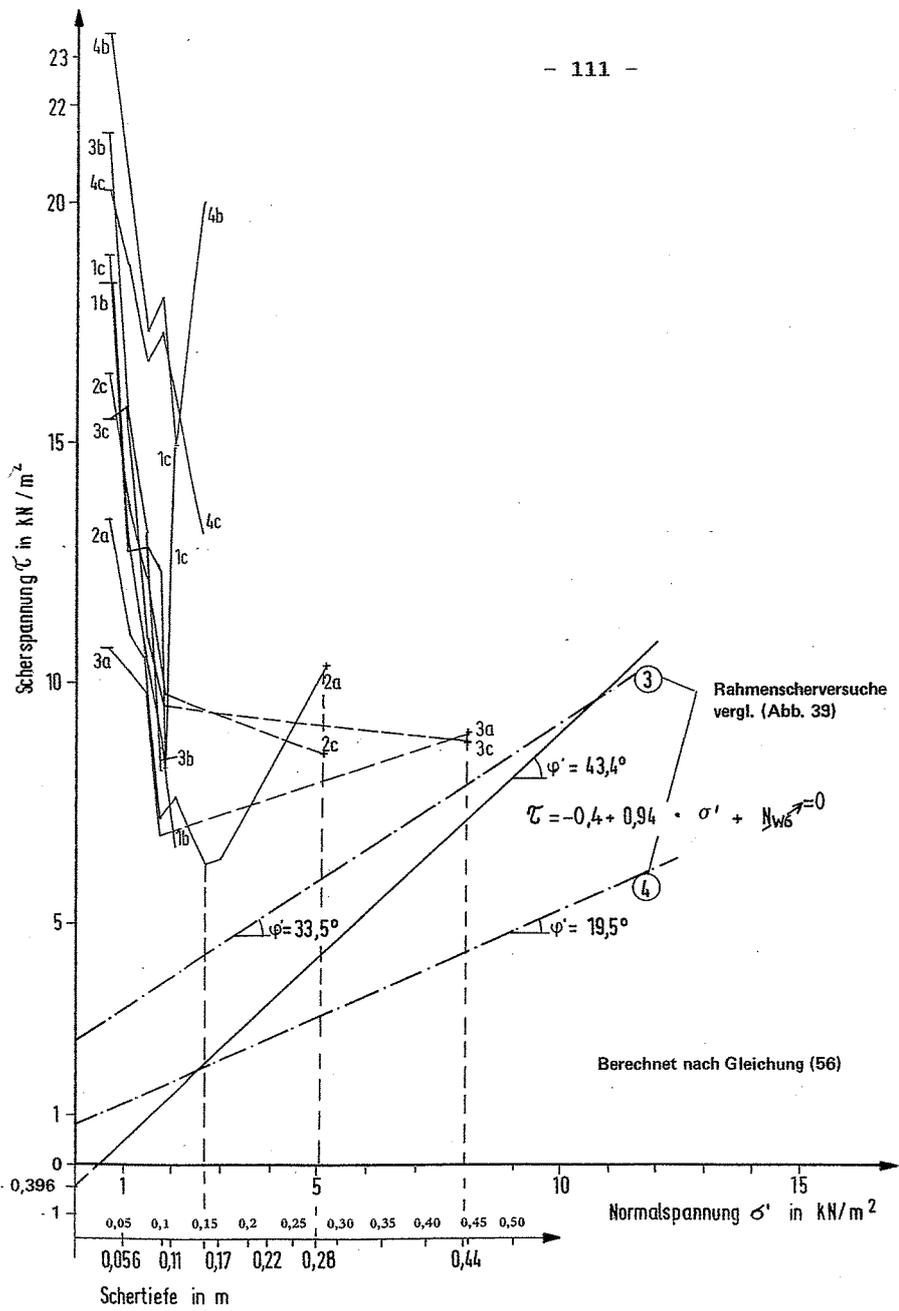


Abb.36: Berechnete Scherspannungen aus der Meßreihe II / III

bildete die Pflugsohle als Bearbeitungsgrenze auch eine Wachstumsgrenze, über der sich ein verstärkter Wurzelhorizont ausgebildet hatte.

10.8 Ergebnisse der Rahmenscherversuche

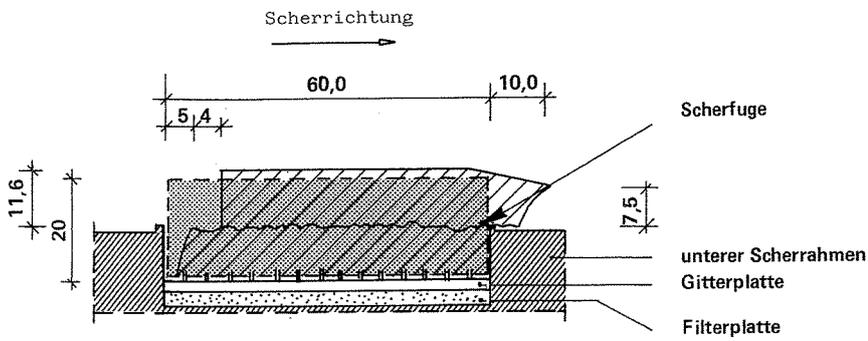
Scherfestigkeitsmessungen im Rahmenschergerät sollten die folgende beiden Fragen klären:

1. Ist die Scherfestigkeit eines durchwurzelten Bodens mit einem Rahmenschergerät im Labor meßbar ?
2. Sind die Meßergebnisse des Rahmenschergerätes mit denjenigen des Kastenscherversgerätes vergleichbar ?

Dazu wurden die Bodenproben der Parzellen 2 und 3 für das Rahmenschergerät parallel zu den Kastenscherversuchen der Meßreihe III entnommen (Foto 7). Die Bodenproben aus der gleichen Tiefe wurden unter den gleichen Normalspannungen abgeschert wie sie bei den Kastenscherversuchen angewendet wurden (Tab. 11).

Zur Beantwortung der ersten Frage wurde zunächst die Verformung der abgescherten Bodenproben beobachtet. In Abb. 37 wurde jeweils die typische Verformung einer stark durchwurzelten sowie einer kaum durchwurzelten Bodenprobe ohne den oberen Scherrahmen dargestellt. Eine starke Durchwurzelung bewirkte beim Schervorgang zunächst eine Zusammendrückung und danach eine Hebung der Probe. Die Hebung der Probe war eine Folge einer Stauchung in Scherrichtung, da eine eindeutige Scherfuge kaum oder nur nach einer großen Scherverschiebung auftrat. Bei undurchwurzelten Bodenproben wurde meist eine geringe Zusammendrückung festgestellt.

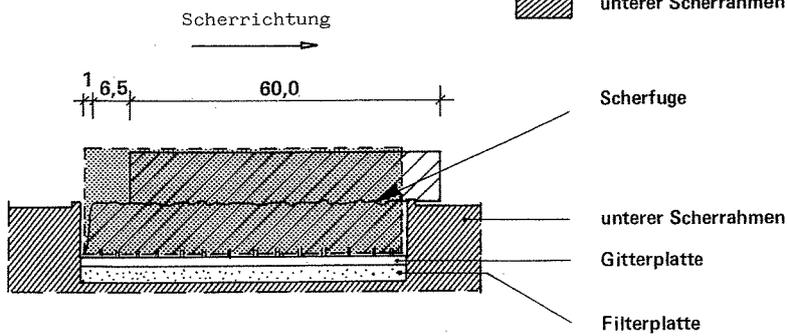
In der Abb. 38 (Seite 114) sind die verschiedenen Typen von Scherspannungsverschiebungskurven aufgetragen. Die Kurven



A. Stark durchwurzelte humusreiche Bodenproben
(Probennr. 1C1, Parzelle 1) Schertiefe: 0,08 m

Alle Maße in mm

-  gescherte Probe
-  Probe vor dem Schervorgang
-  unterer Scherrahmen



B. Kaum durchwurzelte sehr humusarme Bodenprobe
(Regelfall der Proben aus der Tiefenstufe 0,42 bis 0,48 m, Parzelle 3)

Abb. 37: Verformungsverhalten von Bodenproben im Rahmenschergerät mit und ohne Durchwurzelung.

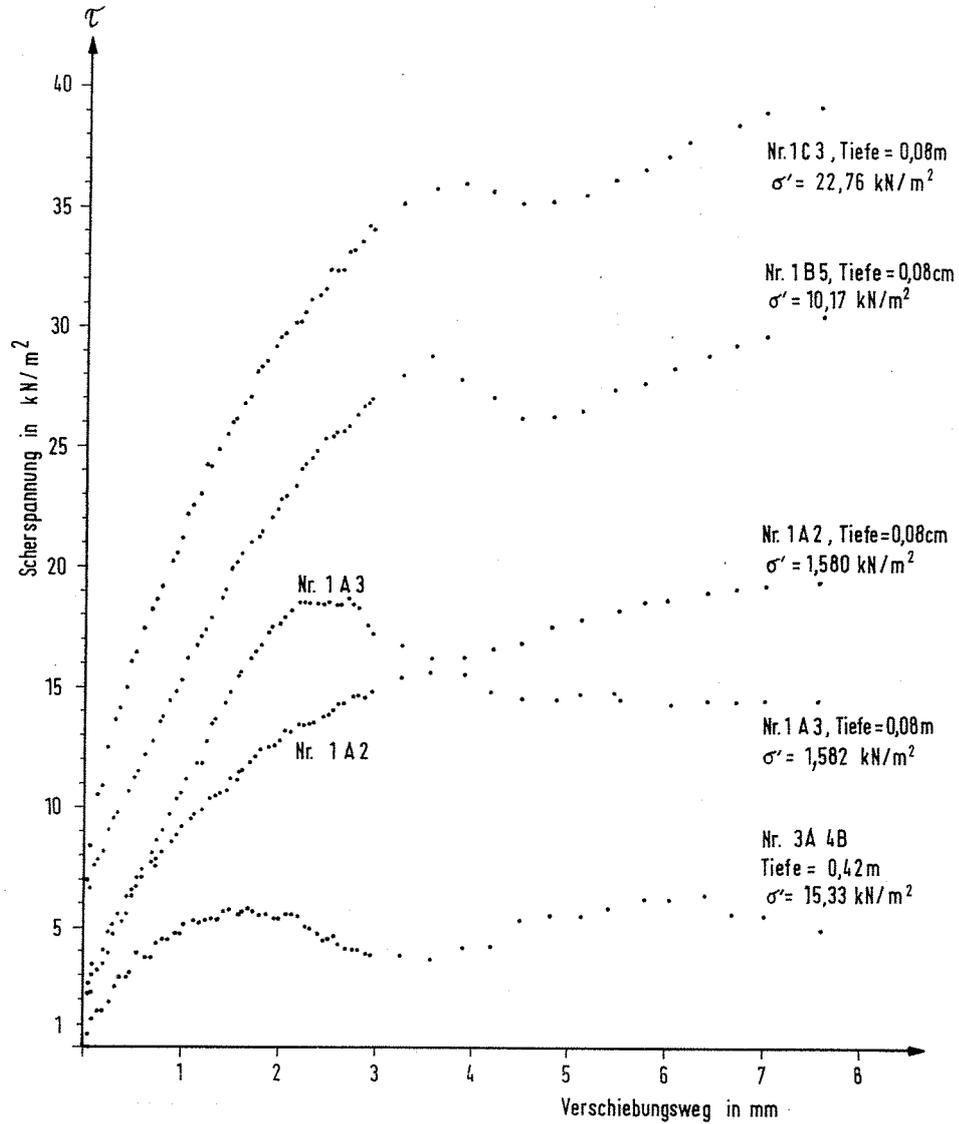


Abb. 38: Scherspannungsverschiebungskurven gemessen mit dem Rahmenschergerät vom 3. 10. 1984 bis 22. 4. 1985 an Horstrotschwingelparzellen (Landschaftsrasen)

durchwurzelter Bodenproben konnten vielfach in 2 Abschnitte unterteilt werden :

1. Die Scherspannung steigt bis zu einem Maximalwert (vermutlich dem Bruch des Korngerüstes) an.
2. Der Scherspannungsverlauf bleibt gleich oder fällt wieder ab und steigt über den bisherigen Maximalwert wieder deutlich an. Die maximale Scherspannung wurde hierbei noch nicht erreicht, da der Scherweg des Schergerätes nicht ausreichte.

Weitere Typen von Scherspannungskurven zeigten, wie unterschiedlich die Lagerungsverhältnisse des Bodens gewesen sind. Die Kurve 1A3 der Abb. 38 entsprach derjenigen des dichten, festen und die Kurve 1A2 derjenigen des lockeren Bodens. In keinem Fall aber war es möglich gewesen, die beiden Hälften der abgescherten Bodenprobe voneinander zu trennen, da die Wurzeln noch nicht vollständig herausgezogen oder zerrissen waren.

Die maximalen Scherfestigkeiten wurden in ein $\tau - \sigma$ - Diagramm eingetragen und jeweils eine Korrelationsgerade aus den Meßwerten einer Tiefenstufe berechnet (Abb. 39). Diejenigen Messungen, bei denen die maximalen Scherfestigkeiten aufgrund des begrenzten Verschiebungsweges des Schergerätes nicht erreicht werden konnten, wurden mit einem nach oben weisenden Pfeil markiert.

Aufgrund der deutlich höheren Kohäsion der Schergeraden (Nr. 1) der Parzelle 1 gegenüber derjenigen der Parzelle 3 erkannte man die stärkere Durchwurzelung der Parzelle 1 zumindest in den oberen 8 cm. Zur Abschätzung der minimalen Scherfestigkeiten beim Horstrotschwingel wurden die weiteren Messungen aus Zeitgründen nur noch an der Parzelle 3 durchgeführt.

Vergleicht man diese Ergebnisse mit denjenigen der Meßreihe

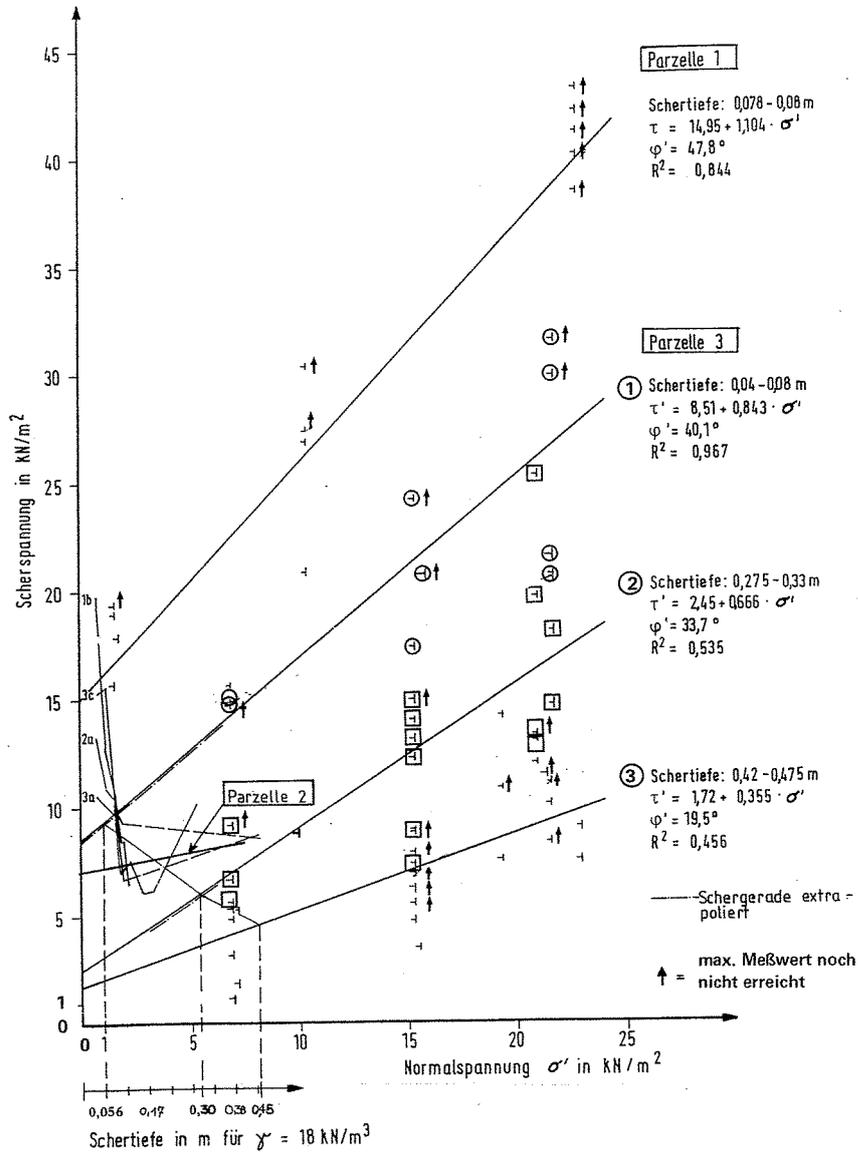


Abb. 39: Rahmenscherversuche am extensiv gepflegten Horstrotschwingel vergleichend zu Meßreihe II/III

III in Abb. 35 (Seite 110), so wurden mit dem Rahmenschergerät in der oberen 10 cm starken Schicht deutlich höhere Scherfestigkeiten gemessen als mit dem Kastenschergerät. Der Grund war in dem unterschiedlichen Scherverfahren zu sehen. Beim Rahmenschergerät wurde eine Scherfuge erzwungen, während sich die Scherfuge beim Kastenschergerät unterhalb des Scherkastens frei ausbilden konnte. Aufgrund der Durchwurzelung in den oberen 10 cm bildete sich die Scherfuge meist unterhalb von 10 cm Tiefe frei aus. Diese Verschiebung führte aber zu geringeren Scherfestigkeiten als es aufgrund der Durchwurzelungsintensität erwartet wurde.

In der Schicht zwischen einer Tiefe von 10 cm und 30 cm stimmten die Messungen im Rahmenschergerät (Parzelle 2 und 3) gut mit dem Rechenmodell der Meßreihe II/III aus Abb. 36 (Seite 111) überein. Im Gegensatz zu den Bodenproben der Parzellen 1 und 3 wurden die Bodenproben der Parzelle 2 mit den tatsächlich in der Natur vorhandenen Normalspannungen abgeschert. Hier deutete sich ein ähnlicher Scherfestigkeitsverlauf an, wie er mit dem Modell aufgrund der Meßreihe II/III berechnet wurde.

Unterhalb einer Tiefe von 0,35 m wurden mit beide Schergeräten gleiche Scherwinkel, jedoch unterschiedliche Kohäsion gemessen. Diese Differenz konnte nicht eindeutig erklärt werden. Vermutlich spielte der geringere Anfangsporengehalt bei den Rahmenscherversuchen ebenso eine Rolle wie der höhere Tongehalt bei der Messung-Nr. 3A mit dem Kastenschergerät.

Beide Schergeräte zeigten in dem entscheidenden Tiefenbereich, d.h. dort, wo der Scherspannungsverlauf des durchwurzelten Bodens sein Minimum aufweist, eine gute Übereinstimmung. Es konnte somit davon ausgegangen werden, daß mit dem Kastenschergerät in diesem Bereich realistische Meßwerte erzielt wurden.

Das Rahmenschergerät wies die folgenden Nachteile auf:

- Durch das zweimalige Herausstechen wurde die Bodenprobe wesentlich mehr gestört, als beim Kastenschervergerät.
- Aufgrund der kleinen Scherfläche und der geringen Auflast war die Streuung der Meßwerte wesentlich höher als beim großformatigen Schervergerät. Dies wurde besonders durch die Durchwurzelung verstärkt.
- Der begrenzte Scherverschiebungsweg von 7 mm hatte in vielen Fällen nicht ausgereicht, die maximale Scherkraft zu messen, da infolge der Durchwurzelung die Elastizität des Bodens sehr stark erhöht wurde. Entsprechend war besonders in den Tiefen 0,1 m bis 0,3 m eine starke Verformung der Bodenprobe aufgetreten, die ein vollständiges Abscheren der Bodenprobe aufgrund des begrenzten Verschiebungsweges unmöglich machte.

10.9 Meßreihe IV

Mit der Meßreihe IV wurden die folgenden Ziele verfolgt:

1. Die Scherfestigkeitsmessungen an den Pazellen 6,7 und 8 des Horstrotschwingels (Meßreihe IVa) dienten zur genaueren Bestimmung der minimalen Scherfestigkeit zwischen 0,1 m und 0,3 m Tiefe (Tab. 12).
2. Als Vergleich zum Horstrotschwingel wurden an den Parzellen 1 und 2 des Schafschwingels (Meßreihe IVb, Tab. 13) sowie an einer Parzelle des Ausläufertreibenden Rot-schwingels Kastenscherversuche durchgeführt.
3. Zur Abschätzung des Einflusses des Bodenwassergehaltes auf die Scherfestigkeit eines durchwurzelten Bodens wurden ebenfalls an der Parzelle 1 des Schafschwingels Kastenscherversuche an wassergesättigtem Boden durchgeführt (Meßreihe IVc, Tab. 14).

Die maximalen Scherfestigkeiten wurden in ein $\tau - \sigma$ - Diagramm (Abb. 40) eingetragen, wobei sich die Normalspannungen aus dem Gewicht des Bodenblocks und demjenigen des Schergerätes zusammensetzten. Die Messungen an der Parzelle 6 des Horstrotschwingels wurden im Gegensatz zu denjenigen der Parzellen 7 und 8 mit einer zusätzlichen Auflast abgesichert, um weitere Daten zur Bestimmung von Schergeraden zu ermitteln. Die Scherfestigkeitsverläufe zeigten noch keine eindeutige Minima, so daß bei diesen drei Sorten des Horstrotschwingels, auf diesem Standort und bis zu einer Tiefe von 0,3 m noch mit einer Bodenfestigung durch Wurzeln zu rechnen war.

Im Gegensatz dazu standen die Ergebnisse des Ausläufertreibenden Rotschwingels, wo der Scherfestigkeitsverlauf zwischen einer Tiefe von 0,12 m und 0,30 m ständig anstieg. Das Scherfestigkeitsminimum lag also oberhalb von 0,12 m Tiefe. Die bewehrende Wirkung war demnach wesentlich geringer als diejenige des Horstrotschwingels. Gegenüber dem Bodenaufbau unter den Horstrotschwingelparzellen stand aber hier bereits ab etwa 0,25 m Tiefe ein tonreicherer, dichter Boden an, so daß sich ohnehin nur ein flaches Wurzelsystem ausbilden konnte. Aufgrund dieses Standortnachteils konnten die gemessenen Scherfestigkeiten des Ausläufertreibenden Rotschwingels nicht direkt mit denjenigen des Horstrotschwingels verglichen werden.

Zur Erfassung des Einflusses des Wassergehaltes auf die Scherfestigkeit des durchwurzelten Bodens wurden an der Parzelle 1 des Schafschwingels Kastenscherversuche durchgeführt, wobei der herausgestochene Bodenblock etwa 12 Stunden lang bis zum Abscheren mit Wasser gesättigt worden war. Erst nach einer solch langen Wässerungszeit konnte man sicher sein, daß auch wirklich der gesamte Bodenblock und besonders die Scherzone die höchstmögliche Wassersättigung erreicht hatten. Das Wasser versickerte nämlich zunächst durch einen Schlitz zwischen der Scherkastenwandung und dem Bodenblock direkt in die unteren Bodenschichten. Der Wasserzufluß wurde

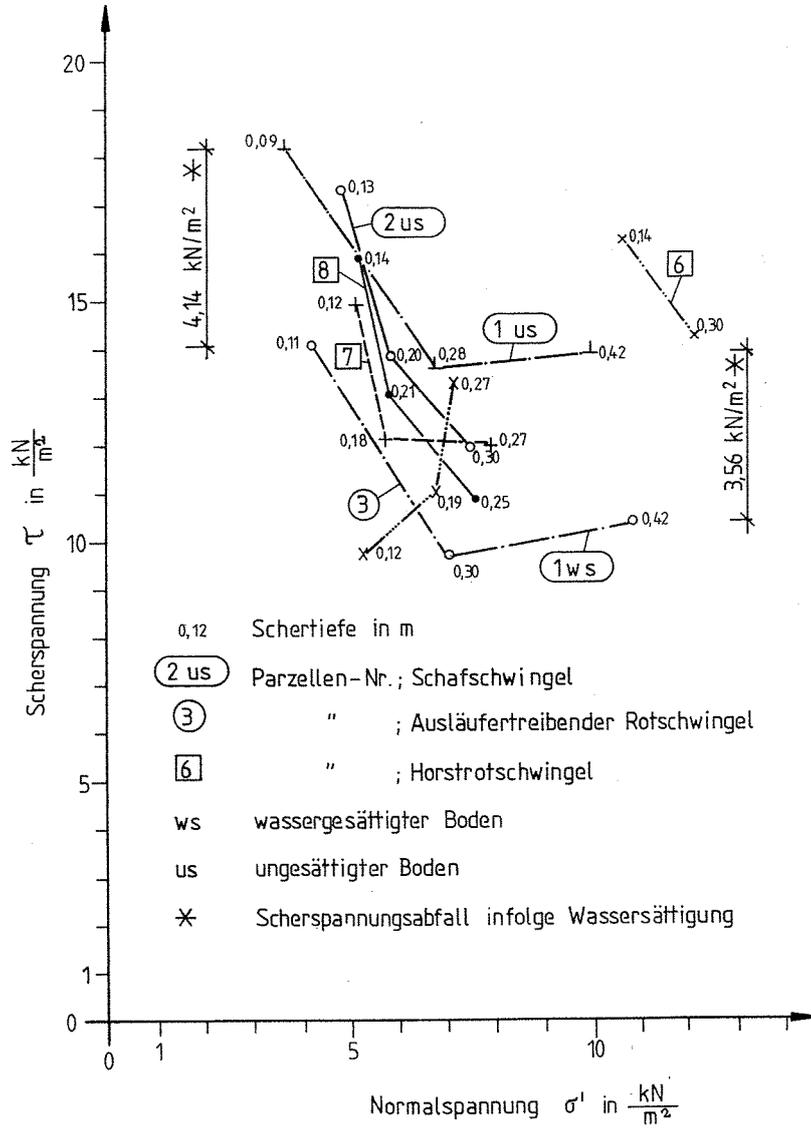


Abb. 40: Meßergebnisse der Scherfestigkeitsmessungen der Meßreihen IVa, b, c sowie des Ausläufertreibenden Rotschwingels.

so eingestellt, daß die Scherfläche bis kurz vor dem Abscheren eingestaut war. Nach dem Hochziehen des inneren Scherrahmens war die Grenze zwischen der oberen durchwurzelten und der unteren wenig durchwurzelten Schicht gut zu erkennen (Foto 10). Es wurde ein Sättigungsgrad von $S_r = 0,83$ bis $S_r = 0,86$ erreicht. Die Bodenproben der Parzelle 1 im feuchten Zustand wiesen einen Sättigungsgrad von $S_r = 0,58$ bis $S_r = 0,62$ auf. Die Meßergebnisse zeigten, daß bei einer starken Wassersättigung mit einem Scherfestigkeitsabfall zwischen $3,6 \text{ kN/m}^2$ und $4,2 \text{ kN/m}^2$ gerechnet werden mußte.

11. SCHERFESTIGKEITSMESSUNGEN AN MIT GEHÖLZEN DURCHWURZELTEM BODEN

11.1 Allgemeines

Die bisherigen Untersuchungen an Gehölzwurzelsystemen haben gezeigt, daß mit zunehmendem Alter der Gehölze auch die obere Bodenschicht zunehmend durchwurzelt wird (KÖSTLER et al., 1968). FLOSS schlägt 1985 vor, diese intensiv durchwuzelte Schicht als homogenes Wurzeldeckwerk mit veränderten Bodenkennwerten aufzufassen. Die dazu notwendigen Wurzelkennwerte müssen aber noch erforscht werden. Die Verankerungskraft der parallel zur Geländeoberfläche wachsenden Wurzeln eines ganzen Wurzeltellers kann nach einem Vorschlag vom Verfasser (1985) durch das Umziehen eines Baumes gemessen werden. Statisch kann der Wurzelteller eines Baumes als stark bewehrter Bodenblock angesehen werden, der besonders hangaufwärts durch seine Horizontalwurzeln verankert ist. Zur Erfassung der unter der Pflanze lotrecht in tiefere Bodenschichten gewachsenen Wurzeln wurden die folgenden Scherversuche durchgeführt. Aufgrund dieser Messungen können noch keine neuen, allgemein gültigen Gesetzmäßigkeiten abgeleitet werden. Der wechselhafte Boden des Standortes ab einer Tiefe von 30 cm hätte wesentlich umfangreichere Untersuchungen erfordert als die im Rahmen der zeitlichen Möglichkeiten durchgeführten. So können lediglich anhand der vorliegenden Ergebnisse bisherige in der Literatur beschriebene Rechenansätze überprüft bzw. erweitert werden.

11.2 Standort, Material und Methoden

Zur Durchführung der Untersuchungen wurde die im Kap. 8.1 beschriebene Gelbe Steinweide im November 1982 gepflanzt. Die ersten Messungen wurden im Mai und Juli 1984, d. h. in der zweiten Vegetationsperiode und im Juni/Juli 1985 in der dritten Vegetationsperiode durchgeführt. Foto 11 zeigt die gerade in ein 0,25 m² großes Quadrat gepflanzten, einjährig

Prüfungs-Nr.: 1 bis 6

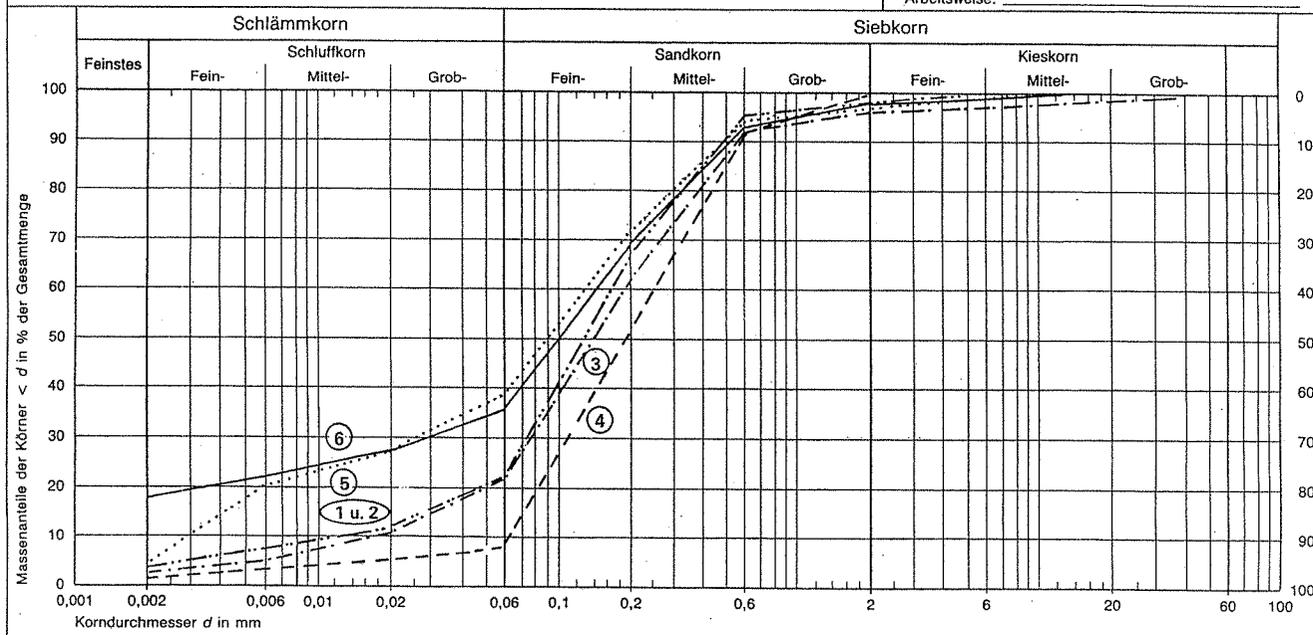
Probe entnommen am:

Art der Entnahme: gestört

Abb. 41: Körnungslinien der Kastenscherfestigkeitsmessungen an *Salix balsamifera* mas. (Gelbe Steinweide).

Abb. 41: Körnungslinien der Kastenscherfestigkeitsmessungen
an *Salix balsamifera* mas. (Gelbe Steinweide).

Prüfungs-Nr.: 1 bis 6
 Probe entnommen am: _____
 Art der Entnahme: gestört
 Arbeitsweise: _____



Kurve Nr.:	1 u. 2	3	4	5	6
Bodenart:	fS, ms, u, t', h'	fS, \bar{m} s, u, t'	fS und mS, u', gs', t'	fS, ms, \bar{u} , t'	fS, ms, u, t
Tiefe: in m	0,0 - 0,30	0,30 - 0,50	0,30 - 0,60	ab 0,50	ab 0,50
$U = d_{60}/d_{10}$:	12,7	10,7	3,97	47,5	70

bewurzelten Weidenstecklinge, damit später der Scherkasten darüber gesetzt werden konnte. In der ersten Vegetationsperiode im Jahr 1983 erreichten die Pflanzen durchschnittlich eine Wuchshöhe von 0,70 m (Foto 12). In der zweiten Vegetationsperiode 1984 waren die Pflanzen nach Auskunft des Pflanzenschutzamtes Berlin von der Gemeinen Spinnmilbe oder der Bohnenspinnmilbe befallen, was die Vitalität der Weiden jedoch nicht beeinträchtigte (Foto 13).

Aufgrund der Kornzusammensetzungen konnten drei Bodenschichten unterschieden werden (Abb. 41, Tab. 15):

- Oberboden von der Geländeoberkante (GOK) bis 0,30 m Tiefe:

Hier stand ein mittelsandiger, schluffiger, schwach toniger und schwach humoser Feinsand an (Kornverteilungskurven 1 und 2) mit einem Humusgehalt von 1 % bis 2,3 %. Der pH-Wert betrug 5,0 bis 5,8. Es wurden die Messungen Nr. 1 und 2 durchgeführt.

- Mittelsandiger Feinsand von 0,30 m bis etwa 0,60 m Tiefe:

In dieser Schicht wurde ein schwach schluffiger bis schluffiger, mittelsandiger Feinsand oder ein Fein- und Mittelsand gefunden (Kornverteilungskurven 3 bis 4). In dieser Tiefe hatte der Humusgehalt bis auf 0,2 bis 0,4 abgenommen und der pH-Wert war auf 6,3 bis 7,4 angestiegen. Hier wurden die Messungen Nr. III/3, III/3w sowie II/1 und II/1/w durchgeführt.

- stark schluffiger bis schluffiger, toniger, mittelsandiger Feinsand unterhalb von 0,60 m:

Unterhalb von 0,60 m Tiefe folgte ein mittelsandiger teilweise stark schluffiger bis toniger Feinsand, mit den Kornverteilungskurven 5 und 6. In diesem Boden wurden die Versuche 2, 2w sowie 4w durchgeführt. Die Scherfläche bei der Messung 2w bestand zur Hälfte aus Mittel- und Feinsand

sowie tonigem, stark schluffigem Feinsand.

Der Standort war mit Nährstoffen schlechter versorgt als die Standorte der Gräserparzellen, wobei der Gehalt an Nährstoffen mit zunehmender Tiefe abnahm.

Zur Messung der Scherfestigkeit von mit Gehölzen durchwurzeltem Boden konnte ebenfalls das Kastenscherggerät verwendet werden, das bereits zur Messung der Scherfestigkeit von mit Gräsern durchwurzeltem Boden eingesetzt wurde. Dazu wurde der Aufwuchs abgeschnitten (Foto 14 und 15), sodaß der darübergestülpte, innere Scherkasten eingeschlagen und eingegraben werden konnte. Die Aufzeichnung von Scherkraft und -weg erfolgte genauso wie bei der Untersuchung der Grasparzellen auf einem Zweikanallinienschreiber.

Die Durchwurzelung (s. Tab. 15) wurde jeweils nach dem Schervorgang durch Auszählen und Messen der Durchmesser der gerissenen Wurzeln bestimmt. Aus dem mittleren Durchmesser \bar{D}_w und der mittleren Wurzelquerschnittsfläche \bar{A}_w wurde die Durchwurzelungsintensität N_{w6} und der Durchwurzelungsgrad A_{w6} jeweils bezogen auf 1 m^2 ermittelt. Diese mittels der gerissenen Wurzeln errechneten Wurzelkennwerte veränderten sich unter Einbeziehung der nicht gerissenen Wurzeln nur unwesentlich.

11.3 Ergebnisse der Scherfestigkeitsmessungen

11.3.1 Allgemeines

Die Ergebnisse der Scherfestigkeitsmessungen sind in der Tab. 16 zusammengestellt. Zunächst wurde die Differenz $\Delta\tau_w$ zwischen der Scherfestigkeit des durchwurzelten und des undurchwurzelten Bodens berechnet. Dieser Differenz wurde einer Art Wurzelkohäsion gegenübergestellt, die nach Gleichung 8 (Kap. 6.3) für verschiedene Wurzelzugfestigkeiten berechnet wurde. Die Abschätzung der Wurzelzugfestigkeiten

wird in Kap. 11.3.2 behandelt. Die über die Summe der Wurzelquerschnittsflächen berechnete Wurzelkohäsion c_w war meist höher als die gemessene Scherspannungsdifferenz $\Delta\tau_w$. Zur Klärung dieser Erscheinung war es notwendig, das Verhalten einzelner Wurzeln beim Schervorgang, wenn auch nur durch eine überschlägliche Rechnung, aufzuschlüsseln.

11.3.2 Schertiefe von GOK bis 0,3 m :

Die obere 0,30 m starke Bodenschicht konnte mit einem 0,3 m hohen Scherkasten ohne Auflast aufgrund der starken Durchwurzelung nicht abgeschert werden, da der Kasten angehoben und über die Pflanzen hinwegezogen wurde. Mit einem weiteren Versuch, diesmal unter einer zusätzlichen Auflast von 2,87 kN (Messung Nr. 1w), die die Hebung des Kastens begrenzen sollte, konnte zwar annähernd eine Scherverschiebungskurve gemessen werden, jedoch rissen auch nach der maximalen Verschiebung von 16,3 cm nur wenige Wurzeln (Abb. 42 und 43). Vielmehr wurden die drei Pflanzen ebenfalls nach unten aus dem Bodenblock herausgezogen, so daß die Wurzeln nicht mehr eindeutig einer Scherebene oder Scherzone zugeordnet werden konnten. Die Durchwurzelung konnte deshalb nicht bestimmt werden. Die gemessene Scherspannungsdifferenz von $\Delta\tau_w = 4,7$ kN/m² (Tab. 16) zwischen den Scherfestigkeitsmessungen an undurchwurzeltem (Messung Nr. 1) und durchwurzeltem Boden (Messung Nr. 1w) dürfte somit eher höher sein, da die durch den Scherkasten abgeschnittenen Horizontalwurzeln nicht verhindern konnten, daß die einzelnen Pflanzen durch den Bodenblock hindurchgezogen wurde.

11.3.3 Schertiefe zwischen 0,3 m und 0,5 m :

In einer Tiefe von 0,5 m wurden Scherfestigkeitsmessungen im wassergesättigten mittelsandigen Feinsand (Messung Nr. II/1 und II/1/w) und im tonigen, schluffigen und mittelsandigen Feinsand (Messung Nr. 4w) durchgeführt. Im mittelsandigen

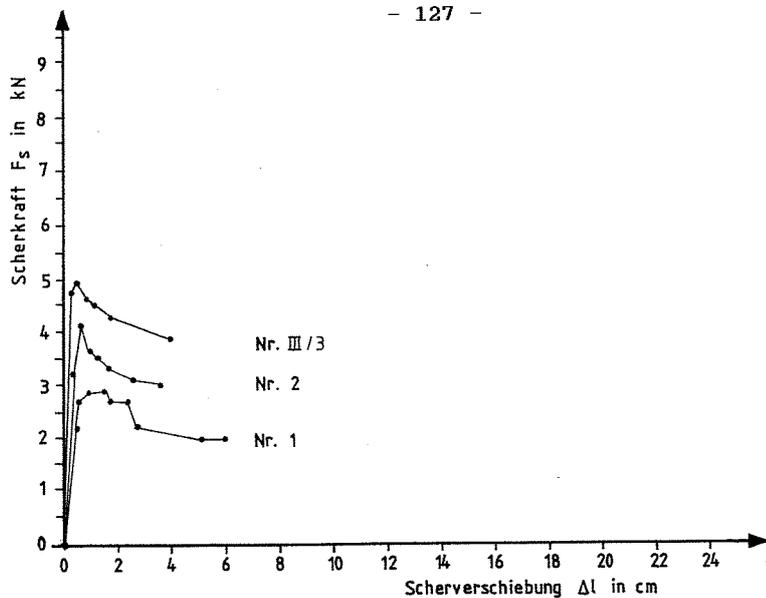


Abb. 42 : Scherkraftverschiebungskurve undurchwurzelter Böden

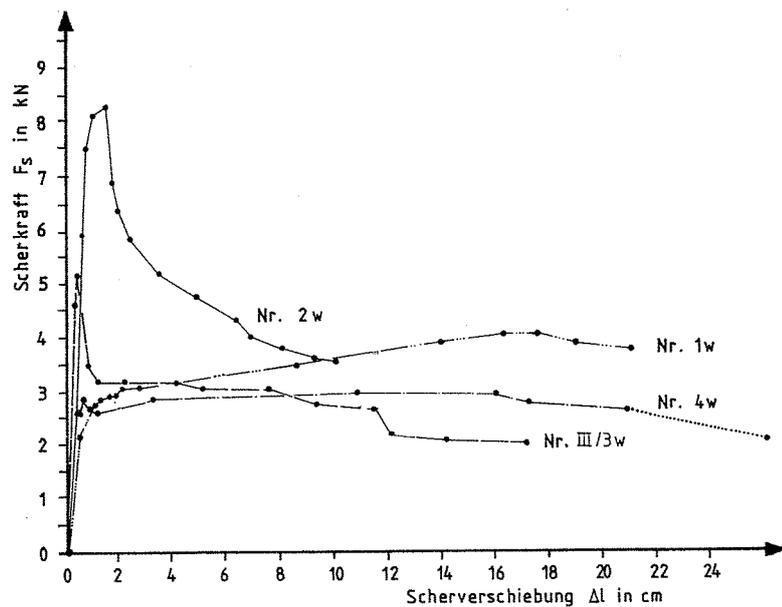


Abb. 43 : Scherkraftverschiebungskurve durchwurzelter Böden (Gelbe Steinweide)

Feinsand (Messung II/1/w) war die Durchwurzelung wesentlich stärker als in einem Feinsand, der Ton- und Schluffanteile bis zu 20 % enthielt. Ergänzend zu den Wurzeldurchmessern wurden diejenigen Wurzellängen gemessen, bei der die Wurzeln unterhalb der Scherfläche gerissen waren. Daraus ergaben sich die folgenden Wurzelgruppen :

- Gruppe 1:

Hierunter wurden diejenigen Wurzeln (65 Stück) zusammengefaßt, die nicht weiter als 5 cm unterhalb der Scherfuge gerissen waren. Es handelte sich um Wurzeln mit Durchmessern zwischen 0,1 mm und 3,75 mm bzw. einem mittleren Durchmesser von 1,04 mm. Der Abstand vom Ripfunkt zur Scherebene wurde als Ausziehlänge l_{ws} definiert, so daß sich für die erste Gruppe eine Ausziehlänge von $l_{ws1} = 5,0$ cm ergab (Abb. 45, Seite 132). Die Summe der Wurzelquerschnittsflächen betrug 91,6 mm².

- Gruppe 2:

Der weitaus geringere Teil der Wurzeln (19 Stück) war zwischen 5 cm und 31 cm unterhalb der Scherfläche gerissen. Hierbei handelte es sich um Wurzeln mit Durchmessern zwischen 0,3 mm und 5,5 mm mit einem Mittel von 2,36 mm. Es konnte der folgende lineare Zusammenhang zwischen der Wurzelquerschnittsfläche A_w und der Ausziehlänge l_{ws2} von $R^2 = 0,42$ und unter Ausklammerung eines Extremwertes sogar von $R^2 = 0,82$ nachgewiesen werden:

$$l_{ws2} = 0,0636 + 4224,58 \cdot A_w \quad (23)$$

mit

$$\begin{aligned} l_{ws2} &= \text{Ausziehlänge in m und} \\ A_w &= \text{Wurzelquerschnittsfläche in m}^2. \end{aligned}$$

Die Summe der Wurzelquerschnittsflächen war mit 119,0 mm²

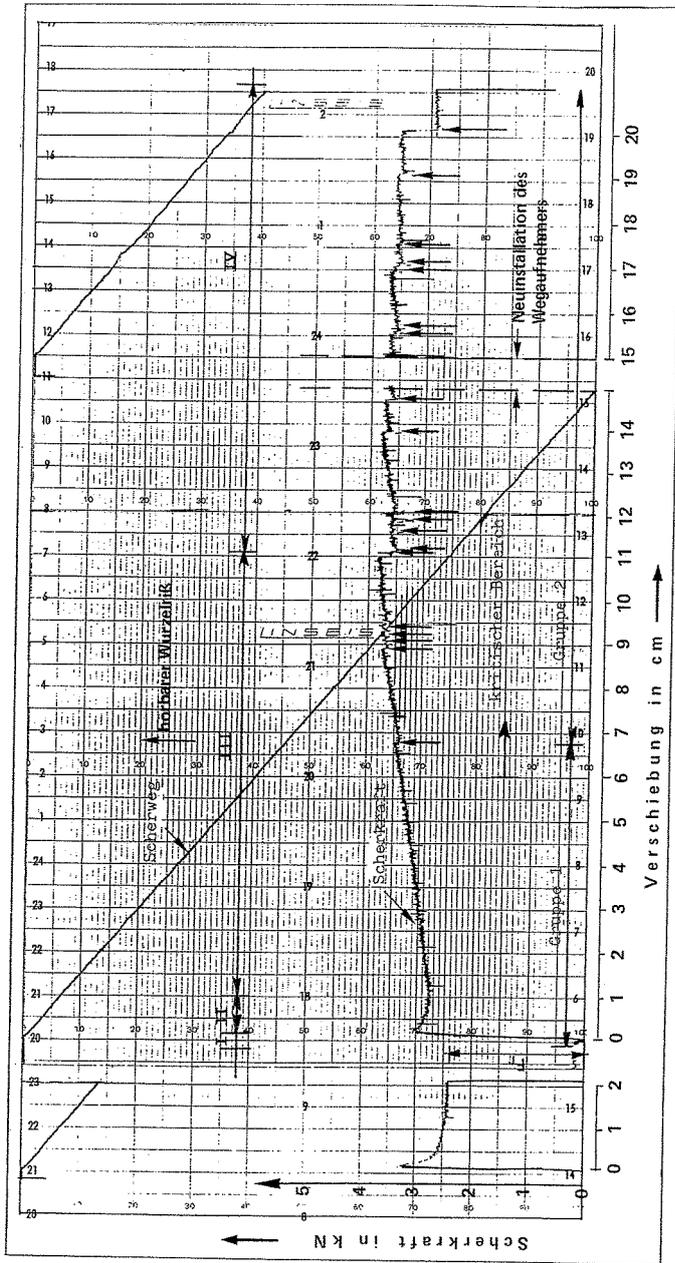


Abb. 44 : Kraft-Weg-Diagramm zweier wassergesättigter Bodenblöcke im undurchwurzelten und durchwurzelten Zustand.
Pflanze: Gelbe Steinweide (*Salix balsamifera* mas.)

höher als bei der Gruppe 2.

Die Scherverschiebungskurve der Messung II/1/w in Abb. 44 zeigte den typischen Verlauf für einen mit stärkeren Einzelwurzeln durchwachsenen Boden, d.h., nach konstantem Anstieg fiel die Scherkraft nach jedem Wurzelriß plötzlich ab.

Die Verformung einer einzelnen Wurzel wurde in einer ersten Näherung linear angenommen und in Abb. 45 dargestellt. Der maximale Scherkraftabfall wurde derjenigen Wurzel mit der größten Querschnittsfläche zugewiesen und die Zugfestigkeit σ_{zw} zu 25 MN/m² rückgerechnet.

Nach HILLER (1966) erreichten die Wurzeln einiger Weidenarten Zugfestigkeiten zwischen 0,9 MN/m² und 25 MN/m², sodaß eine Abschätzung der Zugfestigkeit der Wurzeln der Gelben Steinweide mit 10 MN/m² bis 25 MN/m² als realistisch angenommen werden konnte. Auch bei diesem Versuch war die errechnete Wurzelkohäsion c_w größer als die Scherspannungsdifferenz zwischen dem jeweiligen Scherspannungsmaximum des undurchwurzelten und des durchwurzelten Bodens.

Zur Bestimmung der Scherdeformation Θ der o. g. Wurzel wurde angenommen, daß sich die Wurzel oberhalb der Scherfuge ähnlich verformte und damit die ungedehnte Länge l_w gleich der doppelten Ausziehlänge l_{ws} war (Abb. 45). Damit ergab sich :

$$\tan \Theta = \Delta l / (2 \cdot l_{ws}) = 0,2 \text{ m} / (2 \cdot 0,15 \text{ m}) = 0,667 \quad (24)$$

und die Scherdeformation der Wurzel

$$\Theta = 33,7^\circ.$$

Weiterhin wurde die relative Bruchdehnung ϵ_B dieser größten Wurzel ermittelt zu:

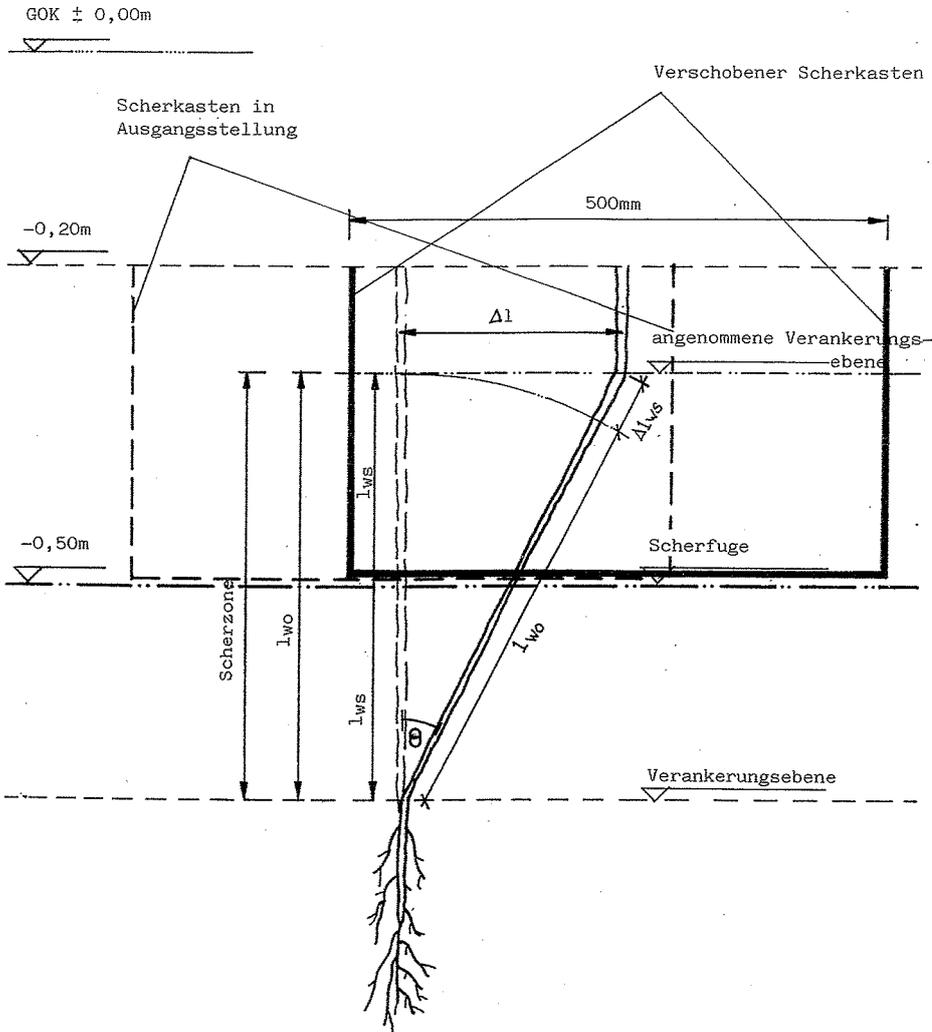


Abb. 45: Schematische Scherverformung einer Wurzel; Versuch II/lw.
(Gelbe Steinweide)

$$\begin{aligned}\Delta l_{ws} &= 2 \cdot l_{ws} \cdot ((1/\cos\theta)-1) \\ &= 0,3 \cdot ((1/\cos 33,7^\circ)-1) = \underline{0,061 \text{ m}}\end{aligned}$$

$$\varepsilon_B = (\Delta l_{ws} / l_{w0}) \cdot 100 = (0,061 / (2 \cdot 0,15)) \cdot 100 = \underline{20 \%}$$

Mit diesen Werten konnte nun diejenige Scherverschiebung berechnet werden, bei der alle Wurzeln der Gruppe 1 herausgezogen waren.

Aus

$$l_{w01} = 2 \cdot l_{ws1}$$

errechnete sich die Bruchdehnung der Wurzeln der Gruppe 1 zu

$$\Delta l_{ws1} = \varepsilon_B \cdot 2 \cdot l_{ws1} / 100 = 20 \cdot 2 \cdot 0,05 / 100 = \underline{0,02 \text{ m}}$$

Damit betrug die maximale Scherverformung $\theta = 33,6^\circ$ und diejenige Verschiebung des Scherkastens, bei der die letzten und größten Wurzeln der Gruppe 1 gerissen waren

$$\Delta l_1 = (l_{w01} + l_{ws1}) \cdot \sin\theta = 0,12 \cdot \sin 33,6^\circ = \underline{0,067 \text{ m}}$$

In Abb. 44 wurde der Wirkungsbereich der Wurzeln der Gruppe 1 in das Scherkraftverschiebungsdiagramm eingetragen. Damit waren bei einer Scherverschiebung von 6,7 cm bereits 0,916 kN bis 2,3 kN, d.h., etwa 50 % der zur Verfügung stehenden Wurzelzugkraft abgebaut (Tab. 16).

Die restliche Zugkraft von 1,19 kN bis 2,98 kN der Wurzelgruppe 2 wurde auf dem verbleibenden Scherweg von 13,7 cm abgebaut. Zur Erläuterung dieses Vorganges war es zunächst notwendig den gesamten Verlauf der Scherfestigkeit genauer zu beschreiben:

Die Scherverschiebungskurve ließ sich in 4 Abschnitte unterteilen, wie sie in ähnlicher Weise bereits bei den Scher-

festigkeitsmessungen von mit Rasenwurzeln durchwurzeltem Boden im Rahmenschergerät beobachtet werden konnten:

- Abschnitt 1:

Die Scherkraft erreichte nach einer Verschiebung von etwa 2,3 mm ein relatives Maximum, d. h. das Korngerüst brach wahrscheinlich zusammen. Die Wurzeln konnten hier noch keinen wesentlichen Einfluß auf die Scherkraft ausüben, da aufgrund ihrer Elastizität und ihrer nicht immer senkrechten Stellung wesentlich höhere Verschiebungswege notwendig waren um eine merkbare Zugkraft zu erzeugen.

- Abschnitt 2:

Die Gesamtscherkraft fiel solange ab, bis die Zunahme der Zugkraft der sich dehrenden Wurzeln den Scherkraftabfall im Boden wieder aufhob.

- Abschnitt 3:

Ein nahezu linearer Scherkraftanstieg zeigte, daß keine größeren Wurzeln rissen, die einen merklichen Scherkraftabfall zur Folge gehabt hatten. Die Wurzeln der Gruppe 1 waren bei einer Scherverschiebung von maximal 6,7 cm gerrissen. Gleichzeitig erfolgte die Umlagerung der Scherkraft auf die größeren Wurzeln beider Gruppen. Nach der vollständigen Umlagerung der Scherkraft auf die tiefer verankerten Wurzeln der Gruppe 2 erreichte die Gesamtscherkraft bei etwa 11,1 cm ihren Maximalwert. Bei etwa 6 cm Scherverschiebung waren etwa 70 % der Wurzeln gerissen oder herausgezogen und die restlichen starken Wurzeln stark gedehnt.

- Abschnitt 4:

Nach dem Überschreiten der maximalen Scherkraft rissen nacheinander die einzelnen starken Wurzeln und verursach-

ten jeweils einen Scherkraftsprung bis die Gleitscherkraft wieder erreicht war. Nach dem Bruch des Korngerüstes konnte also nicht mehr mit der Bruchscherfestigkeit gerechnet werden, sondern spätestens im 3. Abschnitt bestimmte die Gleitscherfestigkeit des Bodens den Scherkraftverlauf.

Die Gleitscherkraft des Bodens in der Parzelle II/1/w wurde mit $F_r = 2,4$ kN gemessen (Abb. 44 und 43). Vernachlässigte man die oft sehr geringe Kohäsion der Gleitscherfestigkeit, so errechnete sich der Scherwinkel f_r' der Gleitscherfestigkeit nach COULOMB zu

$$\tan f_r' = F_r / N = 2,4 / 3,125 = 0,77$$

$$f_r' = 37,5^\circ$$

Mit den Gleichungen (7) und (8) aus Kap. 6.3 nach WU et al. (1978) und BINQUET et al. (1975, zitiert in WU et al., 1988) konnte nun die maximale Scherkraft näherungsweise berechnet werden. Dazu wurden die Gleichungen folgendermaßen modifiziert:

Der Bruchscherwinkel φ' wurde durch den Gleitscherwinkel f_r' ersetzt, indem die Kohäsion mit $c' = 0$ angenommen wurde. Unter Vernachlässigung einer zusätzlichen Normalkraft aus der Wurzelzugkraft, die sich erst infolge der Scherverschiebung einstellte, errechnete sich lediglich eine max. Scherkraft F von

$$F = F_r + \sigma_w \cdot \Sigma A_w \quad (25)$$

$$= 3,61 \text{ kN.}$$

Bei Berücksichtigung der zusätzlichen Normalkraft, ergab sich die beste Annäherung an die gemessene max. Scherkraft F von 3,8 kN zu

$$F = F_r + (\sigma_{zw} \cdot \Sigma A_w) \cdot (\cos\theta \cdot \tan f_r' + \sin\theta) \quad (26)$$
$$= 3,85 \text{ kN.}$$

Hierbei ist

$$F_r = N \cdot \tan f_r' \text{ in kN,}$$
$$N = 3,128 \text{ kN,}$$
$$f_r' = 37,5^\circ,$$
$$\sigma_{zw} = 10.000 \text{ kN/m}^2,$$
$$\Sigma A_w = 4,76 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{m}^2 \text{ und}$$
$$\theta = 33,7^\circ.$$

11.3.4 Schertiefe unterhalb von 0,5 m :

Unterhalb von 0,5 m Tiefe wurden die Scherfestigkeitsmessungen 2, 2w, 3 und 3w durchgeführt, deren Scherkraftverschiebungskurven ihr Maximum bereits nach einer Verschiebung von wenigen Zentimetern erreichten. Dies deutete darauf hin, daß die maximale Scherkraft im wesentlichen durch die Festigkeit des Bodens hervorgerufen wurde. Nach dem Überschreiten der maximalen Scherkraft war noch deutlich das Reißen einzelner Wurzeln zu hören, jedoch konnte hier eine eindeutige Trennung zwischen den Scherkräften aus Wurzeln und Boden nicht vorgenommen werden.

12. ZUSAMMENFASSENDER AUSWERTUNG UND AUSBLICK

12.1 Gräserdurchwurzelung

12.1.1 Beziehungen zwischen Standort und Pflanze

Die Wechselwirkungen zwischen Standort und Pflanze sind u. a. von ELLEBERG (1986) ausführlich dargestellt worden. RÜMLER (1974) hat ein verfeinertes Schema speziell für das Wachstum von Landschaftsrasen auf Staßenböschungen und -hängen aufgestellt. Die komplexen Zusammenhänge zwischen Pflanze und Standort sind auch bei der Auswertung der Scher- versuche an grasdurchwurzeltem Boden hervorgetreten.

Unter Zuhilfenahme der Daten des Horstrotschwingels und einer Parzelle des Ausläufertreibenden Rotschwingels (Meß- reihen II, III und IV) wurden diejenigen Kennwerte ermit- telt, die unmittelbar auf die Durchwurzelungsintensität ein- wirkten. Es wurde ein hochsignifikanter Zusammenhang zwi- schen der Durchwurzelungsintensität und

- dem pflanzenverfügbaren Phosphorgehalt (P_2O_5),
- dem Gesamtstickstoff (N),
- der Bodenreaktion (pH),
- dem Tongehalt (Ton) und
- der Tiefe (T) gefunden:

$$N_{wc} = e^{[11,024^{**} + 0,055^{**} \cdot (1/T) - 0,093^{**} \cdot \text{Ton} - 0,5^{**} \cdot \text{pH} + 1,343^{**} \cdot \ln(P_2O_5) - 0,568^{**} \cdot \ln(\text{Gesamtstickstoff})]} \quad (27)$$

$$R^2 = 0,88; n = 27 \text{ Wiederholungen}$$

Eine genauere Auswertung wird nicht dargestellt, da die che- mischen Kennwerte nicht zur gleichen Jahreszeit und aus technischen Gründen nicht der pflanzenverfügbare Stickstoff gemessen werden konnte.

Die Ergebnisse zeigen, daß die Durchwurzelung auch quantita- tiv in Abhängigkeit der wichtigsten Standortfaktoren dar-

stellbar sind. Das Beispiel besagt aber auch, daß das Wurzelwachstum und damit die Wurzelkennwerte wie der Durchwurzelungsgrad und -intensität eines Standortes nur auf Standorte mit gleichen Verhältnissen übertragbar sind. Andererseits kann lediglich durch das einfache Messen der Durchwurzelungsintensität bei sonst gleicher Kornverteilung und gleichem Humusgehalt die Scherfestigkeit mit zunehmender Tiefe abgeschätzt werden.

12.1.2 Abhängigkeit der Durchwurzelungsintensität und des Humusgehaltes von der Tiefe

Aus den bisherigen Ausführungen geht hervor, daß an erster Stelle die Durchwurzelung und an zweiter Stelle der Humusgehalt die Scherfestigkeit wesentlich beeinflussen. Zur Ermittlung des Zusammenhanges zwischen der Durchwurzelungsintensität N_{wg} und der Tiefe T in m sind die 67 bzw. 76 Mittelwerte der Wurzelzählungen aller Ergebnistabellen (s. Anhang) mit der jeweiligen Tiefe korreliert worden, so daß dieser Berechnung eine wesentlich größere Anzahl von Einzelmessungen zugrunde liegen. Die Ergebnisse sind in der Abb. 46 dargestellt.

Für die Horstrotschwingelparzellen gilt (Tab. 16) :

$$N_{wg} = (8,903 - 73,301^{**} \cdot T + 251,783^{**} \cdot T^2 - 289,076^{**} \cdot T^3) \cdot 10^4$$

$n = 67$ Wiederholungen,

$$R^2 = 0,58$$

$T =$ Tiefe in m

(28)

Anhand der Parzellen 1 bis 3 des Horstrotschwingels ist Abhängigkeit der Durchwurzelungsintensität von der Sorte und der Tiefe T mittels einer polynomischen Regression berechnet worden:

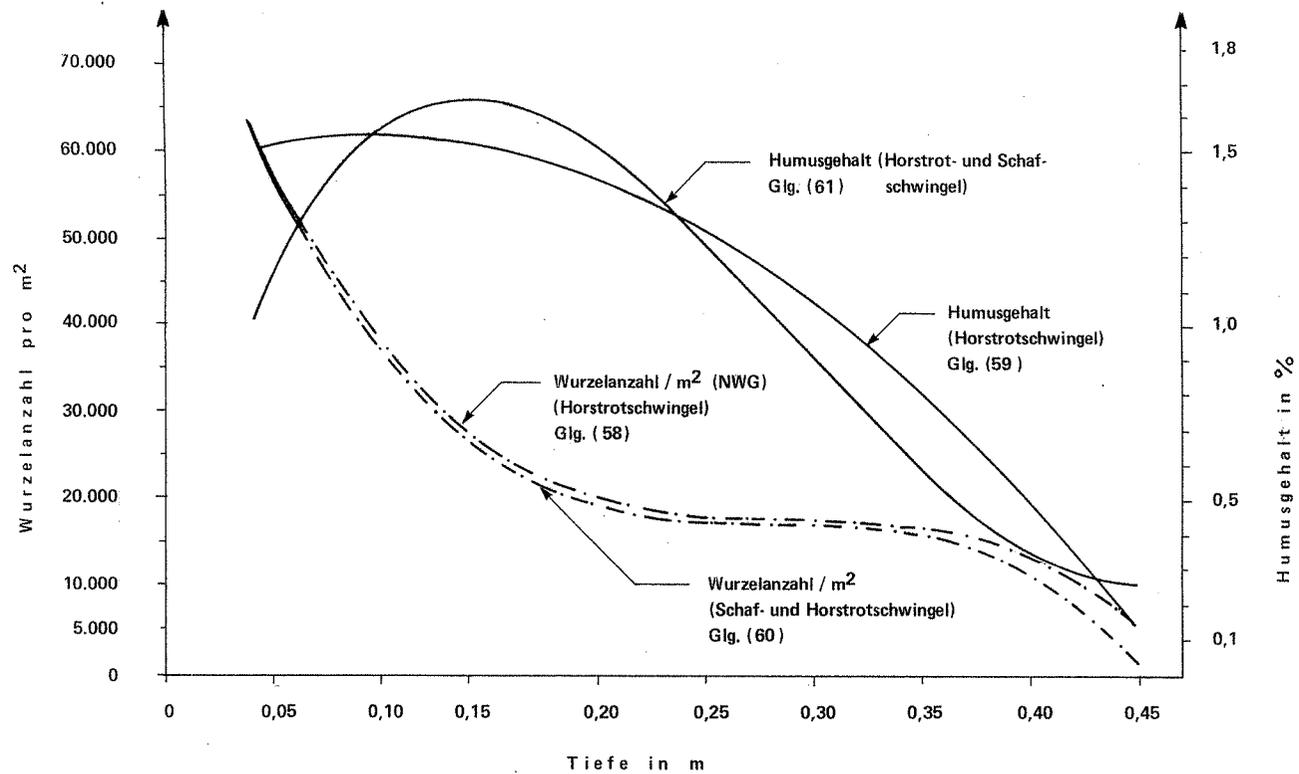


Abb. 46: Wurzelaanzahl und Humusgehalt in Abhängigkeit der Tiefe (Landschaftsrassen)

Parzelle 1:

$$N_{wg} = (1,1236 - 13,5336 \cdot T + 55,5888 \cdot T^2) \cdot 10^5 \quad (29)$$

n = 14 Wiederholungen; $R^2 = 0,72$

Parzelle 2:

$$N_{wg} = (0,7841 - 6,38527 \cdot T + 14,936 \cdot T^2) \cdot 10^5 \quad (30)$$

n = 14 Wiederholungen; $R^2 = 0,91$

Parzelle 3:

$$N_{wg} = 2891,7 \cdot T^{-0,97416} \quad (31)$$

n = 14 Wiederholungen; $R^2 = 0,90$

Für Horstrot- und Schafschwingelparzellen gilt:

$$N_{wg} = (9,051 - 77,707^{**} \cdot T + 275,418^{**} \cdot T^2 - 326,395^{**} \cdot T^3) \cdot 10^4$$

n = 76 Wiederholungen, $R^2 = 0,95$ (32)

T = Tiefe in m

Die Durchwurzelungsintensität (Abb. 46) fällt in den oberen 20 cm zunächst sehr schnell ab und ist etwa zwischen 0,20 m und 0,35 m Tiefe konstant geblieben. Hier hat sich über der Pflugsohle ein Wurzelhorizont ausgebildet.

Der Humusgehalt (Hu in %) aller Horstrotschwingelpazellen ist mit der Tiefe korreliert und ergab folgende Funktion:

$$Hu = 1,43 + 2,21^{**} \cdot T - 11,42^{**} \cdot T^2 \quad (33)$$

n = 27 Wiederholungen, $R^2 = 0,81$
T = Tiefe in m

Der Humusgehalt aller Horstrot- und Schafschwingelparzellen in Abhängigkeit der Tiefe kann mit folgender Gleichung abgeschätzt werden :

$$Hu = 0,44 + 19,0^{**} \cdot T - 88,4^{**} \cdot T^2 + 100,5^{*} \cdot T^3 \quad (34)$$

n = 36 Wiederholungen, $R^2 = 0,71$
T = Tiefe in m

Aus den Kurvenverläufen ist deutlich zu erkennen, daß besonders in den oberen 30 cm der Humusgehalt und die Durchwurzelungsintensität qualitativ nicht vergleichbar sind. Der Humusgehalt steigt zunächst an bzw. bleibt etwa gleich bis zu einer Tiefe von 0,15 m. Unterhalb dieser Tiefe fällt er nahezu konstant ab. Diese qualitative Abweichung vom Verlauf der Durchwurzelungsintensität weist auf andere humusbildende Einflüsse neben der Durchwurzelung, z. B. die Bodenfauna, hin.

12.1.3 Verlauf der Scherfestigkeit mit zunehmender Tiefe

Die bisher dargestellten Ergebnisse haben gezeigt, daß die Wirkung einer Gräserdurchwurzelung auf die Scherfestigkeit eines Bodens als eine Art Kohäsion in die Bruchbedingung von COULOMB eingefügt werden kann. Man gelangt demnach zu folgender erweiterten allgemeinen Gleichung :

$$\tau = \tan \rho' \cdot \sigma' + c + c_w \quad (35)$$

Hierbei sind :

- τ = gesamte Scherspannung in kN/m^2 ,
 σ' = effektive Normalspannung in kN/m^2 ,
 c = Kohäsion in kN/m^2 und *)
 c_w = Kohäsionsanteil infolge einer Durchwurzelung in kN/m^2 .

*) Die Kohäsion c ist bei rein rolligen Böden aus der scheinbaren Kohäsion und der kohäsiven Wirkung des Humusgehaltes zusammengesetzt, der aus Mikroorganismen und Pflanzenresten, auch lebenden Wurzeln, besteht.

Die Meßreihen II, III und IVa wurden zur Meßreihe II/IVa (Tab.12) zusammengefaßt und damit für alle Horstrotschwingelparzellen die folgenden Zusammenhänge ermittelt :

$$\tau = 0,874^{**} \cdot \sigma' - 1,52 + 0,17656 \cdot 10^{-3**} \cdot N_{wg} + 4,05^{**} \cdot Hu \quad (36)$$

$$\begin{aligned} s \text{ für } b_1 (= \tan \varphi') \text{ von } \sigma' &= \pm 0,098, & \varphi' &= 41,2^\circ \\ s \text{ für } b_2 \text{ von } N_{wg} &= \pm 0,0011 \\ s \text{ für } b_3 \text{ von } Hu &= \pm 1,15 \\ R^2 &= 0,90, \quad n = 27 \end{aligned}$$

Die Gleichung 36 zeigt, daß der Einfluß des Humusgehaltes auf die Scherfestigkeit nur sehr unsicher bestimmt werden kann, da die Standardabweichung s des Regressionskoeffizienten bereits einen Betrag in Höhe der gemessenen Werte erreicht hat. Auch die negative Kohäsion weist auf ein unsicheres Ergebnis hin. Da zudem der Einfluß organischer Bestandteile auf die Scherfestigkeit eines Bodens, besonders bei bindigen Böden, von sehr komplexen chemischen Vorgängen abhängt (NASSIF, 1965), wird die folgende Gleichung empfohlen:

$$\tau = 0,755^{**} \cdot \sigma' + 3,70 + 0,23657 \cdot 10^{-3**} \cdot N_{wg} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} s \text{ für } b_1 (= \tan \varphi') \text{ von } \sigma' &= \pm 0,11, & \varphi' &= 37,1^\circ \\ s \text{ für } b_2 \text{ von } N_{wg} &= \pm 0,0013 \\ R^2 &= 0,85, \quad n = 27 \end{aligned}$$

Die Gleichung 37 kann mit ausreichender Genauigkeit zur Abschätzung der Scherfestigkeit von Landschaftsrasen aus Horstrotschwingel herangezogen werden. Der Kohäsionsanteil $c = 3,7 \text{ kN/m}^2$ umfaßt die Kohäsion aufgrund geringer bindiger Anteile, die scheinbare Kohäsion und die Wirkung des Humusgehaltes. Die Standardabweichung besagt, daß der Scherwinkel etwa zwischen $40,8^\circ$ und $32,8^\circ$ angenommen werden kann. Faßt man die Durchwurzelungsintensität als eine Funktion der Tiefe auf und setzt in Gleichung 37 die Durchwurzelungsintensität als Funktion der Tiefe (Gleichung 28) ein, so gelangt man zu einer Schergleichung, die nur von der Schertiefe abhängt (Abb. 47) :

$$\tau = 0,755^{**} \cdot \sigma' + 3,70 + 0,23657 \cdot 10^{-3**} \cdot N_{wg} (T) \quad (38)$$

In einer weiteren Auswertung werden die Scherfestigkeitsmessungen der Horstrot- und der Schafschwingelparzellen zusammengefaßt (Meßreihe II, III und IVb). Unter Einbeziehung des Humusgehaltes ergibt sich :

$$\tau = 0,770^{**} \cdot \sigma' + \underbrace{3,27^{**} \cdot Hu}_{c} + 1,12 + 0,18061 \cdot 10^{-3**} \cdot N_{wg} \quad (39)$$

c c_w

s für b_1 ($= \tan \varphi'$) von σ'	= ± 0,097,	$\varphi' = 37,6^\circ$
s für b_2 von N_{wg}	= ± 0,0012	
s für b_3 von Hu	= ± 1,07	
$R^2 = 0,90, n = 33$		

Die Gleichung (39) zeigt, daß in den oberen 0,45 m dieses Standortes die Höhe der Kohäsion c ebenfalls wesentlich durch den Humusgehalt bestimmt ist. In einer Tiefe von etwa 0,1 m beträgt die Kohäsion infolge eines Humusgehaltes von 1,6 % nach obiger Gleichung etwa $5,2 \text{ kN/m}^2$ und in 0,45 m Tiefe mit einem Humusgehalt von 0,2 % nur noch $0,65 \text{ kN/m}^2$. Bei dem verbleibendem Kohäsionsanteil von $1,12 \text{ kN/m}^2$ kann es sich entweder um scheinbare oder um "echte" Kohäsion infolge

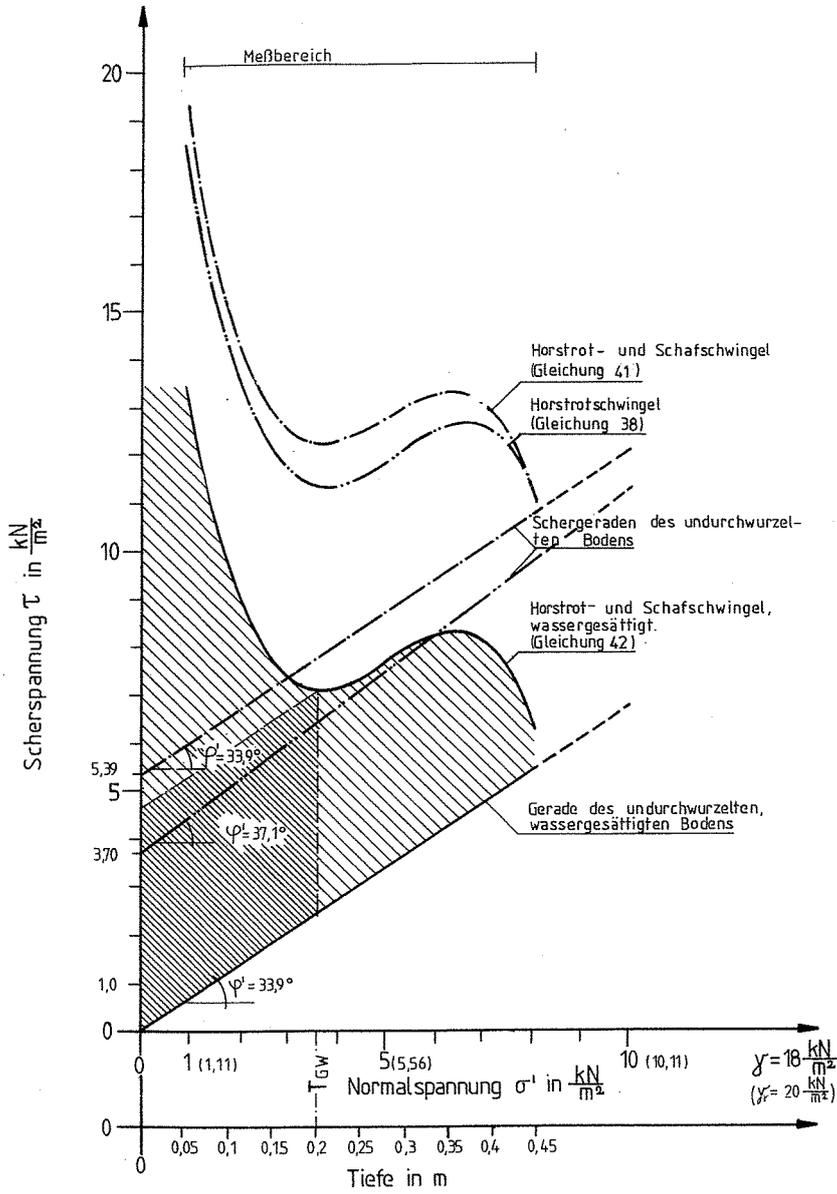


Abb. 47: Scherfestigkeitsverlauf von mit Horstrot- und Schafschwingel durchwurzeltem Boden in Abhängigkeit der Tiefe.

eines stärkeren Tonanteils handeln. Für die Abschätzung der Wurzelkohäsion in der Praxis wird die folgende Gleichung empfohlen :

$$\tau = 0,6722^{**} \cdot \sigma' + 5,385 + 0,22875 \cdot 10^{-3**} \cdot N_{wg} \quad (40)$$

$$= c \qquad \qquad \qquad = c_w$$

$$\begin{aligned} s \text{ für } b_1 \text{ (} = \tan \varphi' \text{)} \text{ von } \sigma' &= \pm 0,10, & \varphi' &= 33,9^\circ \\ s \text{ für } b_2 \text{ von } N_{wg} &= \pm 0,0012 \\ R^2 &= 0,85, \quad n = 33 \end{aligned}$$

Der Scherwinkel φ' schwankt zwischen $29,8^\circ$ und $37,7^\circ$. Mit der Durchwurzelungsintensität als Funktion der Tiefe (Gleichung 32) erhält man ebenfalls eine Schergleichung für den durchwurzelten Boden, die nur von der Tiefe abhängt :

$$\tau = 0,6722^{**} \cdot \sigma' + 0,22875 \cdot 10^{-3**} \cdot N_{wg}(T) + 5,385 \quad (41)$$

Das relative Minimum wurde hier in einer Tiefe von 0,209 m mit $\tau = 12,17 \text{ kN/m}^2$ und das relative Maximum in 0,353 m Tiefe mit $\tau = 13,28 \text{ kN/m}^2$ bestimmt.

Bei weitgehender Wassergesättigung des Bodens (Kap. 10.9) fällt die Kohäsion des Bodens (scheinbare Kohäsion) um $c_k = 4,14 \text{ kN/m}^2$ bis $c_k = 3,56 \text{ kN/m}^2$ ab. Auf der sicheren Seite liegend wird bei der Gleichung 41 die gesamte Kohäsion von $c = 5,385 \text{ kN/m}^2$ abgezogen und man gelangt zu der folgenden Gleichung für die Scherfestigkeit :

$$\tau = 0,6722^{**} \cdot \sigma' + 0,22875 \cdot 10^{-3**} \cdot N_{wg}(T) \quad (42)$$

In der Abb. 4 ist zwischen der Schergeraden des undurchwurzelten Bodens und dem Scherfestigkeitsverlauf für den wassergesättigten Boden der Bereich der Wurzelkohäsion schraffiert dargestellt. Für die Baupraxis kann auf diesem Standort demnach eine Wurzelkohäsion von $c_w = 4,5 \text{ kN/m}^2$ (max. $c_w = 5 \text{ kN/m}^2$ bei Landschaftsrassen, der vorwiegend aus

Horstrotschwingel und Schafschwingel besteht) bis in eine Tiefe von etwa 20 cm angenommen werden. Der Bereich oberhalb der Parallelen zur Schergeraden des undurchwurzelten Bodens wird vernachlässigt.

12.1.4 Bestimmung der maßgeblichen Scherfestigkeit unter Verwendung der Grenztiefe T_G

Für die praktische Verwendung der vorliegenden Forschungsergebnisse werden abschließend Hinweise zur Ermittlung der maßgebenden Scherfestigkeit gegeben. Dazu muß zunächst die Durchwurzelungsintensität in Abhängigkeit der Tiefe gemessen werden. Als Beispiel sind in Abb. 48 mehrere Scherfestigkeitsverläufe aufgetragen, die aus tatsächlich gemessenen Durchwurzelungsintensitäten berechnet worden sind. Es wurde mit einem $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ gerechnet.

Zwischen der Geländeoberkante und derjenigen Tiefe, in der die Durchwurzelung gleich Null ist, treten oft ein oder mehrere Minima des Scherfestigkeitsverlaufs auf. Diese Minima sind aus dem Verlauf der Durchwurzelungsintensität über die Tiefe nicht immer zu erkennen. Die Tiefe, bei der der Scherfestigkeitsverlauf ein relatives Minimum erreicht, wird als die Grenztiefe der Wurzelkohäsion T_{c_w} bezeichnet. Bis zu dieser Tiefe kann der Wert der Kohäsion alle Differenzbeträge zwischen der Scherfestigkeitskurve des durchwurzelten Bodens und der Schergerade des undurchwurzelten Bodens annehmen. So erhält man z. B. für die Scherfestigkeitskurve der Parzelle 4b zunächst in einer Tiefe $T_1 = 0,1 \text{ m}$ eine Wurzelkohäsion von $c_w = 5,2 \text{ kN/m}^2$. Bei $0,17 \text{ m}$ Tiefe ergibt sich aus dem relativen Scherfestigkeitsminimum eine Wurzelkohäsion von $c_w = 3,3 \text{ kN/m}^2$ und die Grenztiefe T_{c_w} der Wurzelkohäsion der Parzelle 2. Unterhalb einer Tiefe von $0,17 \text{ m}$ wird der Ansatz einer höheren Wurzelkohäsion zur Berücksichtigung von Wurzelhorizonten als diejenige der Grenztiefe nicht empfohlen. So muß bei einem Standsicherheitsnachweis einer Böschung die jeweilige Wurzelkohäsion mehrerer Tiefen einer Scherfestigkeitskurve berücksichtigt werden, um zur minimalen Standsicherheit zu gelangen. Die minimale Wurzelkohäs-

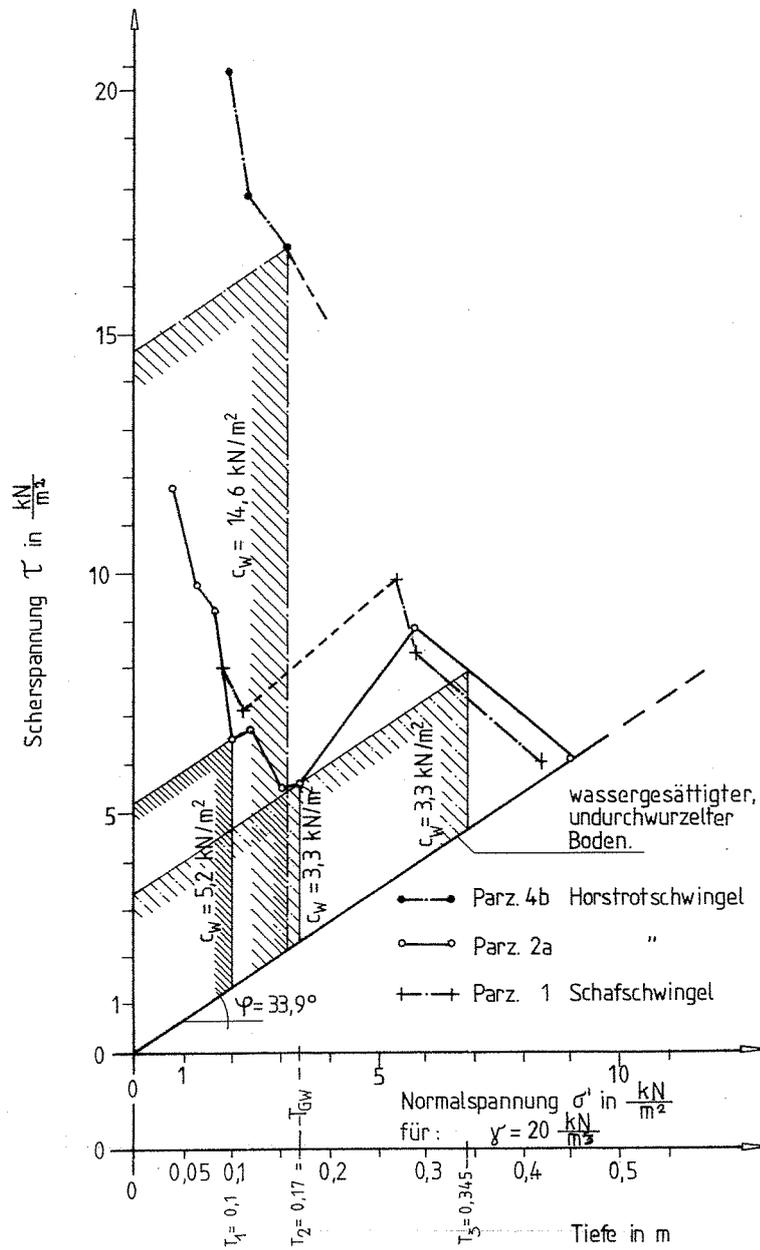


Abb. 48: Scherspannungsverläufe einzelner Horstrot- und Schafschwingselarten sowie der anhand der Grenztiefe ansetzbare Scherspannungsverlauf.

ion, die durch die Grenztiefe ermittelt wird, muß nicht zwangsläufig die minimale Standsicherheit einer Böschung ergeben.

12.2 Gehölzdurchwurzelung

Aus den Scherversuchen können folgende Ergebnisse für eine Schertiefe von 0,5 m und die beschriebene Bodenart festgehalten werden, die noch durch weitere Scherversuche untermauert werden müssen:

1. Die Verformung von Wurzeln bis zu einem Durchmesser von 5,5 mm (Gruppe 2) kann für einen mitteldicht gelagerten Sand als linear angenommen und daraus eine zusätzliche Normalkraft infolge der Scherverschiebung errechnet werden.
2. Die zusätzliche Scherkraft größerer, tiefer verankerter Wurzeln wird erst nach dem Bruch des Korngerüstes aktiviert und sollte unter Zugrundelegung der Gleitscherfestigkeit des Bodens berechnet werden.
3. Beim Bruch des Bodens müssen auch die begrenzenden Materialeigenschaften des Lebendbaustoffs Pflanze miteinbezogen werden:

Mit zunehmender Scherverschiebung dehnen sich die Wurzeln und werden zunehmend geschädigt. Vermutlich kann vor dem endgültigen Zerreißen die Wurzel ihre Funktion, die Ernährung der Pflanze, nicht mehr erfüllen. Wenn aber zu viele Wurzeln die Pflanze nicht mehr ernähren können, könnte auch die Standsicherheit einer gesamten Böschung zumindest zeitweilig in Frage gestellt werden. Kommt es nicht zum vollständigen Abrutschen des Wurzeldeckwerkes, so ist der lebende Baustoff in der Lage sich zu regenerieren, das Deckwerk wieder zu festigen und nach unten zu verankern.

Weiterhin haben die Scherversuche gezeigt, daß die bisher in der Literatur veröffentlichten Rechenmodelle zur Berechnung der Wurzelkohäsion die Bodenart kaum oder gar nicht berücksichtigen. Das hier zugrundegelegte Modell von WU et al. (1979 und 1987) kann im wesentlichen bei einem kohäsionslosen Boden angewandt werden.

Kohäsive Böden, die mit Wurzeln durchwachsen sind, sind bisher noch kaum hinsichtlich des Einflusses der Durchwurzelung auf die Scherfestigkeit untersucht worden. Aufgrund des höheren Ton- und Schluffanteils dieser Böden ist wiederum mit einer veränderten Durchwurzelungsintensität aber auch mit einer veränderten Ausbildung der einzelnen Wurzeln zu rechnen. So zeigt die Scherverschiebungskurve Nr. 2w (Abb. 43) ein sehr hohes Scherkraftmaximum und keinen Wiederanstieg infolge einer Wurzelzugkraft. Eine Wassersättigung dauert bei einem solchen Boden sehr lange und hätte evtl. die Entstehung von Porenwasserdruck bewirkt, so daß der Einfluß der Wurzeln nicht genau hätte bestimmt werden können. Die Wurzeln des Scherversuchs Nr. 2w sind nicht seitlich durch den Boden, sondern senkrecht aus ihren Wurzelröhren herausgezogen und in der Scherfuge horizontal auf Zug belastet worden (Foto 21). Bei einer der stärksten Wurzeln ist der Zentralzylinder etwa 45 cm unterhalb der Scherebene gerissen, während die Rinde in der Scherebene gerissen ist. Die Mantelreibung hat die Rinde festgehalten und der Zentralzylinder ist aus der Rindenröhre herausgerutscht.

Die Weiden haben nach 3 Jahren eine etwa 30 cm starke Bodenschicht sehr stark durchwurzelt, d. h. eine Art Wurzeldeckwerk ist entstanden. Dieses Deckwerk ist durch eine große Anzahl starker Wurzeln mit den darunter liegenden Bodenschichten verbunden. Wenn man das verschiebliche Rechenmodell von WU et al. (1979 und 1988) zugrundelegt, wirken diese noch biegeweichen Wurzeln als Anker.

12.3 Ausblick

Im Hinblick auf die weitere Erforschung des Einflusses von Gräserwurzeln auf die Scherfestigkeit von Böden sind weitere Arbeiten an den folgenden Punkten notwendig :

- Das für diese Untersuchungen gebaute Schergerät sollte technisch einmal in seiner Handhabung und zum anderen so verbessert werden, daß beim Einsatz möglichst wenig Rasenfläche zerstört wird.
- Zur Erfassung der Durchwurzelung, besonders der Wurzelquerschnittsflächen, müssen einfach zu handhabende und zeitsparende Verfahren entwickelt werden.
- Die Scherversuche müssen für möglichst viele Gräserarten auf verschiedenen Standorten durchgeführt werden, um die Datenbasis weiter zu vergrößern.

Bei der Erfassung der Wirkung von Gehölzwurzeln auf die Scherfestigkeit von Böden und damit auf die Standsicherheit von Böschungen sollte z. B. an den Vorschlägen von FLOSS (1985) weitergearbeitet werden, der das Wurzelwerk als ein homogenes Deckwerk mit veränderten Bodenkennwerten auffaßt. Dieser Gedanke sollte auch verknüpft werden mit einem Vorschlag von SMOLTCZYK (1989), die Verankerungswurzeln nach der Methoden der "Bewehrten Erde" zu berechnen. Läßt man geringe Verschiebungen einer Bodenscholle auf einem Hang zu, so läßt sich die verankernde Wirkung einer Wurzel auch in Form einer Rückstellkraft berechnen. Dabei wird die Wurzel als elastisches Zugglied im Boden behandelt. Bei der Berechnung von Ankern schlägt VOGT (1987) vor, eine Verschiebung der verankerten Bodenscholle zuzulassen, damit sich der Anker dehnt, was den Anpreßdruck erhöht und in der Scherfuge eine zusätzliche, rückhaltende Scherkraft erzeugt. Evtl. ließe sich dieser Rechengang auch auf Wurzeln anwenden, wie es bereits von WU et al. (1979) begonnen worden ist. Hierzu fehlen aber noch die wesentlichen Kennwerte. Weitere Berech-

nungsmodelle, die evtl. zur Erfassung des Einflusses der Durchwurzelung auf die Standsicherheit von Böschungen herangezogen werden könnten, werden bei der Bodenvernagelung und bei der Verdübelung von Hängen angewandt.

Um aber die notwendigen Kennwerte zu ermitteln müssen vor allem die Untersuchungsmethoden weiter- bzw. neu entwickelt werden. Durch das Ausziehen einzelner Wurzeln oder ganzer Pflanzen können die Verankerungskräfte genau und schnell erfaßt werden und man erhält z. B. beim Ausziehen ganzer Wurzelteller einen Hinweis auf die Stärke der intensiv durchwurzelten, oberflächennahen Bodenschicht, durch die wahrscheinlich keine Bruchfuge verläuft.

13. ZUSAMMENFASSUNG

Seit langem ist aufgrund praktischer Erfahrungen bekannt, daß von standortgemäßen Pflanzen durchwurzelte Böden wesentlich stabiler gegen Erosion und Rutschungen als vegetationslose Böden sind. Es fehlen jedoch die rechnerischen Nachweise, damit der Baustoff "lebende Pflanze" in die Standsicherheitsberechnung von Hängen und Böschungen berücksichtigt werden kann. Zudem hat in den letzten Jahren die Erforschung des Einflusses von Pflanzenwurzeln auf die Festigkeit von Böden gerade im Hinblick auf zunehmende Schädigungen jeglicher Art der Pflanzendecke erheblich an Bedeutung gewonnen. Ziel dieser Arbeit ist es deshalb, den Einfluß von Pflanzenwurzeln auf die Scherfestigkeit eines durchwurzelten Bodens auch quantitativ zu erfassen.

Am Institut für Landschaftsbau der Technischen Universität Berlin hat der Verfasser Scherfestigkeitsmessungen mit einem Kastenscherggerät in situ an mit Gräsern und mit Gehölzen durchwurzelten Böden und am Institut für Grundbau und Baubetrieb der Technischen Universität Berlin Scherversuche mit einem kleinformatischen Rahmenscherggerät an von Gräsern durchwurzeltem Boden durchgeführt. Zu den Versuchen wurden Horstrotschwingel und Schafschwingel (*Festuca rubra* ssp. *commutata* und *Festuca ovina* s. L.) sowie der Ausläufertreibende Rotschwingel (*Festuca rubra* ssp. *rubra*) und die Gelbe Steinweide (*Salix balsamifera* mas.) herangezogen.

Anhand der einschlägigen Literatur wird die Schutzwirkung der Bodendurchwurzelung gegen Erosion und Rutschungen dargestellt und in einem kurzen Abriß wird die Wurzelmorphologie, das Wurzelwachstum und die mechanischen Eigenschaften von Wurzeln erläutert. Aus bodenmechanischer Sicht werden Berechnungsmodelle ohne und mit Berücksichtigung von Pflanzenwurzeln zum Nachweis der Standsicherheit von Böschungen sowie der Scherfestigkeit eines Bodens gegenübergestellt. Zur Messung der Scherfestigkeit in situ ist ein Kastenscherggerät konstruiert worden, daß sich sowohl zum Einsatz an gras-

durchwurzeltem als auch an mit Gehölzen durchwurzeltem Boden eignet. Die Ergebnisse von Scherfestigkeitsmessungen an grasdurchwurzeltem Boden mit einem Rahmenschergerät im Labor zeigen nur teilweise eine gute Übereinstimmung mit denjenigen des Kastenschergerätes, da die Höhe der Laborproben zu gering war und der Verschiebungsweg des Rahmenschergerätes zu gering war.

Zur quantitativen Erfassung der Durchwurzelung erwies sich die Durchwurzelungsintensität (Wurzelanzahl pro Scherfläche) neben dem Durchwurzelungsgrad (Wurzelquerschnittsfläche pro Scherfläche) als gut geeignet. Die Messung der Wurzelanzahl und der Wurzelquerschnittsflächen ist mit verschiedenen Methoden erfolgt und beschrieben worden.

Die Scherfestigkeit eines grasdurchwurzelten Bodens wird als Funktion der Schertiefe dargestellt, erreicht in einer Grenztiefe ihren minimalen Wert und nähert sich danach der Schergeraden des undurchwurzelten Bodens an.

Die Scherfestigkeit wird von der Pflanzenart, dem Boden, dem Nährstoff- und Wassergehalt des Bodens, aber auch durch die Pflege beeinflusst. In einer zusammenfassenden Auswertung wird gezeigt, daß die Wirkung der Bodendurchwurzelung als eine Art Kohäsion, hier als Wurzelkohäsion bezeichnet, in die COULOMB'sche Bruchbedingung eingefügt werden kann.

Anhand der Scherfestigkeitsmessungen an mit Wurzeln der Gelben Steinweide (*Salix balsamifera* mas.) durchwurzeltem Boden wird gezeigt, daß die Scherfestigkeit eines mit lebenden elastischen Wurzeln durchwachsenen Fein- und Mittelsandes über das Rechenmodell von WU et al. (1979) näherungsweise berechnet werden kann, wobei anstatt des Scherwinkles der Winkel der Gleitreibung in der Formel berücksichtigt wird. Erst bei größeren Verschiebungen werden die Wurzelzugkräfte aktiviert, die ein etwa 30 cm starkes Wurzeldeckwerk nach unten hin verankern. Abschließend werden Hinweise für weitere Forschungen an durchwurzelte Böden gegeben.

LITERATURVERZEICHNIS

- AHLGRIMM, H.J. (1977): Der Einfluß physiologischer und morphologischer Faktoren auf die Festigkeit von Pflanzhalmen am Beispiel von Wiesenlieschgras. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 37. - Selbstverlag der Bundesanstalt für Landwirtschaft Braunschweig - Völkenrode (FAL).
- ALBRECHT, D. / FRITSCHKE, K.H. / WINKLER, S. (1953): Weitere Entwicklung des Strukturbohrers. - Deutsche Landwirtschaft 4, S. 206 - 208.
- ARBEITSGRUPPE BODENKUNDE der geologischen Landesämter und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in der Bundesrepublik Deutschland (1982): Bodenkundliche Kartieranleitung. - In Kommission: E. Schweitzerbartsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- BAKER, G. (1978): Examples of different methods of slope stabilization. FRI Symposium, New Zealand Forest Service. In: ORWIN, J. (Ed.): Revegetation in the rehabilitation of mountain lands, No. 16, p. 175-180.
- BARKER, D.H. (1986): Enhancement of slope stability by vegetation. - Ground engineering, April 1986, p. 11-15.
- BECKER, A. / MUSSGNUG, R. / FRANK, F. / CZERMAK, H. (1942): Die lebende Verbauung. Archiv für Wasserwirtschaft, Heft 72, Berlin.
- BERNHARD, G. / RICHTER, R. (1978): Meßgerät zum Bestimmen der Scherfestigkeit. - Argrartechnik V. 27 (9), S. 390-393.
- BOGOUSLAWSKI, E. von (1981): Ackerbau, Grundlagen der Pflanzenproduktion. - DLG-Verlag, Frankfurt/M.

- BÖHM, W. (1974): Wurzelforschung und Landschaftsökologie. - Natur und Landschaft, 49. Jg., Heft 6, S. 158-161.
- BÖHM, W. (1979): Methods of studying root systems. - Springer-Verlag, Berlin, New York.
- BÖHM, W. / KUTSCHERA, L. / LICHTENEGGER, E. (1983): Wurzelökologie und ihre Nutzenanwendung. Internationales Symposium vom 27. Sept. bis 24. Sept. 1982. - Verlag Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft, A-8952 Irdning.
- BÖLLING, W.H. (1971): Zusammendrückung und Scherfestigkeit von Böden. - Springer-Verlag, Berlin.
- BOSKOVIC, P. (1975): Bedeutung einiger Wurzeleigenschaften von Gräsern für Sportplatz-, Park- und Begrünungsrasen. - Rasen Turf Gazon, Nr. 3, S. 91-94.
- BOSKOVIC, P. (1975): Bedeutung einiger Wurzeleigenschaften von Gräsern für Sportplatz-, Park- und Begrünungsrasen. - Rasen Turf Gazon, Nr. 6, S. 95-118
- BREBURDA, J. (1983): Bodenerosion und Bodenerhaltung. - DLG-Verlag, Frankfurt/M.
- BROWN, C.E. / SHEU, M.S. (1975): Effects of deforestation of slopes. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 101, p. 147-165.
- BRUNNER / SCHEIDEGGER (1975): Zur Dynamik des Rasengleitens. In: Internationales Symposium Interprävent, Schutz alpiner Lebensräume, Beiträge zu Fachbereich I-III, Band 1, Forschungsgesellschaft für vorbeugende Hochwasserbekämpfung, Klagenfurt.
- BUCHWALD, K. (1969): Begriffsbestimmungen und Anwendungsbereich. In: Baustoffe und Methoden des

Lebendbaus und kombinierter Verfahren, Handbuch für
Landespflege und Naturschutz Bd. 4. - BLV
Verlagsgesellschaft, München, Basel, Wien.

BUCHWALD, K. (1954): Lebendverbauung von Steilhängen und
Halden. - Begrünen und Rekultivieren von extremen
Standorten, Heft 43, S. 13-19 der Reihe Landwirtschaft -
Angewandte Wissenschaft. Landwirtschaftsverlag GmbH,
Hiltrup bei Münster.

BUCHWALD, K. / DUTTWEILER, H. (1973): Verbreitetste Methoden
zur Sicherung und Begrünung instabiler Hänge gegen
Erosion durch fließendes Wasser, Rutschung, Steinschlag.
In: BUCHWALD / ENGELHARD (Hrsg.): Landschaftspflege und
Naturschutz in der Praxis, BLV-Verlagsgesellschaft,
München, Basel, Wien.

BUNDESSORTENAMT (1986): Beschreibende Sortenliste 1986.
Rasengräser. - Alfred Strothe-Verlag, Hannover.

BUNZA, G. (1976): Systematik und Analyse alpiner
Massenbewegungen von G. Bunza. In: BUNZA / J. KARL / J.
MANGELSDORF 1976: Geologisch-morphologische Grundlagen
der Wildbachkunde mit einem Beitrag von P. Simmersbach,
Schriftenreihe der Bayerischen Landesstelle für
Gewässerkunde München, Heft 11.

BURROUGHS, E.R. / THOMAS, B.R. (1977): Declining root
strength in Douglas-fir after felling as a factor in
slope stability. - United States Department of
Agriculture Forest Service, Intermountain Forest and
Range Experiment Station, Ogden, UT, Reserch Paper
INT-190.

CHMELAR, J. / MEUSEL, W. (1979): Die Weiden Europas, 2.
Auflage. - Die Neue Brehm-Bücherei, A. Ziemsen Verlag,
Wittenberg, Lutherstadt.

DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR ERD- UND GRUNDBAU (1962):
Empfehlungen für den Bau und die Sicherung von
Böschungen. - Die Bautechnik, Heft 12.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e.V. (Hrsg.), Beuth-Verlag,
Berlin:

- Normenausschuß Bauwesen im Deutschen Normenausschuß
(1981):
DIN 4084, Baugrund, Gelände und Böschungsberechnungen.
- Fachnormenausschuß Bauwesen im Deutschen Normenausschuß
(1973):
DIN 18035, Sportplätze, Tennenflächen.
- Fachnormenausschuß im DIN (Deutsches Institut für
Normung) e.V. (1976):
DIN 18121, Wassergehalt, Bestimmung durch Ofentrocknung.
- Fachnormenausschuß für Bauwesen im Deutschen
Normenausschuß (DNA) (1972):
DIN 18123, Baugrund, Untersuchung von Bodenproben,
Kornverteilung.
- Fachnormenausschuß für Bauwesen im Deutschen
Normenausschuß (DNA) (1973):
DIN 18124, Baugrund, Bestimmung der Korndichte mit dem
Kapillarpknometer, Teil 1.
- Fachnormenausschuß für Bauwesen im Deutschen
Normenausschuß (DNA) (1970):
DIN 18196, Erdbau, Bodenklassifikation für bautechnische
Zwecke.
- Fachnormenausschuß für Bauwesen im Deutschen
Normenausschuß (DNA) (1973):
DIN 18917, Landschaftsbau, Rasen.

- Fachnormenausschuß Wasserwesen (FNW) im Deutschen Normenausschuß (DNA), (1977):
DIN 19657, Sicherung von Gewässern, Deichen und Küstendünen.
- Fachnormenausschuß Wasserwesen (FNW) im Deutschen Normenausschuß (DNA), (1968):
DIN 19672, Bodenentnahmegerate für den Landeskulturbau Blatt 1.
- Fachnormenausschuß Wasserwesen (FNW) im DIN, Deutsches Institut für Normung e.V. (1977):
DIN 19684, Chemische Laboruntersuchungen.

DUTHWEILER, H. (1966): Beobachtung der spontanen und der durch Lebendbau gelenkten Vegetationsentwicklung auf Steilböschungen und in ausgewählten Standorträumen. - Diss. Technische Universität Hannover, Fakultät für Gartenbau und Landeskultur.

DUTHWEILER, H. (1974): Leistungsvergleich krautiger Pionierpflanzen für die Sicherung von Mergelhängen. Ein Beitrag zur Lebendbauforschung. - Schriftenreihe planungsbüro grebe landschafts- und ortsplanung, 8500 Nürnberg, Lange Zeile 8.

ELLENBERG, H. (1986): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. - Ulmer-Verlag, Stuttgart.

ELLENBERG, H. (1979): Zeigerwerte der Gefäßpflanzen Mitteleuropas. - Verlag Erich Goltze KG, Göttingen.

ELLISON, L. / COALDRAKE, J.E. (1954): Soil Mantle-Movement in Relation to Forest Clearing in Southeastern Queensland. - Ecology, Vol. 35, 1954, p. 380-388.

ENDO, T. (1968): On the effects of tree's roots upon the shearing strength of soil. I. Annual Report of the

Hokkaido Branch Forest Experiment Station, 1969 (in Japanese with English summary).

ENDO, T. / TSURUTA, T. (1980): Effect of tree roots upon the shear strength of soil. Forest Management Division, Hokkaido Branch, Forest and Forestry Products Research Institute, Japan. - Japan Agriculture Quarterly, Vol. 14 (2), p. 112-115.

FINCK, A. (1979): Dünger und Düngung. - Verlag Chemie, Weinheim.

FLOSS, R. (1985): Zur Standsicherheit von Böschungen mit Lebendverbau aus der Sicht von Bodenmechanik und Grundbau. In: PFLUG (1982): Ingenieurbiologie. Wurzelwerk und Standsicherheit von Böschungen und Hängen. - SEPIA Verlag, Aachen.

FLOSS, R. / THAMM, B.R. (1977): Entwurf von Stützkonstruktionen aus bewehrter Erde. In Tiefbau 2.

FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN UND VERKEHRSWESEN, Arbeitsgruppe Straßenentwurf (1983): Richtlinie für die Anlage von Straßen, Teil: Landschaftsgestaltung (RAS-LG), Abschnitt 3, Lebendverbau, Köln.

GAISER, R.N. (1952): Root channels and Roots in Forest Soil. - Soil Science Society Proceedings, p. 62-65.

GRASSHOFF, H. / SIEDECK, P. / FLOSS, R. (1979): Handbuch Erd- und Grundbau, Teil 1: Boden und Fels Gründungen, Stützbauwerke, Teil 2: Erdbau und Erddruck. - Werner-Verlag, Düsseldorf.

GRAY, Donald H. (1973): Effects of forest clear cutting on the stability of natural slopes. Results of field studies. Interim report to Nat. Sci. Found., Dep. of Civil Eng., Univ. of Michigan, Ann Arbor.

- GRAY, Donald H.: Effects of forest clear-cutting on the stability of natural slopes. - Bulletin of the Association of Engineering Geologists, 7 (1,2), 1970, p. 46-66.
- GREENWAY; D. R., 1987: Vegetation and slope stability. - Edited by M. G. Anderson and K. S. Richards, Wiley, New York and sons. Zitiert in: PREGL, O., 1989: Handbuch der Geotechnik, Böschungen, Band 10. - Selbstverlag des Instituts für Geotechnik und Verkehrswesen, Universität für Bodenkultur, Gregor Mendel Str. 33, A-1180 Wien.
- GROTTENTHALER, W. / LAATSCH, W. (1973): Untersuchungen über den Hangabtrag im Lainbachtal bei Benediktbeuren. - Forstwissenschaftliches Centralblatt 9/2, S. 1-19.
- GUDEHUS, G. (1981): Bodenmechanik. - Springer-Verlag, Berlin.
- HÄHNE, K. (1982): Messungen des Widerstandes von Gehölzwurzelsystemen gegenüber oberirdisch angreifenden Zugkräften. In: W. PFLUG (Hrsg.) (1982): Ingenieurbiologie, Jahrbuch 1980 der Gesellschaft für Ingenieurbiologie. - Krämer-Verlag, Stuttgart.
- HÄHNE, K. (1985a): Wurzelentwicklung einer Saalweide am Hellerbergschnitt der A 62 bei Freisen im Saarland sowie einer Rotbuche und einer Traubeneiche am ungestörten Hellerberghang. In: W. PFLUG (Hrsg.) (1985): Ingenieurbiologie, Jahrbuch 2 der Gesellschaft für Ingenieurbiologie. - SEPia-Verlag, Stuttgart.
- HÄHNE, K. (1985b): Die Wurzelentwicklung einiger Gehölze sowie krautiger Pionierpflanzen am Rutschhang bei Weilerbach. In: W. PFLUG (Hrsg.) (1985): Ingenieurbiologie, Jahrbuch 2 der Gesellschaft für Ingenieurbiologie. - SEPia-Verlag, Stuttgart.

HÄHNE, K. (1985c): Scherversuche auf Rasennarben. - Rasen Turf Gazon, Heft 1, S. 19 - 25.

HARDKE, K.H. (1985): Wechselbeziehungen zwischen Pflanzen und Boden bzw. Lockergestein unter besonderer Berücksichtigung der Standortverhältnisse an neu entstandenen Böschungen. In: W. PFLUG (Hrsg.) Ingenieurbiologie, Jahrbuch 2 der Gesellschaft für Ingenieurbiologie. - SEPiA-Verlag, Stuttgart.

HARDKE, K.H. (1978): Einführung in die Bodenphysik. - Ferdinand Enke-Verlag, Stuttgart.

HILLER, H. (1966): Beitrag zur Beurteilung und zur Verbesserung biologischer Methoden im Landeskulturbau. - Diss. TU Berlin. D 83, Nr. 206.

HILLER, H. (1969): Problematik der Deichsicherung durch biologische Maßnahmen - Erste Untersuchungsergebnisse von beweideten Seedeichen an der Westküste Schleswig-Holsteins. - Z.f. Kulturtechnik und Flurbereinigung 10, Heft 3, S. 157-173.

HILLER, H. (1973): Trockenrasen an Straßenrändern: Untersuchungen zur Ermittlung pflegeextensiver Ansaatmischungen. - Z. Rasen Turf Gazon 4, Heft 2, S. 31-36.

HILLER, H. (1976): Rasen im Landschaftsbau. Habilitationsschrift, Fachbereich 14: Landschaftsentwicklung, TU Berlin, D 83.

HILLER, H. (1985): Zur Ausbildung des Wurzelwerks von Strauchweiden und ihr Beitrag zur Böschungssicherung. In: W. PFLUG (Hrsg.) (1985): Ingenieurbiologie, Jahrbuch 2 der Gesellschaft für Ingenieurbiologie, SEPiA-Verlag, Stuttgart.

- HOLY, M. (1980): Erosion and Environment. - Environmental sciences and applications, Vol. 9, Pergamon Press.
- HORN, R. (1981): Die Bedeutung der Aggregation von Böden für die mechanische Belastbarkeit in dem für Tritt relevanten Auflastbereich und deren Auswirkung auf physikalische Bodenkenngrößen. Fachbereich 14, Landschaftsentwicklung der TU Berlin (Hrsg.), Landschaftsentwicklung und Umweltforschung, Schriftenreihe des FB 14 der TU Berlin, Nr. 10.
- HÜNICKEN (1977): Polyre, Rechenprogramm zur polynominalen Regression. - ZEBIDAT, Fachbereich 15 der Technischen Universität Berlin.
- KAIBORI, M. / SASSA, K. (1984): Tragbares Geländerahmen-Schergerät. In: Forschungsgesellschaft für vorbeugende Hochwasserbekämpfung (Hrsg.): Koordinierung in der Schutzwasserwirtschaft. Internationales Symposium Interprävent 1984, Bd. 2, Tagespublikationen, Villach.
- KARL, J. / HÖLTL, W. (1974): Analyse alpiner Landschaften in einem homogenen Rasterfeld. Schriftenreihe Bayerische Landesanstalt für Gewässerkunde, Heft 10, München.
- KAUL, R. (1965): The influence of roots on certain mechanical properties of an uncompacted soil. Ph. D. thesis, Department of Agriculture Engineering, North Carolina State University, Raleigh, N.C.
- KLAPP, E. (1967): Lehrbuch des Acker- und Pflanzenbaus. - Verlag Paul Parey, Berlin.
- KOBASHI, S. (1984): The role of vegetation to slope stability. In: Forschungsgesellschaft für vorbeugende Hochwasserbekämpfung, Klagenfurt (Hrsg.): Koordinierung in der Schutzwasserwirtschaft, Internationales Symposium Interpraevent, 1982, Villach.

- KOMAMURA, F. / WATANABE, T. (1977): Effects of tree on the slope stability. - Journal of the Japanese Forestry Society (Japan), Sept. 1977, Vol. 59 (9), p. 338-340 (japanisch, übersetzt durch Dr. M. Takeya, Freie Universität Berlin, Institut für Veterinär-Biochemie).
- KÖSTLER, J.N. / BRUCKNER, E. / BIBELRIETHER, H. (1968): Die Wurzeln der Waldbäume. - Paul Parey-Verlag, Hamburg, Berlin.
- KRUEDENER, A. von (1950/51): Der unterirdische Wald. Allgemeine Forst- und Jagtzeitung, Heft 8, S. 226-233. In: PFLUG, W. (Hrsg.) (1985): Ingenieurbiologie, Jahrbuch 2 der Gesellschaft für Ingenieurbiologie, SEPIA-Verlag, Aachen.
- KURON, H. / JUNG, L. / SCHREIBER, H. (1956): Messungen von oberflächlichem Abfluß und Bodenabtrag auf verschiedenen Böden Deutschlands. - Schriftenreihe des Kuratoriums für Kulturbauwesen, Heft 5.
- KUTSCHERA, L. (1960): Wurzelatlas mitteleuropäischer Ackerunkräuter und Kulturpflanzen. - DLG-Verlags-GmbH, Frankfurt/M.
- KUTSCHERA, L. / LICHTENEGGER, E. (1982): Wurzelatlas mitteleuropäischer Grünlandpflanzen, Band I, Monocotyledoneae. - Gustaf-Fischer-Verlag, Stuttgart, New York.
- LANG, H.-J. / HUDER, J. (1982): Bodenmechanik und Grundbau. - Springer-Verlag, Berlin.
- LICHTENEGGER, E. (1985): Die Ausbildung der Wurzelsysteme krautiger Pflanzen und deren Eignung für die Böschungssicherung auf verschiedenen Standorten. In: PFLUG, W. (Hrsg.) (1985): Ingenieurbiologie, Wurzelwerk und Standsicherheit von Böschungen und Hängen. - SEPIA-

Verlag, Aachen.

- LINKE et al. (1969): Ingenieurbiologische Bauweisen und
Landeskultur.- Kammer der Technik, Fachausschuß
Ingenieurbiologische Bauweisen im Fachverband Wasser,
Berlin (DDR).
- MANBEIAN, T. (1973): The influence of soil moisture, cyclic
wetting and drying and plant roots on the shear strength
of cohesive soil. Ph. D. thesis, Departement of Soil
Science University of California, Berkeley, CA.
- MÜCKENHAUSEN, E. (1985): Die Bodenkunde und ihre
geologischen, geomorphologischen, mineralogischen und
petrologischen Grundlagen. - DLG-Verlag, Frankfurt/M., 3.
ergänzte Auflage.
- MUDRA, A. (1958): Statistische Methoden für
landwirtschaftliche Versuche. Paul-Parey-Verlag, Berlin,
Hamburg.
- MÜLLER (1929): Die Beziehungen Bodenschub und Wuchsform der
Bäume im Deutschen Mittelgebirge. - Diss. Hamburg/Apolda.
- NASSIF, S. (1965): Der Einfluß organischer Bestandteile auf
die physikalischen Eigenschaften, insbesondere auf die
Scherfestigkeit bindiger Böden. -Diss., Fakultät für
Bauwesen der Technischen Hochschule München.
- NACHTIGALL, W. (1971): Biotechnik. - UTB, Uelle und Meyer
Verlag, Heidelberg.
- NEULAND, H. (1980): Diskriminanzanalytische Untersuchungen
zur Identifikation der Auslösefaktoren für Rutschungen in
verschiedenen Höhenstufen der Kolumbianischen Anden. -
Catena, Vol. 7, S. 205-221.
- O'LOUGHLIN, C.L. (1972): An investigation of the stability

of the steep-land forest soils in the Coast Mountains, South-west British Columbia, Ph. D. Diss., University of British Columbia, Vancouver, B.C., Canada.

OBERDORFER, E. (1983): Pflanzensoziologische Exkursionsflora. - Ulmer-Verlag, Stuttgart.

OPITZ VON BOBERFELD, W. (1978): Möglichkeiten zur serienmäßigen Ermittlung sorten- und artenspezifischer Wurzelgewichte in verschiedenen Medien. - Habil. an der Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät der Rheinischen-Friedrich-Wilhelm-Universität zu Bonn.

PAHLKE, K. (1961): Struktur- und Wasserhaushaltsuntersuchungen auf einem jungen, tonreichen Seemarschboden. - Diss. TU Berlin.

PAULI, F.W. (1985): Lebendverbauung der Pflanze - Boden - Grenzfläche in Hanglagen. In: PFLUG, W. (Hrsg.) (1985): Ingenieurbiologie, Wurzelwerk und Standsicherheit von Böschungen und Hängen. - SEPia-Verlag, Aachen.

PFEFFER, W. (1893): Druck- und Arbeitsleistung durch wachsende Pflanzen. - Abhandlungen der Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften XX, S. 235-274.

RICHTER, G. (1965): Bodenerosion. Schäden und gefährdete Gebiete in der Bundesrepublik Deutschland. Forschungen zur Deutschen Landschaftskunde, Band 152.

RIEHM VIS, F. (1980): Die Bedeutung des pH-Wertes des Oberbodens für den Rasen. Z. für Vegetationstechnik 3, S. 97-99.

RÜMLER, R. (1974): Zur Entwicklung von Rasenansaat und ihre Bedeutung für die ingenieurbiologische Sicherung von Straßenböschungen. Diss., Fakultät für Bauwesen, RWTH Aachen.

- SACHS, L. (1983): Angewandte Statistik. - Springer-Verlag, Berlin, New York.
- SCHAARSCHMIDT, G. (1974): Zur ingenieurbioologischen Sicherung von Straßenböschungen durch Bewuchs und Lebendverbau. Diss., RWTH Aachen.
- SCHIEFFER, P. / SCHACHTSCHNABEL, P. (1984): Lehrbuch der Bodenkunde, 11. Auflg., - Ferdinand-Enke-Verlag, Stuttgart.
- SCHIECHTL, H.M. (1973a): Die Folgen der Entwaldung am Beispiel des Finsingtales. Zentralblatt für das gesamte Forstwesen, Nr. 1-2.
- SCHIECHTL, H.M. (1973b): Sicherungsarbeiten im Landschaftsbau. - Verlag Callwey, München.
- SCHIECHTL, H.M. (1983): Pflanzen als Mittel der Bodenstabilisierung. In: BÖHM, W. / KUTSCHERA, L. / LICHTENEGGER, E. (1983): Wurzelökologie und ihre Nutzanwendung. Internationales Symposium vom 27. Sept. bis 24. Sept. 1982. - Verlag Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft, A-8952 Irndning.
- SCHLOSSER, F. / NGUYEN-THAUGH LONG (1974): Recent Results in French Research on Reinforced Earth. - Journal of Construction Division, Sept. 1974, p. 223-237.
- SCHLÜTER, U. (1971): Versuche über die Eignung von Gehölzen als Heckenlagen zur Stabilisierung steiler Kippenböschungen aus saurem, tertiärem Abraummateriale. Beiheft 6 zu Landschaft und Stadt. - Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- SCHUBERT (1978): Sicherungstechnische Eigenschaften von Graswurzeln. Z. für Vegetationstechnik, S. 75-80.

- SCHULTZE, E. / MUHS, H. (1967): Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten. - Springer-Verlag, Berlin.
- SKIRDE, W. (1979): Reaktion von Gehölzen auf verschiedene Maßnahmen der Bodenpflege. Z. f. Vegetationstechnik, Heft 2, S. 78-83.
- SMOLTCZYK, H.U. (1960): Untersuchung eines Sandes an einem großformatigen Kastenschergerät. Der Bauingenieur, Heft 5, S. 162-167.
- SMOLTCZYK, H.U. (Hrsg.)(1980): Grundbau-Taschenbuch, Teil 1 und 2. - Verlag von Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin.
- SMOLTCZYK, H.U. (Hrsg.)(1987): Grundbau-Taschenbuch, 3. Aufl., Teil 3, Ernst-Verlag, Berlin.
- SMOLTCZYK, U. / MALCHAREK, K. (1985): Lebendverbau an Steilwänden aus Tonmergel. In: PFLUG, W. (Hrsg.) (1985): Ingenieurbilogie, Wurzelwerk und Standsicherheit von Böschungen und Hängen. - SEPiA-Verlag, Aachen.
- SMOLTCZYK, H.U. (1989): Mündliche Mitteilung an den Verfasser im Rahmen einer Fortbildungsveranstaltung "Umweltfreundliche Methoden der Böschungssicherung" an der Technischen Akademie Esslingen.
- SÖHNE, W. (1953): Reibung und Kohäsion bei Ackerböden. Grundlagen der Landtechnik 5, S. 64.
- SPORER, W. (1985): Alternative Bauweisen für belastbare Vegetationsflächen und deren Eignung unter besonderer Berücksichtigung bodenmechanischer Kenngrößen. Diss., Fachbereich 14: Landschaftsentwicklung, TU Berlin.
- STEIN, D. (1971): Untersuchung über die Scherfestigkeit grobkörniger Schüttmaterialien unter Verwendung eines großformatigen Kastenschergerätes. - VEB-Verlag für

Bauwesen, Heft 35, Berlin.

- STINY, J. (1910): Die Muren. In: BUNZA / J. KARL / J. MANGELSDORF 1976: Geologisch-morphologische Grundlagen der Wildbachkunde mit einem Beitrag von P. Simmersbach, Schriftenreihe der Bayerischen Landesstelle für Gewässerkunde München, Heft 11.
- STINY, J. (1947): Die Zugfestigkeit von Pflanzenwurzeln. Durch Verfasser übermittelte Separatabschrift aus: SCHIECHTL, H.M. (1973): Sicherungsarbeiten im Landschaftsbau, Callwey-Verlag, München.
- STOLZY, L.H. / BARLEY, K.P. (1968): Mechanical resistance encountered by roots entering compact soils. Soil Science 105, p. 297-301.
- STRASBURGER, E. (1983): Lehrbuch der Botanik, 32. Auflage - Gustav-Fischer-Verlag, Stuttgart, New York.
- SWANSTON, D.N. (1970): Mechanics of Debris Avalanching in Shallow Till Soil of Southeast Alaska. - Forest Service Research Paper, PNW-103, U.S. Department Agriculture.
- SWANSTON, D.N. (1969): Debris avalanching in thin soils derived from bedrock. - U.S. Forest Service Research, PNW-64.
- TAYLOR, D.W. (1948): Fundamentals of Soil Mechanics. - John Wiley & Sons, Inc., New York.
- TEFERRA, A. (1975): Beziehungen zwischen Reibungswinkel, Lagerungsdichte und Sondierwiderständen nichtbindiger Böden mit verschiedener Kornverteilung, Diss. SCHULTZE, F. (Hrsg.), Forschungsberichte aus Bodenmechanik und Grundbau, RWTH Aachen.
- TER-STEPHANIAN, G. (1963): On the Long-Term Stability of

Slopes. Publication 52, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, Norway, p. 1-15.

TERZAGHI, K. PECK, R. (1967): Soil Mechanics in Engineering Practice. 2nd Ed., Wiley, New York.

THUN, R. / HERRMANN, R. / KNICKMANN, E. (1955): Die Untersuchung von Böden. Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik, Methodenbuch, Band 1. - Neumann Verlag, Radebeul und Berlin.

TURMANINA, V.J. (1965): The strength of tree roots. Bull. Moscow Soc. Naturalists, Biol. Sec., Vol. 70, no. 5, p. 36-45.

VEDER, Ch. (1979): Rutschungen und ihre Sanierung. - Springer Verlag, Hamburg, Berlin.

VETTER, H. / SCHARAFAT, S. (1964): Die Wurzelverbreitung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen im Unterboden. Z. f. Acker- und Pflanzenbau 120, S. 275-298.

VIDAL (1966): La terre armee. Ann. Inst. Technm. Bat. Trav. Publ., p. 223-224.

VOGT, N. (1987): Denkanstoß, Ansatz von Ankern bei der Standsicherheitsuntersuchung von Böschungen nach DIN 4084. Geotechnik, Zeitschrift für Bodenmechanik, Felsmechanik, Grundbau, Ingenieurgeologie, Organ der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau, Heft 4, S. 198 - 199.

VON SOOS, P. (1980): Eigenschaften von Boden und Fels; ihre Ermittlung im Labor. In: SMOLTCZYK, H.U. (Hrsg.) (1980): Grundbau-Taschenbuch, 3. Aufl., Teil 1, Ernst-Verlag, Berlin.

- WALDRON, L.J. (1977): The shear resistance of root-permeated homogenous and stratified soil. Soil Science, Vol. 41.
- WALDRON, L.J. / DAKESSIAN, S. (1981): Soil reinforcement by roots: Calculation of increased soil shear resistance from root properties. Soil Science, Vol. 132, no. 6.
- WALDRON, L.J. / DAKESSIAN, S. (1982): Effect of grass, legume, and tree roots on soil shearing resistance. Soil Science, Vol. 46.
- WALDRON, L.J. / DAKESSIAN, S. / NEMSON, J.A. (1983): Shear resistance of 1,22 - Meter diameter soil cross sections by Pine and Alfalfa Roots. Soil Science, Vol. 47.
- WALTER, H. (1975): Wie kann man den Klmotypus anschaulich darstellen? Die Umschau 57, S. 751-753.
- WANDEL, G. (1951): Über den Einfluß der Baum- und Strauchvegetation auf die Hangflächenabtragung. Wasser und Boden, Z. für die gesamte Wasserwirtschaft, Heft 10. - Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin.
- WEBER, H. (1953): Die Bewurzelungsverhältnisse der Pflanzen. - Verlag Herder, Freiburg/Br..
- WELLER, F. (1965): Die Ausbreitung der Pflanzenwurzeln im Boden in Abhängigkeit von genetischen und ökologischen Faktoren. - Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart.
- WISHMEIER, W.H. / SMITH, D.D. (1978): Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning. USDA, Agric. Handbook No. 537.
- WITTKKE, W. (1962): Über die Scherfestigkeit rolliger Erdstoffe. Diss. Fakultät für Bauwesen der TH Darmstadt.

WU, T.H. / MCKINNELL, W.P. / SWANSTON, D.N. (1979): Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Islands, Alaska. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 16 (1), p. 19-33.

WU, T.H. et al. (1988): Study of soil root interaction. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 114, No. 12.

WU, T.H. et al. (1988): In-situ shear test of soil-root systems. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 114, No. 12.

ZIEMER, R.R. (1981): Roots and the stability of forested slopes. IAHS Publication, No. 132, p. 343-361.

ZUNKER, F. (1953): Gesetze der Bodenerosion durch Wasser an Hängen. Z. Wasserwirtschaft - Wassertechnik, 8. Jg., Heft 9.

- 171 -

ANHANG

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN	Seite
Abb. 1: Profilskizze der 17er-Reiße im Lainbachtal bei Benediktbeuren (GROTTENTHALER et al., 1973).	12
Abb. 2: Profilskizze der Söldner Alm - Rutschung (GROTTENTHALER et al., 1973).	12
Abb. 3: Typisches Wurzelwachstum von Gehölzen nach MÜLLER (1927).	14
Abb. 4: Abfall der Wurzelanzahl bei Douglasien (Coast Douglas-fir) in Abhängigkeit der Zeit nach dem Fällen des Baumes entnommen an senkrechten Probeflächen bis 1 m Tiefe (BURROUGHS et al., 1977).	16
Abb. 5: Abfall der Wurzelzugfestigkeit (Coast Douglas-fir) in Abhängigkeit der Zeit nach dem Fällen des Baumes (BURROUGHS et al., 1977).	16
Abb. 6: Relative Bodenstabilität in Abhängigkeit der Zeit nach dem Fällen nach ZIEMER, 1981).	18
Abb. 7: Längsschnitt durch eine junge Wurzel der Gerste (aus KUTSCHERA; 1960).	21
Abb. 8: Skizze der hier betrachteten Bodenscholle der Länge l	26
Abb. 9: Modellvorstellung eines Bruchvorganges an einer endlichen Böschung für einen kohäsionslosen Boden	27
Abb. 10: Kräfteverteilung an einem Bodenelement eines "unendlichen" Hanges	28

	Seite
Abb. 11: Zusammenhang zwischen Stabilitätsbeiwert, Hangneigungswinkel und innerem Reibungswinkel eines bewachsenen und eines unbewachsenen Hanges	34
Abb. 12: Schnitt durch eine Rasendecke an einer nicht verformten Stelle (BRUNNER, 1975).	34
Abb. 13: Rahmenschergerät nach GOLDER (1942, zitiert in SCHULTZE/MUHS (1967)).	37
Abb. 14: Scherspannungsverschiebungsdiagramm eines dichten festen und eines lockeren weichen Bodens nach DIN 18137 (1972).	40
Abb. 15: τ - σ -Diagramm mit Meßpunkten nach DIN 18137 (1972).	40
Abb. 16: Gegenüberstellung von Scherfestigkeitsmessungen mit einem großformatigen Schergerät in Abhängigkeit verschiedener Schubbelastungsgeschwindigkeit nach SMOLTCZYK (1960).	44
Abb. 17: Modell einer Wurzel in einer verformten und einer unverformten Scherzone nach WALDRON (1977).	49
Abb. 18: Versuchsanlage und Bodenaufbau der extensiv gepflegten Landschaftsrasenparzellen.	57
Abb. 19: Witterungsverlauf im Jahre 1983 in Berlin-Dahlem.	59
Abb. 20: Witterungsverlauf im Jahre 1984 in Berlin-Dahlem.	60
Abb. 21: Skizze der Meßanordnung des Kastenschergerätes	64

	Seite
Abb. 22: Körnungslinien zur Meßreihe I (intensiv gepflegter Rasen).	78
Abb. 23: Scherverschiebungskurve eines durchwurzelten Bodens in einer Tiefe von 3,4 cm.	81
Abb. 24a: Scherverschiebungskurve eines durchwurzelten Bodens in einer Tiefe von 13,8 cm	82
Abb. 24b: Scherverschiebungskurve eines durchwurzelten Bodens in einer Tiefe von 15,1 cm	82
Abb. 25: Kastenscherversuche (in situ) an intensiv gepflegtem Rasen (Meßreihe I vom 15.4. bis 27.4.1983).	84
Abb. 26: Körnungsband zu den Meßreihen II bis IV und zum Ausläufertreibenden Rotschwengel.	90
Abb. 27: Schutzmechanismus der Wurzel vor Verletzung bei Bodendeformationen.	94
Abb. 28: Typische Bruchdehnungslinien alter und junger Wurzeln (Horstrotschwengel, Sorte Barfalla).	95
Abb. 29: Elastizitätsmodul E_t in Abhängigkeit der minimalen Durchmesser D_{min} von jungen und alten Wurzeln (Horstrotschwengel, Sorte Barfalla).	97
Abb. 30: Zugfestigkeit an der mittleren minimalen Wurzelquerschnittsfläche in Abhängigkeit der Bruchdehnung (Horstrotschwengel, Sorte Barfalla).	98
Abb. 31: Maximale Zugkraft in Abhängigkeit der Bruchdehnung (Horstrotschwengel,	

	Seite
Sorte Barfalla).	98
Abb. 32: Lineare Regression zwischen der Wurzelquerschnittsfläche und der maximalen Zugkraft von Horstrotschwingel (Sorte Barfalla).	100
Abb. 33: Kastenscherversuche (in situ) und Rahmenscherversuche an extensiv gepflegtem Horstrotschwingel (Meßreihe II vom 12.7. bis 28.10.1983, Landschaftsrasen).	103
Abb. 34: Vergleichende Ermittlung der Grenztiefen T_c für intensiv und extensiv gepflegten Rasen.	107
Abb. 35: Kastenscherversuche (in situ) an extensiv gepflegtem Horstrotschwingel (Meßreihe III vom 1.10. bis 6.12.1984, Landschaftsrasen).	109
Abb. 36: Berechnete Scherspannungen aus der Meßreihe II/III.	111
Abb. 37: Verformungsverhalten einer Bodenprobe im Rahmenschergerät mit und ohne Durchwurzelung.	113
Abb. 38: Scherspannungsverschiebungskurven, gemessen mit dem Rahmenschergerät vom 3.10.1984 bis 22.4.1985 an Horstrotschwingelparzellen (Landschaftsrasen).	114
Abb. 39: Rahmenscherversuche an extensiv gepflegtem Horstrotschwingel vergleichend zur Meßreihe II/III.	116
Abb. 40: Meßergebnisse der Scherfestigkeitsmessungen	

	Seite
der Meßreihen IVa, b, c sowie des Ausläufer- treibenden Rotschwingels.	120
Abb. 41: Körnungslinien zu den Kastenscherfestigkeits- messungen an <i>Salix balsamifera</i> mas. (Gelbe Steinweide).	123
Abb. 42: Scherverschiebungskurven undurchwurzelter Böden.	127
Abb. 43: Scherverschiebungskurven durchwurzelter Böden (Gelbe Steinweide).	127
Abb. 44: Kraft-Weg-Diagramm zweier wassergesättigter Bodenblöcke in undurchwurzeltem und durchwur- zeltem Zustand. (Pflanze: Gelbe Steinweide).	129
Abb. 45: Schematische Verformung einer Gehölzwurzel Versuch Nr. II/lw. (Gelbe Steinweide).	131
Abb. 46: Wurzelanzahl und Humusgehalt in Abhängigkeit der Tiefe (Landschaftsrasen).	138
Abb. 47: Scherfestigkeitsverlauf von mit Horstrot- und Schafschwingel durchwurzeltem Boden in Abhängigkeit der Tiefe.	143
Abb. 48: Scherspannungsverläufe einzelner Horstrot- und Schafschwingelsorten sowie der anhand der Grenztiefe ansetzbare Scherspannungsverlauf.	146

VERZEICHNIS DER TABELLEN

	Seite
Tab 1: Materialkennwerte pflanzlicher und technischer Materialien aus NACHTIGALL (1971) (vergl. auch AHLGRIMM, 1977).	179
Tab 2: Zusammenstellung der Veränderlichen, die die Scherfestigkeit eines rolligen Erdstoffes beeinflussen nach WITKE (1962).	179
Tab. 3: Bestandsaufnahme auf intensiv gepflegten Rasenflächen vom 22.10. bis 26.10.1982 (Meßreihe I).	180
Tab. 4: Ergebnisse der Scherfestigkeitsmessungen der Meßreihe I (intensiv gepflegter Rasen).	181
Tab. 5a: Mittlere Wurzelkennwerte der Meßreihe II, Parzellen 1 und 2 (Methode A).	182
Tab. 5b: Wurzelkennwerte der Meßreihe II, Parzellen 1 und 2, bezogen auf 1 m ² .	183
Tab. 5c: Mittlere Wurzelkennwerte der Meßreihe II, Parzellen 3, 4, und 5 (Methode A).	184
Tab. 5d: Wurzelkennwerte der Meßreihe II, Parzellen 3, 4, und 5, bezogen auf 1 m ² .	185
Tab. 6: Durchwurzelungsintensität der Meßreihe III, Horstrotschwingel (Methode B2).	186
Tab. 7: Durchwurzelungsintensitäten der Meßreihen IVa und IVb sowie zum Ausläufertreibenden Rotschwingels (Methode B1).	187
Tab. 8: Durchwurzelungsintensitäten zu den Meßreihen	

Tab. 1: Materialkennwerte pflanzlicher und technischer Materialien aus NACHTIGALL (1971), (vgl. a. AHLGRIMM, 1977)

	ϵ_E [%]	ϵ_B [%]	σ_E [kp/mm ²]	σ_B [kp/mm ²]	E [kp/mm ²]
Papyrus antiquorum (Papyrus)	1,52) nur wenig höhere Werte	20) nur wenig höhere Werte	1316
Phormium tenax (neu- seeländischer Flachs)	1,30		20		1538
Lilium auratum (Goldlilie)	0,76		19		2500
Secale creale (Roggen)	0,44		20		4545
Stahl	0,12	ca. 25	24,6	ca. 50-80	20500

Tab. 2: Zusammenstellung der Veränderlichen, die die Scherfestigkeit eines rolligen Erdstoffes beeinflussen (nach WITTKE (1962))

Gruppe	Veränderliche			
	I	II	III	IV
1 Einzelkorn	Materialreibungswinkel Materialbeschaffenheit, Oberflächenbeschaffenheit	Kornform	Korngröße	Korngrößenzusammensetzung
Räumliche Anordnung des Einzelkornes (Schüttung)	Lagerungsart	Porenvolumen Berührungswinkel		
3 Füllung der Hohlräume	Wassergehalt			
4 Beanspruchung der Schüttung	Spannungs- und Verformungsbedingungen	Beanspruchungsrichtung (Anisotropie)	absolute Größe der Belastung oberhalb und im Bereich der Materialfestigkeit	
5 Versuch	Verhältnis der Probenabmessungen	Verhältnis der Probenabmessungen zu den Kornabmessungen	Belastungsgeschwindigkeit	Verformungsgeschwindigkeit

Tab. 3: Bestandsaufnahme auf den intensiv gepflegten Rasenflächen
(vom 22. - 26. 10. 1982)

Aufnahme Nr.	24	25	26	27
Deckungsgrad	88	90	92	94
Lückenanteile in der Narbe	15	12	10	8
<u>Gräser</u>				
Agrostis tenuis	3	10	25	23
Dactylis glomerata	-	1	2	-
Festuca rubra	47	27	32	30
Lolium perenne	5	-	5	10
Phleum bertolonii	15	25	10	8
Poa pratensis	8	20	12	6
<u>Leguminosen</u>				
Trifolium repens	5	5	2	3
<u>Kräuter</u>				
Achillea millefolium	-	-	-	10
Bellis perennis	2	2	-	-
Chenopodium album	-	-	-	1
Hypochoeris radicata	4	-	-	-
Plantago maior	1	-	-	-
Taraxacum officinale	10	10	12	10

(Lückenanteil bedeutet in dieser Arbeit: Lücken + Unkraut)

Tab. 4: Ergebnisse - Scherfestigkeitsmessungen der Meßreihe I (intensi gepflegter Rasen)

Messungs-Nr.	Zielgrößen		Kennwerte erdbaulich und bodenmechanisch													e _A
	τ	Δs	σ'	Tiefe	γ	γ_d	w	C _c	U	SK	Ton	n	n _a	n _w	Sr	
	kN/m ²	%	kN/m ²	cm	kN/m ³	Ma. %	-	-	%	%	-	-	-	-	-	
2	20,86	11,95	11,02	5,25	19,02	16,76	1355	2,90	14,50	21,62	4,96	0,3504	0,1232	0,2271	0,6480	0,5439
2a	20,89	6,52	14,75	5,93	18,26	16,10	1334	4,37	22,86	23,98	6,83	0,3756	0,1604	0,2150	0,5726	0,6015
2b	31,65	12,98	20,34	4,58	18,23	16,16	1272	2,93	14,63	21,75	4,19	0,3733	0,1673	0,2057	0,5515	0,5955
3	26,42	14,95	16,60	3,40	18,65	16,56	1261	4,30	23,24	22,50	4,80	0,3577	0,1486	0,2091	0,5844	0,5569
3a	25,24	22,58	13,17	3,03	18,65	16,49	1242	6,56	35,74	21,35	6,33	0,3609	0,1559	0,2047	0,5675	0,5645
3b	23,54	2,85	20,08	13,82	17,44	15,54	1230	4,28	23,94	22,20	4,50	0,3972	0,2058	0,1913	0,4817	0,6591
4	17,61	1,81	12,91	14,05	17,56	15,76	1147	3,62	18,66	21,57	5,31	0,3887	0,2079	0,1809	0,4652	0,6359
4a	24,89	8,79	15,12	5,52	18,04	16,37	1019	4,06	21,00	21,27	6,37	0,3650	0,1981	0,1669	0,4579	0,5750
4b	35,20	16,83	21,16	3,78	17,81	16,25	958	2,71	14,00	21,23	4,96	0,3697	0,2140	0,1558	0,4213	0,5867
5	19,57	2,14	15,08	15,10	17,16	15,60	1006	4,65	24,00	21,15	6,43	0,3953	0,2384	0,1569	0,3970	0,6538
Minimum	17,61	1,81	11,02	3,03	17,16	15,54	9,58	2,71	14,00	21,15	4,19	35,04	0,1232	0,1558	0,4213	0,5439
Maximum	35,20	22,58	21,16	15,10	19,02	16,76	13,55	6,56	35,74	23,98	6,86	39,72	0,2384	0,2271	0,6480	0,6538
Mittelwert	--	--	--	--	18,08	16,16	11,82	4,04	21,26	--	--	0,3734	0,1820	0,1913	0,5147	0,5973
Streuung s	--	--	--	--	+0,425	+0,296	+1,02	+0,81	+4,64	--	--	+0,0114	+0,0257	+0,0180	+0,0581	+0,0289

Δs = Probenstauchung

Tab. 5a: Mittlere Wurzelkennwerte der Meßreihe II, Parzellen 1 und 2 (Methode A)

Messung Nr.	1 b			1 c		
	\bar{D}	\bar{A}	\bar{N}	\bar{D}	\bar{A}	\bar{N}
	mm/Wurzel	mm ² /Wurzel	1/78,54 cm ²	mm/Wurzel	mm ² /Wurzel	1/78,54 cm ²
4,00	0,22522 (3)	0,048070 (3)	530 (3)	0,22367 (3)	0,055030 (3)	548 (3)
<u>5,88</u>	<u>0,20635</u>	<u>0,042095</u>	<u>393</u>			
6,36	0,20153 (3)	0,040570 (3)	358 (3)	0,2287 (3)	0,054800 (3)	354 (3)
8,42	0,16383 (3)	0,025630 (3)	284 (3)	0,18333 (3)	0,033634 (3)	346 (3)
10,00	0,14637 (2)	0,002270 (2)	146 (3)	0,17700 (3)	0,032130 (3)	323 (3)
12,00	0,15850 (2)	0,026535 (2)	146 (3)	0,19510 (3)	0,039200 (3)	389 (3)
<u>12,15</u>				<u>0,19478</u>	<u>0,039064</u>	<u>386</u>
15,30				0,1880 (3)	0,036200 (3)	328 (3)
	2 a			2 c		
4,00	0,26600 (3)	0,065033 (3)	385 (3)	0,2292 (2)	0,048250 (2)	474 (3)
6,36	0,22937 (3)	0,048364 (3)	304 (3)	0,20420 (2)	0,038450 (2)	382 (3)
<u>7,12</u>				<u>0,18917</u>	<u>0,033991</u>	<u>362</u>
8,42	0,19643 (3)	0,037258 (3)	280 (3)	0,16347 (3)	0,026363 (3)	328 (3)
10,00	0,17967 (3)	0,031867 (3)	173 (3)	0,17350 (2)	0,030300 (2)	250 (3)
12,00	0,16635 (2)	0,026849 (3)	176 (3)			
15,30	0,17480 (3)	0,030733 (3)	118 (3)			
17,00	0,16903 (3)	0,027770 (3)	112 (3)			
<u>17,15</u>	<u>0,16500</u>	<u>0,027200</u>	<u>111</u>			
	5 a			5 b		
15,30	0,12523 (3)	0,016618 (3)	251	0,12013 (3)	0,015712 (3)	346 (3)

Tab. 5b: Wurzelkennwerte der Meßreihe II, Parzellen 1 und 2, bezogen auf 1 m²

Tab. 5b: Wurzelkennwerte der Meßreihe II, Parzellen 1 und 2, bezogen auf 1 m²

Messung Nr.	1 b			1 c		
	$\frac{N_{WG}}{\bar{N}} = \frac{D_{WG}}{\bar{D} \cdot N_{WG}}$ 1/m ²	$\frac{D_{WG}}{\bar{D} \cdot N_{WG}}$ mm/m ²	$\frac{A_{WG}}{\bar{A} \cdot N_{WG}}$ mm ² /m ²	$\frac{N_{WG}}{\bar{N}} = \frac{D_{WG}}{\bar{D} \cdot N_{WG}}$ 1/m ²	$\frac{D_{WG}}{\bar{D} \cdot N_{WG}}$ mm/m ²	$\frac{A_{WG}}{\bar{A} \cdot N_{WG}}$ mm ² /m ²
4,00	67.482	15.198	3.243,8	69.773	15.606	3.839,6
<u>5,88</u>	<u>50.038</u>	<u>10.325</u>	<u>2.106,4</u>			
6,36	45.582	9.186	1.849,2	45.073	10.312	2.469,9
8,42	36.160	5.924	926,8	44.054	8.077	1.481,7
10,00	27.502	4.025	624,3	41.126	7.279	1.321,4
12,00				49.529	9.663	1.941,5
<u>12,15</u>				<u>49.146</u>	<u>9.573</u>	<u>1.919,9</u>
15,30				41.762	7.851	1.511,8
	2 a			2 c		
4,00	49.020	13.039	3.187,9	60.351	13.833	2.912,0
6,36	38.706	8.878	1.872,0	48.638	9.932	1.870,1
<u>7,12</u>				<u>46.091</u>	<u>8.719</u>	<u>1.566,7</u>
8,42	35.651	7.003	1.328,2	41.762	6.827	1.101,0
10,00	22.027	3.958	701,9	31.831	5.523	964,5
12,00	22.409	3.728	601,7			
15,30	15.024	2.626	461,7			
17,00	14.260	2.410	396,0			
17,15	<u>14.132</u>	<u>2.332</u>	<u>384,4</u>			

Tab. 5c: Mittlere Wurzelkennwerte der Meßreihe II, Parzellen 3, 4 und 5 (Methode A)

Messung Nr.	3 a			3 b			3 c		
	\bar{D}	\bar{A}	\bar{N}	\bar{D}	\bar{A}	\bar{N}	\bar{D}	\bar{A}	\bar{N}
Tiefe cm	mm/Wurzel	mm ² /Wurzel	1/78,54 cm ²	mm/Wurzel	mm ² /Wurzel	1/78,54 cm ²	mm/Wurzel	mm ² /Wurzel	1/78,54 cm ²
4,0	0,15700 (3)	0,025086 (3)	306 (3)	0,17685 (2)	0,29936 (2)	621 (3)	0,18700 (3)	0,034268 (3)	446 (3)
6,09	0,16881	0,029733	284						
6,36	0,17033 (3)	0,030333 (3)	281 (3)	0,20050 (2)	0,04000 (2)	435 (3)	0,16867 (3)	0,028421 (3)	442 (3)
8,42	0,15733 (3)	0,025979 (3)	258 (3)	0,12995 (2)	0,01700 (2)	355 (3)	0,16267 (3)	0,028784 (3)	291 (3)
8,50				0,13000	0,0171	347			
8,53							0,15940	0,027824	294
10,0	0,13500 (3)	0,019249 (3)	162 (3)	0,130000 (3)	0,019667 (3)	202 (3)	0,11650 (2)	0,015000 (2)	241 (3)
	4 a			4 b			4 c		
4,0				0,18317 (3)	0,031847 (3)	681 (3)	0,15177 (3)	0,022100 (3)	587 (3)
6,36				0,14310 (3)	0,022112 (3)	580 (3)	0,11773 (3)	0,014905 (3)	529 (3)
8,23				0,12930	0,017762	488			
8,42				0,12790 (3)	0,017320 (3)	479 (3)	0,11693 (3)	0,014821 (3)	461 (3)
10,0				0,11510 (3)	0,014668 (3)	491 (3)	0,11957 (3)	0,014884 (3)	464 (3)
12,0				0,11116 (3)	0,013419 (3)	469 (3)	0,12080 (3)	0,015435 (3)	376 (3)
15,30				0,10037 (3)	0,010733 (3)	523 (3)	0,12310 (3)	0,016133 (3)	321 (3)
15,39							0,12350	0,016800	319
	5 a			5 b					
15,30	0,12523 (3)	0,016618 (3)	251	0,12013 (3)	0,015712 (3)	346 (3)			

Tab. 5d: Wurzelkennwerte der Meßreihe II, Parzellen 3, 4 und 5, bezogen auf 1 m²

Tab. 6: Durchwurzelungsintensität zu der Meßreihe III, Horstrotschwingel (Methode B2)

Wiederholung	Messung Nr.	1 A	1 B	1 C	2 A	2 B	2 C	3 A	3 C
	Tiefe in cm	10,5	10,5	10,5	29,0	29,0	29,0	45,0	45,0
1	125	195	129	125	127	103	22	11	
2	144	185	110	148	80	112	48	26	
3	124	105	128	125	124	81	28	14	
4	135	152	118	62	145	154	32	10	
5	176	160	167	140	145	48	30	53	
6	115	114	145	151	80	87	18	21	
7	111	139	133	70	116	85	38	41	
8	139	142	146	98	92	134	18	28	
9	148	114	100	72	106	93	16	23	
10	168	96	112	46	128	90	33	47	
11	160	151	102	113	64	66	28	34	
12	119	149	111	60	34	32	19	30	
13	127	128	105	72	89	75	27	27	
14	142	104	86	85	83	46	19		
15	147	122	185	115	130	46	27		
16	150	103	98	70	76	22	32		
17	127	150	133	144	56	34	55		
18	139		122	128	158	37	50		
19	134		150	131	62		52		
20	137		187	201			28		
21				146					
$\bar{N}_W/50,266 \text{ cm}^2$ *	138,35	135,82	128,35	109,62	99,74	74,72	30,86	28,08	
Streuung s	± 16,95	± 28,78	± 28,15	± 39,85	± 34,62	± 36,76	± 11,67	± 13,17	
95% Vertrauensbereich	± 7,96	± 14,80	± 13,15	± 18,17	± 16,68	± 18,28	± 5,32	± 7,97	
$N_{WG} = \bar{N}_W/m^2$	27.454	27.021	25.534	21.808	19.842	14.866	6.139	5.586	
95%-Vertrauensbereich für 1 m ²	± 1.583	± 2.944	± 2.617	± 3.616	± 3.318	± 3.638	± 1.059	± 1.585	

* Querschnittsfläche des Probenzylinders: 50,266 m²

Tab. 7: Durchwurzelungsintensitäten zu den Meßreihen IVa und IVb sowie zum Ausläufertreibenden Rotschwingel (Methode B1)

HORSTROTSCHWINGEL (Meßreihe IV a)

Messung Nr.	6a	6b	6c	7a	7b	7c	8a	8a(S)	8b	8b(S)	8c
-------------	----	----	----	----	----	----	----	-------	----	-------	----

Tab. 7: Durchwurzelungsintensitäten zu den Meßreihen IVa und IVb sowie zum Ausläufertreibenden Rotschwengel (Methode B1)

HORSTROTSCHWINGEL (Meßreihe IV a)

Messung Nr.	6a	6b	6c	7a	7b	7c	8a	8a(S)	8b	8b(S)	8c
Wiederholungen	19,0	20,0	13,5	12,5		27,5	14,3		20,5		28,8
Tiefe in cm											
1	247	467	282	267	284	236	244	284	267	125	261
2	175	369	359	284	300	305	265	283	232	160	180
3		291	460	292	206	268	344		312		298
4		286	402	350	312	94	308		281		157
$\bar{N}_w/225 \text{ cm}^2 *$	211,0	353,3	375,8	298,3	275,5	225,8	302,8	283,5	273,0	142,5	224,0
Streuung s 95%-Vertr.- bereich		± 84,82 ± 134,86	± 75,0 ± 119,25	± 36,04 ± 57,30	± 47,73 ± 75,89	± 92,25 ± 146,68	± 32,82 ± 32,18		± 33,18 ± 52,76		± 66,51 ± 105,75
$N_{WG} = \bar{N}_w/m^2$	9.378	15.700	16.700	13.256	12.244	10.036	13.378	12.600	12.177	6.333	9.800
Vertrauens- bereich gesamt ^{*2}		±5.300	±2.547	±3.373	±6.519	±2.319			±2.345		±4.700

Ausläufertreibender Rotschwengel Schafschwengel (Meßreihe IVb)

Messung Nr.	3a	3b	3c	2a	2b	2c
Wiederholungen	12,3	19,8	26,5	12,5	20,0	29,80
Tiefe in cm						
1	215	201	107	214	171	356
2	224	202	64	286	214	238
3	364	229	87	239	263	208
4	319	255	106	288	348	231
$\bar{N}_w/225 \text{ cm}^2 *$	280,5	221,8	91,0	256,8	249,0	258,3
Streuung s 95%-Vertr.- bereich	± 72,89 ± 115,90	± 25,68 ± 40,83	± 20,22 ± 32,14	± 36,40 ± 57,88	± 75,95 ± 120,76	± 66,41 ± 105,60
$N_{WG} = \bar{N}_w/m^2$	12.467	9.858	4.044	11.413	11.067	11.480
95%-Vertr.- bereich gesamt ^{*2}	±5.151	±1.815	±1.482	±2.572	±5,367	±4.693

* Fläche des Stechrahmens: 225 cm²

*₂ Vertrauensbereich gesamt ist auf 1 m² bezogen

Tab. 8: Durchwurzelungsintensitäten zu den Meßreihen IV b und IVc (Schafschwingel wassergesättigt (ws) und ungesättigt (us); Methode B2)

Meßreihen	IVb	IVc	IVb	IVc	IVb	IVc
Messung Nr.	1 Aus	1 Aws	1 Bus	1 Bws	1 Cus	1 Cws
Wiederholung Tiefe in cm	9,0	11,1	27,5	30,0	42,0	42,0
1	206	197	117	44	8	0
2	138	125	95	69	7	3
3	137	126	75	54	6	1
4	169	111	105	63	8	5
5	111	102	64	53	14	4
6	176	94	134	58	17	11
7	129	96	67	93	23	12
8	197	126	86	44	13	3
9	102	112	151	109	28	0
10	149	148	429	116	10	3
11	107	146	103	126	3	1
12	196	150	196	113	2	20
13	147	109	98	116	9	16
14	144	78	236	139	6	5
15	154	124	249	119		6
16	132		81	155		11
17			201	99		7
18			169	100		10
19			80			6
20			55			16
21			72			
$\overline{N_w}/50,266 \text{ cm}^2$ *	149,63	122,93	136,33	92,78	11,00	7,00
Streuung s	± 31,95	± 29,13	± 88,40	± 34,43	± 7,42	± 5,78
95%-Vertrauensbereich	± 18,44	± 16,10	± 40,32	± 17,12	± 4,28	± 2,70
$N_{ws} = \overline{N_w}/m^2$	29,767	24,458	27,123	18,458	2,188	1,393
95%-Vertrauensbereich gesamt	± 3,669	± 3,202	± 8,020	± 3,406	± 852	± 537

* Querschnittsfläche des Probenzylinders: 50,266 cm²

Tab. 9: Ergebnisse der Scherfestigkeitsmessungen der Meßreihe II

Versuchs-Nr.	Zielgrößen	Kennwerte											
		versuchsbedingt			pflanzlich				erdbaulich				
		Scher-spannung	Bruch-scher-weg	Proben-stau-chung	Normal-spannung	Scher-tiefe	Durch-wurze-lungsin-tensität	Gesamtwurzel-		Ton-an-teil	Schlämm-korn-anteil	Ungleich-förmigk.-grad	
		τ	Δl_f	Δs	σ'	T	N _w	D _w	A _w				F _w
kN/m ²	%	%	kN/m ²	m	-	mm	mm ²	kN	%		-		
1b	Meßreihe II	23,90	11,38	12,00	11,60	0,0588	50,038	10,325	2.106,4	73,627	6,61	25,75	25,43
1c		26,83	5,66	5,00	15,55	0,1215	49,146	9,573	1.919,9	68,298	4,84	26,32	22,63
2a		26,65	4,25	1,03	20,99	0,1715	14,132	2,332	384,4	15,199	4,41	27,87	24,62
2c		29,32	12,12	11,11	17,15	0,0712	46,091	8,719	1.566,7	57,749	5,12	26,20	31,37
3a		37,50	20,20	20,00	23,29	0,0609	36,160	6,104	1.075,1	41,155	5,15	24,92	26,00
3b		23,45	6,39	5,80	11,28	0,0850	44,181	5,744	758,5	35,317	6,64	25,78	32,83
3c		24,27	6,606	6,40	15,32	0,0853	37,433	5,967	1.041,5	40,677	5,16	27,03	21,26
4b		32,27	7,67	7,00	19,63	0,0823	62,133	8,034	1.103,6	50,662	5,34	25,29	20,11
4c		19,47	3,25	1,00	11,65	0,1539	40,616	5,016	682,4	32,064	4,88	26,53	24,18
5a		21,99	1,77	0,80	15,41	0,1526	31,958	4,002	531,1	25,072	4,05	25,78	21,69
5b		25,61	1,77	1,00	19,16	0,1526	41,508	4,986	652,2	31,550	5,88	25,50	22,93
An-wen-dungs-gren-zen der Meß-reihe II	minimaler Meßwert	19,47	1,77	0,88	11,28	0,0588	14,132,0	2,332	384,4	15,119	4,05	24,92	20,11
	maximaler Meßwert	37,50	20,20	20,00	23,29	0,1715	61,133,0	10,325	2106,4	73,627	6,64	27,87	32,83
	Mittelwert		7,32	6,47							5,28	26,08	24,82
	Standardab-weichung s		+ 5,46	+ 6,00							+0,816	+0,833	±4,03
	95% Vertrauens-bereich		+ 3,67	+ 4,03							+0,548	+0,560	±2,71
	n = 11 Wiederholungen												

Kennwerte (Forts.)												
und bodenmechanisch								bodenchemisch				
Dichte feucht	Dichte trocken	Wasser-gehalt	Gesamt-poren-anteil	mit Luft gefüllter Poren-anteil	mit Wasser gefüllter Poren-anteil	Sättigungs-grad	Anfangs-poren-zahl	pH-Wert	Humus-gehalt	Gesamt-stick-stoffgeh.	pflanzenverfügbar	
γ	γ_d	w	n	n _a	n _w	S _r	e _A	pH	Hu	N	K	P
kN/m ³	kN/m ³	Ma.-%	-	-	-	-	-	-	%	mg / 100 g Boden		
19,03	17,03	11,89	0,3399	0,1374	0,2055	0,3957	0,5150	5,70	1,30	60,23	4,00	30,00
17,18	15,55	10,00	0,3973	0,2418	0,1555	0,3914	0,6592	5,60	1,70	66,53	5,40	34,00
17,14	15,43	11,09	0,4019	0,2308	0,1711	0,4257	0,6721	5,70	1,60	68,63	3,20	31,00
19,23	17,14	12,54	0,3357	0,1139	0,2218	0,6608	0,5053	5,60	1,40	58,83	2,40	28,00
19,14	17,07	11,98	0,3384	0,1339	0,2045	0,6044	0,5114	5,80	1,50	61,61	5,10	27,00
18,87	16,88	12,15	0,3457	0,1406	0,2051	0,5932	0,5284	5,70	1,60	64,43	5,80	31,00
19,39	17,38	11,58	0,3264	0,1251	0,2013	0,6167	0,4845	5,70	1,70	61,63	4,70	26,00
18,56	16,57	11,98	0,3578	0,1592	0,1985	0,5549	0,5570	5,60	1,50	54,63	6,60	30,00
18,08	16,22	11,11	0,3713	0,1911	0,1802	0,4853	0,5906	5,50	1,60	91,04	8,60	29,00
17,91	16,36	10,98	0,3659	0,1863	0,1796	0,4909	0,5770	5,70	1,50	70,03	8,40	33,00
17,42	15,73	11,10	0,3904	0,2157	0,1746	0,4473	0,6402	5,60	1,50	56,03	8,40	31,00
17,14	15,43	10,00	0,3264	0,1139	0,1555	0,3914	0,4845	5,50	1,30	54,63	2,40	26,0
19,39	17,38	12,94	0,4019	0,2418	0,2218	0,6608	0,6721	5,80	1,70	91,04	8,60	34,0
18,36	16,49	11,53	0,3610	0,1705	0,1904	0,5333	0,5673	5,65	1,54	64,88	5,69	30,0
+0,850	+0,684	+0,782	+0,0265	+0,0449	+0,0195	+0,0891	+0,0660	+0,082	+0,12	+9,95	+2,13	+2,41
+0,571	+0,460	+0,525	+0,0178	+0,0302	+0,0131	+0,0599	+0,0444	+0,055	+0,08	+6,69	+1,43	+1,62

Tab. 10: Ergebnisse der Scherfestigkeitsmessungen der Meßreihe II/III

Versuchs-Nr.		Zielgrößen			Kennwerte					
		Scher-spannung	Bruch-scherweg	Proben-stau-chung	versuchsbedingt	Pflanzl.	e r d b a u l i c h			
					Normal-spannung	Scher-tiefe	Durch-wurze-lungsin-tensität	Ton-anteil	Schlamm-korn-anteil	Ungleich-förmigk.-grad
		τ	Δl_f	Δs	σ'	T	NWG	Ton	Sk.	U
kN/m ²	%	%	kN/m ²	m	-	%		-		
1A	Meßreihe III	11,25	4,09	2,50	3,47	0,11	27,454	4,43	26,49	28,28
1B		18,54	4,19	3,42	9,29	0,11	27,021	4,02	25,05	20,00
1C		22,49	6,07	4,26	14,82	0,11	25,534	4,07	25,06	25,71
2A		10,60	2,05	2,05	7,15	0,29	21,808	3,61	24,78	28,28
2B		14,20	2,89	2,17	12,49	0,29	19,842	4,00	26,11	25,00
2C		18,84	1,11	0,80	17,61	0,29	14,866	5,88	26,23	24,14
3A		12,10	1,54	0,60	10,14	0,44	6,139	6,55	23,17	33,59
3C		16,12	1,44	0,60	21,19	0,44	5,586	5,71	25,66	24,57
Anwen-dungs-grenzen der Meß-reihe III	minimaler Meßwert	10,60	1,11	0,60	3,47	0,11	5,586	3,61	23,17	20,00
	maximaler Meßwert	22,49	6,07	4,26	21,19	0,44	27,454	6,55	26,49	33,59
	Mittelwert		2,93	2,05				4,78	25,32	26,20
	Standardab-weichung s		$\pm 1,73$	$\pm 1,35$				$\pm 1,1$	$\pm 1,1$	$\pm 4,0$
	95 % Vertrau-ensbereich n = 8 Wieder-holungen		$\pm 1,45$	$\pm 1,13$				$\pm 0,9$	$\pm 0,9$	$\pm 3,3$
Anwen-dungs-grenzen der Meßreihen II / III	min. Meßwert	10,60	1,11	0,60	3,47	0,06	5,586	3,61	23,17	20,00
	max. Meßwert	37,50	20,20	20,0	23,29	0,44	61,133	6,64	27,87	33,59
	Mittelwert							5,07	25,76	25,40
	s							$\pm 0,95$	$\pm 0,99$	$\pm 3,95$
95%-Bereich n = 19 Wieder-holungen							$\pm 0,46$	$\pm 0,48$	$\pm 1,90$	

Kennwerte (Fortsetzung)												
und b o d e n m e c h a n i s c h								b o d e n c h e m i s c h				
Dichte feucht	Dichte trocken	Wasser-gehalt	Gesamt-poren-anteil	mit Luft gefüllter Poren-anteil	mit Wasser gefüllter Poren-anteil	Sättigungs-grad	Anfangs-porenzahl	pH-Wert	Humus-gehalt	Gesamt-stick-stoffgeh.	pflanzenverfügbar	
γ	γ_d	w	n	n_a	n_w	S_r	e_A	pH	Hu	N	K	P
kN/m ³	kN/m ³	Ma.-%	-	-	-	-	-	-	%	mg/100g Boden	-	-
18,75	16,80	9,91	0,3488	0,1823	0,1663	0,4773	0,5357	5,50	1,40	53,60	6,20	25,00
19,34	17,54	10,46	0,3202	0,1367	0,1835	0,5731	0,4709	5,40	1,20	57,80	6,00	24,20
19,30	17,37	11,17	0,3267	0,1327	0,1940	0,5938	0,4853	5,60	1,20	54,30	6,80	21,80
18,64	16,74	11,39	0,3512	0,1605	0,1907	0,5430	0,5412	5,80	1,20	53,20	4,20	20,00
18,56	16,66	11,58	0,3543	0,1613	0,1929	0,5446	0,5486	6,10	0,80	43,10	4,60	18,88
19,40	17,73	10,69	0,3128	0,1233	0,1895	0,6059	0,4552	6,30	0,80	39,20	4,80	18,80
18,01	16,10	11,99	0,3760	0,1829	0,1930	0,3134	0,6025	7,20	0,30	14,70	6,20	13,00
18,90	17,25	11,44	0,3314	0,1341	0,1973	0,5955	0,4957	7,30	0,30	26,30	6,00	14,60
18,01	16,10	9,91	0,3128	0,1233	0,1665		0,4552	5,40	0,30	14,70	4,20	13,00
19,40	17,73	11,99	0,3760	0,1829	0,1973	0,6089	0,6025	7,30	1,40	57,80	6,80	25,00
18,86	17,02	11,07	0,3402	0,1517	0,1884	0,5169	0,5169	6,15	0,90	42,78	5,60	19,53
$\pm 0,477$	$\pm 0,541$	$\pm 0,678$	$\pm 0,0210$	$\pm 0,0232$	$\pm 0,0097$	$\pm 0,0448$	$\pm 0,0488$	$\pm 0,74$	$\pm 0,42$	$\pm 15,39$	$\pm 0,93$	$\pm 4,23$
$\pm 0,398$	$\pm 0,452$	$\pm 0,566$	$\pm 0,0175$	$\pm 0,0194$	$\pm 0,0081$	$\pm 0,0374$	$\pm 0,0407$	$\pm 0,62$	$\pm 0,35$	$\pm 12,84$	$\pm 0,78$	$\pm 3,53$
17,14	15,43	9,91	0,3128	0,1139	0,1555	0,3914	0,4552	5,40	0,30	14,70	2,40	13,0
19,40	17,73	12,94	0,4019	0,3418	0,2218	0,6608	0,6721	7,30	1,70	91,04	8,60	34,0
18,57	16,71	11,34	0,3522	0,1626	0,1896	0,5428	0,5461	5,86	1,27	55,57	5,65	25,69
$\pm 0,75$	$\pm 0,67$	$\pm 0,76$	$\pm 0,0259$	$\pm 0,0377$	$\pm 0,0158$	$\pm 0,0730$	$\pm 0,0632$	$\pm 0,53$	$\pm 0,43$	$\pm 16,52$	$\pm 1,69$	$\pm 6,20$
$\pm 0,36$	$\pm 0,32$	$\pm 0,36$	$\pm 0,0125$	$\pm 0,0182$	$\pm 0,0076$	$\pm 0,0352$	$\pm 0,0304$	$\pm 0,26$	$\pm 0,21$	$\pm 7,56$	$\pm 0,81$	$\pm 2,99$

Tab. 11: Ergebnisse und Kennwerte der Rahmenscherversuche im Labor.

Parzelle	Tiefe m	φ' Alt-grad	c' kN/m ²	Anwendungsgrenzen				
				w	γ_d	S_r	e_A	Vertrauensbereich für
				%	kN/m ³	-	-	
1	0,08 bis 0,08	47,8°	15,0	11,2 ±0,7	16,2 ±0,6	0,49 ±0,03	0,59 ±0,06	95%
3	0,04 bis 0,08	40,1°	8,5	9,6 ±0,8	15,0 ±0,2	0,35 ±0,03	0,72 ±0,02	95%
	0,28 bis 0,33	33,7°	2,5	11,2 ±1,0	15,8 ±0,5	0,46 ±0,07	0,63 ±0,05	99%
	0,42 bis 0,48	19,5°	1,7	11,7 ±1,1	15,8 ±0,2	0,48 ±0,05	0,64 ±0,02	99%

Tab. 12: Ergebnisse der Scherfestigkeitsmessungen der Meßreihen IVa und II/IVa

Versuchsnummer		Zielgrößen			Kennwerte					
		Scher- spannung	Bruch- scher- weg	Proben- stau- chung	versuchsbedingt		pflanzl.	e r d b a u l i c h		
					Normal- spannung	Scher- tiefe	Durch- wurze- lungsin- tensität	Ton- anteil	Schlamm- korn- anteil	Ungleich- förmigk.- grad
		τ	Δl_f	Δs	σ'	T	NWG	Ton	Sk	U
kN/m ²	%	%	kN/m ²	m	-	%		-		
6b	Meßreihe IVa	14,27	2,37	1,10	12,13	0,30	15.700	4,71	26,08	20,12
6c		16,23	6,61	1,90	10,64	0,14	16.700	6,68	24,87	37,60
7a		14,92	6,00	2,46	5,16	0,12	13.256	5,00	26,47	18,90
7b		12,09	2,98	1,06	5,77	0,18	12.244	5,72	24,41	15,16
7c		11,93	0,57	0,30	7,89	0,27	10.036	4,07	23,36	12,73
8a		15,80	6,00	2,56	5,26	0,14	13.378	6,95	26,63	20,24
8b		13,05	3,59	1,31	5,83	0,21	12.177	5,78	24,38	21,38
8c		10,80	1,20	1,08	7,69	0,25	9.800	3,63	25,37	4,59
Anwen- dungs- gren- zen der Meß- reihe II/ IVa		minimaler Meßwert	9,65	0,57	0,30	3,47	0,0588	5.586	3,61	23,17
	maximaler Meßwert	37,50	20,2	20,00	23,29	0,4400	61.133	6,95	26,63	37,60
	Mittelwert							5,14	25,60	23,46
	Standardab- weichung s							+1,006	+1,052	+ 6,62
	95 % Vertrau- ensbereich							+0,399	+0,417	+2,624
	n = 27 Wieder- holungen									

Kennwerte (Fortsetzung)												
und bodenmechanisch								bodenchemisch				
Dichte feucht	Dichte trocken	Wasser- gehalt	Gesamt- poren- anteil	mit Luft gefüllter Poren- anteil	mit Wasser gefüllter Poren- anteil	Sättigungs- grad	Anfangs- poren- zahl	pH- Wert	Humus- gehalt	Gesamt- stick- stoffgeh.	pPflanzenverfügbar	
γ	γ_d	w	n	n_a	n_w	S_r	e_A	pH	Hu	N	K	P
kN/m ³	kN/m ³	Ma.-%	-	-	-	-	-	-	%	mg / 100g Boden		
20,40	18,44	10,64	0,2853	0,0891	0,1962	0,6873	0,3991	5,60	1,30	62,68	4,70	22,10
18,30	15,89	15,68	0,3841	0,1350	0,2492	0,6487	0,6237	5,59	1,63	55,42	4,86	22,90
20,40	17,78	14,75	0,3109	0,0886	0,2623	0,8437	0,4511	6,20	1,90	75,99	6,40	22,80
18,09	16,20	12,55	0,3721	0,1688	0,2033	0,5464	0,5926	6,20	1,70	71,08	6,40	24,00
19,84	18,11	9,59	0,2981	0,1244	0,1737	0,5827	0,4246	6,45	0,80	26,61	4,40	11,80
17,95	16,17	11,00	0,3733	0,1954	0,1779	0,4765	0,5955	6,64	1,80	73,19	7,10	27,40
17,46	15,44	13,12	0,4016	0,1990	0,2026	0,5045	0,6710	6,69	2,20	89,99	7,60	27,40?
19,01	17,37	9,47	0,3267	0,1623	0,1645	0,5034	0,4853	6,82	0,60	28,01	5,10	12,20
17,14	15,43	9,47	0,2853	0,0486	0,1555	0,3914	0,3991	5,40	0,30	14,70	2,40	11,80
20,40	18,44	15,68	0,4019	0,2418	0,2623	0,8437	0,6721	7,30	2,20	91,04	8,60	34,00
18,68	16,78	11,55	0,3498	0,1560	0,1938	0,5447	0,5414	5,98	1,33	56,99	5,70	24,33
+0,879	+0,816	+1,39	+0,0316	+0,0427	+0,0234	+0,1071	+0,0751	+0,54	+0,47	+18,25	+1,54	+ 6,36
+0,348	+0,324	+0,551	+0,0125	+0,0169	+0,0093	+0,0425	+0,0298	+0,21	+0,19	+7,24	+0,61	+ 2,52

Tab. 13: Ergebnisse der Scherfestigkeitsmessungen der Meßreihe IVb (Schafschwingel, ungesättigt) und der Meßreihe II/IVb (Horstrot- und Schafschwingel)

Versuchsnummer		Zielgrößen			Kennwerte					
		Scher- spannung	Bruch- scher- weg	Proben- stau- chung	versuchsbedingt		erdbaulich			
					Normal- spannung	Scher- tiefe	Durch- wurze- lungs- intensit.	Ton- anteil	Schlamm- kornan- teil	Ungleich- förmigk.- grad
					σ'	T	N _{wg}	Ton	Sk	U
kN/m ²	%	%	kN/m ²	m	-	%		-		
2a	Meßreihe IVb (ungesättigt)	17,33			4,89	0,1250	11,413	4,18	26,45	24,29
2b		13,83			5,88	0,2000	11,067	5,24	26,29	24,49
2c		11,95			7,51	0,2975	11,478	3,32	26,36	20,00
1A		18,20			3,64	0,0900	29,767	4,59	26,63	23,38
1B		13,67			6,78	0,2750	27,123	3,99	26,71	22,50
1C		13,92			9,97	0,4200	2,188	3,76	25,09	21,50
Anwen- dungs- grenzen der Meßreihen II/IVb	minimaler Meßwert	9,65			3,47	0,059	2,188	3,32	23,17	4,59
	maximaler Meßwert	37,50			23,29	0,440	62,133	6,95	26,71	37,60
	Mittelwert							4,97	25,72	23,32
	Standartabweichung							±1,02	±1,01	±6,01
	95%-Vertrauensbereich n = 33 Wiederholungen							±0,37	±0,36	±2,13
3a	Ausläufer- treibender Rotschwingel	9,65			5,28	0,1175	12,476	4,83	25,42	21,34
3b		10,98			6,79	0,1905	9,858	5,31	25,21	22,50
3c		13,28			7,15	0,2650	4,044	14,98	35,79	94,00

Kennwerte (Fortsetzung)												
und bodenmechanisch								bodenchemisch				
Dichte feucht	Dichte trocken	Wasser- gehalt	Gesamt- poren- anteil	mit Luft- gefüllter Poren- anteil	mit Wasser- gefüllter Poren- anteil	Sättigungs- grad	Anfangs- porenzahl	pH- Wert	Humus- gehalt	Gesamt- stick- stoffgeh.	pflanzenerfügb.	
γ	γ_d	w	n	n _a	n _w	S _r	e _A	pH	Hu	N	K	P
kN/m ³	kN/m ³	Ma.-%	-	-	-	-	-	-	%	mg / 100g Boden	-	-
17,91	16,43	9,04	0,3632	0,2146	0,1485	0,4090	0,5704	5,44	1,70	56,73	7,10	15,20
17,62	15,91	10,85	0,3833	0,2107	0,1726	0,4503	0,6215	5,46	2,00	63,73	6,40	12,20
18,91	17,18	10,13	0,3341	0,1601	0,1740	0,5209	0,5017	5,52	1,50	45,17	4,20	11,40
19,33	17,28	11,94	0,3302	0,1239	0,2063	0,6247	0,4930	5,90	1,40	56,40	4,20	22,40
18,72	16,56	13,00	0,3581	0,1429	0,2152	0,6011	0,5579	5,70	0,80	32,60	7,20	15,60
18,85	16,58	11,39	0,2837	0,1198	0,1639	0,5777	0,3961	5,80	0,20	18,20	5,20	6,80
17,14	15,43	9,04	0,2853	0,0486	0,1485	0,3914	0,3961	5,40	0,20	14,70	2,40	6,80
20,40	18,44	15,68	0,4019	0,2418	0,2623	0,8437	0,6721	7,30	2,20	91,04	8,60	34,00
18,66	16,75	11,46	0,3484	0,1571	0,1913	0,5421	0,5351	5,92	1,32	54,90	5,71	22,44
± 0,84	± 0,76	± 1,38	± 0,0318	± 0,0420	± 0,0240	± 0,1025	± 0,0745	± 0,51	± 0,50	± 18,37	± 1,49	± 7,33
± 0,30	± 0,27	± 0,49	± 0,0113	± 0,0149	± 0,0085	± 0,0364	± 0,0265	± 0,18	± 0,18	± 6,52	± 0,53	± 2,60
19,36	17,34	11,67	0,3279	0,1256	0,2024	0,6171	0,4897	5,81	1,40	54,63	5,30	14,80
19,69	17,47	12,77	0,3229	0,0998	0,2231	0,6910	0,4768	5,82	1,70	63,73	5,30	14,40
20,87	18,39	13,35	0,2872	0,0417	0,2455	0,8548	0,4029	5,99	0,80	34,32	9,60	13,20

Tab. 14: Ergebnisse der Scherfestigkeitsmessungen des Schafschwingsels, (wassergesättigt).

Ver- suchs- Nr.		Zielgrößen			Kennwerte					
		Scher- spannung	Bruch- scher- weg	Proben- stau- chung	versuchsbedingt		pflanzl. e r d b a u l i c h			
					Normal- spannung	Scher- tiefe	Durch- wurze- lungs- intensit.	Ton- ge- halt	Schlamm- kornan- teil	Ungleich- förmigk.- grad
					σ	T	N_{WG}	Ton	Sk	U
kN/m ²	%	%	kN/m ²	m	-	%		-		
1A	Schaf- schwingel (wassergesät- tigt) IVC	14,06	2,02	2,23	4,25	0,1110	24,458	3,99	26,28	20,00
1B		9,68	0,99	6,05	7,04	0,3000	18,458	3,82	27,10	21,93
1C		10,36	1,99	8,84	10,83	0,4200	1,393	7,83	29,63	46,84

Kennwerte (Fortsetzung)												
und b o d e n m e c h a n i s c h								b o d e n c h e m i s c h				
Dichte feucht	Dichte trocken	Wasser- gehalt	Gesamt- poren- anteil	mit Luft gefüllter Poren- anteil	mit Wasser gefüllter Poren- anteil	Sättigungs- grad	Anfangs- porenzahl	pH- Wert	Humus- gehalt	Gesamt- stick- stoffgeh.	pflanzenverfügbar	
γ	γ_D	w	n	n_a	n_w	S_r	e_A	-	Hu	N	Kalium	Phosphor
kN/m ³		Ma.-%	-	-	-	-	-	-	%	mg / 100g Boden		
20,06	17,23	16,45	0,3322	0,0467	0,2834	0,8533	0,4975	6,00	1,40	54,60	4,40	18,00
20,17	17,49	15,36	0,3221	0,0529	0,2692	0,8357	0,4751	5,90	0,60	29,80	6,00	12,00
21,04	18,67	12,69	0,2764	0,0394	0,2369	0,8573	0,3820	5,80	0,30	14,70	8,20	8,00

Tab. 15: Boden- und Wurzelkennwerte der Scherversuche an durchwurzeltem Boden
(gelbe Steinweide).

Schertiefe	Bodenart	BODENKENNWERTE							WURZELKENNWERTE					
		γ	γ_d	w	n	e	S_r	\bar{D}_w	\bar{A}_w	N_w	A_w	A_{wg}		
m	-	$\frac{kN}{m^3}$	$\frac{kN}{m^3}$	Ma.-%	-	-	-	mm	mm ²	$\frac{1}{0,25 m^2}$	$\frac{mm^2}{0,25 m^2}$	$\frac{m^2}{m^2}$		
1	0,30	fS,ms,u,h'	18,1	16,5	9,9	0,38	0,61	0,43	-	-	-	-	-	
1 w	0,30	"	18,0	16,1	11,7	0,39	0,65	0,48	-	-	-	-	-	
2	0,60	fS u. mS	*17,9	16,9	6,1	0,36	0,57	0,29	-	-	-	-	-	
		fS, ms, u, t	*20,3	18,1	12,6	0,32	0,47	0,71						
2 w	0,60	fS,ms,u,t	20,3	18,1	12,6	0,32	0,47	0,71	0,748	0,684	73	49,9	$20 \cdot 10^{-4}$	
III/3	0,60	fS,ms,u,t'	20,2	17,9	13,1	0,33	0,49	0,72	-	-	-	-	-	
III/3w	0,60	fS,ms,u,t'	18,8	17,8	5,3	0,30	0,43	0,33	0,989	2,025	31	62,8	$2,51 \cdot 10^{-4}$	
4w	0,50	fS,ms,u,t	20,0	17,8	14,9	0,33	0,49	0,79	1,68	2,605	21	54,7	$2,9 \cdot 10^{-4}$	
II/1	0,50	fS,ms,u',t'	19,0	16,9	11,3	0,36	0,57	0,52	-	-	-	-	-	
II/1/w	0,50	fS,ms,u',t'	19,0	16,9	15,33	0,36	0,57	0,71	1,338	2,498	85	212,3	$8,49 \cdot 10^{-4}$	
									Gruppe 1	1,037	1,410	65	91,6	$3,67 \cdot 10^{-4}$
									Gruppe 2	2,364	6,263	19	119,0	$4,76 \cdot 10^{-4}$

Tab. 16: Vergleich der gemessenen und der berechneten Wurzelkohäsion der Gelben Steinweide.

Messung Nr.	Scher- tiefe m	MESSERGESBNISSE				BERECHNETE ERGEBNISSE			
		σ' $\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$	Δl_f cm	r_f $\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$	$\Delta \tau_w$ $\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$	c_w		F_w	
						mit $\sigma_{zw} = 10.000$ $\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$	$\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$	mit $\sigma_{zw} = 25.000$ $\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$	$\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
1	0,30	11,9	1,2	11,5	-	-	-	-	
1 w	0,30	11,9	16,3	16,2	4,70	-	-	-	
4 w	0,50	12,9	0,49	12,0	-	2,19	-	5,48	
II/1	0,50	12,5	0,15	12,4	-	-	-	-	
II/1/w	0,50	12,5	11,1	15,2	2,8	Gruppe 1 3,67 Gruppe 2 4,76	0,92 1,19	9,18 11,90	2,30 2,98
						gesamt: 8,49	2,12	21,23	5,31
2	0,63	14,5	0,60	16,4	-	-	-	-	
2 w	0,60	14,3	1,0	33,2	16,8	2,00	0,50	5,0	1,25
III/3	0,60	16,1	0,37	18,4	-	-	-	-	
III/3w	0,60	14,2	0,36	20,4	2,0	2,51	0,63	6,27	1,57

VERZEICHNIS DER FOTOGRAFIEN

	Seite
Foto 1: Narbe des extensiv gepflegten Horstrot- schwingels im Herbst 1984.	199
Foto 2: Schergerät zur Scherfestigkeitsmessung (in situ) von durchwurzeltem Boden.	199
Foto 3: Der große innere, 60 cm hohe Scherkasten mit darübergestülptem Scherrahmen. Im Vordergrund das elektronische Wegmeßgerät und das Kettengehänge.	200
Foto 4: Der kleine, innere, 30 cm hohe Scherrahmen.	200
Foto 5: Zughub mit festem Widerlager, das von zwei 70 cm langen Leichtmetallheringen gebildet wird.	201
Foto 6: Kraftmeßeinrichtung: Rechts das Dynamometer und links das elektronische Kraftmeßgerät.	201
Foto 7: Entnahme von ungestörten Bodenproben zur Gewinnung von Proben für das Rahmenschergerät im Labor.	202
Foto 8: Stauchung des eines intensiv gepflegten Rasen- sodens bei einer Schertiefe von 3cm bsi 4 cm.	202
Foto 9: Scherfläche eines abgescherten Rasensodens mit herausgezogenen Wurzeln (Sodenstärke 3 cm bis 4 cm).	203
Foto 10: Im unteren wenig durchwurzelten Bereich ist der wassergesättigte Boden nach dem Entfernen des inneren Scherkastens ausgeflossen.	203
Foto 11: Pflanzung einer Parzelle mit drei einjährig be-	

	Seite
wurzelten Steckhölzern der Gelben Steinweide.	204
Foto 12: Pflanzanlage der Gelben Steinweide am Ende der ersten Vegetationsperiode.	204
Foto 13: Bereits abgescherte Bodenblöcke aus einer Reihe der Gelben Steinweide (2. Vegetationsperiode).	205
Foto 14: Zum Abscheren vorbereitete Parzelle der Gelben Steinweide in der 3. Vegetationsperiode.	205
Foto 15: Der Aufwuchs ist abgeschnitten, damit der innere Kasten darüber gestellt werden kann.	206
Foto 16: Der Abschervvorgang in 50 cm Tiefe.	206
Foto 17+18: Der zur Seite gekippte Scherkasten. Die abgerissenen Wurzeln wurden mit einer Bürste herausprepariert, damit sie besser gezählt werden können.	207
Foto 19+20: Die Wurzel war in der Scherebene gerissen und hatten sich in einer stark kiesigen Schicht verzweigt.	208
Foto 21: Der Zentralzylinder dieser Wurzel war etwa 44 cm unterhalb der Scherfläche gerissen, während die Rinde in der Scherebene gerissen war.	209
Foto 22: Das Wurzelsystem aus der Parzelle III/3w in der oberen, etwa 50 cm starken, intensiv durchwurzelten Bodenschicht. Die Stange deutet etwa die Lage der Scherfläche an.	209
Foto 23: Eins der drei Steckhölzer mit durchtrennten Horizontalwurzeln.	210

Foto 1:

Narbe des extensiv gepflegten Horstrotschwings im Herbst 1984.

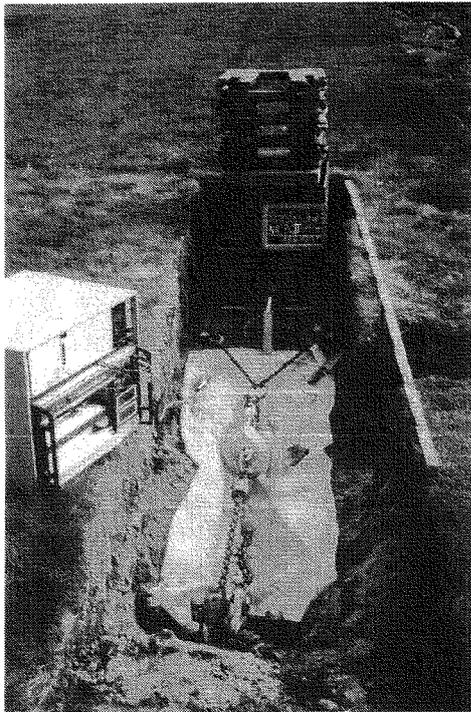
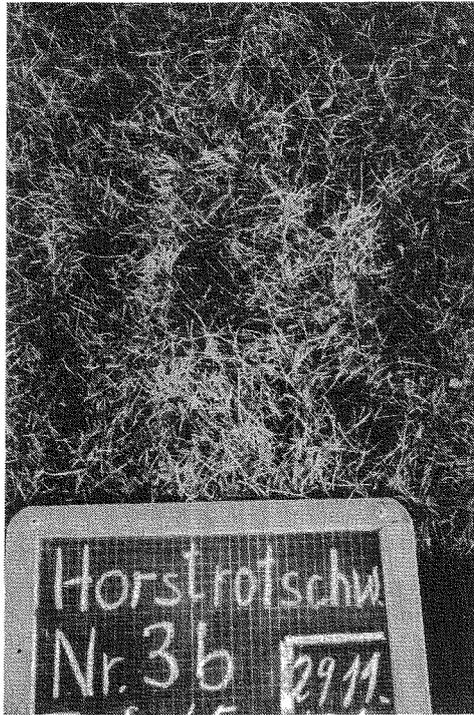


Foto 2:

Scherggerät zur Scherfestigkeitsmessung (in situ) von durchwurzelten Böden.

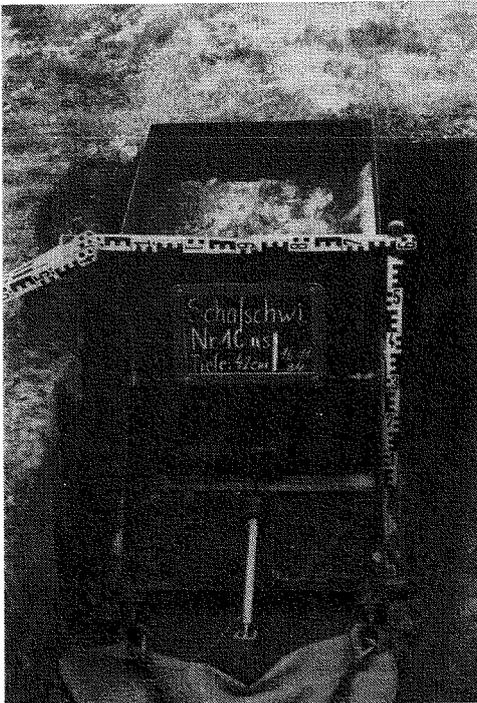


Foto 3:

Der große innere, 60cm hohe Scherkasten mit darübergestülptem Scherrahmen. Im Vordergrund das elektronische Wegmeßgerät und das Kettengehänge.

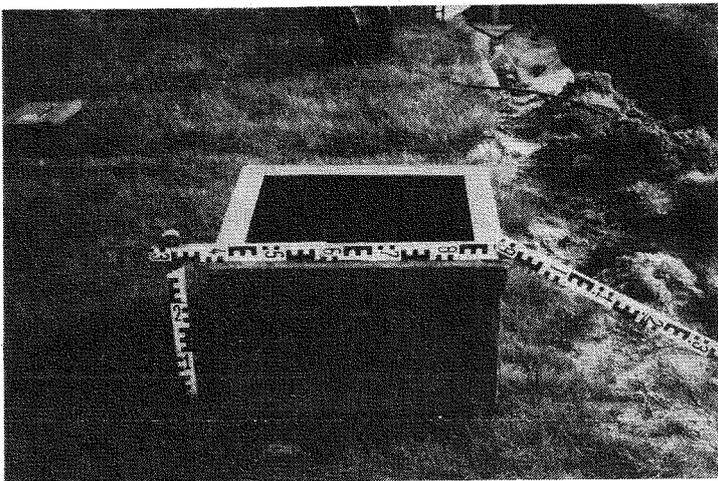


Foto 4: Der kleine innere, 30cm hohe Scherrahmen.

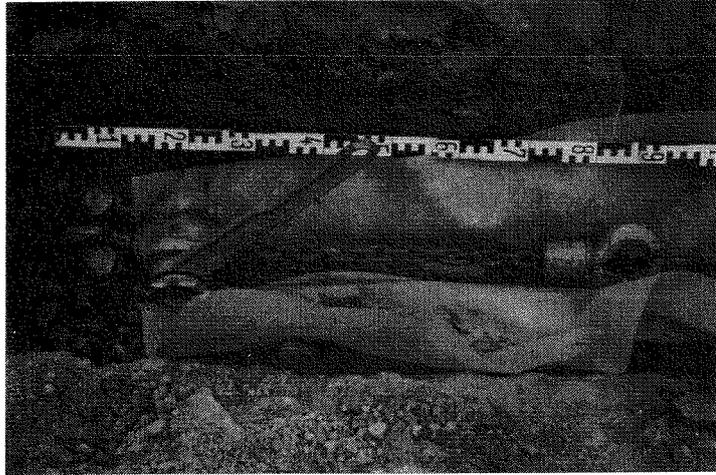


Foto 5: Zughub mit festem Widerlager, das von zwei 70cm langen Leichtmetallheringen gebildet wird.

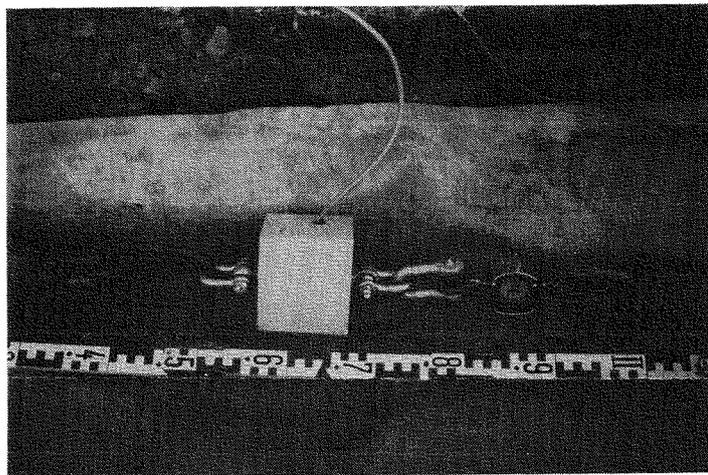


Foto 6: Kraftmeßeinrichtung: Rechts das Dynamometer und links das elektronische Kraftmeßgerät.

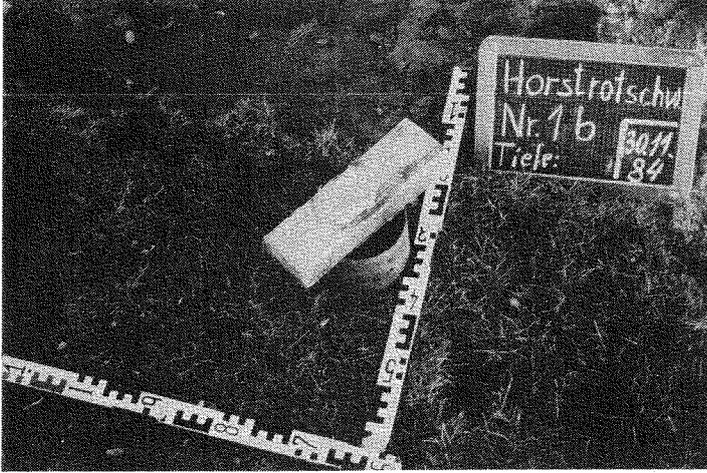


Foto 7: Entnahme von ungestörten Bodenproben für das Rahmenschergerät im Labor.

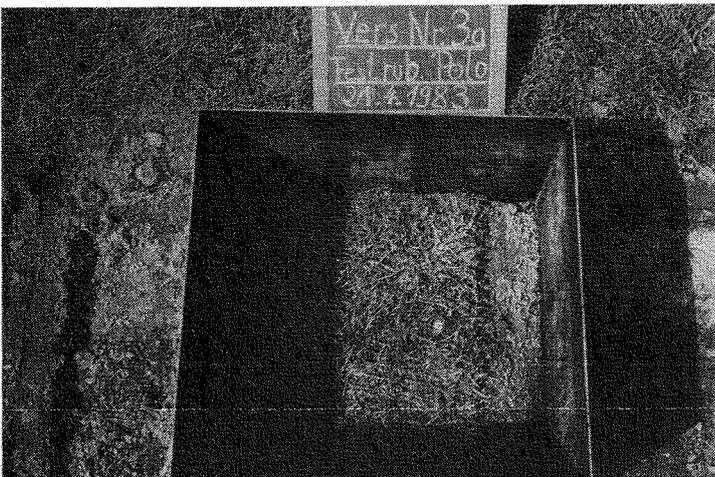


Foto 8: Stauchung einer intensiv gepflegten Rasennarbe bei einer Schertiefe von 3cm bis 4cm.



Foto 9: Scherfläche einer abgescherten Rasensode mit herausgezogenen Wurzeln (Sodenstärke 3cm bis 4cm).

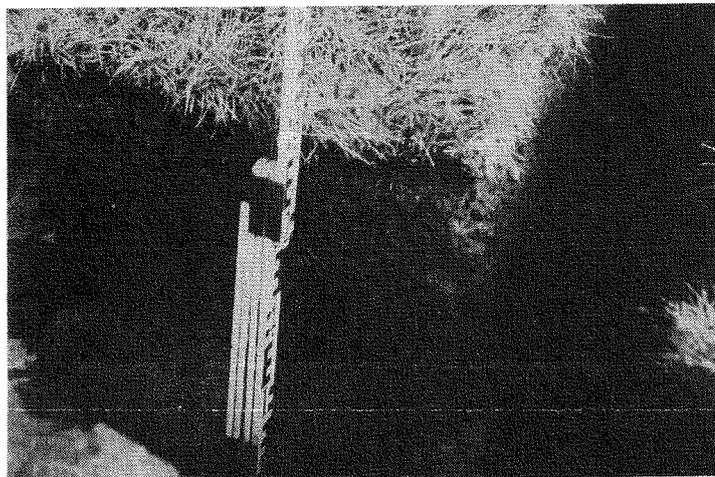


Foto 10: Im unteren, wenig durchwurzelten Bereich ist der wasser- gesättigte Boden nach dem Entfernen des inneren Scher- kastens ausgeflossen.

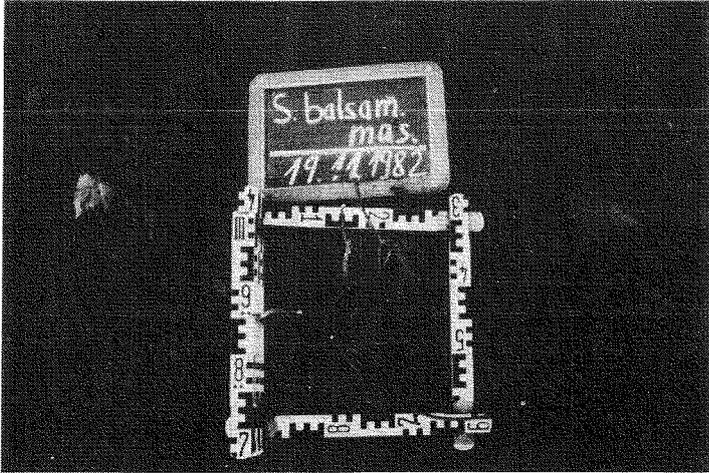


Foto 11: Frisch bepflanzte Parzelle mit drei einjährig bewurzelten Steckhölzern der Gelben Steinweide.

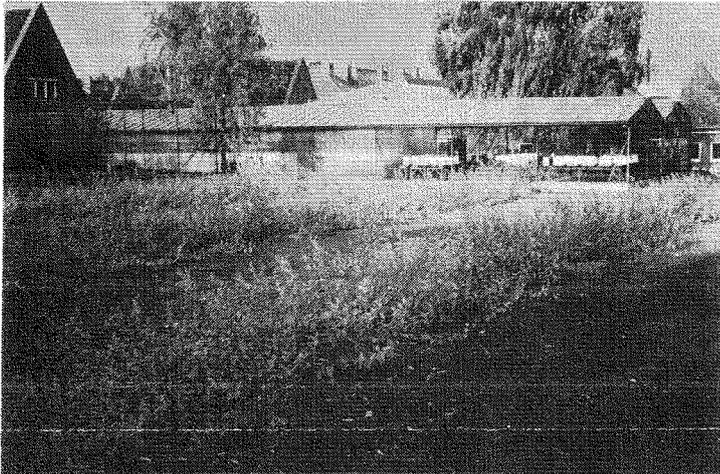


Foto 12: Versuchspflanzung der Gelben Steinweide am Ende der ersten Vegetationsperiode.

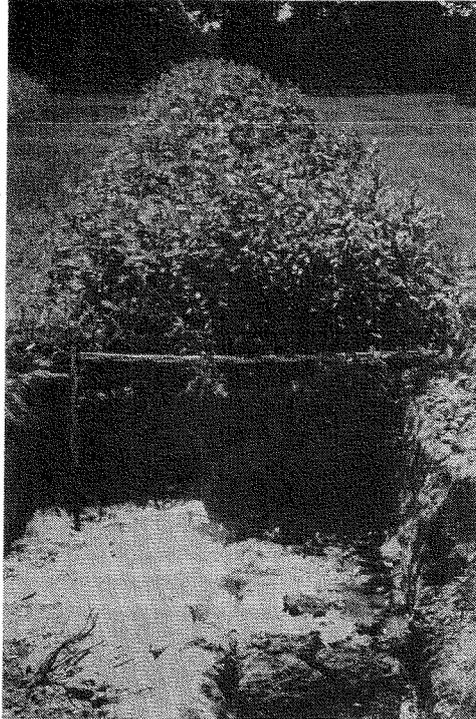


Foto 13:

Bereits abgescherte Boden-
blöcke aus einer Reihe der
Gelben Steinweide (2. Ve-
getationsperiode).

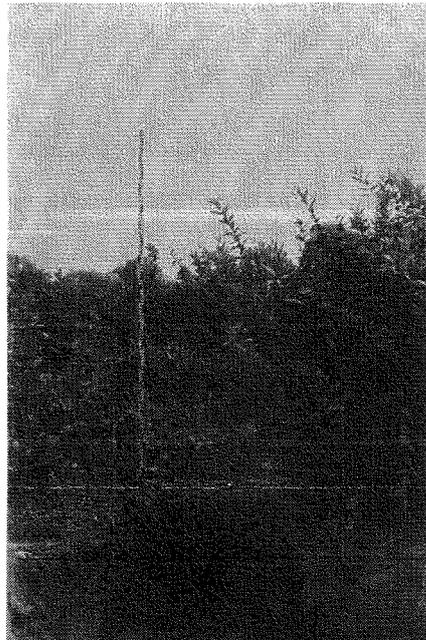


Foto 14:

Zum Abschern vorberei-
tete Parzelle der Gelben
Steinweide in der 3. Ve-
getationsperiode.

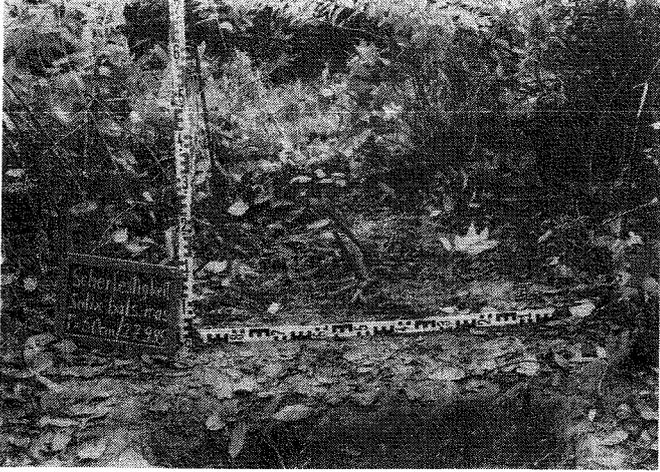
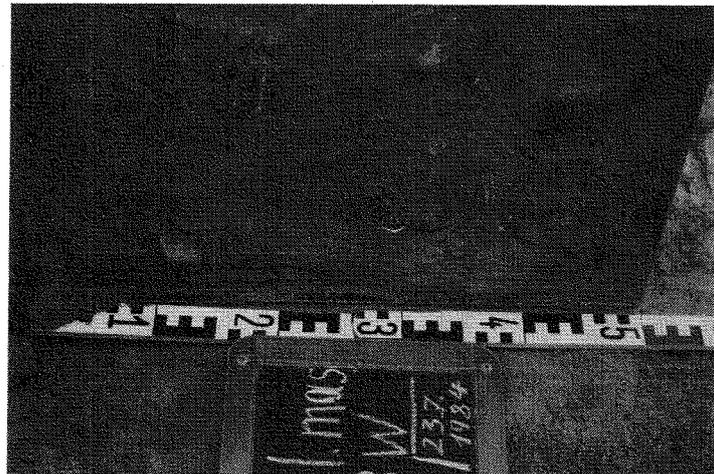
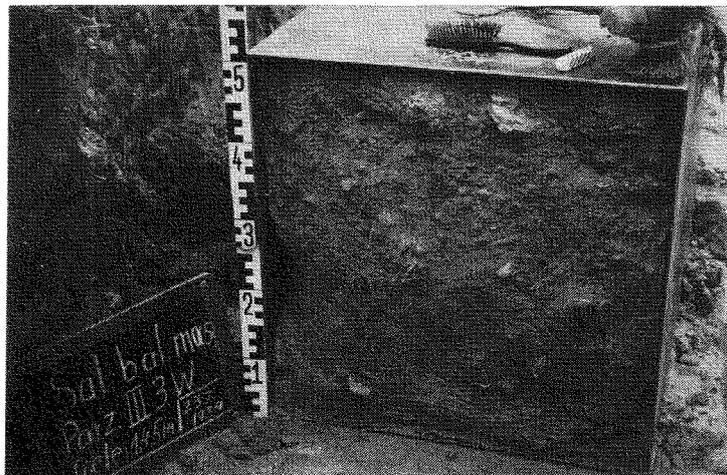


Foto 15: Der Aufwuchs ist abgeschnitten, damit der innere Scher-
kasten darüber gestellt werden kann.

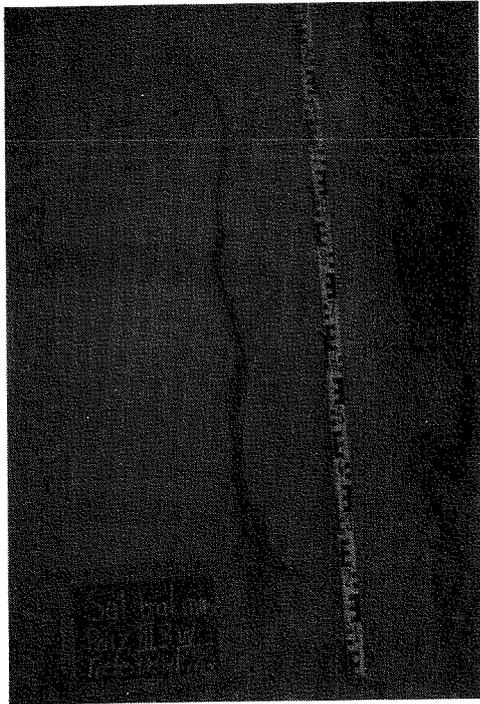


Foto 16:

Der Abschervvorgang in 50cm
Tiefe.



Fotos 17 + 18: Der zur Seite gekippte Scherkasten. Die abgerissenen Wurzeln wurden mit einer Bürste herauspräpariert um sie besser zählen zu können.



Fotos 19 + 20:

Die Wurzel war in der Scher-
ebene gerissen und hatte
sich in einer stark kiesigen
Schicht verzweigt.

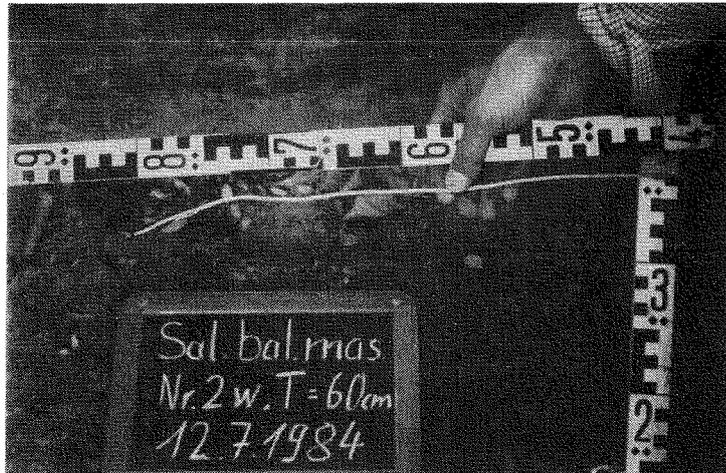


Foto 21: Der Zentralzylinder dieser Wurzel war etwa 44cm unterhalb der Scherfläche gerissen, während die Rinde in der Scherebene gerissen war.

Foto 22:

Das Wurzelsystem aus der Parzelle III / 3w in der oberen, etwa 50cm starken, intensiv durchwurzelten Bodenschicht. Die Stange deutet etwa die Lage der Scherfläche an.

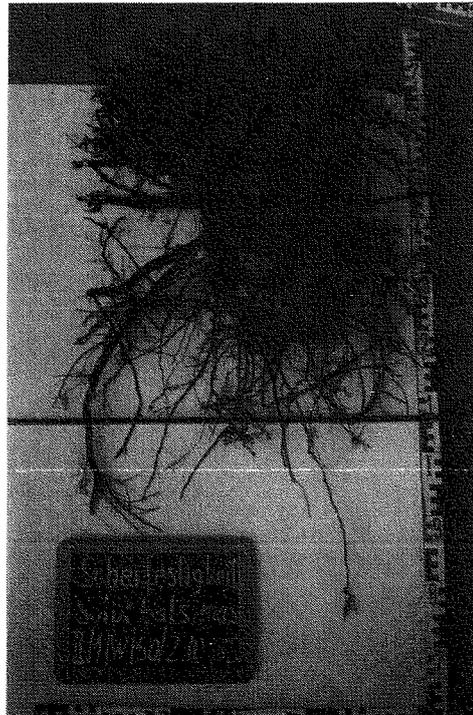


Foto 2

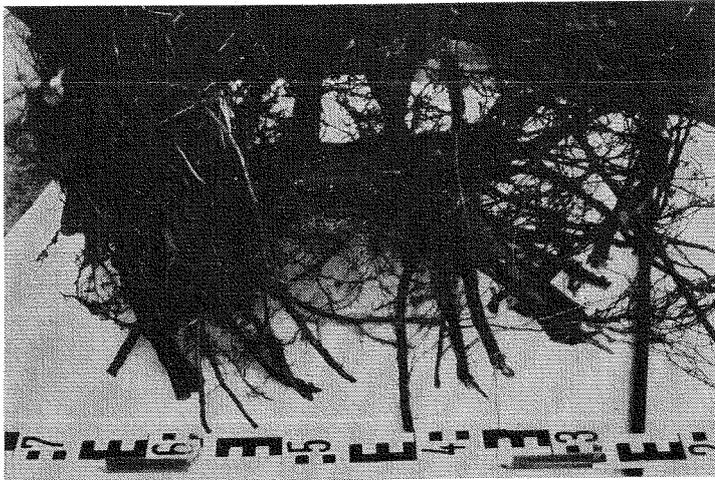


Foto 23: Eines der drei Steckhölzer mit durchtrennten Horizontalwurzeln.

LEBENS LAUF

Persönliche Daten

Name	Karl Hähne
Geburtstag/-ort	17. August 1952 in Dresden
Staatsangehörigkeit	deutsch
Familienstand	verheiratet, 1 Kind

Schulbildung

1959 - 1964	Volksschule Esch
1964 - 1969	Realschule Köln
1969 - 1972	Gymnasium Köln

Wehrdienst August 1972 bis September 1973

Hochschulausbildung

1973 - 1980	Studium des Bauingenieurwesens an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Vertieferrichtung: Konstruktiver Ingenieurbau, Abschluß: Diplom-Bauingenieur
-------------	---

Berufspraxis

April - Mai 1980	Baumschulpraktikum bei der Firma Rathe (Wietze bei Celle)
Juli - November 1980	Praktikum beim Wasserwirtschaftsamt Weilheim in Oberbayern im Fachgebiet Ingenieurbiologie und naturnaher Gewässerausbau (Technischer Angestellter mit befristetem Vertrag).
Februar 1981 -	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am

Januar 1986	<p>Institut für Landschaftsbau (Fachbereich 14) im Fachgebiet Ingenieurbiologie der Technischen Universität Berlin. Durchführung der vorlesungsbegleitenden Übung und Lehrauftrag mit Prüfungsberechtigung zur Betreuung von Studienprojekten aus dem ingenieurwissenschaftlichen Bereich. Wesentliche Lehrinhalte: Ingenieurbiologische Bauweisen (besonders zur Röhrichtansiedlung) zur naturnahen Rekultivierung kleiner Fließgewässer, zur Sicherung von Böschungen und Hängen (u.a. Rekultivierung von Kiesgruben). Vermittlung der für ingenieurbiologische Bauweisen notwendigen hydraulischen und bodenmechanischen Grundlagen.</p>
April - Juli 1986	<p>Lehrauftrag für das Institut für Landschaftsbau</p>
August 1986 - Januar 1987	<p>Fertigstellung der ersten Fassung meiner Dissertation und Ausarbeitung von Wurzeluntersuchungen für die Gesellschaft für Ingenieurbiologie und die Rhein-Main-Donau AG</p>
Februar - September 1987	<p>EDV- Einführungskurs und Aufbaukurs am Institut für technische Weiterbildung in Berlin</p>
November 1987 - April 1989 und Mai 1989 - April 1991	<p>Wissenschaftlicher Angestellter bei der Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste im Referat für Erd- und Grundbau mit dem Arbeitsschwerpunkt Ingenieurbiologie (befristete Arbeitsverträge)</p>