Kraftmessungen an Feinwurzeln des Feldahorns

Interdisziplinäre Forschung an Pflanzenwurzeln und Entwicklung eines Geräts zur Bestimmung der Scherfestigkeit von Feinwurzeln

Measurements of the shear strength of fine roots of Field Maple Tree



Masterarbeit zur Erlangung des akademischen Grades Diplomingenieurin der Landschaftsplanung und Landschaftsarchitektur

> eingereicht von Linda Breth



Betreuung: O.Univ.Prof. Dr.phil. Florin Florineth, DI Dr. Markus Rauchecker, DI Dr. Franz Aschauer

Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau Departement für Bautechnik und Naturgefahren Universität für Bodenkultur Wien, Februar 2015



Inhaltsverzeichnis

		Seite
	Danksagung	i
А	Kurzfassung	iii
В	Abstract	iv
1	Einleitung	1
1.1	Ziele der Arbeit	2
1.2	Aufbau der Arbeit	3
2	Grundlagen und Forschungsstand	5
2.1	Bodenmechanische Grundlagen zur Scherfestigkeit von Böden	7
2.2	Kraftwirkung im bewurzelten Bodenkomplex	9
2.3	Wirkung der Vegetation auf die Scherfestigkeit durch Erhöhung der Kohäsion	9
2.4	Wirkung der Vegetation auf die Scherfestigkeit durch Berechnung der "virtuellen Dichte"	12
2.5	Stand der Forschung	13
3	Kräfte, die zum Bruch der Wurzel führen	15
3.1	Auszugwiderstand	15
3.2	Zugfestigkeit	17
3.3	Scherkräfte und Scherspannungen	18
4	Die Versuchspflanze Feldahorn und ihre Bedeutung für Hangsicherungen	23
4.1	Standortansprüche und Verwendung	25
4.2	Das Wurzelsystem des Feldahorns	25
4.3	Anatomie der Feldahornwurzel	27
5	Die Pflanzenwurzel	29
5.1	Evolutionäre Entstehung von Wurzeln	29
5.2	Entwicklung eines Wurzelsystems	30
5.3	Primärer und sekundärer Aufbau der Pflanzenwurzel	31
5.4	Die Zellwand als strukturgebender Teil der Pflanzenwurzel	33
5.5	Molekulare Kraftaufnahme der Cellulosewände in der Wurzel	37
5.6	Zusammenfassung der morphologischen Grundlagen der Wurzel	38
6	Vorbereitungen für das Experiment	39
6.1	Zeitlicher Ablauf	39
6.2	Probengewinnung	42
6.3	Gerätentwicklung, Testphase und Anpassungen	45
7	Das Wurzelschergerät	49
7.1	Grundsätze des Geräteaufbaus	54
7.2	Grundsätze des Versuchsaufbaus für die Messung der Scherkraft mittels Wassergewicht	55
7.3	Störungsquellen während der Messung von Scherkräften mit dem Wurzelschergerät	55

8	Dokumentation eines Experiments	59
9	Bedeutende Größenparameter	67
9.1	Kräfte	67
9.2	Scherspannung und Scherprozess	69
9.3	Bestimmung des Wurzeldurchmessers und der Querschnittsfläche	69
10	Messergebnisse	71
10.1	Berechnung der maximalen Scherkraft bei Bruch der Wurzel	71
10.2	Beschreibung der Messergebnisse nach Durchmesserklassen	73
10.3	Überprüfung der Messergebnisse der Wassergewichtsmethode	76
10.4	Berechnung der maximalen Scherspannung bei Bruch der Wurzel	77
10.5	Beschreibung der Messergebnisse zur Scherspannung	78
11	Diskussion der Messergebnisse	81
11.1	Mögliche Gründe für die breite Streuung der Ergebnisse	81
11.2	Vergleich der Ergebnisse	84
12	Zusammenfassung und Ausblick	89
13	Literaturverzeichnis	97
14	Abbildungsverzeichnis	101
15	Tabellenverzeichnis	103
16	Anhänge (alle DIN A3 Hochformat)	105
16.1	Anhang I	105
	Messergebnisse mit Wassergewicht der Serien 1-5 und DI Alvarez	
	sowie der Vergleich der Messung mit Wassergewicht und Zeitnahme	
16.2	Anhang II	106
	Ergebnisse der Versuche an der Kraftmessdose	
16.3	Anhang III	107
	alle Messergebnisse geordnet	
16.4	Anhang IV	109
	Normalverteilungen der Scherspannungswerte der Serien 1-5 und DI Alvarez	

Mein besonderer Dank gilt meinen Betreuern Prof. Florineth, Dr. Rauchecker und Dr. Aschauer, die mich während des Studiums als Vortragende und während der Masterarbeit unterstützt haben, und dem gesamten Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau.

Mit Anregungen, Bereitstellung von Räumlichkeiten und Instrumenten haben folgende Personen an dieser interdisziplinären Masterarbeit mitgewirkt:

Ich danke herzlichst

Frau Ing. Sandra Alvarez, Institut für Geotechnik Herr Univ.Prof. Dr. Erhard Halmschlager, Institut für Forstentomologie, Forstpathologie und Forstschutz Frau Friederike Hintermüller, Institut für Ingenieurbiolgie und Landschaftsbau Frau Ing. Monika Lex, Institut für Waldbau Herr Univ.Prof. Dr. Karl Moder, Institut für Angewandte Statistik und EDV, Methodenzentrum für Versuchsplanung und Erhebungsplanung Frau Susanne Mottinger-Kroupa, Institut für Forstentomologie, Forstpathologie und Forstschutz Herr Ing. Johann Rutzenholzer, Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau Herr Reinhard Schuller, Institut für Physik und Materialwissenschaft Herr Dr. Gerhard Sinn, Institut für Physik und Materialwissenschaft alle BOKU Wien

sowie

Herr DI Daniel Beiter, Wien Frau Dr. Monika Sobotik, Pflanzensoziologisches Institut, Klagenfurt

Und danke allen Freunden, Mitbewohnern, Studienkollegen und Wegbegleitern, sowie meinen Eltern und Geschwistern für eure immerwährende Unterstützung, Geduld und Hingabe mir und meinen Interessen gegenüber während der Zeit auf der BOKU.

> - Auch das kleinste Ding hat seine Wurzel in der Unendlichkeit, ist also nicht völlig zu ergründen. -Wilhelm Busch

Kurzfassung

Die Masterarbeit hat zum Ziel, den von Pflanzenwurzeln übernommenen Anteil der für die Stabilität eines Hanges wesentlichen Scherkräfte besser abschätzen zu können.

Während der Recherche zum Forschungsstand konnten viele mathematische Modelle gefunden werden. Die bisherige Forschung sagt aus, dass vor allem feine Wurzeln die Stabilität des Bodens erhöhen, und bemängelt die unzureichenden Kenntnisse über die aufgenommenen Kräfte dieser Wurzeln.

Diese Arbeit versucht, geotechnische Ergebnisse zum Rutsch- und Kriechverhalten eines Hanges mit bisherigen Kenntnissen bezüglich des Beitrages der Pflanzenwurzeln zu verbinden und diese Kenntnisse durch eigene Messungen zu erweitern.

Um auch im Feld kostengünstig und einfach die Scherfestigkeit von Wurzeln bestimmen zu können, wurde ein auf einfachen physikalischen Grundlagen basierendes Gerät entwickelt. Bestimmt wurde die Scherfestigkeit feiner Wurzeln des Feldahorns. Die Krafteinleitung bis zum Scherbruch erfolgte kraftgesteuert mit einer pro Zeiteinheit festgelegten Wassermenge, deren Gesamtmasse anschließend durch exaktes Wiegen bestimmt wurde. Die so ermittelten Daten wurden mit eigenen Messungen an einer elektronischen Kraftmessdose, mit Messungen einer Kollegin und mit Angaben aus der Literatur verglichen.

Die Wurzeln des Feldahorns im Durchmesserbereich um 1 mm halten Scherkräften von ca. 15 bis 25 N stand, mit 2 mm Durchmesser können sie mit ungefähr 100 N belastet werden. Für die Scherspannung kann ein Bereich zwischen 10 und 50 N/mm² angegeben werden.

Die Versuche ergaben brauchbare Richtwerte, jedoch konnten wegen zu hoher Streuung keine statistisch signifikanten Daten für die Scherspannung von Feinwurzeln zwischen 0,45 und 3,75 mm erbracht werden. Die Gründe liegen im Umbiegeverhalten der Pflanzenwurzel im Schergerät und der organischen Struktur, die sich anders als anorganische Werkstoffe verhält. Die Messergebnisse sind jedoch trotz der zu hohen Streuung interessant und bei Adaptierung des Versuchsgerätes durchaus eine Anregung zu weiterer Forschung.

Die Masterarbeit will als Orientierung für weitere Forscherinnen und Forscher dienen, indem sie maßgebliche Aspekte dieses interdisziplinären Themenkreises aufzeigt und eine Gebrauchsanleitung für das existierende Wurzelschergerät bietet.

Seite | iii

Abstract

This master thesis aims to contribute to the research on the influence of plant roots on the stability of natural and built slopes. It provides an orientation for future researchers which issues are part of this interdisciplinary topic and is an instruction manual for the existing root shear strength apparatus.

The literature provides a number of models on the contribution of roots to the soil shear strength. Former researchers point out that especially fine roots increase the stability of green slopes. Generally there is a lack of knowledge about the mechanical performance of fine roots.

This thesis tries to build a bridge from geotechnical knowledge about landslides and the testing of shear strength of rooted and unrooted soils to a new testing of direct shear strength of the individual fine roots of Field Maple, Acer campestre.

An apparatus was built to measure the shear strength of these fine roots from 0,45 - 3,75 mm in diameter soley with the weight of water, which flows in a defined manner to a bucket, that applies the pulling force on the root. The apparatus and its functioning were tested with samples of similar roots with an electrical load cell. The results were compared to results from a colleague working with similar roots sheared by water weight and to data from the literature review.

Roots of Field Maple with 1 mm in diameter have shear strengths from 15 N to 25 N; 2 mm diameter roots resist up to 100 N load until they get ruptured. For shear tension, which is a measure of the relation between shear strength and diameter, the data is in a range between 10 and 50 N/mm².

These results give us a usable guidance level, but due to the broad distribution of measured values, no statistically significant data for fine roots of Field Maple can be provided with in the scope of this thesis.

Among the causes of the broad distribution are that fine roots tend to bend over in the shear apparatus and their organic structure leads to more complex behavior than inorganic materials. Nevertheless, the results are promising and give a lot of reason to expand this field of research. For this there are proposals given for the adaption of the apparatus und the research process in the end of this thesis.

1 Einleitung

Die Anwendung ingenieurbiologischer Maßnahmen bei der Revitalisierung von Naturräumen, Instandsetzung von Bauwerken und Sicherung von Böschungen im Zuge von Baumaßnahmen hat sich etabliert. Die Verwendung von Pflanzen und die Nutzung ihrer technischen Eigenschaften kommt einem höheren gesellschaftlichen Bewusstsein im Umgang mit und in der Gestaltung unserer Kulturlandschaft entgegen.

Dabei wurden schon in den letzten Jahrzehnten viele Maßnahmen erprobt und aus langjähriger Beobachtung und Erfahrung bewährte Konzepte eingesetzt. Gestiegen ist inzwischen die Nachfrage nach vielfältiger, an die Region angepasster Vegetation bei Neupflanzungen und damit die Bandbreite an eingesetzten Pflanzen – vom pannonischen Trockenrasen bis zur artenreichen Waldrandgesellschaft, von der Vielfalt an Gräsern bis zu verschiedenen Mischwaldgehölzen.

In der Geotechnik gibt es zahlreiche Ergebnisse aus Rahmenscherversuchen mit unbewurzelten und bewurzelten Bodenproben. Aus ihnen lassen sich Aussagen über das Rutsch- und Kriechverhalten von Hängen ableiten. Mathematische Modelle mit unterschiedlichen theoretischen Ansätzen beschreiben das Verhalten verschiedener Böden und den Beitrag von Pflanzenwurzeln zur Erhöhung der Scherkräfte. Zu den Kräften, die einzelne Pflanzenwurzeln aushalten, gibt die Literatur bisher hauptsächlich Auskunft über Zugfestigkeiten, also jene Spannungen, die in Richtung der Pflanzenfaser wirken. Die Scherfestigkeit der Einzelwurzel ist noch wenig erforscht.

Allgemein ist festzustellen, dass über die Morphologie von Pflanzenwurzeln in Österreich durch Lore KUTSCHERA und Erwin LICHTENEGGER (2013) und später durch ihre Schülerin Monika Sobotik sehr viel geforscht wurde. Hingegen gibt es über die technischen Eigenschaften von Wurzeln noch wenig Forschungserfolge (EISENMANN, 2015). Mit vielfältigen Ansätzen wurden immerhin wichtige Grundlagen gelegt, durch die wir uns das unterirdische Wesen der Pflanze besser vorstellen und seine Bedeutung für unsere Umwelt und bei Baumaßnahmen abschätzen können.

Diese Masterarbeit und dabei entwickelte Gerät wollen einen Beitrag leisten, um mehr über die spezifischen technischen Eigenschaften verschiedener Pflanzenwurzeln zu erfahren. Hier geht es nicht um den genauen Aufbau der Wurzel - anatomische Kenntnisse helfen bei der Interpretation der Daten -, sondern speziell um die Scherkräfte, die von den Feinwurzeln des Feldahorns aufgenommen werden können. Dies sind weitgehend unerforschte Eigenschaften, zu denen es bisher nur Einzelangaben gibt. In der vorliegenden Arbeit geht es um die Kräfte, die wirken, wenn die Wurzel quer zur Faser in einer Scherzone belastet wird.

Wie die Forschungen von ZIEMER (1981), ZIEMER und SWANSTON (1977) sowie von MAKAROVA et al. (1997) zeigen, können mehr Erkenntnisse über die Pflanzenwurzel an sich zu neuen Ansätzen beitragen, die in mathematischen Modellen die Wirkung von Wurzeln im Boden genauer beschreiben. Die Ergebnisse zu Feinwurzeln des Feldahorns im Durchmesserbereich von 0,45 bis 3,75 mm leisten dazu einen Beitrag.

Das Wurzelschergerät, das dazu entwickelt werden musste, der Versuchsaufbau und die Experimente werden detailliert beschrieben, Fehlerquellen jeweils erörtert. Die Ergebnisse liefern Richtwerte, auf denen die Forschung im Feinwurzelbereich sowie die Verbesserung der Methode aufbauen können.

Die Masterarbeit soll dazu beitragen, den Wissensstand über den komplexen Wirkungszusammenhang bei ingenieurbiologischen Hang- und Böschungssicherungen zu erweitern, und Anstoß geben, die Pflanzenwurzel weiter zu erforschen.

1.1 Ziele der Arbeit

Die Forschungsarbeit hat zum Ziel festzustellen, welchen Scherkräften und -spannungen die Feinwurzeln des Feldahorns standhalten und ob Regelmäßigkeiten im Bezug auf die Durchmesser der Wurzelproben auftauchen. Hierfür werden die einzelnen Feinwurzeln im Versuchsgerät abgeschert.

Durch zwei Platten, wovon eine beweglich ist, wird die Wurzelprobe geführt und ein angehängter Kübel füllt sich stetig mit einer definierten Menge von Wasser. Allein durch das Gewicht von Wasser, das auf die Wurzel im Gerät wirkt, werden die Kräfte errechnet. Dies gewährleistet eine einfache, leicht nachvollziehbare und wiederholbare Methode. Bestätigt sich die einfache Anwendung und Zuverlässigkeit der gewonnenen Daten, kann diese Versuchsmethode kostengünstig und einfach in der Bedienung, außerdem ortsunabhängig, für ähnliche Experimente genutzt werden.

Überprüft werden die Daten durch die Aufnahme der Zeit während des Experimentes und durch die Durchführung von Versuchen mit vergleichbaren Proben mittels einer Kraftmessdose, die den kraftgesteuerten Versuch mit einem Computerprogramm aufzeichnet. Das zweite Messverfahren dient auch dazu, Fehlerquellen/Störfaktoren, die durch den Aufbau und die Beschaffenheit des Geräts nicht vollkommen zu vermeiden sind, größenmässig festzustellen bzw. realistisch abschätzen zu können.

Die Forschungsarbeit ist interdisziplinär und bedient sich Ansätzen aus verschiedenen Wissenschaftsbereichen:

 Die Botanik liefert Wissen über den Versuchsgegenstand Wurzel .
Es wird ein Überblick über die Aufgaben und Funktionsweisen der Wurzel als Teil der Pflanze und über ihren anatomischen Aufbau gegeben.

Weiters wird die einzelne Wurzel in Zusammenhang mit dem Wurzelsystem, den verschiedenen Formen und deren Funktionsweisen gesetzt. Die Kräfte, die auf die einzelne Wurzel im Wurzelsystem unter verschiedenen Belastungen in der Natur wirken, leiten über zum Gebiet Geotechnik.

- Die Geotechnik knüpft an das System Wurzel und Boden an. Es wird ein Überblick über bisherige Methoden und Theorien zu Schubspannungen und Scherkräften im durchwurzelten Boden gegeben. Die technischen Zusammenhänge der Boden-Wurzel-Matrix werden nach bisherigen Erkenntnissen dargestellt.
- Kenntnisse aus den Materialwissenschaften (Holzfasern) und der Biomechanik werden benötigt, um die Wirkung von Schub- und Normalspannungen auf die einzelne Wurzel zu beleuchten. Das Verhalten der Wurzel im Schergerät, bezogen auf das jeweiligen Experiment als auch auf allgemeine Stoffeigenschaften, kann mit physikalischen und mathematischen Grundlagen erklärt werden.

Der Stand der Forschung aus den einzelnen Disziplinen wird in einen neuen Zusammenhang gebracht, und die Daten aus ehemaligen sowie den im Rahmen der Arbeit durchgeführten Experimenten soweit wie möglich verglichen. Aus den Erkenntnissen der anderen Disziplinen ist ausserdem ein Forschungsbedarf ablesbar, der durch diese Arbeit aufgenommen wird. Neue Zusammenhänge werden hergestellt und weitere Daten gewonnen. Diese können interpretiert werden und in der Praxis bei Planungen oder Risikoabschätzungen helfen. Dennoch wird der Forschungsbedarf nicht unbedingt geringer. Im Gegenteil, durch neue Zusammenhänge ergeben sich weiterführende Fragestellungen, mit denen diese Arbeit schließen wird.

1.2 Aufbau der Arbeit

Nach der Darstellung der Ziele der Masterarbeit folgen die geotechnischen Grundlagen, sowie ein Portrait der Versuchspflanze. Anschließend werden das Wurzelschergerät, seine Funktionsweise und die durchgeführten Experimente beschrieben.

Zunächst wird die Versuchsreihe in ihrem zeitlichen Ablauf dargestellt und dann nach Arbeitsschritten aufgerollt. Die Probenbehandlung und -gewinnung steht am Anfang, dann werden der Bau des Geräts und erfolgte Anpassungen besprochen, gefolgt von einer genauen Beschreibung der Experimente.

Hinweise zum Aufbau und zum störungsfreien Experimentverlauf werden gegeben. Einerseits wird gezeigt, auf welche Details besonders zu achten ist, und andererseits welche Fehler nach meiner bisherigen Erfahrung passieren können. Dies soll helfen, die Funktionsweise von Beginn der Arbeit an nachvollziehen zu können. Eine Checkliste für die Vorbereitung gibt einen Überblick und soll für andere Forscherinnen und Forscher als Hilfeleistung dienen.

Ein Experiment wird mittels Fotodokumentation dargestellt und der Ablauf erklärt. Auf die Behandlung und die Auswahl der Wurzelproben während der Versuche wird eingegangen.

Die einfachen Berechnungen der Kraft und Spannung aus den Aufzeichnungen des Wassergewichts und des Messens des Durchmessers unmittelbar nach dem Versuch werden schrittweise erklärt.

Die Interpretation und der Vergleich der Daten folgen darauf und lassen Schlussfolgerungen auf die Eignung des Wurzelschergeräts, auf das Material Feinwurzel an sich sowie auf Anpassungen des Messverfahrens und seiner Anwendung zu.

2 Grundlagen und Forschungsstand

Den bisherigen Forschungsarbeiten zum Einfluss der Vegetation auf die Erhöhung der Scherfestigkeit liegen zahlreiche Messdaten und mathematische Modelle zu Grunde.

In der Geotechnik und Bodenmechanik ist die Scherfestigkeit des Bodens ein Maß für die Stabiliät eines Hanges bis zu seinem Abrutschen. Sie ist eine Dimensionierungsgröße, die angibt, welche maximale Scherspannung bis zum Versagen aufgenommen werden kann. Hier beziehen wir uns noch auf die Bodenstruktur in Hangabschnitten, diese einfache Definition kann aber auch auf die nachfolgenden Untersuchungen an den Feinwurzeln übernommen werden.

Es gibt verschiedene Untersuchungsmethoden und -geräte zur Messung der Scherkraft einer Bodenprobe. Bei weggesteuerten Versuchen wird ein definierter Weg zurückgelegt und die Spannungsänderungen währenddessen aufgezeichnet. Bei kraftgesteuerten Versuchen wird die Zunahme der wirkenden Scherkraft pro Zeiteinheit vorgegeben und die Spannung in Bezug auf den zurückgelegten Scherweg gemessen.

Da das Wurzelschergerät ein Mittel ist, um direkt die Scherkraft von einzelnen Feinwurzeln zu messen, werden ein Bezug zu den Eigenschaften von Direktscherversuchen (z.B. mittels eines Rahmenschergeräts) hergestellt und die Unterschiede besprochen.

HÄHNE (1991) stellt folgende wichtige Punkte zur Messung der Scherfestigkeit beim direkten Scherversuch auf:

- Kontrollierte Scherspannung
- Erzwungene Lage der Scherfläche
- Vorgegebene Gestaltänderung
- Vertikallast wird aufgebracht und bleibt konstant
- Künstliche Steigerung der Scherspannung
- Konstante Verschiebungsgeschwindigkeit (HÄHNE, 1991)

Hierzu ist festzuhalten, dass die Scherspannung der Wurzel im Versuch mit dem Wurzelschergerät erst gemessen und mittels der Anwendung verschiedener Messverfahren (Gewichtsmessung, Zeitmessung, Aufzeichnung mittels Kraftmessdose) kontrolliert wird. Die Lage der Scherfläche (Abb. 2.1 und 2.2) wird durch die Bohrlöcher in den Platten, die Klemmvorrichtungen, die die Wurzel in ihrer Lage fixieren, und den Spalt zwischen den Platten vorgegeben (zum genauen Verständnis siehe Kapitel 7 Das Wurzelschergerät ab Seite 49).



Abb. 2.1 Schematische Darstellung des Wurzelschergeräts in der Aufsicht Durch die Bohrlöcher wird die Wurzel in Position gehalten, die seitliche Rollen fixieren die gerade Bewegung der Platte und damit die Scherzone in Längsrichtung (BOKU, 2014)

In unserem Fall ist es von Bedeutung, dass sich die Wurzel möglichst wenig in ihrer Gestalt (umbiegen, dehnen) ändert, damit wir von einem Ergebnis ausgehen können, das die Scherkraft ohne Einfluss von Zugkräften wiedergibt.

Vertikallasten (auch als Auflasten oder Normalspannungen bezeichnet) spielen bei dem Wurzelschergerät keine Rolle.

Die künstliche Steigerung der Scherspannung und die konstante Verschiebungsgeschwindigkeit werden durch den definierten Durchfluss bei der Wassergewichtsmethode bzw. durch die elektronische Steuerung bei Versuchen mit Kraftmessdose gewährleistet.



2.1 Bodenmechanische Grundlagen zur Scherfestigkeit von Böden

STÜCKELBERGER (2000) hat in einem Zwischenbericht zu seinen Forschungen zur Scherfestigkeit von bewurzelten Bodenproben die bodenmechanischen Grundlagen nach LANG et al. (1996) zusammengefasst. Sie sollen hier zur umfassenden Darstellung der Scherfestigkeit im Zusammenhang mit Hangsicherungen erwähnt werden. Da wir mit dem Wurzelschergerät aber keinen Bezug auf den Boden direkt nehmen, sondern einen Beitrag zur Erforschung der einzelnen Feinwurzeln liefern, geschieht dies vor allem als Gesamtüberblick zum Themenbereich Boden und Wurzel.

Neben dem Vorhandensein verschiedener Bruchkriterien von Böden – d.h. bei welcher Spannungsbelastung verliert ein Bodenkomplex seine Stabilität – hat sich das Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb in der Anwendung durchgesetzt.

Die Formel lautet:

 $\tau = c + \sigma * \tan \phi$

- τ... Scherfestigkeit, maximale Scherspannung der Bodenprobe [N/m²; kPa]
- c... Kohäsion, abhängig von der Bodenart [N/m²; kPa]
- σ ... Normalspannung, Auflast auf die Bodenprobe [N/m²; kPa]
- φ... Reibungswinkel [°]

Bei Scherversuchen an quader- oder zylinderförmigen Bodenproben wird diese sowohl vertikal mit einer Normalspannung σ belastet (Auflast) als auch in Querrichtung mit einer Scherspannung τ (vereinfacht dargestellt in Abb. 2.3). Die maximale Belastung, als Scherfestigkeit τ bezeichnet, bezieht sich auf die Verformung unter der gesamten Spannungseinwirkung auf die Gesamtfläche der Bodenprobe.

Die Kohäsion bezieht sich auf die Kräfte zwischen den Bodenteilchen und ist stark abhängig von Bodenart, Korngrößenverteilung und Wassersättigung. Sie wird als Faktor aus Erfahrungswerten in die Berechnung mit einbezogen.

Der Scherwinkel stellt den Winkel dar, der während des Schervorganges die Verformung der Bodenprobe in Richtung der Scherkraft abbildet.



Abb. 2.3

Auflast σ und Scherspanunng τ beeinflussen die Verformung der Bodenprobe und werden durch Δh und den Scherwinkel γ beschrieben (HAGER, 2012) Der Winkel der inneren Reibung φ bezeichnet die Steigung der Bruchgerade, die aus der Berechnung für einzelne Abschnitte des Hanges, die durch ihre Lage unter verschiedenen Spannungen stehen, entsteht. Im Rahmenscherversuch oder Traxialversuch wird die Normalspannung, die Last, die von oben senkrecht auf die Bodenprobe wirkt, in mindestens drei Versuchen variiert und bei kraftgesteuerten Versuchen die Schubkraft stetig erhöht oder die Verformung auf einem definierten Weg (weggesteuert) aufgezeichnet. Daraus ergeben sich die Mohr´schen Spannungskreise und die resultierende Bruchkurve (Abb. 2.4).

Der Bruch tritt ein, wenn die Spannung über der Scherfestigkeit, d.h. über der Bruchgeraden nach Coulomb, liegt. Die Scherfestigkeit bezeichnet, wie angeführt, die maximale Scher- oder Schubspannung.



Abb. 2.4 Bruchkriterium und Formel nach Mohr-Coulomb (HAGER, 2012)

2.2 Kraftwirkung im bewurzeltem Bodenkomplex

Boden allein ist eine Materie, die gegen Zugkräfte sehr wenig Widerstand leistet, durch innere Kräfte Schubspannungen je nach Zusammensetzung aushalten kann, sich bei Normalspannungen (Druck) kaum verändert und sehr resistent ist. Die Pflanzenwurzel kann hingegen Zugkräfte sehr gut aufnehmen – dies zeigen bisherige Forschungen in vielfältigen Versuchen –, ist aber nicht stabil gegen Druck (WEINBERGER, 2011).

Bei der Durchwurzelung eines Bodens verbessert die Wurzel also die benachteiligte Kraftkomponente im Boden. Dieses Kräftezusammenspiel wird bei Untersuchungen von bewurzelten Bodenproben untersucht.

In den Modellen, bei denen die Auswirkung von Pflanzenwurzeln mit in die Berechnung der Bodenscherfestigkeit einbezogen werden sollen, haben bisherige Forschungen versucht, die Wirkung dem Kohäsionsfaktor oder dem Einfluss auf den Scherwinkel zuzuordnen.

Allgemeine Aussagen über die verstärkende Wirkung von Pflanzenwurzeln besagen, dass bei ohnehin sehr scherfesten Böden der Einfluss von Bewurzelung gering ist. Bei lockeren, rutschgefährdeten Böden verstärken Wurzeln die Scherfestigkeit dagegen maßgeblich (WEINBERGER, 2011).

Durch vielfältige Forschungen wurden relevante Zusammenhänge zwischen Eigenschaften der Pflanzenwurzeln und anderen Parametern festgestellt. Die Masterarbeit von WEINBERGER (2011) stellt einige Aussagen dar:

- Bei geringen Auflasten erhöht die Bewurzelung die Scherfestigkeit.
- Daher ist die Bewurzelung vor allem im oberflächennahen Bereich wirksam.
- Die Erhöhung der Scherfestigkeit durch Wurzeln ist umso markanter, je kleiner die Bodendichte und je geringer der Seitendruck ist.
- Die Wirkung von Vegetation auf die Scherfestigkeit wird durch Mykorrhizabildung an den Wurzeln und die damit verstärkte Bodenbindung zusätzlich erhöht.
- Da der Wurzelanteil mit der Tiefe im Boden abnimmt, scheinen vor allem die Feinwurzeln für eine Erhöhung der Scherfestigkeit im oberflächennahen Bereich ausschlaggebend zu sein.

2.3 Wirkung der Vegetation auf die Scherfestigkeit durch Erhöhung der Kohäsion

Modelle zur Erhöhung der Scherkraft durch zusätzliche Kohäsion oder größeren Scherwinkel basieren auf der Formel nach dem Mohr-Coulomb´schen Bruchkriterium. Da sie sich auf bewurzelte Bodenproben beziehen, kommen dieselben Variablen wie zuvor bei der Prüfung von unbewurzelten Bodenproben vor. Je nach Forschungsgegenstand werden zusätzliche Parameter, oft der Porenwasserdruck der Probe (siehe Formel Seite 10), miteinbezogen. Für die Variablen gibt es unterschiedliche Bezeichnungen in der Fachliteratur.

Die zusätzliche Kohäsion, die der Wirkung der Vegetation zugeordnet wird, ist ein additiver Faktor (O`LOUGHLIN und ZIEMER, 1982).

$\tau = (c + \Delta C) + (\sigma - u) \tan \phi$

- τ... Scherfestigkeit der bewurzelten Bodenprobe [kPa]
- c.. Kohäsionsfaktor des Bodens [kPa]
- ΔC... Kohäsionszunahme durch die Bewurzelung [kPa]
- σ... Normalspannung [kPa]
- u... Porenwasserdruck [kPa]
- φ... Reibungswinkel [°]

O´LOUGHLIN und ZIEMER (1982) beschreiben weiter ein Modell von LUCKMAN et al., das eine Verbiegung der Wurzel (Abb. 2.5) während der Verschiebung des Hanges beschreibt und in das Scherfestigkeitsmodell einzubeziehen versucht. Hier wirkt eine Normalspannung σ durch das Gewicht des Bodens auf die einzelne Wurzel. Dargestellt ist es in ihrer Arbeit folgendermaßen:





Die Verbiegung und Streckung der Wurzel wirkt sich auch auf die Messergebnisse im Wurzelschergerät aus. Dieser Einfluss wird bei der Diskussion der mit dem Wurzelschergerät gemessenen Daten noch weiter besprochen (Kapitel 11 ab Seite 81). Durchmesser, Alter und somit der innere Aufbau der Wurzel tragen zur Verformbarkeit einer Wurzel bei und nehmen so verschiedene Arten von Kräften im Boden auf. Die Kraftwirkungen in unterschiedlichen Situationen werden in Kapitel 3 ab Seite 15 dargestellt und bisherige Forschungsergebnisse präsentiert.

Für die Erhöhung der Scherfestigkeit durch eine zusätzliche Kohäsion im Boden stellen SCHMIDT et al. (2001) den Flächenanteil der Wurzelquerschnitte an einer Bodenscherfläche (RootAreaRatio), die einzelnen Wurzeldurchmesser, die Pflanzenart und den Anteil an lebenden Wurzeln als bedeutende Faktoren dar. Sie bestimmen einen Mittelwert für die zusätzliche Kohäsionswirkung durch Wurzeln zwischen 25,6 – 94,3 kPa in alten unbewirtschafteten Wäldern und 6,8 – 23,2 kPa in industriell bewirtschafteten Wäldern an der Westküste der USA. Zehn Jahre nach der Rodung der Hänge betrugen die Werte für die Kohäsion durch Pflanzenwurzeln nur noch bis zu 10 kPa. Dies weist auf die Bedeutung der lebenden Pflanze und ihre Wirkung auf Entwässerung und Festigung des Bodens hin.

Allgemeine Aussagen zum Einfluss von Vegetation auf die Scherfestigkeit von Böden sind dies nicht, da die Hangrutschung stark ortsspezifisch beeinflusste Ursachen hat und Zusammenhänge mit der jeweiligen spezifischen Vegetationszuammensetzung in ihrer Arbeit nicht hergestellt werden konnten.

In der Arbeit von O`LOUGHLIN und ZIEMER (1982) wird eine Übersicht über mehrere Forschungsergebnisse gegeben. Hier kommen Werte von 1 – 17,5 kPa für Δ C vor. Diese Werte basieren jedoch wiederum auf verschiedenen mathematischen Modellen. Die Autoren weisen auch darauf hin, dass Pflanzenwurzeln in komplexen Zusammenhängen auf die Hangsicherung Einfluss nehmen. Die Erhöhung der Kohäsion durch Wurzeln unterschätzt den Einfluss von Vegetation auf die Hangstabilität deutlich (O'LOUGHLIN und ZIEMER, 1982).

Professor Rolf KATZENBACH und DI Anke WERNER von der TU Darmstadt haben 2007 einen Beitrag zu einem Kongress an der Universität für Bodenkultur (im Folgenden: BOKU) verfasst und darin erste Messergebnisse präsentiert, die von Aufbau und Pflanzenart ähnlich den hier behandelten Proben sind. Sie haben unbewurzelte und bewurzelte Bodenproben aus Pflanzkisten nach einer und zwei Vegetationsperioden im Rahmenschergerät abgeschert.

Es wurde die Wirkung der Wurzeln der Pioniergehölzarten Sandbirke (Betula pendula) und Spitzahorn (Acer platanoides) getestet. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass der Reibungswinkel zwischen bewurzelten und unbewurzelten Proben sich nicht signifikant ändert. Eine Erhöhung der Kohäsion von 0 – 2,4 kN/m² bei unbewurzelten auf 3,5 – 6,3 kN/m² bei bewurzelten Proben ist jedoch deutlich. Die abgescherten Hauptwurzeln hatten einen Durchmesser von mehreren Zentimetern.

In Abbildung 1.6 sind die bisherigen Ergebnisse in einem Normalspannung-Schubspannungs-Diagramm dargestellt, mit Angabe des mittleren Verhältnisses Fläche des Wurzelquerschnitts A_w zur Gesamtfläche der Bodenprobe A. Für weitere Informationen über die durchgeführten Versuche sei auf die elektronische Ressource auf der Website der BOKU verwiesen. (KATZENBACH und WERNER, 2007)

Der auf der y-Achse mit C_{Root} bezeichnete Bereich der Scherfestigkeit τ stellt die Wirkung der Vegetation gegenüber den Referenzversuchen ohne Pflanzenwurzeln dar.



Abb. 2.6 Messergebnisse von unbewurzelten und bewurzelten Bodenproben aus Kistenversuchen mit Sandbirke und Spitzahorn von KATZENBACH und WERNER (2007)

Werte aus mathematischen Modellen zeigen also nicht die biomechanischen Eigenschaften der Wurzeln, sondern versuchen einen einzelnen Einflussfaktor der wirklichen Vorgänge im Hang zu beschreiben.

Der Einfluss auf die verbesserte Situation im Hang, die Kräfte, die während der Verschiebung des Bodens im Scherprozess wirken, werden von bisherigen Forschungen durch Zugkräfte der gestreckten, gebogenen Wurzel beschrieben. Dabei spielen die Querlegung, ein Wegfaktor und damit die Biegsamkeit der Wurzel eine Rolle.

2.4 Wirkung der Vegetation auf die Scherfestigkeit durch Berechnung der "virtuellen Dichte"

BÖLL und GRAF (2001) stellen einen anderen Ansatz dar, der den Einfluss der Vegetation auf den Scherwinkel beschreiben soll. Sie bezeichnen ihr Modell als "Modell der virtuellen Dichte". Sie nehmen die Wurzelwirkung als einen Faktor an, der die tatsächliche Dichte des Bodens "virtuell" erhöht und so die Scherfestigkeit einer bewurzelten Bodenprobe beschreibt. Erfahrungsgemäß steigt der Reibungswinkel mit zunehmender Lagerungsdichte. Es wird modellhaft davon ausgegangen, dass ein bepflanzter, lockerer Boden (geringe Dichte) den gleichen Scherwinkel aufweist wie ein unbepflanzter, dichter (höhere Dichte). Der durch die Bewurzelung beeinflusste Faktor wird als virtuelle Dichte bezeichnet.

2.5 Stand der Forschung

Die Vielfalt an mathematischen Modellen macht die Vergleichbarkeit der Daten schwierig und gibt Anlass, grundlegendere Ergebnisse mit direkt gemessenen Werten zu produzieren, anstatt auf gemittelten Faktoren und mathematischen Modellen, die mit Annahmen und Vereinfachungen arbeiten, aufzubauen.

Allgemein ist festzustellen, dass bisher kaum Daten über die Scherfestigkeit von Pflanzenwurzeln an sich vorliegen. Die Wirkung von Vegetation wird immer in einer Änderung der Scherfestigkeit ΔS beschrieben, die auf verschiedene Art und Weise erklärt und mathematisch modelliert wird.

Festzuhalten ist für diese Arbeit vor allem die Tatsache, dass Wurzeln mit kleinen Durchmessern nach Erkenntnissen aus verschiedenen Forschungen, bezogen auf den Querschnitt, resistenter sind gegen von außen wirkende Kräfte. Für die Zugfestigkeit wurde dies mehrfach nachgewiesen. In ABE und ZIEMER (1991) wird auf die Dehnung von Feinwurzeln verwiesen, die bei Zugtests eher aus dem Boden rutschen als brechen bzw. an den Spitzen brechen und nicht in der Scherzone. Unterschiede in der maximalen Zugkraft von verschiedenen Spezies sind ebenfalls im Feinwurzelbereich nachweisbar und verlieren sich bei größeren Durchmessern. Der innere Aufbau der Wurzel gibt weitere Hinweise auf die größere Dehnbarkeit.

Zu beiden Überlegungen gibt das nachfolgende Kapitel über die Kräfte, die zum Bruch der Wurzel im Boden führen können, weitere Aufschlüsse.

ABDULLAH et al. (2011) geben im Paper "Soil-root Shear Strength Properties of Some Slope Plants" einen Überblick über die Bedeutung der Feinwurzeln. Die Masse der Feinwurzeln und das Verhältnis ihrer Länge zum Durchmesser erhöhen durch Bindung der Bodenpartikel die Kohäsion. Die Entwässerung des Bodens erhöht ebenfalls seine Festigkeit.

ABE und ZIEMER (1991) zeigen, dass die Menge an Wurzeln mit der Tiefe im Boden exponentiell abnimmt. Wurzeln festigen daher besonders den oberflächennahen Bereich. Bei ihrer Forschung zu japanischen Fichten fanden sie die meisten Wurzeln im Bereich von 20 – 50 cm Tiefe. Die festgestellten Durchmesser lagen bei bis zu 85% unter 5 mm. Die Lage und Wuchsrichtung der Wurzeln wird ebenso diskutiert. Seitlich horizontal wachsen Wurzeln vor allem in der obersten Zone, mittig eher schräg und vertikal, die meisten direkt in die Tiefe wachsenden Wurzeln liegen im tiefsten Abschnitt des untersuchten Bereichs.

Daraus ist abzuleiten, dass die Forschung an der Einzelwurzel auch mit ihrer Lage, Wuchsrichtung und Funktion im Wurzelsystem verknüpft werden kann, um Unterschiede festzustellen. Demnach können Schlüsse über den Beitrag der verschiedenen Wurzeln derselben Pflanze zum Halten oder Versagen eines Hanges gezogen werden.

Kräfte, die zum Bruch der Wurzel führen

Verschieden gerichtete Kräfte wirken auf die einzelne Wurzel im Boden. Zur Vollständigkeit werden alle Kräfte beschrieben. Der Überblick über die Kräfte, die auf Pflanze und Boden wirken, verbessert die Möglichkeit zur Interpretation und Anwendung der Ergebnisse von Messungen mit dem Wurzelschergerät.

3.1 Auszugwiderstand

Diese Kraft hält die Pflanze gegen Zugkräfte von oben, wie zum Beispiel gegen Tierfraß oder Windkräfte, im Boden und verteilt die angreifenden Kräfte über eine Scherzone hinaus in den festen Untergrund (RIESTENBERG, 1994).

Der Auszugswiderstand ist bei kleinen Durchmessern noch gering. Hier reißen die Wurzeln eher nicht, sondern rutschen aus dem Bodenverbund. Erst bei größeren Durchmessern übersteigen die Auszugskräfte die Reißkräfte, d.h. Zugkräfte. Dann ist die Wurzel stark im Boden verankert und nimmt die volle Zugkraft bis zum Versagen der Fasern auf. Der Kreuzungspunkt der Kurven, in Abb. 3.1 zu sehen, hat vor allem mit der Scherkraft des Bodens zu tun, beeinflusst vom Wassersättigungsgrad und anderen Eigenschaften, wie Natasha POLLEN (2005) erklärt.





Die folgende Abbildung 3.2 stellt die angreifenden Kräfte bei einem Windwurf dar.

Verschiedene Forschungen sind laut Alexia STOKES in Plant Roots (2002) zu dem Ergebnis gekommen, dass vor allem die aktivierten Zugkräfte an der windzugewandten Seite die Verankerung des Baumes sichern. An der Leeseite werden die Wurzeln gebogen und Druck- und Biegekräfte in den Wurzelfasern mobilisiert. Dieser Anteil wird als gering eingeschätzt und somit gelten die Zugkräfte der Wurzeln als bedeutend gegen Windwurf, Aushebelung und Abrutschen eines Hanges. Wenn die Wurzeln den Baum nicht mehr im Untergrund verankern, ist der Hang nicht mehr vor weiterem Rutschen gesichert. Die Wurzelkräfte liefern also nicht nur einen

3

Beitrag zur Erhöhung der Hangstabilität, sondern sichern auch einen schon in Bewegung geratenen Boden.

(STOKES, 2002)



Abb. 3.2 Kraftwirkung bei Wind im Wurzelsystem (eigene Darstellung nach STOKES, 2002)

Als Merksatz wird Folgendes zusammengefasst:

Kleine Durchmesser

Zugkräfte > Auszugskräfte

Zugkräfte > Biegekräfte

Große Durchmesser

Auszugkräfte > Zugkräfte

Zugkräfte > Biegekräfte

3.2 Zugfestigkeit

Da die Kräfte auf Zug als die wirksamsten bei der Bodenstabilisierung gelten, werden die Größenordnungen hier besprochen und kurz die physiologischen Grundlagen dargelegt.

Die Materialwissenschaft, die sich mit organischen Verbundstoffen, wie Holz, beschäftigt, und die Botanik beschreiben das Material als hauptsächlich cellulosehaltig. Durch die mikroskopische Struktur ist die Festigkeit solcher organischer Stoffe stark richtungsabhängig. Die Kräfte wirken je nach Einfluss in Richtung der Holzfaser anders als quer zur derselbigen. Holz wird als ein vielfach anisotroper Werkstoff beschrieben. Das Ingenieurgrundlagenwerk von CZICHOS (2012) gibt an, dass die Zugfestigkeit in Faserrichtung ungefähr 50-fach so groß ist wie quer. Die Querzugfestigkeit beschreibt, wie leicht sich die Fasern in Querrichtung von einander trennen, und ist nicht zu verwechseln mit den Scherspannungen, die im Wurzelschergerät quer auf die Wurzel wirken. Druckfestigkeiten sind, wie zuvor erwähnt, um ein vielfaches geringer als die Zugkräfte.

Die Zugfestigkeit variiert jedoch stark nach Pflanzenart, Umgebung und auch innerhalb desselben Wurzelsystems. Verschiedenheiten wurden festgestellt nach der Wuchsform der Wurzel und ihrer Menge an Verzweigungen (NORRIS, 2005).

Der für uns bedeutende Zusammenhang ist folgender:

Die relative Zugfestigkeit von Wurzeln nimmt mit zunehmendem Durchmesser ab.

Je feiner die Wurzel ist, umso mehr trägt sie im Verhältnis zu ihrem Durchmesser zur Stabilisierung des Bodens bei.

O'LOUGHLIN und WATSON (1979), dargestellt in STOKES (2002), weisen nach, dass Wurzeln von Picea radiata von ca. 1 cm bis 2,5 cm Durchmesser Zugkräfte zwischen 20 und 30 MPa aushalten, bei 5 – 10 cm Durchmesser pendeln sich die Kräfte zwischen 10 und 20 MPa ein. Dies stellt vor allem den Zusammenhang einer negativen Korrelation dar. STOKES weist darauf hin, dass viele Faktoren die tatsächliche Zugfestigkeit von Wurzeln beeinflussen. Sie erwähnt die Pflanzenart, Vorgänge bei der Pflanzung und die Jahreszeit, mit welcher der Wassergehalt in der Wurzel zusammenhängt.

Ein Mittelwert zur Zugspannung von verholzten Wurzeln des Spitzahorns (Acer platanoides) wird mit 27 MPa (STOKES, 2002) angegeben. In der Arbeit von BURROUGHS und THOMAS (1977) stellen die Autoren ihre Forschungsergebnisse denen von O'LOUGHLIN gegenüber. Sie beschreiben, dass die Daten von O'LOUGHLIN weit weniger Streuung aufweisen als ihre. Der Grund scheint die Auswahl der Testwurzeln zu sein. O'LOUGHLIN sortierte die Wurzeln aus und verwendete nur gerade, gleichförmig gewachsene, während BURROUGHS und THOMAS, wie auch wir in dieser Arbeit, alle Wurzeln testeten und keine spezifische Auswahl trafen.

Weitere Forschungen von Alexia STOKES, die sie in ihrem Paper zur Verankerung von Wurzeln erwähnt, besagen, dass Druck- und Biegekräfte mit abnehmendem Durchmesser hingegen ebenfalls abnehmen, also positiv korrelieren. Sie bezieht dieses Erkenntnisse aber auf Versuche am ganzen Wurzelsystem, nicht auf die einzelne Wurzel.

3.3 Scherkräfte und Scherspannungen

Wenn wir Scherkräfte bezogen auf die einzelne Wurzel betrachten, sehen wir in dieser Masterarbeit Zusammenhänge mit den biomechanischen Eigenschaften von Faserverbundstoffen, da materialtechnische Experimente an der Einzelwurzel dazu bisher fehlen. Scherspannungen sind Scherkräfte auf eine Fläche bezogen (siehe Seite 69). In der Arbeit von KERSTENS et al. (2001) ist das unterschiedliche Verhalten der Fasern im Inneren der Wurzelwandzelle bei Belastung in Querrichtung im Unterschied von der Krafteinwirkung auf den Querschnitt in Faserrichtung bei zwei Pflanzen in Abbildung 3.3 veranschaulicht.



Abb. 3.3 Vergleich der Krafteinwirkung parallel/mit der Faser und quer/rechtwinkelig auf die Faser in der Zellwand der Zwiebel mit längsorientierten Cellulosefibrillen und einer Kalanchoe-Pflanze mit in alle Richtungen orientierten Cellulosefibrillen (KERSTENS et al., 2001).

Die Ursache dafür liegt in der Orientierung der strukturgebenenden Cellulosefibrillen (im Folgenden: CF), die hauptsächlich die Zellwand bilden. Der Aufbau der Wurzelzelle wird in Kapitel 5 ab Seite 29 noch ausführlicher besprochen. Zur Interpretation der Linien in Abb. 3.3 ist zu sagen, dass die Steigungen der Graphen, die das plastische Verhalten der Zellwände darstellen, sehr unterschiedlich sind. Scherkräfte in Faserverbundstoffen werden bei einheitlicher Orientierung der CF gleichförmiger von der Wurzel aufgenommen. Durch die Zugkräfte in Faserrichtung dehnt sich der Pflanzenteil bei Erstbelastung.

BURROUGHS und THOMAS (1977) stellen die Frage, unter welcher Art von wirkenden Kräften die Wurzel im Boden bricht. In der Diskussion ihrer Arbeit stellen sie fest, dass die Wurzeln bei fester Verankerung im Boden eher unter Scherkräften brechen, wenn die Scherzone sehr eng ist. Auf Zug brechen sie, wenn die Scherzone weit genug ist, die Wurzel sich verbiegt und dehnt, bis ihre volle Zugkraft überstiegen wird.

Scherzone entspricht Spaltbreite

Schmale Scherzone – Bruch aufgrund von Scherkräften

Größere Scherzone – Bruch aufgrund von Zugkräften

Die Beschreibung der Kraftwirkungen stellt die Belastungen in der Natur dar. Die Messergebnisse anderer Forscherinnen und Forscher geben einen Orientierungsrahmen für unsere Messdaten an.

Die einzigen konkreten Zahlen zur Scherkraft von Gehölzwurzeln im Feinwurzelbereich konnten bei ZIEMER (1981) gefunden werden. Die Daten basieren jedoch auf einer Berechnung der Scherkraft aus der Zugkraft, die durch vorige Tests abgeschätzt wurde. In Tabellen 3.1 bis 3.3 sind diese Daten aufgeführt, um hier Vergleiche ziehen zu können. Die angegebenen Zahlen zur Scherspannung wurden im Bezug auf die als kreisförmig angenommen Querschnittsflächen von der Autorin errechnet. Interessant für künftige Forschungen kann auch der Vergleich mit den von ZIEMER getesteten verschiedenen Gehölzarten sein. Dabei handelt es sich um Baum- und Straucharten einer nordamerikanischen Mischkoniferenwaldgesellschaft, benannt nach der Colorado-Tanne als "white fir phase".

Tabelle 3.1 Ergebnisse nach ZIEMER (1981) für Wurzelproben mit dem Durchmesser 2 mm (bzw. Fläche von 3,14 mm²)

Art	Scherkraft [N]	Scherspannung [N/mm ²]
Sambucus callicarpa	77	24,51
Ceanothus velutinus	61	19,42
Castanopsis chrysophylla	76	24,19
Arbutus menziesii	39	12,41
Pseudotsuga menziesii	57	18,14
Libocedrus decurrens	95	30,24
Abies concolor	49	15,60
Pinus lambertiana	43	13,69
Pinus ponderosa	44	14,01

Tabelle 3.2 Ergebnisse nach ZIEMER (1981) für Wurzelproben mit dem Durchmesser 5 mm (bzw. Fläche von 19,63 mm²)

Art	Scherkraft [N]	Scherspannung [N/mm ²]
Sambucus callicarpa	449	22,87
Ceanothus velutinus	336	17,11
Castanopsis chrysophylla	393	20,02
Arbutus menziesii	280	14,26
Pseudotsuga menziesii	266	13,55
Libocedrus decurrens	349	17,77
Abies concolor	241	12,27
Pinus lambertiana	253	12,89
Pinus ponderosa	200	10,19

Tabelle 3.3 Ergebnisse nach ZIEMER (1981) für Wurzelproben mit dem Durchmesser 10 mm (bzw. Fläche von 78,54 mm²)

Art	Scherkraft [N]	Scherspannung [N/mm ²]
Sambucus callicarpa	1600	20,37
Ceanothus velutinus	1399	17,81
Castanopsis chrysophylla	1400	17,83
Arbutus menziesii	1239	15,78
Pseudotsuga menziesii	946	12,04
Libocedrus decurrens	995	12,67
Abies concolor	849	10,81
Pinus lambertiana	879	11,19
Pinus ponderosa	689	8,77

Die Scherkräfte, die von Feinwurzeln mit 2 mm Durchmesser bis zum Bruch aufgenommen wurden, betragen zwischen 39 und 95 N, die Scherspannung für die Querschnittsfläche von 3,14 mm² zwischen 12 und 30 N/mm². Die Scherspannung nimmt mit größeren Durchmessern ab, die Werte sinken bei 5 mm Durchmesser auf 10 bis 22 N/mm². Bei 10 mm Probendurchmesser liegen sie um durchschnittlich weitere 2 N/mm² niedriger, nämlich zwischen 8 und 20 N/mm².

Aus diesen Angaben kann folgendes zusammengefasst werden:

Scherkraft [N]

Die von der Wurzel aufgenommene Scherkraft nimmt nicht linear,

sondern in einer polynomialen Funktion mit dem Durchmesser zu.

Scherspannung [N/mm²]

Die Scherspannung derselben Wurzel der jeweiligen

Gehölzart nimmt bei größeren Durchmessern ab.

Diese Merksätze für die spätere Interpretation der eigenen Daten basieren u.a. auf Berechnungen und können mit den gemessenen Kräften verglichen werden.

Die Versuchspflanze Feldahorn und

ihre Bedeutung für Hangsicherungen

Namen: Feldahorn, Kleiner Ahorn, Maßholder

Botanischer Name: Acer campestre L.

Der Feldahorn ist ein sommergrüner, dicht verzweigter Strauch oder Baum, der eine Höhe von ungefähr 20 m erreichen kann (Abb. 4.1 und Abb. 4.3).

Die oberirdische Verzweigung des Sprosses entwickelt sich über eine durchgehende Achse (monopodial). Der Wuchs wird als dicht verzweigt mit einer ovalen oder rundlichen Krone beschrieben, die Äste sind aufrecht abstehend. Ein gutes Erkennungsmerkmal sind die kleinen, am Rand rundlichen Blätter (Abb. 4.2) und die mehrere Millimeter starken Korkleisten an jungen Ästen.

(KUTSCHERA und LICHTENEGGER, 2013)

Er toleriert verschiedene Standortbedingungen, ist sehr anpassungsfähig, winterhart und krankheits- und trockenresistent. Deswegen wird er auch bei Bepflanzungen auf extremen Standorten wie Straßen, Parkplätzen und auf offenem Gelände eingesetzt. Er zählt zu den schnellwachsenden heimischen Baumarten mit 30 – 40 cm Wachstum pro Vegetationsperiode. (SIMON, 2013)



Abb. 4.1 Feldahorn als Baum in einem Heckenverbund am Wegesrand (unbekannt, Website des SCHUTZGEMEINSCHAFT DEUTSCHER WALD, 2015)

4



Abb. 4.2 Blatt und Frucht des Feldahorns (unbekannt, Website des SCHUTZGEMEINSCHAFT DEUTSCHER WALD, 2015)



Abb. 4.3 Feldahorn im Heckenverbund in Herbstfärbung (Foto von Jörg Kaspari, Deutschland, 2013, mit freundlicher Erlaubnis heruntergeladen von der Internetgalerie FLICKR)
4.1 Standortansprüche und Verwendung

Heimisch ist der Feldahorn in den Mischwäldern Mittel- und Südeuropas, hat aber auch Verbreitungsgebiete in Nordeuropa, in Westrussland und Nordpersien, im Süden kommt er von Kleinasien über den Mittelmeerraum bis Mittelspanien vor.

Er gedeiht sehr gut auf kalkhaltigen, feuchten Böden, in sonniger bis halbschattiger Lage. Über 1000 m Seehöhe ist er nur noch selten anzutreffen. Sein Wärmebedürfnis im Sommer lässt ihn gut an Hängen mit leichter Südost- bis Südwestneigung gedeihen. In Mischwäldern, Felderhecken und an Waldrändern kommt er natürlich vor. Auch in Augebieten außerhalb des Überschwemmungsbereiches ist er verbreitet. Salz- und säurehaltige Böden werden eher gemieden. Eine gewisse Salzverträglichkeit wird ihm andererseits in der Verwendung als Straßenbegleitgrün zugeschrieben.

Als Landschaftsgehölz wird der Feldahorn gerne in Windschutzhängen und zur Bodenfestigung gepflanzt. Ökologische Funktionen übernimmt er als Nistgehölz und Wildverbissgehölz im naturnahen Raum, im urbanen Raum erfüllt er unterschiedliche kleinklimatische und lufthygienische Aufgaben. Die Eignung als Baum im Straßenverkehrsbereich wurde schon erwähnt.

(SIMON, 2013)

Die Wurzeln des Feldahorns wurden durch die Dissertation von Kollegin Sandra ALVAREZ Gegenstand dieser Masterarbeit (ALVAREZ, unveröff.). Die Eignung als Baum für Hangsicherungen in Österreich und andernorts ist nach der Darstellung der nützlichen Eigenschaften jedenfalls gegeben. Die Beschreibung des Wurzelsystems nach dem Wurzelatlas von KUTSCHERA und LICHTENEGGER (2013) untermautert diese Annahme.

4.2 Das Wurzelsystem des Feldahorns

Die Bewurzelung ist ähnlich der des Spitzahorns, Acer platanoides. Die dicken Wurzelabschnitte verwachsen oft nahe dem Stammansatz. Sonst zeichnet sich das Wurzelsystem durch die große Zahl an feinen Wurzelsträngen und die weite räumliche Verbreitung im Boden aus. Die Durchwurzelung des Bodens und vor allem das Streben der Wurzeln in die Tiefe übertreffen die des Spitzahorns. Stockausschläge, Legtriebe und Wurzelsprosse gehören zu den Verbreitungseigenschaften des Wurzelsystems.

Dies ermöglicht den Wuchs als dichtes Strauchwerk, zum Beispiel in einer Hecke, das eine starke sprossbürtige Bewurzelung aufweist.

Die Polwurzel tritt im Laufe der Entwicklung durch rasche Verzweigungen und Dickenzunahme anderer Wurzeln bald zurück. Das Wurzelsystem fächert sich leicht auf, die Wurzeln, die in die Tiefe streben, bilden einen zentralen Zylinder. Dieses Verhalten nimmt zum Rand des Wurzelsystems hin rasch ab.

Die Feinverzweigung findet man vor allem oberflächennah außen, in die Tiefe nimmt sie eher ab. Die Form des Wurzelsystems wird als kegelförmig, nach oben erweitert, beschrieben. (KUTSCHERA und LICHTENEGGER, 2013)



Abb. 4.4 Zeichnungen des Wurzelsystems des Feldahorns aus dem Wurzelatlas (KUTSCHERA und LICHTENEGGER, 2013)

Das feingliedrige, kompakte Wurzelsystem scheint den Feldahorn als geeignete Versuchspflanze für unsere Experimentreihe zu bestätigen. Das Ausbilden von Feinwurzeln, die Raschwüchsigkeit, die Anspruchlosigkeit an seinem Standort und vielfältige Anwendbarkeit dieser Pflanze spricht außerdem für die Verwendung in der Ingenieurbiologie zur Hangsicherung.

4.3 Anatomie der Feldahornwurzel

Für diese Arbeit soll eine überblicksartige Darstellung der Ausformungen des Zellaufbaus genügen. Es werden die stark wechselnde Größe der Zellen des Rindenparenchyms erwähnt, dadurch ergibt sich die fehlende radiale Anordnung der Zellen. Laut KUTSCHERA und LICHTENEGGER (2013) lässt dies auf eine höhere Trockenresistenz schließen. Die Zellwände der Exodermis, eines Teiles des sekundären Abschlussgewebes, sind deutlich mit Suberin verstärkt, das die Wurzel vor Fäulnis und Austrocknung schützt.

Die Zellen des Abschlussgewebes zeichnen sich durchwegs durch dünne Wände und die Weitlumigkeit der Zellen aus. Im Inneren, im Holz- und Bastteil der Wurzel, variiert der entsprechende Anteil an Grundgewebe stark. Im sekundären Zustand entspricht ein hoher Anteil an Grundgewebe im Holz dem höheren Wärmebedarf und der Resistenz gegen Trockenheit.

Die Abbildungen 4.4, 4.5 und 4.6 sind dem Standardwerk zu Pflanzenwurzeln, dem Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher (KUTSCHERA und LICHTENEGGER, 2013, Ausschnitte aus Tafel 134), entnommen. Hier finden sich weitere Informationen. Auf die Pflanzenwurzel und ihre Eigenschaften und Funktionen wird im folgenden Kapitel näher eingegangen.



Abb. 4.5 Primärer Aufbau der Wurzel des Feldahorns (KUTSCHERA und LICHTENEGGER, 2013)



Abb. 4.6 Sekundärer Aufbau der Wurzel des Feldahorns (KUTSCHERA und LICHTENEGGER, 2013)

5 Die Pflanzenwurzel

Nach einer allgemeinen Einführung werden der anatomische Aufbau der Wurzel, die Eigenschaften der einzelnen Wurzel und das Zusammenwirken im Wurzelsystem als festigender Verbindungsteil mit der Bodenumwelt mit den Krafteinwirkungen im Hang in Verbindung gebracht.

5.1 Evolutionäre Entstehung von Wurzeln

Zu Beginn erläutere ich kurz die Entstehung des Pflanzenteils Wurzel. In POLOMSKI und KUHN (1998) wird einleitend beschrieben, dass nur ein Teil der von Pflanzen gebildeten unterirdischen Organen zur Wurzel gezählt wird. Kryptogamen (Algen, Pilze und Moose) verankern sich mit Rhizoiden, die allein der Verankerung, aber nicht der Stoffaufnahme und Weiterleitung von Stoffen dienen.

In der Entwicklung treten echte Wurzeln erstmals bei den samenlosen Gefässpflanzen auf. Die Wurzeln sind einheitlich und sprossbürtig.

Einen Überblick zur Systematik der typischen Bewurzelungsformen der wichtigsten Gefässpflanzen bietet Abbildung 5.1. Es wird klar, wie viele Arten von Wurzelsystemen und, innerhalb dieser, wie viele unterschiedliche Einzelwurzeln es gibt.



Abb. 5.1 Systematik und Entwicklung der Wurzelsysteme (POLOMSKI und KUHN, 1998)

Die Ausdifferenzierung des Pflanzenkörpers in Sprossachse, Blatt und Wurzel geschah während des Übergangs vom Lebensraum Wasser aufs Land. Hier galt es, Anpassungen an den neuen Lebensraum zu bewältigen. Dabei spielte die Entwicklung der Wurzel eine entscheidende Rolle, um sich an Herausforderungen in folgenden Bereichen erfolgreich einzustellen:

- Wasserhaushalt Aufnahme, Weiterleitung, Speicherung und Abgabe von Wasser
- Ernährung Aufnahme, Weiterleitung, Speicherung und Abgabe von Nährstoffen
- Mechanische Probleme Verankerung, Wachstum, Ausbreitung

Im Gegensatz zum Leben im Medium Wasser können viele lebenswichtige Nährstoffe und Flüssigkeit nur noch aus dem Medium Boden bezogen werden. Diese Aufgabe übernehmen hauptsächlich die Wurzeln unterirdisch und die Blätter oberirdisch, die Stoffe zum Teil aus der Atmosphäre aufnehmen und dorthin wieder abgeben.

Die mechanische Verankerung und Stabilisierung des Pflanzenkörpers fällt ganz in die Aufgabe der Wurzeln. Weiters übernehmen Wurzeln auch Funktionen als Speicherorgan für Reservestoffe und sind Orte für Synthesen .

(LÜTTGE, 2012)

5.2 Entwicklung eines Wurzelsystems

Hier muss deutlich zwischen dem Wurzelsystem der einkeimblättrigen und zweikeimblättrigen Pflanzengruppe unterschieden werden. Bei ersterer stirbt die Primärwurzel in den ersten Jahren ab und wird durch sprossbürtige Wurzeln ersetzt, die sich zu einem fasrigen, aber oft weit verzweigten, intensiven und oft auch tiefreichenden Erschliessungssystem entwickeln. Diese Wurzelsysteme weisen kein sekundäres Dickenwachstum auf. Diese betreffende Entstehungsart wird als sekundäre Homorhizie bezeichnet.

Die Wurzeln der Zweikeimblättrigen haben ein heterogeneres Wurzelsystem, das Primärwurzeln und Sprosswurzeln (Nebenwurzeln) ausbildet und als allorhiz bezeichnet wird. Die Wurzeln nehmen mit zunehmendem Alter an Dicke zu und können nach Verzweigungsgrad in Wurzeln erster, zweiter, dritter (usw.) Ordnung eingeteilt werden.

(POLOMSKI und KUHN, 1998)

WAISEL und ESHEL (2002) weisen darauf hin, dass innerhalb des Wurzelsystems die Aufgabenverteilung und Eigenschaften differenziert sind. Gräser bilden oberflächennahe Wurzeln aus, die relativ gleichförmig in Länge und Durchmesser sind und hohe Zugkräfte aufnehmen können. Die tiefgehenden Wurzeln sind im Erscheinungsbild differenter und halten nicht so hohe Kräfte aus. Dieses Phänomen wird auch bei verholzten Pflanzen in ähnlicher Weise beobachtet. Die Dicke und Länge einer Wurzel hängen wiederum u.a. mit dem Widerstand im Boden zusammen, auf den die Wurzel trifft.

5.3 Primärer und sekundärer Aufbau der Pflanzenwurzel

Junge Wurzeln nehmen erst durch das sekundäre Dickenwachstum an Durchmesser zu, davor zeigen sie den primären Bau. Die Spitze ist das Zentrum der Neubildung von Zellen, das Alter und der Differenzierungsgrad des Gewebes nehmen also zur Wurzelbasis hin zu.

Die Wurzelhaube oder Kalyptra (Abb. 5.2 rechts) befindet sich an der Extremität der Wurzel und umschließt deren Bildungszentrum, den Vegetationspunkt. Dieser besteht aus Meristemgewebe mit undifferenzierten Zellen, die theoretisch unbegrenzt teilungsfähig sind.

Nach dieser Wurzelhaube, die das Längenwachstum vorantreibt, befindet sich die Wurzelhaarzone. Die Wurzelhaare an sich haben nur eine Lebensdauer von einem bis wenigen Tagen. Darauf folgen die Zone der sekundären Endodermis und der Bereich, wo die Seitenwurzeln gebildet werden.

Zum allgemeinen Verständnis werden im Folgenden die Gewebearten in der Wurzel vorgestellt. Anschließend wird auf den zellularen Aufbau im primären und sekundären Zustand eingegangen. Die mikrobielle Zusammensetzung gibt Aufschluss über die verschiedenen biomechanischen Eigenschaften der Pflanzenwurzel. Junge Wurzeln sind biegsamer und aufgrund ihres unterschiedlichen Aufbaues dehnbarer als ältere.



Abb. 5.2 Wurzelanatomie, links Querschnitte durch die Wurzel im Zustand des primären und sekundären Wachstums; rechts Längsschnitt durch die Wurzelspitze und angrenzende Wurzelregionen (Ausschnitt aus EVERT et al., 2009)

Im Grundlagenwerk der Pflanzenanatomie von Ray F. EVERT et al. (2009) wird eine Einführung über den inneren Aufbau des Pflanzengewebes gegeben. Die Pflanzenwurzel ist im Vergleich zum Spross einfach strukturiert. Das Leitgewebe ist im primären Wachstumsstadium ein massiver Zylinder, der leitende Zellen beinhaltet und eine oder mehrere Schichten von nichtleitenden Zellen (Abb. 4.5 und 5.2). Der äußere Abschluss des Leitzylinders wird Perizykel (Abb. 5.2 links unten) genannt; beide Gewebe entstehen aus dem Wurzelapikalmeristem. Von dieser Schicht aus entstehen auch die Seitenwurzeln.

Die weitlumigen Zellen im Zentrum gehören zum Leitgewebe des Xylems, das im primären und sekundären Zustand verholzt sein kann und im reifen Zustand tot ist. Die Verholzung ist ein irreversibler Vorgang. Die kleineren Zellen gehören zum lebenden Leitgewebe des Phloems, in denen der Stofftransport stattfindet. Im innersten des Zylinders liegt das Grundgewebe oder Mark. Die Zellen übernehmen eine Stützfunktion und dienen der mechanischen Festigung.

Im primären Pflanzenkörper bildet die Rhizodermis den äußeren Abschluss als einschichtiges Gewebe. Sie hat keine Stomata oder Cuticula wie die oberirdischen Teile der Pflanze. Unterirdisch bilden sich aus dieser Schicht im Bereich der Wurzelhaarzone die Wurzelhaare aus, die zur Aufnahme von Wasser und Nährstoffen essentiell sind und einen wichtigen Beitrag zur Bildung der Rhizosphere leisten.

Unter der Rhizodermis entsteht aus dem Rindenparenchym - das sind teilungsfähige Zellen im äußeren Bereich der Wurzel – die Exodermis (Abb. 4.5). Auf die Eigenschaften der Wurzelzellen wird folgend eingegangen. Hier ist festzuhalten, dass die Exodermiszellen ohne Interzellulare verbunden sind und Einlagerungen von Suberin vorkommen.

Als Überleitung zum Aufbau der Pflanzenzelle und ihrer molekularen Zusammensetzung ist der casparysche Streifen zu erwähnen (Abb. 5.3), der in den Zellwänden und den interzellularen Mittellamellen der primären Endodermis und in den absorbierenden Zellen der Wurzelhaarzone vorkommt. Er ist eine Wandverdickung, mit Suberin und Lignin imprägniert und dadurch wasserabweisend.



Abb. 5.3 Lage des Casparyschen Streifens, der die Endodermis kennzeichnet, an der transversalen Zellwand (EVERT et al., 2009)

Die primäre Endodermis wird während des sekundären Dickenwachstums bei Blütenpflanzen abgestoßen. Die sekundäre Endodermis zeichnet sich ebenfalls durch Suberineinlagerungen in den Zellwänden aus. Sie ist die Übergangsstufe zur tertiären Endodermis. Hier werden auf die Suberinlamellen Zellulosewände aufgelagert. Die Endodermisschichten regulieren und ermöglichen den Austausch zwischen Zentralzylinder und Rindenzellen. (EVERT et al., 2009)

KUTSCHERA und LICHTENEGGER (2013) erklären die Wichtigkeit der Kenntnisse über den primären Zustand der Wurzel im Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher. So dienen Teile der primären Rinde, die beim sekundären Dickenwachstum oft verlorengehen, der Speicherung von Assimilaten aus den oberirdischen Teilen der jungen Pflanze. Sie werden als Kraftreserve für das weitere Wachstum gelagert. Rasche Vermehrung der Zellen im primären Zustand und das Längenwachstum der Zellen sind Eigenschaften des primären Wachstums. Das Längenwachstum erfolgt auch durch Wassereinlagerungen in den Zellen. Das geotrope Wurzelwachstum findet ebenfalls nur im primären, sehr aktiven Stadium statt. Das vollständig offene und lösliche Zellsystem der Wurzelhaube erobert durch Druck und die Aufnahme von Wasser den Bodenraum.

Das sekundäre Wachstum der Wurzel geht vom Zentralzylinder aus. Rhizodermis und Rinde sterben, wie erwähnt, meist ab. Das sekundäre Abschlussgewebe geht aus dem Perikambium hervor. Dabei schließen sich Phloemzellen über denen des Xylems. Das neu entstandene innere Bildungsgewebe bringt nach innen neues Wasserleitungsgewebe und nach außen Gewebe zur Leitung von Nährstofflösungen hervor.

Die Dickenzunahme erfolgt hauptsächlich im Holzteil der Wurzel. Neue Leitgewebe werden gebildet und sind durch die meist größeren Zellen gut vom Gewebe aus dem primären Wachstum zu unterscheiden. Der innere Bastteil wächst nicht so stark, der breitere holzige Teil ähnelt dem Frühholz der oberirdischen Sprossteile. Verfestigungen der Zellwände der wasserleitenden Gewebe sowie des Rindenparenchyms, die Versteifungen der Endodermis durch den Casparyschen Streifen und das sekundäre Abschlussgewebe, der Periderm, kennzeichnen den anatomischen Zustand des sekundären Dickenwachstums (Abb. 4.6). Bei Holzgewächsen ist auch eine Borke Teil des Wurzelaufbaus. Das Periderm folgt der Rhizodermis nach und besteht aus Korkzellen, die mit Suberin imprägniert sind. Lignin ist im Abschlussgewebe von Laubholzwurzeln nicht festzustellen, die Zellwände bleiben unverdickt. Die Leitelemente des sekundären Phloems haben Cellulosewände. Dieser Teil wird von Sklerenchymzellen, wie Faser- und Steinzellen, geschützt.

(KUTSCHERA und LICHTENEGGER, 2013)

5.4 Die Zellwand als strukturgebender Teil der Pflanzenwurzel

Verschiedene Zelltypen wurden im vorigen Abschnitt in den Entwicklungsstadien des Wurzelwachstums nach EVERT et al. (2009) beschrieben. Die Zellwände können wie angedeutet verschieden aufgebaut und verstärkt sein. Durch den unterschiedlichen Aufbau der Wände lassen sich die Zelltypen voneinander gut unterscheiden.

Die Zellwand bestimmt Form und Größe der Zelle, sie ist dehnbar und unterstützt so das Längenwachstum während des primären Stadiums der Zelle. Im sekundären trägt sie zur Stabilisierung des Gewebes bei, einerseits als Cellulosekomponente der Pflanzenzelle, andererseits durch verstärkend wirkende Einlagerungen.

Im folgenden werden die molekularen Bestandteile der Zellwand (Abb. 5.4) benannt und ihre Eigenschaften beschrieben, um auf die Festigkeit des Zellverbundes schließen zu können.

Cellulosemoleküle sind lang und dünn. Sie bilden eine kristalline Gitterstruktur, die Mikrofibrille genannt wird. Der Durchmesser der Mikrofibrillen ist oft abhängig von ihrem Wassergehalt. Die gitterförmigen Celluloseformationen winden sich wie Fasern in einem Kabel umeinander und bilden die Makrofibrille, die ungefähr 0,5 μm im Durchmesser und 4 - 7 μm der Länge nach misst. EVERT et al. (2009) gibt an, dass durch diese gedrehte Anordnung der Gitterstruktur die hohe Reißfestigkeit der Pflanzenfasern bewirkt wird. Sie ist mit der eines gleichstarken Stahldrahtes (ungefähr 50-160 kg/mm²) zu vergleichen.

Der Anteil des Trockengewichtes von Cellulosemikrofibrillen an der Zellwand bewegt sich zwischen 20-30% in der primären Zellwand und 40-60%, d.i. das Doppelte, in der sekundären, verholzten Zellwand.

Die Zellwand verhält sich durch die kristalline Cellulosestruktur anisotrop, d.h. sie dehnt sich in unterschiedliche Richtungen unterschiedlich stark aus. Diese Eigenschaft ist bei der Verwendung von Holz als Baustoff zu berücksichtigen, ist aber auch bei unterschiedlichen Belastungsrichtungen (z.B. durch Krafteinwirkungen) auf die Pflanzenfaser von großer Bedeutung.



Abb. 5.4 Struktur der pflanzlichen Zellwand (modifiziert nach RAVEN et al., 2000) Pektin ist in geschwungenen Linien dargestellt, die Hemicellulose in geraden, eckigen Linien, die Cellulosefibrillen als Stäbe; 1 nm entspricht 1000 μm

- Nichtcellulosehaltige Matrix

Von den nicht cellulosehaltigen Stoffen dominiert die Hemicellulose in den meisten Zelltypen. Xyloglucane sind deren Hauptkomponente und kommen in Primärwanden der zweikeimblättigen Pflanzen mit einem Trockengewicht von 20-25% vor. In den sekundären Zellwänden der Xylemelemente fehlen sie anscheinend.

Die Pektine sind sehr heterogene, nicht cellulosehaltige Polysaccharide. Sie kommen in den Primärwänden der Zweikeimblättrigen in einem etwas höheren Anteil als die Xyloglucane (30-50% des Trockengewichts) vor. Bei Gräsern und in Sekundärwänden können sie völlig fehlen. Die Pektinbausteine bilden ein Gel, in welches das Cellulose-Hemicellulose-Netzwerk eingebettet ist (Abb. 5.4). Sie wirken hydrophil, ziehen also Wasser an, das dann von der Zelle aufgenommen werden kann und in der Zellwand eingelagert wird. Das Wasser verleiht der Zellwand plastische Dehnbarkeit und reguliert das Streckungswachstum.

Der Ca²⁺-Anteil in den Zellwänden (vor allem in meristimatischen Zellen) nimmt während der Zellstreckung und –differenzierung zu und beendet schließlich das Längenwachstum.

- Strukturproteine nehmen im primären Wachstumsstadium ungefähr 10% des Trockengewichts der Zellwand ein. Über ihre Funktion ist wenig bekannt. Extensine verstärken vermuteterweise die Wände und unterstützen so das mechanische Durchdringen der Abschlussgewebe.
- Lignin dient der Verstärkung von Zellwänden und ist für die Wundreaktion in den Primärwänden von Parenchymzellen wichtig. Lignin ist eine hydrophobe Füllsubstanz, die das Wasser in der Zellwand verdrängt. In der Interzellularsubstanz ist Lignin ein Bindemittel, das dem Holzstamm Druck- und Biegefestigkeit verleiht. Es ist anzunehmen, dass dies bei den unterirdischen dickeren Pflanzenwurzeln ähnlich ist. Auf die Zugfestigkeit hat dieses Binden jedoch keinen Einfluss. Die Verstärkung mit Lignin hindert die wasserführenden longitudinalen Zellen daran zu kollabieren, wenn durch Transpiration in ihnen ein negativer Druck entsteht.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass Lignin auch eine antimikrobielle Funktion hat, den Wassertransport passiv unterstützt und eine mechanische Stützfunktion erfüllt.

- Das im vorigen Abschnitt öfter erwähnte Suberin ist ein wasserunlösliches Lipidpolymer und bildet die Hauptkomponente der Zellwände im sekundären Dickenwachstum im Abschlussgewebe, im Kork und in den endo- und exodermalen Zellen der Wurzeln. Über die zwei Stadien der Zellwände ist abschließend Folgendes festzuhalten.

Die Primärwand lagert sich während des Zellwachstums ab und besitzt lebende Zellen, die sich noch verschieden ausdifferenzieren können. Sie sind wichtig bei der Wundheilung und Regeneration. 70% bestehen aus einem Cellulose-Xyloglucan-Netzwerk. Ungefähr 10 % entfallen auf das Xyloglucan.

Die Orientierung der Cellulosefibrillen ist der Schlüsselfaktor für die Festlegung der mechanischen Eigenschaften der Zellwand und damit des Pflanzenteils.

Sekundärwände stabilisieren vor allem Zellen, die der Festigung von wasserleitendem Gewebe dienen. Der Celluloseanteil ist höher, Pektine, die hydrophile Substanz, fehlt. Daher sind Sekundärwände starrer und nicht so dehnbar. Nach der unterschiedlichen Orientierung der Cellulosefibrillen werden die Zellwände in drei S-Schichten eingeteilt. Sie sind sehr strukturiert, im Gegensatz zur lockeren Anordnung der Mikrofibrillen im primären Wachstumsstadium.

5.5 Molekulare Kraftaufnahme der Cellulosewände in der Wurzel

Die Zellwand ist der ausschlaggebende Teil für den Verbund und die Festigkeit des Pflanzenteils. Durch die verschiedene Orientierung der Cellulosefibrillen, die vor allem in der Zellwand vorkommen, ergeben sich die mechanischen Fähigkeiten dieser pflanzlichen Faserverbundstoffen. Der Aufbau der Zellwand aus Cellulose, Hemicellulose und der umgebenden Matrix wird in der heutigen biomechanischen Wissenschaft den anisotropen Faserverbundstoffen zugeordnet.

Neben den allgemeinen Aussagen zur Zellwand als Gesamtes von EVERT et al. (2009) gibt es von KERSTENS et al. (2001) spezifische Forschungsaussagen über den Zusammenhang zwischen dem Layer einer Zellwand und dessen strukturellem Aufbau aus Cellulosefibrillen. Die Versuche an zwei verschiedenen Arten von Zellwänden, die eine unterschiedliche Orientierung ihrer Celluloseverbindungen aufweisen, ergab, dass die mittlere Orientierung ausschlaggebend für das Festigkeitsverhalten ist (siehe Abb. 3.3 auf Seite 18).

Wenn, wie bei der Zellwand der Zwiebel, die Hauptorientierung sich in Richtung der Faser erstreckt, ergibt sich bei Krafteinwirkungen in Faserrichtung ein viskoelastisches Verhalten mit plastischer Ausdehnung in der Zellwand. Bei einer Krafteinwirkung, die quer, also im rechten Winkel auf die Fasern wirkt, ist die Spannungskurve weitaus geringer, aber gleichförmiger ohne plastische Verformung.

Dass die Orientierung der Cellulosefibrillen dafür verantwortlich ist, wird im Vergleich mit Tests an einer Kalanchoe-Pflanze gezeigt, deren Cellulosefasern in alle Richtungen gleichförmig gelegt sind und wo zwischen den Kraftrichtungen kein Unterschied festgestellt werden kann. (KERSTENS et al., 2001)

GENET et al. (2004) testete den Celluloseanteil und die Zugkraft von Feinwurzeln der Edelkastanie und stellte fest, dass mit der prozentuellen Abnahme der Cellulose auch die maximale Kraft abnimmt, bei der die Wurzel reißt (Abb. 5.5)



Abb. 5.5 Ergebnisse der Zugfestigkeitstests und Bestimmung des Celluloseanteils der Edelkastanie von GENET et al. (2004) bezogen auf den Durchmesser der Wurzelproben

5.6 Zusammenfassung der morphologischen Grundlagen der Wurzel

Die Funktionen der Wurzel allgemein sind grundlegend, sie versorgen und verankern die Pflanze. Bei Betrachtung der einzelnen Wurzel im Wurzelsystem kommt es zur Kenntnis über differenziertere Eigenschaften und Aufgaben.

Wie auf den Seiten 13, 17 und 18 erwähnt, sind Wurzeln nach Lage und Wuchsrichtung im Wurzelsystem einer Pflanzenart verschieden ausdifferenziert.

Nigel CHAFFEY (2002) ruft im Sammelband "Plant Roots – the hidden half" zu weiteren Forschungen am molekularen Aufbau verschiedenartiger Gehölzwurzeln auf, um über Unterschiede zum Spross Aussagen treffen und die Funktionen der verschiedenen Wurzeln genauer beschreiben zu können.

Er präsentiert eine Tabelle, die die Zellen des sekundären Gefäßsystems in der Pfahlwurzel der Rosskastanie (Aesculus hippocastanum) miteinander vergleicht. Die Angaben zur Zellwand, die laut Literatur für die mechanischen Eigenschaften besondere Bedeutung hat, sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Tabelle 5.1

Vergleich der Charakteristika der Zellwand nach Gefäßtypen in der Pfahlwurzel der Rosskastanie (nach CHAFFEY, 2002)

Gewebe/Zelltyp	Zellwand	± lignifiziert
	im Vergleich zu Kambiumzelle	
Phloem		
Geleitzelle	dicker	nein
Siebelement	dicker	nein
Faser	dicker	ја
axiales Parenchym	dicker	nein
Strahlenparenchym	dicker	nein
Kambium		
Strahlinitialen	dünn	nein
Fusiforminitialen	dünn	nein
Xylem		
Faser	dicker	ја
axiales Parenchym	dicker	ја
Leitgewebe	dicker	ја
Strahlenparenchym	dicker	ја

Die Zellwand wird als strukturgebender und festigender Teil der Zelle beschrieben. Ihre Ausformung beeinflusst die biomechanischen Festigkeitseigenschaften der Wurzel. Einerseits spielen dabei der Celluloseanteil sowie die Orientierung der Cellulosefibrillen eine Rolle. Andererseits hat die Lignifizierung der Zelle Bedeutung für die Druck- und Biegefestigkeit des Holzes, so auch anzunehmen für die Wurzel.

Vorbereitungen für das Experiment

Zu den Vorarbeiten des Experiments gehören die Pflanzung und Pflege der Versuchspflanzen, die im Rahmen einer Dissertation an der BOKU Wien (ALVAREZ, unveröff.) durchgeführt wurden. Die Entnahme der Wurzelproben geschah nach Festlegung des Themas für die vorliegende Masterarbeit. Untersuchungen zum verwendeten Bodensubstrat gemeinsam mit Kollegen, die ihre Bachelorarbeit verfassten, begleiteten die ersten Monate der Masterarbeit im Herbst 2013. Ab dem Jahr 2014 arbeitete ich mit den Betreuern an der Entwicklung des Wurzelschergerätes und wir testeten es in ersten Wurzelscherversuchen.

Seit November 2014 führt eine Kollegin vom Institut für Geotechnik (ALVAREZ, unveröff.) ebenfalls Experimente mit Feinwurzeln mit dem Wurzelschergerät durch. Die gewonnen Daten werden gegenseitig ausgetauscht.

Im folgenden gibt es einen Überblick über den chronologischen Ablauf der Masterarbeit.

6.1 Zeitlicher Ablauf

Wachstumszeitraum der Versuchspflanzen

Frühjahr 2012 – Herbst 2013

Der Vegetationszeitraum stellt die Dauer vom Zeitpunkt der Pflanzung bis zur Kappung der oberirdischen Teile der Versuchspflanzen dar.

Die Jungpflanzen von Acer campestre sind 19 Monate in den Pflanzkisten verblieben. Darin sind die Wintermonate 2012/2013 inbegriffen. Es ist von einem Wachstumsstopp von ungefähr 5 Monaten durch niedrige Temperaturen und kurze Tageslängen auszugehen.

Lagerungszeitraum

Winter – Sommer 2014

Zunächst war die Lagerung der Proben im Keller des Labors für Geotechnik unzureichend. Der Verbleib der Wurzeln im Substrat und die regelmäßige Befeuchtung deckten gerade die Mindestanforderungen, um die Wurzeln frisch zu halten. Ein neuer Austrieb konnte nicht beobachtet werden.

Im Februar 2014 konnte dann ein Platz im Kühlraum des Instituts für Waldbau der BOKU Wien organisiert werden und von nun an wurden die Proben hier gelagert.

Hier herrscht eine konstante Raumtemperatur von 4°C mit automatischer Kühlung. Zunächst wurden die gesamte Kiste mit feuchtem Substrat und den darin enthaltenen Wurzeln gelagert und Feuchtigkeit und Temperatur regelmäßig überprüft. Nach der Auswaschung der Wurzeln wurden diese in durchsichtigen Zipp-Beuteln mit etwas Wasser aus der Sprühflasche luftdicht

6

verschlossen und aufbewahrt. Der Zeitraum zwischen der Auswaschung der Wurzelproben und deren Verwendung im Wurzelschergerät betrug 2 bis 30 Tage.

Der lange Lagerungszeitraum muss als Fehlerquelle angesehen werden. Auf Grund der hohen Temperaturen und der vorhergegangenen monatelangen Aufbewahrung im Raum des Geotechniklabors kann ein Abbauprozess begonnen haben. Es wurde auch kein Alkohol als Konservierungsmittel eingesetzt. Das Handbuch zum Umgang mit bewurzelten Bodenproben und der Gewinnung von Wurzelproben aus dem Feld oder aus Versuchsanordnungen im Labor von Wolfgang BÖHM "Methods of Studying Root Systems" (1979) gibt dazu Hinweise und sei hiermit empfohlen.

Versuchszeitraum

Die Experimentserien sind nach den Versuchstagen mit laufender Nummer bezeichnet. Die Serien 1 - 5 wurden von Ende Juni 2014 bis Anfang Juli 2014 durchgeführt.

- Serie 1 wurde am 2. Juli 2014 an der Kraftmessdose mit 12 Proben durchgeführt. Zwei Versuchsabläufe mussten als fehlerhaft eingestuft werden und wurden nicht in die Interpretation aufgenommen. Zweimal wurde die Schnurdehnung gemessen (Schnur fixiert 1 und 2).

Am 10. Juli wurden dieselben Wurzeln im Versuchsaufbau mit Wassergewicht abgeschert. Hier verliefen alle 12 Abläufe störungsfrei.

 Serie 2 beinhaltete 12 Experimente mit verschiedenen Wurzelproben. Am 3. Juli an der Kraftmessdose, hier mussten drei Ergebnisse gestrichen werden und einmal wurde die Schnurdehnung aufgenommen (Schnur fixiert 3).

Am 10. Juli mit Wassergewicht wurden 11 Messungen durchgeführt und zwei gestrichen.

- In Serie 3 wurde die Reibung und einmal die Schnurdehnung (Schnur fixiert 4) am 15. Juli an der Kraftmessdose aufgezeichnet. Fünf Wurzelversuche wurden durchgeführt und alle als störungsfrei in die Analyse mit aufgenommen. Auch beim Versuchsaufbau mit Wassergewicht musste kein Ergebnis gestrichen werden.
- Die Serie 4 wurde am Nachmittag des 15. Juli durchgeführt. Es wurden wiederum fünf Wurzelversuche an der Kraftmessdose vorgenommen, zwei Messergebnisse wurden gestrichen. Bei der Abscherung der Wurzeln mit Wassergewicht wurden sechs Versuche durchgeführt und zwei davon als fehlerhaft angesehen.
- Serie 5 beinhaltete 22 Experimente am 16. Juli an der Kraftmessdose. Vier Versuche verliefen fehlerhaft. Am Ende der Versuchsreihe wurde wieder eine Schnurdehnung aufgenommen (Schnur fixiert 5).

Am 23. Juli wurden dieselben 22 Wurzeln mit Wassergewicht abgeschert, 16 Versuche verliefen erfolgreich und störungsfrei.

- Weitere Versuche mit Wurzeln aus der zweiten Vegetationsperiode:

Weitere Messungen wurden im November und Dezember 2014 von DI Sandra ALVAREZ für eine andere Forschungsarbeit (siehe ALVAREZ, unveröff.) durchgeführt. Sie arbeitete nach Anleitung aus dieser Masterarbeit. Das Wurzelmaterial war jedoch aus der zweiten Vegetationsperiode und frischer als das zuvor verwendete.

Der Zeitraum zwischen Transport vom Versuchsgarten in Essling/Wien und Verwendung der Wurzeln war kürzer. Die Wurzeln wurden erst einige Tage vor den Versuchen aus dem Substrat entnommen und sofort in einem Kühlraum gelagert.

Die Durchmesser der abgescherten Wurzeln betrugen 0,75 mm bis 2,50 mm. Es wurden 30 Messergebnisse mit in die vorliegende Arbeit aufgenommen. Sie dienen dem Vergleich mit den eigenen Messungen und als Hilfe zur Interpretation der Daten.

Die beschriebene Chronologie bietet einen Überblick, im Folgenden werden die Gewinnung und der Umgang mit den Wurzelproben detailliert besprochen, Hinweise zur Verbesserung gegeben und die Entwicklung des Versuchsgerät beschrieben.

6.2 Probengewinnung

Die verwendeten Wurzeln stammen von Feldahornsetzlingen, die von Gärtnern des Instituts für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau gepflanzt und gepflegt wurden. Im Frühjahr 2013 wurde vom Institut für Geotechnik im Versuchsgarten Essling der BOKU Wien ein Kistenversuch für Scherversuche mit bewurzeltem Boden angelegt. Der Aufbau beinhaltete je fünf Kisten, die übereinander gestapelt, mit Substrat verfüllt und mit vorhandenen Feldahornsetzlingen bepflanzt wurden. Ein Ziel des Versuchs war den Einfluss unterschiedlicher Durchwurzelung der verschiedenen Kisten in Rahmenscherversuchen zu vergleichen (ALVAREZ, unveröff.).

Nach einer Vegetationsperiode (Mai - Oktober 2013) wurde der Versuch abgebaut und ins Labor am Institut für Geotechnik auf der Türkenschanze transportiert. Die Kisten wurden getrennt und einzeln mit Böden versehen, damit das durchwurzelte Substrat weitgehend ungestört blieb. Geschützt vor direktem Sonnenlicht und unter regelmässiger Feuchtigkeitszugabe wurden die Kisten mit Substrat und Wurzeln gelagert.

Im April 2014 wurden weitere Kisten aus Essling ins Labor gebracht und auf dieselbe Weise behandelt.

Die Wurzeln für diese Forschungsarbeit stammen ungefähr aus gleichen Teilen aus einer Kiste des ersten Abbaus und einer des zweiten. In beiden Fällen aus den obersten Kisten, also Kisten, die den oberflächennahen Bereich (0 – 20 cm) eines durchwurzelten Bodens enthielten.

Das geschüttete Subtrat lässt sich allerdings nur bedingt mit gewachsenem Boden vergleichen. Demnach sind auch Durchwurzelungsdichte und Form der Durchwurzelung nicht gleich mit jenen in einem natürlichen Boden.

Für unsere Arbeit spielt dies keine Rolle, da wir die einzelnen Wurzeln untersuchen. Es sei aber darauf verwiesen, dass die Art und Stärke der Durchwurzelung des Bodens wesentlich sind für die Gewinnung von Erkenntnissen zur Hang- oder Ufersicherung ist.

- Entnahme der Wurzeln aus dem Substrat

Im Versuchslabor des Instituts für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau an der BOKU wurde der Wurzelstock des Feldahorns vorsichtig aus dem lockeren, abgetrockneten Substrat herausgezogen (Abb. 6.1).

Dickere Wurzeln wurden von dünneren getrennt, bei jeder Wurzelgabelung wurde ein Schnitt gesetzt. Es wurde darauf geachtet, möglichst lange Probenstücke mit unterschiedlichen Durchmessern zu gewinnen.

Die Länge der Wurzeln ist ein wichtiges Kriterium bei der Auswahl, da zu kurze Wurzeln nicht in das Gerät eingespannt werden können. (Abb. 6.3)



Abb. 6.1 links Wurzelstock des Feldahorns, von dem viele der Wurzelproben abgetrennt wurden, nach Entnahme aus der Pflanzkiste (BOKU, 2014) Abb. 6.2 rechts Wurzelprobe des Feldahorns in Wasser, um das Substrat abzuwaschen (BOKU, 2014) Da bei der Entnahme viel Erdmaterial an den Wurzeln klebt, wurden diese in Wasser gelegt, damit sich das Gefüge auflöste und von der Wurzel wusch. Es wurde mit den Händen und durch leichtes Schwenken im Wasser vorsichtig nachgeholfen, die Wurzel sollte aber nicht verletzt oder umgebogen werden (Abb. 6.2). Im trockenen Zustand konnte auch ein feiner Pinsel bei der Entfernung von Erdsubstrat helfen.



Abb. 6.3 Nach dem Wasserbad wird die Wurzel auf eine saugfähige Unterlage (zB. Küchenrolle oder Handtrockentücher) gelegt (BOKU, 2014)

Die feinen Wurzelhaare verblieben bis zum Experiment am Gerät an der Wurzel. Der angewandte Vorgang kann als Auswaschungsmethode bezeichnet werden.

Das schon zuvor angesprochene Handbuch von BÖHM (1979) bietet eine Anleitung für verschiedene Sieb- und Waschmethoden zur Gewinnung der einzelnen Wurzeln aus dem Substrat. Trockenes Sieben der noch mit Bodenmaterial verbundenen Wurzeln wird für Durchmesser über 2 mm empfohlen. Die Sieblochgröße kann von 2 - 5 mm reichen. Für dünnere Wurzeln ist die Auswaschung mit Wasser durch feine Siebe beschrieben. Die Sieblochgröße von 0,5 mm wird als üblich beschrieben.

Da es für das Ziel der Arbeit nicht wichtig war, alle Wurzeln des Feldahorns aus dem Boden zu gewinnen, war die hier verwendete händische Auswaschung ausreichend.

6.3 Gerätentwicklung, Testphase und Anpassungen

Da in der Entwicklungsphase des Wurzelschergeräts immer wieder Anpassungen vorgenommen wurden, werden hier die wichtigsten konstruktiven Überlegungen und die Gründe für Änderungen kurz dargestellt.

✓ Bohrungen

Nach Überlegungen zur sinnvollen Dimensionierung des Wurzelschergeräts und dem Einkauf der Aluminiumplatten wurden zunächst die Bohrungen für das Einspannen der Feinwurzeln und Sicherungsbohrungen gegen Verrutschen mit einer Standbohrmaschine getätigt.

Die acht Bohrlöcher betrugen über den Bereich der Durchmesser für Feinwurzeln hinaus die Größen von 1,5 mm bis 5,0 mm in Abständen von 0,5 mm (Abb. 6.4).



Abb.6.4 Bohrlöcher des Wurzelschergeräts, nummeriert und nach Durchmesser beschriftet (BOKU, 2014)

Nach oben sollten zunächst keine Grenzen gesetzt werden. Es stellte sich jedoch schnell heraus, dass bei größeren Durchmessern für das Erreichen der notwendigen Scherkraft und gegen ein Aushebeln der oberen Platte mit zusätzlichen Gewichten gearbeitet werden muss.

Die Bohrungen wurden mit einem feinen Schleifpapier von Kanten befreit, um die Gefahr eines Abschneidens der Wurzeln an diesen Stellen zu entschärfen. Das Abscheren soll in der Scherfuge zwischen den Platten erfolgen.

✓ Auflasten mit zusätzlichen Gewichten

Um die bewegliche obere Platte gegen ein Aushebeln zu sichern, war es anzuraten, sie vorne und hinten mit mit zusätzlichen Gewichten zu beschweren. Diese Gewichte mussten nicht in der Berechnung der wirkenden Kräfte berücksichtigt werden, da diese Normalkräfte keinen Einfluss auf die Wurzel direkt nehmen. Sie hielten die Platte in Position, womit die Größe des Spalts als Scherzone ebenfalls gesichert wurde. Damit war das Hineinziehen der Wurzel in den Spalt weitgehend verhindert (Abb.6.5).

✓ Kübelgröße und Gewichte als Startkraft

Die Kübel für die Versuche bildeten zunächst ein Gleichgewicht und einer diente im Lauf des Versuchs als Wassersammelbehälter. Kübel mit 10 Liter oder 20 Liter Volumen (Abb. 6.6 und 6.7) konnten in der gegebenen Ausführung des Geräts problemlos angehängt werden. Wenn die für

den Bruch der Wurzel benötigten Kräfte dieses Volumen überstiegen, konnten Gewichte zu Beginn des Versuchs, wenn die Wurzel noch unverletzt war, zu Hilfe genommen werden, um die Kraft zu erhöhen. Das Gewicht dieser Körper und des Wassers waren zu addieren.

✓ Reibungsfreiheit

Anschließend wurden die Führungs- und Umlenkrollen installiert. Die Zentrierung auf der Längsmittellinie spielt für eine möglichst genaue Krafteinwirkung auf die Wurzel eine entscheidende Rolle.

Die Nadeln wurden nach ersten Messversuchen ausgetauscht. Die anfangs verwendeten Stecknadeln wurden durch dünnere Insektennadeln ersetzt. Damit verringerte sich die Spalthöhe auf 0,25 mm – die Reibungsfreiheit war gegeben (Abb. 8.9 auf Seite 64 und Abb. 9.1 auf Seite 68).

✓ Nylonschnur und Dehnung

Die Anforderungen an die Verbindung zwischen beweglicher Aluminiumplatte und dem Wasserkübel (Abb. 6.5) bzw. der Kraftmessdose waren eine bestimmte Reißfestigkeit, um große Kräfte halten zu können, möglichst wenig Elastizität, um das Ergebnis nicht zu verfälschen, und keine Federwirkung, um vor der Krafteinwirkung des Wassergewichts die Wurzel nicht zu verletzen.

Es wurden auch Versuche mit anderen Materialien, wie dünnen Stahlseilen, durchgeführt, die aber wegen der Federung verworfen wurden.

Die Dehnungskurven der Schnur an der Kraftmessdose mit fixierter Platte sind in Abbildung 6.8 auf Seite 48 zu sehen. Das Dehnungsverhalten gewährleistet eine stetige Kraftsteigerung ohne ruckartige Zunahme.







Abb. 6.5 links: Schnurdehnung während der Kraftmessung im Aufbau mit 20L-Kübel und Gewicht Abb. 6.6 Mitte: 10L-Kübel Abb. 6.7 rechts: 20L-Kübel (BOKU, 2014)



Abb. 6.8 Dehnung der Schnur in Abhängigkeit von der Kraft. Das Dehnungsverhalten und Zuziehen der Knoten bei fixierter Scherplatte wurde beobachtet. Vier Messungen wurden an der Kraftmessdose zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Versuchsserien durchgeführt. Bei Erreichen einer konstanten Steigung der Kurve wurde die Messung manuell beendet. Diagramme der Software TestXpert(R) II Version 3.1, Institut für Physik und Materialwissenschaft (BOKU, 2014)

7 Das Wurzelschergerät

Das im Zuge dieser Masterarbeit entwickelte Wurzelschergerät ist mobil, einfach in Aufbau und Funktionsweise und von einer Person bedienbar. Im Folgenden werden die Bestandteile des Geräts, der Aufbau und die zur Versuchsdurchführung notwendigen weiteren Materialien beschrieben, anschließend ist eine Checkliste für die Anwendung zu finden. Weiters werden die Arbeitschritte während des Versuchsablaufes beschrieben.



Abb. 7.1 Skizzen zum Versuchsaufbau des Wurzelschergeräts und Details zum Einklemmen der Wurzelprobe (5) (BOKU, 2014)

1 Die Hauptbestandteile sind zwei Aluminiumplatten mit gleicher Stärke (15 mm), aber unterschiedlichen Abmessungen (unten 400 x 250 mm; oben 250 x 150 mm). Die Wurzelproben werden von oben nach unten durch Bohrungen in der Mittelachse in Längsrichtung (siehe Punkt 5 in diesem Kapitel Seite 51) eingespannt.

Die acht Bohrungen haben Durchmesser von 1,5 / 2,0 / 2,5 / 3,0 / 3,5 / 4,0 / 4,5 und 5,0 mm. Zwischen den zwei Platten werden dünne Nadeln zum möglichst reibungsfreien Gleiten gelagert. Um ein seitliches Verrutschen zu verhindern, wird die obere Platte zwischen seitlichen Kugellagern über die untere geführt. Eine zusätzliche Bohrung am Rand der oberen Platten ist für eine Sicherungsschraube vorgesehen, um ungewollte Bewegungen und das Auseinanderklappen der Platten beim Transport zu verhindern. Diese Schraube ist auch wichtig, um in Ruhe und ohne Gefahr einer vorzeitigen Krafteinwirkung auf die Probe die Wurzel einspannen zu können. Diese Sicherung wird erst kurz vor Versuchsbeginn gelöst und zwischen den Versuchen wieder eingesetzt.

2 Das Gerät muss sicher mit einem stabilen Untergrund verbunden sein, da sonst die Gefahr des Kippens oder Herunterfallens besteht.

In diesem Fall wurde das Gerät auf Holzbalken auf einem Tisch gelagert. Die Erhöhung verschafft Zugang unter die Platten, um hier die Wurzel zu fixieren und zu lösen. Das Gerät muss weit genug von allen möglichen Reibungsquellen aufgebaut werden. Ein Streifen oder Hängenbleiben der Teile kann die Messergebnisse verfälschen. Die Holzbalken stehen etwas über die Tischplatte hervor. Damit kann das Gerät mit dem stabilen Tisch verbunden werden und steht doch frei.

Eine einfache Möglichkeit ist die Verwendung von Tischlerzwingen, die einen raschen Auf- und Abbau ermöglichen und vielseitig einsetzbar sind. Es ist darauf zu achten, dass das Gerät gut fixiert ist, da einseitig große Kräfte auftreten können.

3 Die Krafteinwirkung bei der Wassermethode mit Kübel erfolgt entlang der Mittelachse in Längsrichtung der Platten.

Haken führen beidseitig die Mittellinie, auf der sich die Bohrlöcher für die Wurzelprobe befinden, fort, wo die hier verwendete Nylonschnur mittels Schlaufe befestigt wird. Die beiden Schnüre werden am Ende der unteren Platte über Kugellager möglichst reibungsfrei nach unten umgelenkt, wo in die Schlaufen wiederum Haken eingehängt sind, an denen zwei gleiche Wasserkübel hängen. Durch den symmetrischen Aufbau ist das Gleichgewicht zu Beginn des Experiments gewährleistet.

In Richtung der Plattenbewegung ist unbedingt ein Stopper anzubringen, um ein Überfahren der Umlenkrolle und ein Aushebeln der beweglichen Platte zu verhindern. In diesem Fall wurde hierfür eine Tischlerzwinge neben der Umlenkrolle angebracht. Gleichzeitig dient der Stopper als akustisches Meldesignal für das Abreißen der Wurzel. 4 Für die Versuchsanordnung ist eine Wasserquelle mit Schlauchanschluss notwendig.

Das Wasser muss von oben in einen der Kübel fließen, um einen stetigen Strom zu gewährleisten. Der Durchfluss bestimmt die Krafteinwirkung pro Zeiteinheit. Wir verwenden einen gewöhnlichen Gartenschlauch, der mit einem Ventil (auf oder zu) und einem feinen Regelventil zur genauen Einstellung des Durchflusses (mehr bzw. weniger) ausgestattet ist. Der Gartenschlauch wird dann auf einen dünnen Schlauch verjüngt, damit das Wasser regelmäßig, ohne Schwappen und Tropfen in den Kübel fließt und somit eine stetige Kraftzunahme gesichert ist.

Da das Wasser während der Versuchsdurchführung immer fließt, ist auf den Abfluss zu achten, wenn der Schlauch nicht im Kübel hängt. Wir haben im geschlossenen Raum zusätzliche Kübel zum Auffangen aufgestellt und zwischen den Versuchen entleert. Nach jedem Ab- und Aufdrehen der Wasserzufuhr muss der Durchfluss justiert werden.

Zu Beginn ist abzuwarten, bis Luftansammlungen in den Schläuchen ausgespült wurden. Dies erkennt man am ruhigen, stetigen Fließen des Wassers.

5 Hier wird schematisch gezeigt, wie die Wurzel durch die Bohrlöcher in den Platten geführt wurde. Damit sie nicht herausrutscht, sondern leicht gespannt in Position gehalten wird, wird sie oberhalb und unterhalb der Aluminiumplatten mit Klemmvorrichtungen fixiert.

Bewährt haben sich 1 - 2 cm hohe Aluminiumplatten mit jeweils zwei Schrauben, zwischen denen die Wurzel eingeklemmt wird. Durch das behutsame Spannen der Wurzel und Feststellen der Schrauben wird das Gewebe der Wurzel gequetscht, aber die Scherebene fixiert und ein Nachrutschen der Wurzel bis zu diesem Zeitpunkt bestmöglich unterbunden. So kann die Wurzel gerade bleiben. Die Klemmvorrichtung ist für alle Durchmesser geeignet.

6 Für die Versuchsdurchführung werden zusätzlich ein Schraubenzieher für die Klemmvorrichtungen, eine Waage zur Bestimmung des Wassergewichtes, eine Stoppuhr zur Zeitnahme, ein Messkolben mit mind. 1L Volumen zur Durchflussbestimmung, Frischhaltebeutel für die Wurzeln und Klebestreifen für deren Sicherung nach dem Abreißen sowie ein wasserfester Stift zur Beschriftung benötigt.

Checkliste

Für die gesamte Versuchsdurchführung werden folgende Einzelteile benötigt:

- ✓ Aluminiumplatte (400 x 250 x 15 mm) mit Lagerungsrollen und Umlenkrollen
- ✓ Aluminiumplatte (250 x 150 x 15 mm) mit Haken in der Mittelachse in Längsrichtung und deckungsgleichen Bohrungen durch beide Platten in der Mittelachse sowie seitlich einer Bohrung für die Sicherungsschraube
- ✓ mind. vier Insektennadeln aus dem Entomologiebedarf (Durchmesser 0,25 mm) ohne Kopf
- ✓ Zwei Klemmvorrichtungen für die Sicherung der Position der Versuchswurzel
- ✓ Schraubenzieher für die Handhabung der Klemmvorrichtungen
- ✓ Gewichte zur Verhinderung eines Aufhebens der oberen Platte
- ✓ Feinwurzelproben (frisch oder k
 ühl und feucht gelagert), frei von Substratresten und Seitenwurzeln
- ✓ Messer oder Schere zum Abtrennen der Seitenwurzeln
- ✓ Klebeband zur Sicherung der abgescherten Wurzelteile
- ✓ Wasserfester Stift zur Beschriftung der Proben bzw. Beutel
- ✓ Eventuell Zipp-Frischhaltebeutel zur Aufbewahrung der Wurzeln vor, während und nach dem Experiment
- ✓ Sprühflasche mit Wasser zum Feuchthalten der Wurzeln
- ✓ Material zum Aufbocken des Geräts, z.B. zwei Holzbalken und Ausgleichplatten zur waagrechten Lagerung auf einem Tisch
- ✓ Wasserwaage zur Überprüfung der waagrechten Lagerung
- ✓ Vier große Tischlerzwingen zur sicheren Verbindung des Geräts und der Holzbalken mit einem stabilen Untergrund
- ✓ Eine kleine Tischlerzwinge als Stopper
- ✓ Zwei Nylonschnüre (Länge jeweils ca. 30 cm) mit Schlaufen
- ✓ Zwei Haken zum leichten Ein- und Aushängen der Kübel
- ✓ Zwei gleiche Kübel mit 10L oder 20 L Volumen und geringem Eigengewicht
- ✓ Schlauch (Durchmesser 13 mm (1/2")) mit Hahnanschluss, Ventil, Regulativ und Verjüngung auf einen dünneren Schlauch (Durchmesser 4,6 mm (3/16"))
- ✓ Eventuell Gewichte, die in den Wasserkübel gelegt werden, um die benötigte Wassermenge zu verringern. Deren Masse muss bestimmt werden.
- ✓ Messkolben mit mind. 1L Volumen
- ✓ Stoppuhr (Genauigkeit 0,01s)
- ✓ Elektronische Waage mit sinnvollem Höchstgewicht (hier 5200 g) und Genauigkeit (hier 0,01g) (Abb. 7.2.)
- ✓ Notizblock zur Schriftführung
- ✓ Fotoapparat zur Dokumentation



Abb. 7.2 Verwendete Waage SARTORIUS Modell GPA5202 mit einem Maximalgewicht von 5200g und einer Messgenauigkeit von 0,01g (BOKU, 2014)

Nach dieser Darstellung der benötigten Teile und der Beschreibung des Geräteaufbaus werden die wichtigsten Grundsätze für einen sicheren Versuchsaufbau und die grundlegenden Punkte bei der Messung der Scherkraft mittels dem Gewicht von Wasser zusammengefasst. Anschließend werden die Durchführung eines Experiments im Detail beschrieben und die dazugehörigen Berechnungen erklärt.

7.1 Grundsätze des Geräteaufbaus

- Das Gerät ist mobil, einfach in Teile zerlegbar, kostengünstig und ohne besondere Gerätschaften zu bedienen. Es kann von einer Person auf- und abgebaut werden.
- Die Bewegung der oberen über die untere Platte muss möglichst reibungsfrei sein.
 Die geringe Reibung wurde in mehreren elektronisch dokumentierten Durchläufen mit Kraftmessdose nachgewiesen (Abb. 9.1 Seite 68).

Um den reibungsfreien Ablauf zu sichern, ist auf verschiedene Details zu achten:

- Positionierung eines Nadelpaares am vorderen Ende (Pfeil 1 in Abb. 7.3), da hier die Kraft die Platte etwas nach unten zieht und die Gefahr des Schleifens besteht. Dies ist beabsichtigt, um dem Aushebeln der oberen Platte vorzubeugen.
- ✓ Positionierung der Nadeln mit Abstand zu den seitlichen F
 ührungsrollen, um ein Verhaken zu verhindern (Pfeil 1 in Abb. 7.3).
- ✓ Überprüfung der Schnurführung in der Umlenkrolle (Pfeil 2 in Abb. 7.3).
- ✓ Überprüfung des Freihängens der Kübel und genug Schwankungsfreiraum um den Kübel (Pfeil 3 in Abb. 7.3).



Abb. 7.3 Hinweise auf die zu Beginn zu überprüfenden Details für einen störungsfreien Versuch (BOKU, 2014)

- Der waagrechte, ausbalancierte und feste Aufbau des Geräts muss gesichert sein (Pfeil 4 in Abb. 7.3).
- Ein Wasseranschluss muss in Reichweite des Schlauches sein und der Zufluss in den Kübel muss von oben erfolgen (Pfeil 5 in Abb. 7.3).
- Die bewegliche, obere Platte darf nicht durch zu hohe Gewichte aus der Führung gehebelt werden. Sie ist zusätzlich zu beschweren.
- Der Versuchsaufbau muss so erfolgen, dass die Entsicherung der Platten, das Hineinlegen und Herausnehmen des Schlauches in den und aus dem Kübel sowie die Zeitnahme von einer Person sicher und ohne Verzögerungen durchführbar ist, um genaue Messergebnisse zu gewährleisten.

7.2 Grundsätze des Versuchsaufbaus für die Messung der Scherkraft mittels Wassergewicht

- Die Methode basiert auf physikalischen Grundgesetzen.
- Die Funktionsweise ist leicht verständlich und nachvollziehbar.
- Die weiteren Berechnungen der gewünschten Daten aus den Messwerten basieren auf mathematischen Grundkenntnissen und einfacher Mechanik.
- Die Messungen können von einer Person durchgeführt werden.
- Störungen im Messverlauf können durch genaue Beobachtung erkannt werden.
- Der Versuchsaufbau ist orts- und zeitungebunden. Beschränkt wird dies nur durch die Notwendigkeit einer Wasserquelle mit Schlauchanschluss. Der Abfluss für das verwendete Wasser und die Möglichkeit eines waagrechten und sicheren Aufbaus des Wurzelschergeräts müssen gewährleistet sein. Bei Verwendung einer elektronischen Waage ist eine Stromquelle ebenfalls notwendig.

7.3 Störungsquellen während der Messung von Scherkräften mit dem Wurzelschergerät

Trotz des einfachen Aufbaus und der leicht bedienbaren Handhabung des Wurzelschergeräts, gibt es Faktoren, die im Geräteaufbau begründet und bei der Interpretation der Messergebnisse zu berücksichtigen sind. Künftige Verbesserungen durch weitere Anpassungen werden anzustreben sein.

Die folgenden Hinweise sollen die sichtbar gewordenen Schwierigkeiten aufzeigen.

Die Störungsfaktoren betreffen vor allem die Möglichkeit der Umlegung der Wurzel aus der aufrechten Position, wodurch die Ergebnisse zu den Scherkräften, die die Feinwurzeln des Feldahorns aushalten, problematisch würden. Dem gilt es durch Achtsamkeit entgegen zu wirken.





Abb. 7.4 Hinweise auf mögliche Störfaktoren, die durch den Geräteaufbau bedingt sind (BOKU, 2014)

- 1 Dehnung der verwendeten Nylonschnur
- 5 Aushebeln der beweglichen Platte
- 2 Schraubklemmen für die Wurzelproben
- 3 Spaltgröße, die durch die Dicke der

Insektennadeln (d=0,25 mm) definiert ist

- 4 Gerade Bohrlöcher für organische Wurzeln
- Die verwendete Nylonschnur, die die bewegliche Platte mit dem K
 übel verbindet, ist dehnbar. Diese Dehnung nimmt keinen direkten Einfluss auf die Scherbelastung der Wurzel (siehe Pfeil 1 in Abb. 7.4).

Ihre Eigenschaften, wie die Länge der Schnur, ihre Längenänderung (Dehnung), das Material und seine mechanischen Kennwerte sowie die Stärke der Schnur spielen eine untergeordnete Rolle. Die Kenntnisse über diese Werte können bei zukünftigen Versuchsreihen jedoch zur Genauigkeit der Ergebnisse und einem besseren Verständnis der Kraftmessung beitragen.

In mehreren Messungen an der elektronisch gesteuerten Kraftmessdose wurde die Dehnung der Schnur aufgezeichnet, während die Platten mit der Sicherungsschraube unbeweglich gehalten wurden. Durch einen Vergleich der Graphen der Dehnungsmessung und verschiedener Wurzelproben kann versucht werden, den Einfluss der Schnurdehnung abzuschätzen.

Der Haken und der Kübelgriff dehnen sich ebenfalls durch die einwirkende Kraft des Wassergewichts. Diese Faktoren werden im Rahmen dieser Masterarbeit nicht weiter behandelt. Um die Wurzel vor Verrutschen zu sichern, wird sie mit Schraubklemmen fixiert. Dazu wird die Wurzel durch das passende Bohrloch in den Platten geführt und zunächst oben, dann unten mit den Klemmen festgemacht. Dabei liegen die Klemmen nicht ganz auf den Platten des Schergeräts auf und geben so einen Spielraum in dem sich die Wurzel bewegen kann. Dieses Verrutschen trägt dazu bei, dass die Ergebnisse von verschiedenen Feldahornwurzeln mit ähnlichen Durchmessern voneinander abweichen können. (siehe Pfeil 2 in Abb. 7.4).

Der Spalt zwischen den Aluminiumplatten soll so klein wie möglich sein. Die verwendeten Insektennadeln mit einem Durchmesser von 0,25 mm entsprechen diesem Ziel im Rahmen der Masterarbeit (siehe Pfeil 3 in Abb. 7.4).
 Es ist aber darauf hinzuweisen, dass sich Wurzeln mit Durchmessern unter 1 mm immer wieder durch Ablösung der Rhizodermis doch in den Spalt gezogen haben und somit gezogen und nicht geschert wurden. In einem solchen Fall wird die Wurzelfaser in

Längsrichtung und nicht in Querrichtung belastet.

Deswegen ist die abgerissene Wurzel nach jedem Versuch genau visuell zu betrachten, um umgebogene Wurzeln als Fehlversuch zu erkennen und das Ergebnis zu verwerfen.

Abhilfe bringt hier vor allem der behutsame und genaue Einsatz der Klemmvorrichtungen.

- Die Bohrlöcher sind gerade und sind für die organische Form der Wurzeln nur bedingt geeignet. Die Wurzel ist dadurch immer fähig sich zu drehen oder ein wenig umzubiegen. Dadurch wirkt die aufgebrachte Scherkraft verschiedenartig auf das Innere der Feldahornwurzel (siehe Pfeil 4 in Abb. 7.4).
- Bei allen Versuchen besteht die Gefahr, dass die obere Platte zu wenig Gewicht hat und sich aus der Führung hebelt (siehe Pfeil 5 in Abb. 7.4).
 Dann belastet das Gewicht der Platte die Wurzel direkt und der Versuch ist abzubrechen. Die Reibungsfreiheit ist ebenso in diesem Fall nicht mehr gegeben.
 Es ist anzuraten, bei allen Versuchen die Platte mit Gewichten zu beschweren. Vorne und hinten können Gewichte auf die bewegliche Platte gestellt werden, ohne auf das Messergebnis einzuwirken. Die Spalthöhe, und damit die Konstanz der Scherzone, wird dadurch gesichert.

All diese Faktoren, außer dem Kippen der Platte, spielen eine größere Rolle bei kleinen Durchmessern bis zu 1 mm und werden mit zunehmender Stärke der Wurzel unbedeutender.

Dokumentation eines Experiments



Abb. 8.1 Aufbau des Geräts und Bereitstellung der benötigten Werkzeuge und Wurzelproben (BOKU, 2014)



Abb. 8.2 Aufbau für das Wassermessverfahren im Techniklabor des Institutes für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau (BOKU, 2014)





Abb. 8.3 und 8.4 Aufbau des Geräts an der Kraftmessdose am Institut für Physik und Materialwissenschaft (BOKU, 2014)

Die Umlenkrollen mussten für den waagrechten Aufbau und die Führung der Schnur nach oben ummontiert werden (links).

Holzbalken und Metallteile stützen das Wurzelschergerät und machen die untere Klemme für die Montage zugänglich (oben).

Es wird ein kraftgesteuerter Versuch mit einer Kraftzunahme von 0,1 kN/sec gestartet.

Technische Daten des Laborequipments: Spindelprüfmaschine des Herstellers: Zwick/Roell Type: 1445 Software: TestXpert(R) II Version 3.1 Kraftmessdose Typ: KAP-Z Hersteller: A.S.T. Herstellernummer: 98-2354 500 N Nennlast


Für die bestimmte Kraftzunahme von 0,1 kN/sec wird der Zufluss so reguliert, dass sich der Messkolben mit einem Volumen von 1000 ml in 100 sec füllt (Abb. 8.5)

Anschließend wird der Zufluss, der während der gesamten Versuchsreihe stetig läuft, in einen Auffangbehälter geleitet.

Im Bild sieht man die frei hängenden weißen Kübel, die ein anfängliches Gleichgewicht und eine Grundspannung aufbringen. Der grüne Kübel dient als Auffang vor und zwischen den Versuchen.

Für Wurzeln ab 2 mm Durchmesser werden Kübel mit einem Fassungsvermögen von 20 L gewählt. Die Wassermenge wird jedoch in den im Bild gezeigten Kübeln gewogen ($m_{Kübel} = 412$ g)

Abb. 8.5 Bestimmung des Durchflusses mit Messkolben und Stoppuhr für die Kraftmessung mit Wassergewicht (BOKU, 2014). Der Durchfluss soll immer wieder überprüft werden, das Wasser fließt weiter bis zur Beendigung der Experimente dieses Versuchstages. Auf die Möglichkeit des Wasserabflusses ist zu achten.



Eine Wurzel, die lang genug ist (Abb. 8.6), wird ausgewählt, von Seitenwurzeln vorsichtig befreit und durch das kleinstmögliche Bohrloch geführt.

Es wird versucht eine jeweils ähnliche Anzahl von Feldahornwurzeln mit ähnlichen Durchmessern auszuwählen.

Umbiegen, Quetschen, Drücken und andere Beanspruchungen sind so weit wie möglich zu vermeiden, um vorzeitigen Schäden an der Wurzel vorzubeugen.

Abb. 8.6 Auswahl einer Wurzelprobe anhand ihrer Länge und ihres Durchmessers. Die Seitenwurzeln werden vor dem Einbau in das Wurzelschergerät entfernt (BOKU, 2014)



Die Platten werden gegen ein Verrutschen und zum leichteren Einfädeln der Wurzelprobe mit der Feststellschraube gesichert (siehe Pfeil 1 in Abb. 8.8).

Zuerst wird die Klemme oben angebracht und gleichmäßig zugeschraubt, dann die Wurzel vorsichtig gerade gerichtet und von unten mit der zweiten Klemme so gut wie möglich in dieser Position fixiert.

Zur Beschwerung der beweglichen Platte werden Gewichte aufgelagert.

Dies verhindert, dass sich der Scherspalt (Scherzone) vergrößert und die Wurzeln sich umlegen können.

Die Masse der Gewichte hat durch die Lagerung auf Rollen keine Wirkung auf die Kraftmessung.

Abb. 8.7 In das Wurzelschergerät wird die Feinwurzel des Feldahorns mit Klemmen eingebaut. Die Wurzelprobe soll gerade und leicht gespannt sein. Nähere Hinweise im Text neben dem Bild. (BOKU, 2014)



Abb. 8.8 Start des Messvorgangs (BOKU, 2014)

Notwendige Vorbereitungen:

- Feststellschraube sichert die Platten (Pfeil 1)
- Wurzelprobe ist in Klemmen fixiert (Pfeil 2)
- Geräte zur Zeitnahme (Pfeil 3) und zur Gewichtsmessung (Pfeil 4) sind in Betrieb, ein Notizbuch liegt bereit
- Schnüre über Umlenkrollen führen (Pfeil 5)

Schritte zum Messbeginn

- GLEICHZEITIG Feststellschraube entfernen, den Schlauch mit laufendem Wasser in Messkübel hängen sowie die Zeitmessung starten

Im großen Bild ist der gesamte Geräteaufbau während einer Messung zu sehen



Abb. 8.9 Messung und Ende des Versuches (BOKU, 2014)

In Abb. 8.9 sehen wir die Position der Nadeln (Pfeil 1), die den Scherspalt bilden, die Schnur, die reibungsfrei über die Umlenkrollen läuft (Pfeil 2), und eine leichte Verschiebung der Platten aufgrund des wirkenden Wassergewichts.

Während der Messung ist zu beobachten, dass der Wasserschlauch im Kübel bleibt und nicht herausrutscht, dass die obere Platte nicht durch zu große Kräfte nach unten gezogen und aufgehoben wird und dass die Wurzel in Position bleibt.

Das Experiment endet abrupt, wenn die Wurzelfasern versagen und die obere Platte an der Sicherung (hier eine Tischlerklemme – Pfeil 3 in Abb. 8.9) anschlägt. Gleichzeitig fällt die untere Klemme mit einem Teil der gerissenen Wurzel zu Boden.

Beides ist gut akustisch wahrnehmbar.

Auf dieses Signal hin muss der Schlauch aus dem Kübel genommen werden und in den Überlauf gehängt sowie GLEICHZEITIG die Zeitmessung gestoppt werden.

Anschließend wird die Wassermenge gewogen (Gesamtgewicht abzüglich des Gewichts des Kübels) und mit der Zeitnahme und Anmerkungen zur Messung notiert.





Abb. 8.10 Einstufung eines gelungenen, ungestörten Versuchs. Die Wurzeln sind sauber ohne Umbiegen gerissen. Die Scherfläche der Wurzel ist gerade. (BOKU, 2014)

In Abb. 8.10 sehen wir eine abgerissene Wurzel in den Klemmen und die zwei Teile einer Wurzel nach dem Scherversuch, welche zusammen und beschriftet aufgehoben werden.

Ein ungestörter Versuch ist durch eine saubere Schnittstelle gegeben und es sind keine Umbiegungen visuell festzustellen. Auch die Rinde der Wurzel ist nicht verlorengegangen.

Eine abgeschälte Rinde im Bereich der Reißfläche deutet darauf hin, dass die Wurzel gezogen wurde und sich die Rinde im Spalt durch Reibung abgelöst hat.

Bei dickeren Wurzeln wird die Rinde oft durch die Einfädelung in das Bohrloch verletzt. In diesen Fällen ist der Versuch dennoch als störungsfrei einzustufen, wenn die Wurzel nicht in den Spalt gezogen wurde.

Nach der Beschriftung der gerissenen Wurzelprobe wird der Durchmesser der Reißfläche bestimmt (siehe Seite 69). Wenn die Stärke der Wurzelprobe größere Gewichte verlangt, gibt es die Möglichkeit Versuche mit Zusatzgewichten im Wasserkübel durchzuführen. Welche Bedeutung die Verwendung von Gewichten bei den Versuchen hat, wird hier zusammengefasst.

Bei Wurzeln mit einem Durchmesser von über 2 mm wurde auf das hintere und vordere Ende der beweglichen Platte ein Metallgewicht gestellt, um ein Aushebeln der Platte durch die wirkenden Kräfte zu verhindern. Um konstante Bedingungen zu gewährleisten, können die Gewichte bei allen Versuchen positioniert werden. Dies sichert die immer gleiche Spaltbreite der Scherzone.

Bei Wurzeln von über 3,5 mm Durchmesser wurde zusätzlich versucht, Gewichte in den 20L-Wasserkübel zu legen, um die benötigte Wassermenge zum Abreißen der Wurzel zu verringern. Dabei sollten die Gewichte zu Beginn der Messung hinzugefügt werden, wenn die Wurzel bei der plötzlichen Kraftzunahme noch nicht ruckartig beschädigt wird. Diese Gewichte werden zum Wassergewicht addiert.

Dabei ist behutsam vorzugehen. Es kann zu unklaren Messergebnissen kommen. Dann muss die Messung mit einer ähnlichen Wurzelprobe wiederholt werden.

9 Bedeutende Größenparameter

Grundlegende Kenntnisse im Bezug auf die physikalischen Größen, die in der Natur auf Pflanzenwurzel und Boden wirken, sind wichtig für das Verständnis der Vorgänge bei einer Hangrutschung und damit der möglichen Stabilisierung eines Hanges. Gleichzeitig wirken diese Parameter auch im Wurzelschergerät auf die einzelne Wurzel. Durch ihre genaue Beschreibung machen sie die Vorgänge beim Experiment deutlich und verständlich. Sie beziehen sich auch auf die anfangs dargestellten Grundlagen in Kapitel 2 und 3.

Die Berechnung der wirkenden Scherkraft und -spannung bis zum Bruch kann nach der genauen Bestimmung des Durchmessers der Probe gleich anschließend an das Experiment durchgeführt werden.

9.1 Kräfte

Symbol: F, Scherkraft F_s , Normalkraft F_N Einheit: Newton [N]

1 N ist eine abgeleitete Größe und definiert die Kraft, die einer Masse von 1 kg eine Beschleunigung von 1 m/s² verleiht. Daraus folgt: N = kg * m/s² (SCHEWE, 2000).

Im Fall unseres Wurzelschergeräts wird die obere Platte (Masse) in Bewegung versetzt und mit einer konstanten Beschleunigung bewegt. Diese Beschleunigung wird durch die konstante Wasserzugabe (Durchfluss Q) bzw. von der Kraftmessdose definiert und hat bei beiden Methoden dieselbe Dimension.

Durch die Bewegung der Platte wird die Kraft auf die eingespannte, unbewegliche Wurzel übertragen. Die Bestimmung der Kraftzunahme pro Zeiteinheit definiert den Versuch als kraftgesteuerten Scherversuch.

Da wir Unterschiede in den Wurzeln je nach Größe ihres Durchmessers feststellen wollen, ist ein Zusammenhang mit diesem notwendig. Die Kraft auf eine Fläche bezogen wird als Spannung bezeichnet. Je nach Richtung der einwirkenden Kraft wird zwischen Normal- und Querkräften bzw. Normal- und Scherspannungen unterschieden.

Wir bestimmen die Scherkräfte, Scherspannungen und die Scherfestigkeit von Feinwurzeln des Feldahorns. Wie einführend festgehalten, entspricht die Scherfestigkeit der maximalen Scherspannung. Normalkräfte oder Auflasten gibt es bei dieser Schermethode, im Unterschied zu Scherversuchen an Bodenproben, nicht. Diese gehen gegen Null.

Im Wurzelschergerät wirkt durch das Wassergewicht eine Kraft nach unten, die als Scherkraft die Wurzel belastet. Eine Reibungskraft ist zwischen den Platten bzw. den Nadeln und den Platten anzunehmen. Die grundlegenden Formeln zur Berechnung und Einschätzung des Einflusses werden hier besprochen.

- Scherkraft

Der sich stetig mit Wasser füllende Kübel hängt frei Richtung Erdmittelpunkt. Somit ist die Masse des Wassers beim Zeitpunkt des Reißens der Wurzel mit der Fallbeschleunigung zu multiplizieren.

Die Krafteinwirkung wird also durch das Gewicht der Wassermasse bestimmt.

 $F_s = g * m$

- *F*_s Maximale Scherkraft zum Zeitpunkt des Reißens der Wurzel [N]
- g Fallbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/sec}^2$
- m Masse des bis zum Zeitpunkt des Reißens geflossene Wassers [kg]

- Reibungskraft

Sie beschreibt die Kräfte, die entstehen, wenn sich zwei Körper aneinander oder gegeneinander bewegen. Die Größe hängt stark von der Oberflächenbeschaffenheit der Körper und der Größe der Berührungsflächen ab.

Bei der Konstruktion des Wurzelschergeräts gibt es kaum Gleitflächen, damit ist die Haft-, Gleit- und Rollreibung zu vernachlässigen. Bewiesen wurde dies durch die Durchführung von Reibungsmessungen an der Kraftmessdose des Instituts für Physik und Materialwissenschaft. In der folgenden Grafik (Abb. 9.1) ist die Dimension der vorhandenen Reibung dargestellt. Die auftretenden Kräfte - das arithmetische Mittel aller Reibungstests beträgt 0,4 N; der höchste Wert liegt bei 1,25 N - sind im Bezug zu den gemessenen Kräften, die auf die verschiedenen Wurzelproben wirken, nicht von Bedeutung.



Abb. 9.1 Messergebnisse aus sechs Aufzeichnungen der Reibung zwischen Nadeln und Platten ohne Wurzelprobe an der Kraftmessdose mit einer Kraftzunahme dF_s=0,1 N/sec (BOKU, 2014)

Aus der Kraft ergibt sich, bezogen auf den Durchmesser der Wurzel und somit auf die Reißfläche, eine Scherspannung, deren Physik im Folgenden besprochen wird.

9.2 Scherspannung und Scherprozess

Symbol: τ (Schub- oder Scherspannung) Einheit: N/mm²

Spannungen stellen die Krafteinwirkung auf eine Fläche dar und geben so der Krafteinwirkung eine räumliche Dimension. Je nach Richtung der wirkenden Kraft werden verschiedene Arten von Spannung bezeichnet. Die Normalspannungen wirken von oben auf ein Probenstück und die jeweilige Angriffsfläche der Kraft, Scherspannungen belasten die Probe seitlich.

Im Falle des Wurzelschergeräts treten solche Belastungen in Längsrichtung auf, wenn sich die Wurzel umlegt und so in die Länge gezogen wird. Hier besteht der Zusammenhang mit Zugfestigkeiten, deren Dimension schon mehrfach im Zusammenhang mit durchwurzelten Böden an verschiedenen Pflanzenwurzeln getestet wurden (z.B. Auszugversuche von Bäumen). Ist das Umlegen der Wurzel während des Versuchs offensichtlich, wird das Ergebnis auf Grund dessen verworfen und der Versuch wiederholt.

Schub- (oder Scher-)spannungen wirken in Quer- und Tangentialrichtung von einer Fläche. Sie bezeichnen die Verformung oder Verschiebung der parallel zueinander liegenden Flächen, die unter der Aufwendung und Zunahme einer bestimmten Kraft zu beobachten ist. Die Aufgabe des Wurzelschergeräts ist es festzustellen, bei welcher maximalen Scherspannung, der Scherfestigkeit, die Wurzel abreißt. Der Scherprozess simuliert durch die Platten, den Scherspalt und die konstante Kraftzunahme durch das Wasser erprobte Scherversuche. Im Rahmen dieser Masterarbeit ist davon auszugehen, dass die Wurzel seitlich belastet wird und unter der maximalen Scherspannung reißt.

Die oben angegebene Einheit N/mm² bezieht sich auf die Größenordnung der für diese Arbeit getesteten Feinwurzeln. Sie entspricht der sonst üblichen Einheit MPa – die Einheit für Druck, sprich Megapascal.

 $1 \text{ N/mm}^2 = 1 \text{ MPa}$

Wie der Durchmesser und damit die Querschnittsfläche der Wurzel bestimmt werden, wird im Folgenden erläutert.

9.3 Bestimmung des Wurzeldurchmessers und der Querschnittsfläche

Die Wurzelteile nach dem Bruch werden mit der Reißfläche in gleicher Richtung mit einem Klebeband miteinander fixiert und mit einem Probennamen beschriftet. Die Fixierung soll nur den durch die Klemmen beschädigten Teil betreffen, da der ungequetschte Teil der Probe zur Durchmesserbestimmung herangezogen wird.

Im Falle der Messung an der Kraftmessdose muss vor dem Experiment dem Computerprogramm ein Durchmesser angegeben werden. Mit einer Schiebelehre kann dieser ungefähr bestimmt werden. Ansonsten werden die Proben bei beiden Messverfahren nach Ende des Experiments gleich gesichert. Das Institut für Forstentomologie, Forstpathologie und Forstschutz an der BOKU Wien stellte uns ein Auflichtmikroskop mit integrierter Strichskala zur Verfügung. Die Skala wurde zu Beginn der Messreihe mit einem Geodreieck überprüft. Die dimensionslose Größe der Skala wird durch den eingestellten Vergrößerungsfaktor des Mikroskops dividiert. So erhält man eine Millimeterangabe.

d = x / Faktor

d	Durchmesser der Wurzelprobe [mm]
х	Einheiten auf Mikroskopskala [mm*Faktor]
Faktor	Vergrößerungsfaktor des Mikroskops Hersteller WILD Heerbrugg Modell M3C

Bei der Betrachtung der Wurzel unter dem Mikroskop ist zu beachten, dass auf die äußeren Ränder scharfgestellt werden muss. Es ist anzuraten, die Durchmesser beider Teile der Wurzel festzustellen und darauf zu achten, dass die Querschnitte nicht zu gequetscht und damit oval sind. Sonst können die Durchmesser über- oder unterschätzt werden. Ein Mittelwert aus beiden ist im Rahmen dieser Arbeit zulässig.

Die als Kreis angenommene Querschnittsfläche A [mm²] der abgerissenen Wurzel mit dem Durchmesser d [mm] wird mit folgender Formel errechnet:

 $A = (d/2)^2 * \pi$

In dieser Arbeit wird versucht, für die Feinwurzeln des Feldahorns festzustellen, welche Scherkräfte und -spannungen aufgenommen werden können.

10 Messergebnisse

10.1 Berechnung der maximalen Scherkraft bei Bruch der Wurzel

Die Kräfte, die durch das Ziehen der Platte auf die Wurzel beim Bruch wirkten, sind die direkten Ergebnisse der Experimente. Das Wassergewicht wird gewogen, das Kübelgewicht subtrahiert und mit der Fallbeschleunigung multipliziert.

Die Formel lautet:

 $F_{S} = (m_{WK} - m_{K}) * g$

F _s	maximale Scherkraft bei Bruch der Wurzel [N]
т _{wк}	Masse, die auf der Waage angezeigt wird (Wasser und Kübel) [kg]
т _к	Masse des Kübels (in unserer Versuchsreihe $m_{K} = 0,412 \text{ kg}$)
g	Fallbeschleunigung (9,81 m/sec ²)

Bei Messungen an der Kraftmessdose wird die maximale Scherkraft bei Reißen der Wurzel in der Ergebnistabelle des Computerprogramms angegeben und kann direkt übernommen werden.

In der vorliegenden Arbeit wurde am Institut für Physik und Materialwissenschaft der BOKU Wien eine Spindelpresse mit Kraftmessdose des Herstellers Zwick/Roell Type: 1445 mit einer Nennlast von 500 N verwendet. Das damit verbundene Softwareprogramm, mit dem gearbeitet wurde, heißt TestXpert(R) II Version 3.1 (Abb. 8.3 und 8.4 auf Seite 60).

Im Diagramm (Abb. 10.1) sind die 90 Messungen der Serien 1 - 5, die störungsfrei verlaufen sind, dargestellt und durch die Form- und Farbgebung der Symbole den zwei unterschiedlichen Versuchsaufbauten, einerseits mittels Wassergewicht und andererseits mittels Kraftmessdose, zugeordnet.

Alle Wurzelproben stammen aus den Jahren 2012 / 2013.

Bei beiden Verfahren ist die genaue Messung des abgescherten Durchmessers nach dem Experiment unter dem Mikroskop erforderlich. Erst dann können die Daten interpretiert werden und weitere Berechnungen erfolgen.



Abb. 10.1 Alle Messergebnisse der Serien 1-5 im Scherkraft-Durchmesser-Diagramm der Wurzeln des Feldahorns (BOKU, 2014)

10.2 Beschreibung der Messergebnisse nach Durchmesserklassen

Zur anschaulichen Beschreibung der 90 Messergebnisse werden die Kraftdaten in Klassen eingeteilt und in Abbildung 10.2 auf Seite 75 dargestellt. Die Kennwerte der Klassen werden in Tabelle 10.1 zusammengefasst und anschließend beschrieben. Die 5 Klassen haben eine Breite von 0,29 mm und umfassen den Bereich von 0,45 mm bis 1,94 mm Wurzeldurchmesser. Darüber hinaus gibt es nur einzelne Messwerte, die in Tabelle 10.2 dargestellt sind, aber keine Anwendung im Diagramm finden.

Durchmesser	0,45-0,74 mm	0,75-1,04 mm	1,05-1,34 mm	1,35-1,64 mm	1,65-1,94 mm
Anzahl n	11	20	30	14	7
Mittelwert [N]	11,19	16,39	23,22	35,41	41,29
kleinster Wert [N]	6,39	7,54	13,18	24,42	19,62
größter Wert [N]	15,90	24,27	33,58	50,50	63,59

Tabelle 10.1 Kennwerte de	r Wurzeldurchmesserklassen	im Bereich von 0,45	mm – 1,94 mm (BOKU, 201	4
---------------------------	----------------------------	---------------------	-------------------------	---

Die Klasse mit den kleinsten Wurzeldurchmessern von 0,45 – 0,74 mm hält Kräfte von 6 – 16 N aus, das entspricht einem Wassergewicht von ungefähr 600 – 1600 g.

In der nächsten Klasse mit Wurzeldurchmessern von 0,75 – 1,04 mm steigt der minimale Wert gegenüber der vorigen Klasse nur um 1 N. Der Maximalwert steigt deutlich um 10 N. Das Mittel bei 20 Messungen liegt bei 16 N, und damit ungefähr um 5 N höher als bei der vorigen Durchmesserklasse. Die Feinwurzeln in diesem Durchmesserbereich können Gewichte bis zu 2,48 kg aushalten.

Wurzeln mit einem Durchmesser zwischen 1,05 bis 1,34 mm halten bei einer Anzahl von 30 Messungen im Mittel um 7 N höhere Kräfte aus. Das heißt, sie halten einem dreiviertel Kilogramm mehr Gewicht stand als in der Klasse darunter und ungefähr doppelt so viel wie Wurzeln mit 0,5 mm weniger Durchmesser. Gewichte, die geringer als 1,3 kg sind, kommen nicht mehr vor. Die Maximalkräfte steigen auf über 33 N, das entspricht 3,4 kg.

Nun folgt ein deutlicher Sprung in den Messdaten.

In der vierten Klasse mit Wurzeldurchmessern von 1,35 – 1,64 mm steigt der Mittelwert zum ersten Mal um über 10 N auf 35 N gegenüber der darunterliegenden Klasse mit einem Mittel von 23 N. Der Minimalwert liegt bei über 20 N, das entspricht ca. 2 kg, der Maximalwert bei 50 N, also über 5 kg Gewicht. In diese Klasse fallen 14 Messungen.

Die Klasse von 1,65 – 1,94 mm Durchmesser beinhaltet nur noch 7 Messungen. Die Anzahl an verfügbaren Wurzeln ab diesem Größenbereich war gering. Nur einzelne Messungen verliefen mit Störungen, in den unteren Durchmesserbereichen mussten mehr Messungen als fehlerhaft angesehen werden. Hier gilt es also, noch mehr Ergebnisse zu sammeln. Dies wurde im November 2014 von DI Sandra ALVAREZ mit weiteren Versuchen begonnen. Sie richtete sich

nach der Anleitung und dem Ablauf der bisherigen Messungen, verwendete jedoch eine neue Charge an Wurzelproben (ALVAREZ, unveröff.). Darauf und auf den Vergleich mit den Daten aus dieser Masterarbeit (Serien 1-5) wird in der Diskussion zum Wurzelmaterial ab Seite 84 eingegangen.

Der Mittelwert ist hier um 6 N höher als der der darunterliegenden Klasse, der Maximalwert steigt auf fast 65 N, also ungefähr 6,5 kg Gewicht, das auf die Wurzel wirkt. Dies bedeutet eine Steigerung von noch einmal 1,5 kg.

Die weiteren Ergebnisse werden als Einzelwerte in der Tabelle 10.2 angegeben. Hier ist keine Klassenbildung mehr sinnvoll, weil die Klassenbreite nicht mehr eingehalten werden kann. Der Zeitaufwand bei den Wassermessungen mit einem Durchfluss von 10 ml/sec bzw. der eingestellten Kraftzunahme an der Kraftmessdose von 0,1 N/sec steigt deutlich. Es müssen auch im Wassermessverfahren Kübel mit einem Fassungsvolumen von 20 L statt bisher 10 L verwendet werden.

Bei einem Durchmesser von 1,70 mm erreicht eine Wurzel den bisherigen Maximalwert von über 60 N. Bei 0,40 mm mehr Durchmesser, hier 2,13 mm, liegt der Messwert einer Probe um über 20 N höher. Nimmt die Wurzel noch ein wenig mehr an Durchmesser zu, in unseren Versuchen auf 2,38 bzw. 2,55 mm, gibt es wieder eine Steigerung von ungefähr 10 N.

Ab einer Wurzelstärke von ungefähr 2 bis 3 mm wird die Grenze 100 N , also 10 kg, die in Querrichtung wirken bis die Wurzel bricht, erreicht. Bei einer Messung von einer Wurzel mit 3,25 mm Durchmesser sind es bereits 180 N und bei einer weiteren mit 3,75 mm Durchmesser über 200 N.

Damit steigt das Gewicht, das bis zum Bruch der Wurzel im Durchmesserbereich über 3 mm gehalten werden kann, auf bis zu 20 kg. Die genauen Ergebnisse sind im Anhang IIIa und teilweise auf Seite 89 angegeben.

Tabelle 10.2 Weitere Messergebnisse der Serien 1-5 mit Wurzeldurchmessern von 1,95 mm bis 3,75 mm (BOKU, 2014)

Durchmesser [mm]	Max. Scherkraft [N]
2,13	86,09
2,38	98,99
2,55	92,09
2,75	113,02
3,00	106,07
3,13	134,05
3,25	179,16
3,75	217,52

Auf der folgenden Seite sind die Messergebnisse nach Klassen in einem Säulendiagramm (Abb. 10.2) zur Veranschaulichung abgebildet.



Abb. 10.2 Übersicht über die Mittelwerte, Minima und Maxima der gemessenen Scherkraft in verschiedenen Durchmesserklassen, um Sprünge zu veranschaulichen und beschreiben zu können (BOKU, 2014) Diese Beschreibung dient der Darstellung der direkten Messergebnisse. Zusammenhänge zwischen den Durchmesserbereichen anzunehmen, wäre aber falsch, da das Verhalten der Wurzel im Schergerät eine wesentliche Rolle spielt. Durch die festen Durchmesser der Bohrlöcher und die Diversität an Durchmessern sowie der Morphologie der Wurzelproben ist ein Verbiegen und Verrutschen der Wurzel im Gerät möglich, das bei kleinen Durchmessern eine deutliche Rolle spielt. Die Diskussion der Messergebnisse erfolgt in Kapitel 11.

Die Berechnung der Spannung aus den genau bestimmten Durchmessern und der daraus resultierenden Querschnittsfläche zeigt, dass nicht nur Querkräfte wirken, sondern durch das Umlegen der Wurzel von einer senkrechten in eine geneigte Lage auch Zugkräfte in Faserrichtung.

10.3 Überprüfung der Messergebnisse der Wassergewichtsmethode

Da das Gerät erst im Zuge der Masterarbeit entworfen und gebaut wurde, war es ein großes Anliegen den Messvorgang, also nicht nur das Gerät, sondern auch den eigenen Umgang mit ihm zu überprüfen. Das Messen des Wassergewichts und damit die verwendete Waage und die Handhabung der Geräte wird durch die Aufnahme der Zeit, in der das Wasser in den Kübel fließt, überprüft.

✓ Aufnahme der Zeit

Während des Messvorgangs wird die Zeit bis zum Reißen der Wurzel mit gemessen. Durch die Bestimmung des Wasserdurchflusses lässt sich so auf einem zweiten Weg die Menge des in den Kübel geflossenen Wassers und daraus die wirkende Kraft errechnen. Der Vergleich der beiden errechneten Werte gibt Sicherheit über den störungsfreien Ablauf des Experiments und die richtige Handhabung der Geräte.

Die Bestimmung der Kraft mittels Zeitaufnahme und Durchfluss wird wie folgt errechnet:

 $F_{\text{überprüft}} = t * Q$

$Diff = |F_{Wasser} - F_{\"uberprüft}|$

F _{Wasser}	Scherkraft, berechnet durch Wassergewicht und Fallgeschwindigkeit (siehe S. 68) [N]
F _{überprüft}	Scherkraft, berechnet nach Zeitnahme und Durchfluss [N]

t ... gemessene Zeit während der Messung [sec]

Q... Durchfluss [ml/sec]

Die Überprüfungsergebnisse sind in Tabelle 10.3 dargestellt:

Tabelle 10.3 Durchschnittliche Differenz der Scherkraft zwischen Gewichtmessung und Zeitmessung [N] (BOKU, 2014)

Mittelwert Serie 1	Mittelwert Serie 2	Mittelwert Serie 3	Mittelwert Serie 4	Mittelwert Serie 5	Mittelwert insgesamt	Mittelwert ohne Probe 4_3b
0,74	0,78	0,16	17,11	0,18	3,79	1,98
			ohne Probe 4_3b			
			8,02			

Serie 4 fällt durch einen sehr hohen Wert auf. Dieser resultiert daraus, dass bei einem der vier Versuche (Probe 4_3b) zusätzliche Gewichte in den Kübel gelegt wurden, um die wirkende Kraft ausreichend zu erhöhen, bevor das Volumen des Kübels erschöpft war. Diese Kraft kann bei der Zeitnahme nicht berücksichtigt werden, woraus folgt, dass hier die Werte zwischen der durch das Wassergewicht gemessenen Kraft und der durch Zeitnahme und Durchfluss berechneten stark voneinander abweichen.

Wenn wir die anderen Serien betrachten, können wir sagen, dass die Messung des Wassergewichts mittels Waage durch die Aufnahme der Zeit bestätigt wurde und die Abweichungen nur sehr gering sind.

10.4 Berechnung der maximalen Scherspannung bei Bruch der Wurzel

Die Spannung macht aus den Werten der Kraftmessungen eine Größe, die sich auf die jeweilige als Kreisfläche angenommene Querschnittsfläche der Wurzel bezieht. Die Spannungswerte sind also unabhängig vom Durchmesser der Probe und beschreiben das Material der Wurzel. Die berechneten Werte aus den Kraftmessungen sind in Abbildung 10.3 dargestellt.

Zur Erinnerung: Die Formel zur Berechnung der Kreisfläche lautet

$A = (d/2)^2 * \pi$

- A... Kreisfläche der Wurzelprobe [mm²]
- d ... Wurzeldurchmesser [mm]

Damit kann die Scherspannung der Wurzel bestimmt werden:

$\tau = F/A$

- τ... maximale Scherspannung [N/mm²]
- F_s ... maximale Scherkraft bei Bruch der Wurzel [N]
- A ... Querschnittsfläche der Wurzelprobe [mm²]



Abb. 10.3

Alle 90 Messwerte der Wurzelproben im Spannung-Durchmesser-Diagramm, mit zwei unterschiedlichen Mittelwerten nach Durchmesserbereich (siehe Tabelle 10.4) (BOKU, 2014)

10.5 Beschreibung der Messergebnisse zur Scherspannung

Aufgrund des Bezugs auf den Durchmesser wäre anzunehmen, dass alle Spannungswerte sich in einem normalverteilten Größenbereich wiederfinden.

Es ist jedoch ein weitgestreuter Datenbereich bei den 52 Wurzelproben bis zu 1,20 mm festzustellen und ein weniger breit gestreuter bei den 38 Wurzelproben mit Durchmessern von 1,20 bis 3,75 mm. Im letzteren Bereich sind weniger Proben enthalten, die sich über einen über doppelt so großen Durchmesserbereich erstrecken.

In Tabelle 10.4 sind die Kennwerte der sich anscheinend sprunghaft unterscheidenden Bereiche zusammengefasst.

Tabelle 10.4 Mittelwerte und Standardabweichungen für die Datenbereiche aus dem Spannung-Durchmesser Diagramm (BOKU, 2014)

Durchmesser	0,45 mm - 1,20 mm	1,20 mm - 3,75 mm
Mittelwert	28,19	20,08
Standardabweichung	8,98	5,02

Kennwerte zu	Serien 1-5	[N/mm ²]
--------------	------------	----------------------

Die beiden Mittelwerte weichen um 8 N/mm² voneinander ab. Die Standardabweichung ist beiden Bereichen sehr groß. Im Bereich der größeren Durchmesser ist sie im Vergleich kleiner, hier wurden jedoch weniger Proben auf eine größere Bandbreite von Durchmessern getestet.

Zur statistischen Beschreibung der Scherspannungswerte wurde eine Normalverteilung (Abb. 10.4) aufgestellt. Die Kennwerte dazu finden sich in Tabelle 10.5.

Tabelle 10.5 Kennwerte für die Normalverteilung der maximalen Scherspannung der Serien 1-5 (BOKU, 2014)

n = 90	х	f(x)
	τ [N/mm²]	
arithm. Mittel	24,76	0,04671902
Standardabweichung	8,54	0,00768286
untere Toleranzgrenze	16,23	0,02833652
obere Toleranzgrenze	33,30	0,02833652
Toleranzbreite	17,08	0,03115815



Abb. 10.4 Normalverteilungskurve aller Scherspannungsmesswerte der eigenen Serien 1-5 (BOKU, 2014)

Die Kurve stellt dar, dass der zuverlässige Bereich, in dem Messdaten mit 95% iger Wahrscheinlichkeit liegen, sehr klein ist. Daher sind die Messergebnisse als nicht zuverlässig reproduzierbar einzustufen.

Diese Aussage kann nur mit den errechneten Spannungswerten gemacht werden, weil hier ein einheitlicher Zusammenhang über den Wurzeldurchmesser gegeben ist.

Durch die Mittelwerte der beiden Durchmesserbereiche ist jedoch eine Aussage über die Größenordnung der maximalen Spannungen, die von den Feinwurzeln des Feldahorns gehalten werden, möglich.

Diese liegen zwischen 10 und 50 N/mm² bzw. MPa. Ein mittlerer Bereich kann zwischen 20 und 30 N/mm² bzw. MPa bestimmt werden.

11 Diskussion der Messergebnisse

Im Interesse der Übersichtlichkeit wird die Diskussion in verschiedene Abschnitte gegliedert. Einerseits sind weitere Fehlerquellen zu vermuten, die bei der Anpassung des Wurzelschergeräts im Rahmen dieser Masterarbeit nicht berücksichtigt wurden. Andererseits sind die vorhandenen Grundlagen und Kenntnisse über die Materialbeschaffenheit der Feinwurzeln von Gehölzen spärlich. Daten über die Scherfestigkeit von Einzelwurzeln konnten bei der Sichtung von Literatur nicht gefunden werden. Daraus folgt die Möglichkeit, dass auch materialtechnische Ursachen auf die Qualität der Daten wirken.

11.1 Mögliche Gründe für die breite Streuung der Ergebnisse

Versuchsaufbau

Zunächst wollen wir darstellen, dass die Idee des Messens der Kraft mittels Wassergewicht funktioniert. Es wurden jeweils 45 Messungen im Versuchsaufbau mit Wassergewicht und 45 Messungen an einer elektronisch gesteuerten Kraftmessdose durchgeführt.

Im Diagramm (Abb. 11.1) zu den beiden Versuchsaufbauten ist durch die Trendlinien, die den zugehörigen Messdaten in polynomischen Funktionen 2. Grades folgen, kein Unterschied erkennbar. Die blaue, durchgehende Linie (Messungen mit Wassergewicht) und die orange, strichlierte (Messungen an der Kraftmessdose) verlaufen fast deckungsgleich.

Dadurch ist bewiesen, dass beide Versuchsaufbauten gleichermaßen funktionieren.

Weiters wurde das Messverfahren durch Wiegen des Wassers nach Bruch der Wurzel überprüft. Wie auf Seite 77 besprochen, zeigt die Nachberechnung durch die gemessene Zeit und den Durchfluss nur minimale, vernachlässigbare Unterschiede.

Demnach sind die Fehlerquellen im Aufbau des Versuchsgeräts an sich bzw. im Wurzelmaterial zu suchen.

Folgend werden die Vor- und Nachteile beider Versuchsaufbauten zusammengefasst, sowie die damit verbundene Bedeutung für den Umgang mit den gewonnenen Daten erläutert.



Abb. 11.1 Diagramm aller Scherkraftmessungen mit Trendlinien für beide Versuchsaufbauten (BOKU, 2014)

- Vor- und Nachteile der beiden Versuchsaufbauten

Die Versuchsaufbauten haben jeweils unterschiedliche Eigenschaften und erfüllen andere Anforderungen. Sie helfen beide bei der Weiterentwicklung der Versuchsanordnung.

Das Messen mit Wassergewicht, Durchfluss und Zeit ist ortsunabhängig und unterliegt physikalischen Grundgesetzen. Das genaue und aufmerksame Arbeiten ist ausschlaggebend. Bei Berücksichtigung der Fehlerquellen durch das Gerät an sich und die Eigenschaften des Materials Wurzel liefert diese Methode jedoch eindeutige, störungsfreie Ergebnisse, da die Grundlagen die Wirkung der Schwerkraft und ein einfacher Wiegevorgang ist.

Die Verwendung der elektronischen Kraftmessdose und eines Computerprogramms kann mehr Daten (z.B. den Verschiebungsweg der beweglichen Platte) liefern und errechnet automatisch die wirkende Maximalkraft und eine Scherspannung, die sich auf einen vorweg angegebenen Durchmesser bezieht. Dieser Durchmesser ist eine Größeneinschätzung. Daher muss der Spannungswert nach Bestimmung des Probendurchmessers unter dem Mikroskop nachberechnet werden. Es gilt auch, die automatisch angegebene Maximalkraft zu hinterfragen und mit dem erstellten Diagramm der Messkurve zu vergleichen. Die Messkurve kann je nach Einstellung im Programm anders dargestellt werden. Bewährt hat sich während dieser Masterarbeit die Darstellung im Weg-Kraft-Diagramm. Daraus ließen sich auch auch Angaben über die Dehung der Schnur und Umlegen der Wurzel (Weg) abschätzen. Den Kraftverlauf während der Messung zu beobachten, gibt Hinweise über das Verhalten der Wurzel im Versuchsgerät und ist daher während der Verbesserungsphase hilfreich.

Das Ziel ist jedoch, das Gerät so anzupassen, dass mit dem Wassergewicht ortsunabhängig und ohne aufwendige Zusatzgeräte gearbeitet werden kann.

Bei beiden Messverfahren soll die verantwortliche Person den Vorgang ständig beobachten, um Störungen nachvollziehen und notieren zu können. Es kann keine Automatisierung erfolgen, da noch zu wenige Erkenntnisse über das Wurzelmaterial vorliegen und nur durch Beobachtung, anschließende Interpretation und Schlussfolgerungen das Verfahren verbessert werden kann bzw. die gewünschte Genauigkeit liefert.

Geräteaufbau

Die Gründe für die große Streuung der Daten ist unter anderem darin zu vermuten, dass sich die Wurzel im Gerät, trotz Anpassungen und Testphasen, bewegen und umlegen kann. Außerdem ist die Frische der Wurzelproben nicht optimal gewesen.

Das Umbiegen und Umlegen der Wurzelprobe konnte kaum visuell beim Messverfahren festgestellt werden, doch folgende Überlegungen und die unterschiedlichen Messergebnisse innerhalb desselben Durchmessers lassen darauf schließen.

Mögliche Gründe für die Umlegung der Wurzel im Schergerät und dadurch für die starke Streuung der Ergebnisse sind

- die Diversität der Wurzelformen

Die Wurzeln sind nicht einheitlich und nicht gerade wie andere nicht organische Materialien, bei denen die Spannung als Kennwert festgestellt wird.

- die Passungenauigkeit der Bohrlöcher

Durch die ungleichförmige Struktur der Feldahornwurzeln wurde das Einpassen in die Bohrlöcher und die für die Messung der Scherspannung geforderte Unbeweglichkeit der Probe nicht vollkommen erreicht. Besonders bei kleineren Durchmessern fällt der Unterschied zwischen Größe der Wurzelprobe und Größe der Bohrlöcher ins Gewicht. Das kleinste Bohrloch hat einen Durchmesser von 1,5 mm und ist damit doppelt bis dreimal so groß wie eine Vielzahl der dünneren Proben.

- die Spaltgröße

Die Höhe des Spalts zwischen den beweglichen Platten beträgt 0,25 mm. Damit ist genug Raum für eine von ihrem Außengewebe durch Abreibung befreite Wurzel, die nun schon vorgeschädigt ist, sich in den Spalt zu legen. Diese wird dann auf Zug, in Längsrichtung der Fasern, beansprucht.

die Schnur

Die Schnurdehnung wurde bereits in Kapitel 6 und 7 besprochen. Die Elastizität trägt zur Vermeidung von einer ruckartigen Kraftwirkung auf die Wurzel bei. In den wechselnden Versuchsaufbauten zwischen Technikum und Physiklabor mussten die Knoten aufgemacht und neu geknüpft bzw. die Schnur ausgetauscht werden. Das Festziehen der Knoten kann vor der Versuchsserie durch einen Ablauf ohne Wurzel, dafür mit Feststellen der Platte mit der Sicherungsschraube, erfolgen. Andernfalls ist die direkte Kraftübertragung auf die Wurzel eventuell gestört.

Wurzelmaterial

Unterschiede nach Wurzeldurchmesser

Die Festigkeit der Wurzeln nimmt mit dem Durchmesser zu. Die Bedeutung der Durchmesserunterschiede zwischen Bohrloch und Wurzelprobe nimmt ab, auch der Spalt als Fehlerquelle fällt weniger ins Gewicht. Es wird, auf die gesamte Querschnittsfläche, mehr auf Schub beansprucht als auf Zug. Die Wurzelprobe sitzt fester im Versuchsgerät.

Die morphologischen Grundlagen aus Kapitel 5 besprechen den Celluloseanteil in der Zellwand als stukturgebend. Die Lignifizierung der Zellwand beeinflusst die biomechanische Zug- und Biegefestigkeit.

Unterschiede in der Frische der Wurzelproben

Die lange Lagerung der Wurzelproben und die undefinierten Eigenschaften, wie Wassergehalt und Lage im Wurzelsystem, lassen nicht zu, die gewonnenen Daten als absolute Werte zu verwenden. Sie geben eine Größenordnung für die Feinwurzeln des Feldahorns an.

11.2 Vergleich der Ergebnisse

Im November 2014 begann DI Sandra ALVAREZ mit einer eigenen Forschungsserie mit Wurzeln des Feldahorns aus dem gleichen Kistenaufbau im Versuchsgarten Essling. Die Wurzeln stammen aus dem zweiten Vegetationsjahr und ihre Lagerzeit war kürzer. Die Daten werden nachfolgend verglichen.

Tabelle 11.1 Vergleich von Kennwerten der Normalverteilungen der eigenen Messserien 1-5 mit einer nachfolgenden von DI ALVAREZ (BOKU, 2014)

	Serie Di Alvarez	elgene Serien 1-5
Anzahl	n = 30	n=73
Durchmesser	0,75 - 2,50 mm	0,75 - 2,50 mm
	τ [N/mm²]	τ [N/mm²]
arithm. Mittel	34,47	23,38
Standardabweichung	7,09	7,09
untere Toleranzgrenze	27,38	16,30
obere Toleranzgrenze	41,56	30,47
Toleranzbreite	14,18	14,17

Corio DI Alu o Corion 1 F

Der Mittelwert für den Durchmesserbereich von 0,75 bis 2,50 mm von DI ALVAREZ beträgt 34,47 N/mm² und liegt damit deutlich über dem Mittelwert der Serien 1-5 mit 23,38 N/mm². Der Unterschied beträgt 11,09 N/mm². Die Standardabweichung ist gleich, ebenso die Toleranzbreite der Normalverteilung.

In Abb. 11.2 sind die Messergebnisse zur maximalen Scherkraft bei Bruch der Wurzel der Serien 1-5 denen von DI ALVAREZ gegenübergestellt. Die Werte von DI ALVAREZ sind durchgehend höher, dies verdeutlicht auch die dazugehörige Trendlinie.

Im Scherspannungs-Durchmesser-Diagramm (Abb. 11.3) liegen ihre Werte ebenfalls über denen der Serien 1-5. Sie berühren den Bereich meiner eigenen Werte nur geringfügig im oberen Bereich der gemessenen Scherspannung.

Die Streuung und die Toleranzbreite, die gleich oder doch sehr ähnlich sind, beweisen, dass die Art der Versuchsdurchführung vergleichbar ist (Tab. 11.1 und Abb. 11.4). Die Gründe für die große Streuung dürften im Geräteaufbau zu suchen sein. Dass die Messwerte im Vergleich deutlich voneinander abweichen, kann auf die Qualität des Wurzelmaterials zurückgeführt werden.



Abb. 11.2 Messergebnisse zur maximalen Scherkraft bei Bruch in den eigenen Serien 1-5 und jenen von DI ALVAREZ mit Trendlinien im Vergleich (BOKU, 2014)



Abb. 11.3 Vergleich der Messergebnisse zur Scherspannung der eigenen Serien 1-5 und jener von DI Alvarez im Vergleich (BOKU, 2014)

Bei der Vorgehensweise orientierte sich DI ALVAREZ nach Anweisungen zur Handhabung des Wurzelschergeräts aus dieser Masterarbeit, verwendete die gleichen Werkzeuge und arbeitete ebenfalls mit einem Wasserdurchfluss von 10 ml/sec.

Vermutlich ist die Frische der Wurzeln von DI Alvarez ausschlaggebend für die höheren Kräfte, die von ihnen aufgenommen werden konnten.

Zunächst wurde bei den Ergebnissen der Spannung (siehe Abb. 10.3 auf Seite 78) vermutet, dass bei kleineren Durchmessern die Werte mehr streuen, da sich diese Wurzeln während des Messvorgangs im Gerät eher umlegen. Die zusätzlichen Werte von DI Alvarez zeigen jedoch, dass die Streuung auch bei Durchmessern bis 2,50 mm sehr groß bleibt (Abb. 11.3 und Abb. 11.4).

Konstruktive Anpassungen des Geräts bzw. ein Überdenken der Versuchsmethode sind demnach geboten. Einige Wurzeln haben sich, unabhängig von ihrer Frische, Alter oder Herkunft, wohl während des Schervorgangs umgelegt und wurden auf Zug beansprucht. Dies entspricht nicht dem Ziel des Wurzelschergeräts, das die Belastung auf die Probe nur seitlich ohne Umlegen, aufbringen soll.



Abb. 11. 4 Normalverteilungen der maximalen Scherspannung bei einem Wurzeldurchmesser zwischen 0,75 und 2,50 mm bei den eigenen Serien 1-5 und jenen von DI Alvarez (BOKU, 2014). Dargestellt sind die Normalverteilungskurven, Mittelwerte und die Toleranzgrenzen im Vergleich.

Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegenden Ergebnisse sind im Sinne eines interdisziplinären Forschens in allen Bereichen anwendbar. Die Ingenieurbiologie ist eine Querschnittsdisziplin, die verschiedene Bereiche zusammenführt und in der Praxis verbindet.

- Scherkraft- und Scherspannungsmessungen im Vergleich mit Daten aus der Literatur

Die Wurzeln unterlagen durch die lange Lagerung wohl schon Abbauprozessen. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse die tatsächlichen Kräfte unterschätzen. ZIEMER (1981) gibt die Scherkräfte der Feinwurzeln mit 2 mm Durchmesser zwischen 39 und 95 N an (siehe Tabelle 3.1 Seite 20).

Die Messungen mit dem Wurzelschergerät liefern höhere Werte für den Feldahorn, Acer campestre. Bei 2 mm Durchmesser liegen die zwei Werte bereits um 100 N (Tabelle 12.1).

Tabelle 12.1 Messergebnisse für die Wurzeln des Feldahorn um 2 mm Durchmesser. Probennummer: Serie_EinzelprobeX, gleiche Einzelproben bedeuten gleiche Wurzel. Probennummer ohne Zusatz = Messung an Kraftmessdose Probennummer mit Zusatz a oder b = Messung mit Wassergewicht Serie 1-5 sind eigene Messungen, 6-10 wurden von DI Alvarez durchgeführt. (BOKU, 2014)

Durchmesser d	Scherkraft F _s	Scherspannung τ	Probennummer
mm	N	N/mm²	
1,88	87,32	31,63	8_5a
1,94	37,97	12,85	5_17
1,95	128,07	42,88	8_2a
1,95	109,32	36,60	8_3a
2,00	100,73	32,06	8_6a
2,00	128,12	40,78	10_3a
2,00	101,75	32,39	11_3a
2,05	113,79	34,48	10_2a
2,13	86,09	24,27	4_4a
2,13	103,46	29,17	11_2a
2,15	107,31	29,56	11_5a
2,25	114,83	28,88	8_4a
2,38	98,99	22,34	4_4b

Bei ZIEMER (1981) liegt die maximale Scherspannung für unterschiedliche Gehölze liegt zwischen 12 und 30 N/mm². Wir haben bei dieser Wurzeldicke zwischen 32 und 40 N/mm² festgestellt. Die meisten von uns getesteten Wurzeln lagen aber im Durchmesserbereich unter 2 mm. Für diese Wurzeldurchmesser gibt es keine Vergleichswerte zur Scherkraft oder Scherspannung.

12

Es besteht Forschungsinteresse, Feinwurzeln mit einem Durchmesser unter 2 mm von verschiedenen Pflanzengruppen auf ihre Scherfestigkeit, die maximale Scherspannung bei Bruch, zu testen und miteinander zu vergleichen.

Die Ergebnisse von ZIEMER (1981, Tabelle 3.1 auf Seite 20 in dieser Arbeit) lassen vermuten, dass die Scherkraft der Feinwurzeln zunächst mit dem Durchmesser steigt, dann jedoch im Verhältnis zur zunehmenden Dicke im Verhältnis wieder sinkt. Das heißt, die Kurve wird flacher. Die Scherspannung sinkt deutlich mit zunehmendem Durchmesser. Diese Schlüsse basieren auf Annahmen und der Errechnung in einem mathematischen Modell.

Der Vergleich der Messdaten aus dieser Masterarbeit nach Durchmesserklassen zeigt eine Verdoppelung bis Verdreifachung der Scherkraft bei einem Wurzeldurchmesser von 0,5 mm im Vergleich mit 1 mm Wurzeldurchmesser (Tabelle 12.2).

Tabelle 12.2 Messergebnisse für die Wurzeln des Feldahorns um 0,5 und um 1,0 mm Durchmesse	r
(BOKU, 2014)	

Durchmesser d	Scherkraft F _s	Scherspannung τ	Probennummer	
mm	Ν	N/mm²		
um 0,5 mm				
0,45	6,39	40,16	5_6	
0,50	9,99	50,87	5_6a	
0,55	7,54	31,75	5_2a	
0,55	9,83	41,36	5_3a	
0,60	9,32	32,95	5_3	
um 1,0 mm				
0,95	17,35	24,48	1_6	
0,95	14,98	21,13	2_7	
0,95	13,30	18,77	1_16a	
0,95	17,96	25,34	5_14a	
0,95	33,95	47,90	9_7a	
1,00	17,20	21,90	1_8	
1,00	20,63	26,27	1_8a	
1,05	17,38	20,07	1_5	
1,05	17,99	20,78	1_7	
1,05	20,28	23,42	1_15	
1,05	22,78	26,31	2_11	
1,05	18,22	21,04	1_7a	
1,05	15,83	18,28	1_15a	
1,05	18,74	21,64	2_11a	
1,05	27,01	31,19	2_11b	
1,05	22,65	26,15	3_1	
1,05	14,67	16,94	5_1a	
1,05	32,00	36,95	5_15a	

Der Sprung auf 2 mm Wurzeldurchmesser (vergleiche Tabelle 12.1 und 12.2) zeigt eine Verfünffachung der maximalen Scherkraft bis zum Bruch der Wurzel.

Die Scherspannung der getesteten Feldahornwurzeln sinkt zunächst, und steigt dann wieder leicht. Die Streuung der Werte lässt aber keine eindeutigen Aussagen zu.

Dies betont den zukünftigen Forschungsbedarf direkt an Wurzeln mit verschiedenen Durchmessern zu arbeiten und verschiedenartigen Pflanzen zu untersuchen. Die Ingenieurbiologie kann Interesse an bestimmten Arten zur Hang- und Ufersicherung benennen. Je nach Aufgabenstellung und Zielen können Gehölze oder Gräser und Kräuter im Fokus stehen. Dies hängt vom Interessensgebiet, dem Standort und der gewünschten Wirkung des Bauwerks ab.

- Morphologie der Wurzel

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde ein abgescherter Wurzelquerschnitt unter einem Durchlichtmikroskop am Institut für Forstentomologie, Forstpathologie und Forstschutz an der BOKU Wien betrachtet und fotografiert. Uns war es hier nur möglich, Proben bis zu einer Größe von ca. 1 mm ganz zu betrachten. An die Arbeit an einem neuen Mikroskop für größere Proben werden die Institutsangehörigen gerade herangeführt.

Der halbe Querschnitt in Abbildung 12.1 zeigt eine Quetschung der Wurzel, die durch den Schervorgang erfolgt ist.

Eine genauere Betrachtung der beschädigten Zellen der getesteten Pflanzenwurzeln wäre aufschlussreich für das Festigungsverhalten der Wurzel, um festzustellen, welche Zellen mehr oder weniger durch die Belastung gequetscht werden.

Längsschnitte würden weitere Erkenntnisse zu der Faserfestigkeit geben. Hier würden gerissene, gedehnte bzw. gestauchte Fasern sichtbar. Eine umfangreiche Betrachtung kann die Vorgänge während der Belastung in Querrichtung verständlicher machen.

Um den festigenden Stoff Cellulose in den Zellwänden zu untersuchen, können chemische Stoffe diesen sichtbar machen.

Das Probenstück wird zurechtgeschnitten, mit CryoGlue auf dem Probenträger fixiert und eingefroren. Im Gefriermikroton Cryostat werden dann Quer- oder Längsschnitte für die Betrachtung unter dem Durchlichtmikroskop angefertigt. Der Friervorgang beansprucht ein paar Stunden.



Abb. 12.1 Halber Querschnitt einer abgescherten Wurzel des Feldahorns mit Durchmesser von ca. 1,8 mm Foto mit Carl Zeiss Axiophot und Kamera AxioCam (zehnfache Vergrößerung); Software Axio Vision (BOKU, 2014)

- Materialwissenschaften bezüglich der Wurzel

Der Vergleich zwischen maximalen Zugkräften und maximalen Scherkräften im Interesse von Materialerkenntnissen über die Gehölzwurzel kann ein weiteres Forschungsfeld sein. Im Grundlagenteil dieser Arbeit wurden auf Seite 17 sind Spannungswerte auf Zug für die Wurzeln von Picea radiata im Bereich von ca. 1 cm bis 2,5 cm Durchmesser zwischen 20 und 30 MPa angegeben. Verholzte Wurzeln des Spitzahorns (Acer platanoides) halten eine Zugspannung von 27 MPa aus ohne Angaben zu den untersuchten Durchmessern (siehe ebenfalls Seite 17). Der Bereich, der von uns für Wurzeldurchmesser bis 3,75 mm des Feldahorns genannt werden kann, liegt zwischen 10 und 50 MPa.

Das Zusammenspiel der Spannungen in verschiedene Richtungen stellt wohl das Verhalten im rutschenden oder erodierenden Hang, bei Kippen eines Baumes oder anderen Belastungen durchaus real dar.

Insofern ist das Wurzelgerät geeignet, komplexe Belastungen nachzuahmen. Es müssen aber Anpassungen vorgenommen werden, um die Spannungen, die auf die Wurzelprobe wirken, näher definieren zu können. Demnach ist es notwendig, je nach Forschungsziel, das Gerät neu zu bauen oder einzelne Teile zu verbessern. Außerdem sind die Vor- und Nachbereitungen zu verfeinern, um einen strukturierteren Forschungsablauf und damit besser nachvollziehbare Ergebnisse zu erhalten.

Die Pflanzenwurzel ist ein organischer Stoff, der sehr variabel in seinen mechanischen Eigenschaften ist. Daher stehen im Forschungsfeld rund um die Wurzel noch viele Türen offen und viele Richtungen können eingeschlagen werden. Bestehende Erkenntnisse über die variablen Eigenschaften der verschiedenen Wurzeln ein und desselben Wurzelsystems einer Pflanze können mit physikalischen Tests gut verbunden werden. Unterschiedliche Pflanzengruppen liefern wiederum weitere Ergebnisse. Die Pflanze an sich steht im Zusammenhang mit ihrer Anwendung im ingenieurbiologischen Bereich zur Erhöhung der Sicherheit, gestalterischen oder ökologischen Zielen.

So können verschiedene Maßstabsebenen und darin liegende Interessen verknüpft werden.

Für anwendbare bzw. weiterführende Daten ist eine genaue Versuchsplanung unumgänglich. Im folgenden werden dazu Hinweise gegeben.

- Ausblick

Verbesserungsvorschläge in der Versuchsplanung

In nachfolgenden Arbeiten sollte die Pflanzenart und das Wachstum nach dem Forschungsziel ausgerichtet sein. Die Substratwahl beeinflusst die Wurzelentwicklung. Pflanzungen in Versuchskisten bedürfen genauer Pflege im Hinblick auf die Simulation natürlicher Rahmenbedingungen. Wurzelproben von wild gewachsenen Pflanzen oder eine Nachuntersuchung von entwurzelten Gehölzen sind wiederum anders zu betrachten.

Anschließend an diese Arbeit dürften Untersuchungen an Feinwurzeln von anderen jungen Pioniergehölzarten interessant sein. Weiters empfiehlt es sich, Daten von Pflanzenarten zu sammeln, deren mechanische Eigenschaften schon dokumentiert sind, um die Ergebnisse vergleichen zu können und die Methodik besser zu beschreiben.

✓ Probengewinnung und Lagerung

Die Lagerung sollte, wenn möglich, nur wenige Tage dauern. Zur Konservierung und Behandlung von Wurzelproben gibt BÖHM (1979) genaue Hinweise. Die Wurzeln direkt nach Entnahme aus dem Boden oder Substrat zu testen, wäre optimal. Dazu ist die Messung mit Wassergewicht gut geeignet.

✓ Zeitlich genau koordinierter Ablauf

Der chronologische Ablauf der Ernte der Wurzel, der Auswaschung, der Kraftmessung bis zu Nachuntersuchungen des Durchmessers und Quer- oder Längsschnitten soll taggenau vorgeplant werden. Sind mehrere Institute, Geräte und Personen involviert, sind Vorbereitungen rechtzeitig zu tätigen und genaue Termine zu vereinbaren. Die Zeitspanne einer möglichen Lagerphase ist mit zu dokumentieren.

✓ Dokumentation der Wurzelherkunft

Neben Substrat und Pflanzenart ist auch von Interesse, aus welchem Teil des Wurzelsystems die Probe kommt. Deswegen ist die Aufnahme des ganzen unterirdischen Pflanzenteils interessant. Außerdem unterscheiden sich die Eigenschaften von Wurzeln nach der Anzahl von Seitenwurzeln, der Lage im Wurzelsystem, der Verzweigungsordnung und ihrer Wuchsrichtung (siehe Seite 18). An diese Angaben anknüpfend, können mechanische Tests mit mikroskopischen Zelluntersuchungen verbunden werden.

Ebenso wichtig wie die Dokumentation vor dem Experiment sind die Nachuntersuchungen an der getesteten Wurzel.

Da die Frage nach einem Wurzelschergerät, das zuverlässige, reproduzierbare Daten liefert, offen bleibt, folgen nun Ideen zur Anpassung des Geräts.

Verbesserungsvorschläge zum Wurzelschergerät

Nach erfolgten Anpassungen ist es zu empfehlen, 10 – 20 ähnliche Wurzelproben zu testen und die Streuung der Daten festzustellen. Damit kann die Wirksamkeit der Maßnahme überprüft werden.

✓ Stärke der beweglichen Platte erhöhen

So ist bei den Wurzeln durch höheren Druck von oben das Hineinziehen in den Spalt unwahrscheinlicher, der Spalt bleibt konstant und die Platte hebt sich nicht so leicht. Die Gewichte, die bisher aufgelagert werden mussten, können eventuell wegfallen. Der Nachteil hier ist, dass die Wurzel noch länger sein müsste.

✓ Aufhängung für größere Behälter

Bei Wurzeln mit stärkerem Durchmesser muss mehr Wasser aufgefangen werden. Dazu sind größere Behälter notwendig. Die Aufhängung kann für solche adaptiert werden.

Gewichte vor oder während der Messung in den Behälter zu legen, kann zu Messungsverfälschungen führen, da ruckartige Kräfte wirken können. Nach bisherigen Erfahrungen müssen die Gewichte auch recht schwer sein, um die Menge an Wasser bedeutend zu verringern.

Die zuverlässigere Methode wäre, größere Behälter anzuhängen. Dabei kann auch probiert werden, den Durchfluss zu erhöhen, um die Zeitspanne des Experiments einzudämmen.

✓ Materialwahl statt Nylonschnur

Die Verbindung zwischen beweglicher Platte und Kübel soll stabil, möglichst ohne Dehnung und ohne Federung sein. Die bisherige Nylonschnur mit einem Durchmesser von 1,7 mm ist für Wurzeln über 3 mm zu schwach. Eine dickere Schnur oder ein anderes Material müsste gewählt werden. Bei dickeren Schnüren muss darauf geachtet werden, dass die Schnur weiterhin gut in der Umlenkrolle geführt werden kann, um zusätzliche Reibungskräfte zu vermeiden. Die Länge der Schnur und damit der Dehnungsparameter des Materials können berücksichtigt werden.

✓ Umbiegen der Wurzel im Schergerät

Um die Wirkung von Kräften in verschiedene Richtungen zu minimieren, sollte der Scherspalt so klein wie möglich sein. Eine weitere Reduzierung wäre besser. Damit in Verbindung kann auch überlegt werden, ob eine Messung an Wurzeln unter 1 mm Durchmesser notwendig ist. Dieser Durchmesserbereich scheint mit Kraftmessungen schwierig definierbar. Hier können ev. mikroskopische Untersuchungen mehr Aufschluss geben.

✓ Fixierung der Wurzel im Schergerät

Die Fixierung der Wurzelprobe bleibt auch mit den Klemmen ein Problem, da die organische Form nicht gut genug in den Bohrlöchern sitzt. Wenn der Spalt eng genug ist, kann die Anwendung von Fixierungsstoffen, wie eine Art Silikon, überlegt werden.

Weiters kann versucht werden, die Wurzel mit einem Gewicht zu beschweren (negative Auflast) und so auf Zug vorzubelasten. Wenn dadurch das Festsitzen bei einem Scherversuch gegeben ist, können Vorgänge bei einer Hangrutschung ebenfalls simuliert werden.

Falls die Fixierung nicht hinreichend möglich ist, schlage ich vor, den Geräteaufbau so zu gestalten, dass das Umbiegeverhalten genauer dokumentiert werden kann und dies als Forschungsziel definiert wird. Hier können genauere Längenmessungen oder ein durchsichtiges Material und damit die visuelle Beobachtbarkeit während des Schertests helfen.

Verbesserungsvorschläge zum Experimentablauf

✓ Scherweg aufzeichnen

Die Größe des zurückgelegten Weges während des Scherprozesses kann hilfreich sein, um Dehnungen berücksichtigen zu können. Wenn die Wurzel gedehnt wird, können die Ergebnisse angewandt werden, um die Kraftwirkung bei Umbiegen während der Erosion im Hang nachvollziehen zu können. Bei dem Ziel, reine Scherkräfte zu messen, soll nur der Weg des Wurzeldurchmessers zurückgelegt werden. Es ist zu empfehlen, bei allen Messungen den Weg mit aufzuzeichnen.

✓ Bestimmen des Durchmessers

Da die Wurzeln durch den Schervorgang gequetscht werden, ist es zu empfehlen, im Vorhinein den Durchmesser der Stelle zu bestimmen, an der die Wurzel getestet wird. Dies verringert Fehleinschätzungen des Durchmessers und erhöht dadurch die Genauigkeit der weiteren Berechnungen der Scherspannung.

Wie die Stelle an der Wurzel markiert und passgenau in das Messgerät eingespannt werden kann, soll Gegenstand weiterer Forschungen sein.

Interdisziplinäre Teambildung

Der zukünftige Forschungsbedarf betrifft alle involvierten Fachdisziplinen. Eine interdisziplinäre Teambildung ist zu empfehlen. Es finden sich spezielle Aufgaben zur detaillierten Verbesserung des Schergeräts für technische Disziplinen. Die Nachbearbeitung der Proben unter dem Mikroskop richtet sich an die botanische Forschung. Bei der Beobachtung und dem Verständnis zu Erosions- und Rutschvorgängen im Hang sowie der Kraftbeanspruchung der Wurzel treffen sich Fachgebiete aus Geotechnik, Ingenieurbiologie und Biomechanik.

Diese Masterarbeit hat einen ersten Rahmen definiert, in dem sich die Scherkräfte von Feinwurzeln des Feldahorns bewegen.

Das Forschungsziel wurde nicht erreicht, genaue Angaben über Scherkräfte und Scherspannungen im Verhältnis zum Wurzeldurchmesser machen zu können. Fehler in der Versuchsplanung und am Messgerät wurden erkannt und möglichst genau besprochen.

Das Messgerät ist nicht geeignet, um die reinen Scherkräfte an der gerade gerichteten Wurzel zu bestimmen, simuliert jedoch das Umbiegen und Reißen der Wurzel unter der Einwirkung von Scherprozessen, wie sie in Rutsch- und Kriechhängen vorkommen.

Das Verständnis des Verhaltens der Wurzel im Messgerät ist gegeben und wurde umfassend dargestellt. Damit lassen sich bei einer genaueren Versuchsplanung Daten gewinnen, die aufgrund des Wurzelmaterials noch besser nachvollziehbar sind und dadurch bessere Anwendung in der Praxis finden können.

Direkte Vergleiche von Rahmenscherversuchen an bewurzelten Bodenproben und Tests an Einzelwurzeln aus demselben Versuchsaufbau mit Pflanzkisten würden die Wirkung der Pflanzenwurzeln auf eine verbesserte Scherfestigkeit von Hängen und Böschungen weiter beleuchten. Substrate und Pflanzenauswahl können je nach Interesse variieren.
13 Literaturverzeichnis

ABDULLAH, Mahamad Nordin, OSMAN, Normaniza und ALI, Faisal Haji (2011) Soil-root Shear Strength Properties of Some Slope Plants in Sains Malaysiana 40(10)(2011) Seite 1065–1073, http://repository.um.edu.my/10917/1/2011-%20Soilroot%20Shear%20Strength%20Properties%20of%20Some%20Slope%20Plants.pdf, am 5.1.2015

ABE, Kazutoki und ZIEMER, Robert R. (1991) Effect of Tree Roots on Shallow-Seated Landslides in USDA Forest Service, http://users.humboldt.edu/rziemer/pubs/Ziemer91e.PDF, am 2.1.2015

ALVAREZ, Sandra (unveröffentlicht) Dissertation am Institut für Ingenieurbiologie und am Institut für Geotechnik an der Universität für Bodenkultur, Arbeitstitel "Scherfestigkeit von Böden unter Berücksichtigung von Wurzeln"; Betreuung: Univ.Prof. Dr.Ing. Wei Wu, O.Univ.Prof. Dr. Florin Florineth

BÖHM, Wolfgang (1979) Methods of Studying Root Systems, Ecological Studies 33, Springer Verlag

BÖLL, Albert und GRAF, Frank (2001) Nachweis von Vegetationswirkungen bei oberflächennahen Bodenbewegungen – Grundlagen eines neuen Ansatzes in Schweizerische Zeitschrift fur Forstwesen: 2001/1, Vol. 152, No. 1, Seiten 1-11, http://www.szfjfs.org/doi/pdf/10.3188/szf.2001.0001, am 5.1.2015

BURROUGHS, Edward R. und THOMAS, Byron R. (1977) Declining root strength in Douglas-fir after felling as a factor in slope stability in USDA Forest Service Research Paper INT-190, https://archive.org/stream/decliningrootstr190burr#page/10/mode/2up, am 5.1.2015

CHAFFEY, Nigel (2002) Secondary Growth of Roots: A Cell Biological Perspective in Plant Roots – The hidden half, Hrsg. WAISEL, Yoav et. Al (2002) 3. Auflage, erschienen bei Marcel Dekker, Inc., New York, Basel, Seiten 93 – 111

CZICHOS, Horst (2012) Hütte – das Ingenieurwissen, Springer Vieweg, Onlineressource des Bibliothekkatalogs der Universität für Bodenkultur Wien, http://permalink.obvsg.at/bok/AC08991463, am 5.1.2015

EISENMANN Jeannine (2015) Ingenieurbiologische Ufersicherung an Binnenwasserstraßen – Untersuchungen zur geotechnischen Standsicherheit, Dissertation am Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau an der Universität für Bodenkultur Wien, Betreuung: O.Univ.Prof. Dr. Florin Florineth

EVERT, Ray F., ESAU, Katherine und EICHHORN, Susan E. (2009) Esau's Pflanzenanatomie, hrsg. von LANGENFELD-HEYSER, Rosemarie, 3. Auflage, erschienen im de Gruyter Verlag, Berlin (u.a.)

GENET, Marie, STOKES, Alexia, SALIN, Franck, MICKOVSKI, Slobodan, FOURCAUD, Thierry, DUMAIL, Jean-Francois und VAN BEEK, Rens (2004) The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots in Plant and Soil (2005) No.278, Seiten 1 – 9,

http://scholar.google.at/scholar_url?url=http://www.researchgate.net/publication/225829878_ The_influence_of_cellulose_content_on_tensile_strength_in_tree_roots/file/e0b4951fe74006bfc f.pdf&hl=de&sa=X&scisig=AAGBfm30D5PubgKm87SXMbvPcxTlk1XiKw&oi=scholarr&ei=kLeqVNz -DoisPJSGgaAD&ved=0CB8QgAMoADAA, am 5.1.2015

HÄHNE, Karl (1991) Der Einfluss von Gräser- und Gehölzwurzeln auf die Scherfestigkeit von Böden und damit auf die Standsicherheit von Hängen und Böschungen, Dissertation am Institut für Landschaftsbau – Fachbereich Landschaftsentwicklung – der Technischen Universität Berlin, online verfügbar http://repository.tudelft.nl/view/hydro/uuid%3A305ac616-3cb1-4e8c-b8ca-928e302e8b09, am 5.1.2015

HAGER, Christoph (2012) Zusammenfassung Bodenmechanik aus dem Frühjahrsemester 2012, Departement Bau, Umwelt und Geomatik, ETH Zürich, http://blogs.ethz.ch/chager/files/2012/08/ZF-Bodenmech.pdf, am 8.1.2015

LANG, Hans-Jürgen, HUDER, Jachen und AMANN, Peter (1996) Bodenmechanik und Grundbau, 6. überarb. und erw. Auflage, Springer Verlag Berlin (u.a.)

LÜTTGE, Ulrich (2012) Botanik - die einführende Biologie der Pflanzen, Herausgeber: Lüttge, Ulrich und Kluge, Manfred, 6. Auflage (1936-2012), Wiley VCH Verlag, Weinheim

KATZENBACH, Rolf und WERNER, Anke (2007) Erhöhung der Standsicherheit von Deichen und Dämmen durch den Bewuchs; Konferenz- oder Workshop-Beitrag beim 1. Departmentkongress Bautechnik und Naturgefahren, Hrsg: BOKU Wien, Department für Bautechnik und Naturgefahren. Redaktion: Ulrike Raich, erschienen bei Ernst & Sohn, Berlin, Verlag für Architektur und Techn. Wiss., 2007

KERSTENS, Sven, DECRAEMER, Willem F., VERBELEN, Jean-Pierre (2001) Cell Walls at the Plant Surface behave mechanically like fiber-reinforced composite materials, in Plant Physiol. Vol 127 (2001), http://www.plantphysiol.org/content/127/2/381.full.pdf+html, am 5. 11. 2014

KUTSCHERA, Lore und LICHTENEGGER, Erwin (2013) Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher, 2. Auflage, Stocker Verlag Graz

MAKAROVA, O.V., COFIE, P. und KOOLEN, A.J. (1997) Axial stress–strain relationships of fine roots of Beech and Larch in loading to failure and in cyclic loading in Soil and Tillage Research Volume 45, Issues 1–2, 11 May 1998, Seite 175–187, http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0933363097000172, am 5.1.2015

NORRIS, Joanne E. (2005) Root reinforcement by hawthorn and oak roots on a highway cut-slope in Southern England in Plant and Soil, No. 278, Seiten 43 - 53

O`LOUGHLIN, Colin und ZIEMER, Robert R. (1982) The importance of root strength and deterioration rates upon edaphic stability in steepland forests, http://www.fs.fed.us/psw/publications/ziemer/Ziemer82.PDF am 5.1.2015

POLLEN, Natasha (2005) Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks: Accounting for soil shear strength and moisture, in Catena Journal 69 (2007), Seiten 197-205, http://www.redesign.dev.entrix.com/documents/doc_lib/pollen_catena_2007.pdf, am 11.10.2014

POLOMSKI, Janina und KUHN, Nico (1998) Wurzelsysteme. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. Bern, Stuttgart, Wien

RAVEN, Peter H., EVERT, Ray F. und EICHHORN, Susan E. (2000) Biologie der Pflanzen, 3. Auflage, erschienen im de Gryter Verlag, Berlin (u.a.)

RIESTENBERG, Mary M.(1994) Anchoring of Thin Colluvium by Roots of Sugar Maple and White Ash On Hillslopes in Cincinnati in U.S. Geological Survey Bulletin 2059-E, http://pubs.usgs.gov/bul/2059e/report.pdf, am 5.1.2015

SCHEWE, Heidrun (2000): Biomechanik – Wie geht das?, Thieme Verlag Stuttgart

SCHMIDT, K.M., ROERING, J.J., STOCK, J.D., DIETRCH, W.E., MONTGOMERY, D.R. und SCHAUB, T. (2001) The variability of root cohesion as an influence on shallow landslide susceptibility in the OregonCoast Range in Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38(5), Seite 995 – 1024, http://eps.berkeley.edu/~bill/papers/104.pdf, am 5.1.2015

SIMON, Victoria (2013) Wachstumsuntersuchungen an Acer campestre mit unterschiedlich eingekürzten Wurzeln und Sprossen, Masterarbeit am Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Universität für Bodenkultur, Wien, Datensatz online verfügbar unter http://permalink.obvsg.at/bok/AC11038731, am 5.1.2015

STOKES, Alexia (2002) Biomechanics of Tree Anchorage in Plant Roots – The hidden half, Hrsg. Waisel, Yoav et. al (2002) 3. Auflage, erschienen bei Marcel Dekker, Inc., New York, Basel, Seiten 175 - 186

STÜCKELBERGER, Jürg (2000) Scherfestigkeit in durchwurzelten Bodenproben. Zwischenbericht Jürg Stückelberger, ETH Institutional Repository , ETH Zürich Bibliothek online, http://ecollection.library.ethz.ch/eserv/eth:30678/eth-30678-01.pdf, am 5.1.2015

WAISEL, Yoav und ESHEL, Amram (2002) Functional Diversity of Various Constituents of a Single Root System in Plant Roots – The hidden half, Hrsg. Waisel, Yoav et. al (2002) 3. Auflage, erschienen bei Marcel Dekker, Inc., New York, Basel, Seiten 158 – 174

WEINBERGER, Christine (2011) Einfluss der Vegetation auf die Stabilität des Bodens – eine Literaturstudie zum aktuellen Stand der Forschung; Masterarbeit am Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau an der Universität für Bodenkultur, Betreuung: O.Univ.Prof. Dr. Florin Florineth und DI Walter Lammeranner ZIEMER, Robert R. und SWANSTON, Douglas N. (1977) Root Strength changes after logging in Southeast Alaska in USDA Forest Service Research Note Dezember 1977, http://www.fs.fed.us/psw/publications/ziemer/Ziemer77.PDF, am 2.1.2015

ZIEMER, Robert R. (1981) Roots and the stability of forested slopes, in Erosion and Sediment Transport in Pacific Rim Steeplands. I.A.H.S. Publication No. 132, S. 343-361 Christchurch, http://www.fs.fed.us/psw/publications/ziemer/ZiemerIAHS.PDF, am 5.1.2015

14 Abbildungsverzeichnis

		Seite
Abb. 2.1	Schematische Darstellung des Wurzelschergeräts in der Aufsicht (BOKU, 2014)	6
Abb. 2.2	Schematische Darstellungen des Wurzelschergeräts im Schnitt (BOKU, 2014)	6
Abb. 2.3	Verformung einer Bodenprobe unter Auflast und Scherspannung (HAGER, 2012)	7
Abb. 2.4	Bruchkriterium und Formel nach Mohr-Coulomb (HAGER, 2012)	8
Abb. 2.5	Gebogene Wurzel im Bodenverbund (nach O´LOUGHLIN und ZIEMER, 1982)	10
Abb. 2.6	Ergebnisse von bewurzelten und unbewurzelten Bodenproben (KATZENBACH und WERNER, 2007)	12
Abb. 3.1	Schematisches Diagramm zur Verankerungswirkung von Wurzeln bei Bäumen (POLLEN, 2005)	15
Abb. 3.2	Kraftwirkung bei Wind im Wurzelsystem (nach STOKES, 2002)	16
Abb. 3.3	Krafteinwirkung auf Cellulosefibrillen verschiedenartiger Zellwände (KERSTENS et al., 2001)	18
Abb. 4.1	Feldahorn als Baum in einem Heckenverbund am Wegesrand (unbekannt, 2015, download von:	23
	http://www.sdw.de/cms/upload/bildergalerie/Feldahorn/Feldahorn_by-G.Aas.jpg, am 19.2.2015)	
Abb. 4.2	Blatt und Frucht des Feldahorns (unbekannt, 2015, download von:	24
	http://www.sdw.de/presse/bildarchiv/bildarchiv-feldahorn.html?start=&view=upload%2F	
	bildergalerie%2FFeldahorn%2FFeldahornblatt_Frucht_by-L.Gssinger.JPG, am 19.2.2015)	
Abb. 4.3	Feldahorn im Heckenverbund in Herbstfärbung (KASPARI, Jörg, Deutschland, 2013; mit freundlicher Erlaubnis gedownloadet von:	24
	http://farm4.static.flickr.com/3806/11055495284_71385a5dc9_m.jpg, am 19.2.2015)	
Abb. 4.4	Zeichnungen des Wurzelsystems des Feldahorns (KUTSCHERA und LICHTENEGGER, 2013)	26
Abb. 4.5	Primärer Aufbau der Wurzel des Feldahorns (KUTSCHERA und LICHTENEGGER, 2013)	27
Abb. 4.6	Sekundärer Aufbau der Wurzel des Feldahorns (KUTSCHERA und LICHTENEGGER, 2013)	28
Abb. 5.1	Systematik und Entwicklung der Wurzelsysteme (POLOMSKI und KUHN, 1998)	29
Abb. 5.2	Wurzelanatomie (EVERT et al., 2009)	31
Abb. 5.3	Lage des Casparyschen Streifens an der transversalen Zellwand (EVERT et al., 2009)	32
Abb. 5.4	Struktur der pflanzlichen Zellwand (nach RAVEN et al., 2000)	34
Abb. 5.5	Ergebnisse zu Zugfestigkeit und Celluloseanteil der Wurzeldurchmesser (GENET et al., 2004)	37
Abb. 6.1	Wurzelstock des Feldahorns (BOKU, 2014)	43
Abb. 6.2	Wurzelprobe des Feldahorns beim Waschen (BOKU, 2014)	43
Abb. 6.3	Wurzelprobe nach dem Wasserbad (BOKU, 2014)	44
Abb. 6.4	Bohrlöcher des Wurzelschergerät (BOKU, 2014)	45
Abb. 6.5	Schnurdehnung während der Kraftmessung (BOKU, 2014)	47
Abb. 6.6	10L-Kübel (BOKU, 2014)	47
Abb. 6.7	20L-Kübel (BOKU, 2014)	47
Abb. 6.8	Schnurdehnung in Abhängigkeit von der Kraft, aufgezeichnet an der Kraftmessdose (BOKU, 2014)	48
Abb. 7.1	Skizzen zum Versuchsaufbau des Wurzelschergeräts (BOKU, 2014)	49
Abb. 7.2	Verwendete Waage (BOKU, 2014)	53
Abb. 7.3	Hinweise auf die zu Beginn zu überprüfenden Details für einen störungsfreien Versuch (BOKU, 2014)	54
Abb. 7.4	Hinweise auf mögliche Störfaktoren (BOKU, 2014)	56

Abb. 8.1	bis Abb. 8.10 zeigen die Dokumentation eines Experiments (BOKU, 2014)	59 - 65
Abb. 9.1	Messergebnisse aus Aufzeichnung der Reibung im Schergerät (BOKU, 2014)	68
Abb. 10.1	Messergebnisse der maximalen Scherkraft der Wurzeln des Feldahorns (BOKU, 2014)	72
Abb. 10.2	Übersicht der Messergebnisse nach Durchmesserklassen (BOKU, 2014)	75
Abb. 10.3	Messergebnisse der maximalen Scherspannung der Wurzeln des Feldahorns (BOKU, 2014)	78
Abb. 10.4	Normalverteilung der max. Scherspannungswerte der eigenen Serien 1-5 (BOKU, 2014)	79
Abb. 11.1	Scherkraftmessungen im Vergleich der beiden Versuchsaufbauten (BOKU, 2014)	82
Abb. 11.2	Scherkraftmessungen im Vergleich mit Messungen von DI Alvarez (BOKU, 2014)	85
Abb. 11.3	Scherspannungsmessungen im Vergleich mit Messungen von DI Alvarez (BOKU, 2014)	86
Abb. 11.4	Vergleich der Normalverteilung mit DI Alvarez (BOKU, 2014)	87
Abb. 12.1	Halber Querschnitt einer abgescherten Wurzel aus den Versuchen (BOKU, 2014)	92

15 Tabellenverzeichnis

		Seite
Tab. 3.1	Ergebnisse nach ZIEMER (1981) für Wurzelproben mit dem Durchmesser 2 mm	20
Tab. 3.2	Ergebnisse nach ZIEMER (1981) für Wurzelproben mit dem Durchmesser 5 mm	20
Tab. 3.3	Ergebnisse nach ZIEMER (1981) für Wurzelproben mit dem Durchmesser 10 mm	20
Tab. 5.1	Vergleich der Charakteristika der Zellwand nach Gefäßtypen (nach CHAFFEY, 2002)	38
Tab. 10.1	Kennwerte der Wurzeldurchmesserklassen im Bereich von 0,45 - 1,94 mm (BOKU, 2014)	73
Tab. 10.2	Weitere Messergebnisse der Serien 1-5 (BOKU, 2014)	74
Tab. 10.3	Durchschn. Differenz der Scherkraft nach Gewichtmessung und Zeitmessung (BOKU, 2014)	77
Tab. 10.4	Mittelwerte und Standardabweichungen für bestimmte Datenbereiche (BOKU, 2014)	78
Tab. 10.5	Kennwerte für die Normalverteilung der Scherspannung der Serien 1-5 (BOKU, 2014)	79
Tab. 11.1	Vergleich der Kennwerte der Normalverteilungen mit Ergebnissen von DI Alvarez (BOKU, 2014)	84
Tab. 12.1	Messergebnisse für die Wurzeln der Feldahorns um 2 mm Durchmesser (BOKU, 2014)	89
Tab. 12.2	Messergebnisse für die Wurzeln der Feldahorns um 0,5 und 1 mm Durchmesser (BOKU, 2014)	90

16.1 Anhang I Messergebnisse mit Wassergewicht Serien 1-5 und DI Alvarez / Vergleich Messung Wassergewicht und Zeitnahme

SERIE 1 WASSERGEWICHT	10.07.2014 d	A	Wasser (o.K.)	F T	Zeitdauer	Wasser überprüft	Füberprüft	Differenz Gewicht-Zeit		Differenz Spannung zw Methoden
1_1a	mm 1,13	mm ² 0,99 2.41	g 2172,35 4330.22	N N/mm ² 21,31 21,44 42.48 17.66	sec 221,29	g 2212,9 4495,2	N 21,71 44.10	N 0,40		N/mm [*] 6,66 2.61
1_3;	1,43	1,59	3078,72	30,20 18,94	320,74	3207,4	31,46	1,26		2,49
1_5a 1_6a	0,88	0,60	2474,34 2011,27	24,27 40,37 19,73 32,81	257,18	2571,8 2119,6	25,23 20,79	0,96		20,29 8,33
1_7a 1_8a	1,05	0,87	1857,11 2103,32	18,22 21,04 20,63 26,27	217,52	1887,4 2175,2	18,52 21,34	0,30		4,37
1_11a 1_12a	0,90	0,64	2303,50 768,73	22,60 35,52 7,54 12,54	236,63	2366,3 733	23,21 7,19	0,62		10,22
1_14 1_15	1,20	1,13	2871,86 1613,30	28,17 24,91 15,83 18,28	295,41	2954,1 1652,9	28,98 16,21	0,81 0,39		1,89 5,14
1_16	0,95	0,71	1356,06	13,30 18,77	140,18	1401,8	13,75	0,45 durchschn. Diff [N] 0.74		4,94 durchschn. Diff [N/mm2] 5.69
SERIE 2 WASSERGEWICHT	10.07.2014	A	Wasser (o.K.)	F T	Zeitdauer	Wasser überprüft	F überprüft	Differenz Gewicht-Zeit		Differenz Spannung zw Methoden
2_1;	mm 0,75	mm² 0,44	g 2141,15	N N/mm ² 21,00 47,54	sec 215,85	g 2158,5	N 21,17	0,17		N/mm ² 6,56
2_4	???	0.29	1621.10	15.00 41.23	166.63	1666.3	16.25	0.44		
2_00	0,88	0,60	1954,03	19,17 31,88	201,41	2014,1	19,76	0,59		10,75
2_10;	1,25	1,23	3423,00	33,58 27,36	354,85	3548,5	34,81	1,23		9,37
2_11; 2_12;	1,05	0,87	1910,20 3909,26	18,74 21,64 38,35 21,70 33,24 38,64	197,30 397,00	1973 3970	19,36 38,95	0,62		4,67
2_14; 2_15;	1,63	2,07	5147,70 3180,37	50,50 24,35 31,20 19,56	531,96	5319,6 3283	52,19 32,21	1,69 1,01		3,67 4,58
2_111	1,05	0,87	2753,47	27,01 31,19	282,07	2820,7	27,67	0,66		31,19
	10.07.2014							durchschn. Diff [N] 0,78		durchschn. Diff [N/mm2] 8,69
WASSERGEWICH	18.07.2014				Zeitdauer sec					
						Wasser überprüft	F überprüft	Differenz Gewicht-Zeit		Differenz Spannung zw Methoden
3_1;	1,10	0,95	2055,54	20,16 21,22	206,52	g 2065,2	N 20,26	N 0,09		N/mm ² 4,93
3_2a 3_3a 3_4	0,75	0,44	1510,17 2251,42 3262,41	14,81 33,53 22,09 23,24 32,09 24,85	147,41	1474,1 2251,8 2265 2	14,46 22,09	0,35		8,78 11,89 4,72
3_44 3_54 4_14	1,30	1,33 1,13 5,94	2288,01 13137,00	22,45 19,85 128,87 21,70	230,63	2306,3	22,62	0,10 0,18 durchschn. Diff [N]	Schnur geriss	2,90 en ungenau!
4_31	1,88 3,75	2,76	4948,00 22172,80	48,54 17,58 217,52 19,69	533,30 1765,00	5333 17650	52,32 173,15	0,16 44,37	*	1,90
4_4a 4_5a	2,13	3,55	8775,95 11520,70	86,09 24,27 113,02 19,03	924,00	9240 12620	90,64 123,80	4,55		15,09
4_4	2,38	4,43	10090,70	98,99 22,34	1098,00	10980 *Zugabe von mehreren Gewichten, Zeitnahm	107,71 e berücksichtigt diese nicht	8,72		22,34
								durchschn. Diff [N] 17,11		durchschn. Diff [N/mm2] 8,24
								durchschn. Diff [N]		
SERIE 5 WASSERGEWICHT	23.07.2014	A	Wasser (o.K.)	F T	Zeitdauer	Wasser überprüft	F überprüft	Differenz Gewicht-Zeit		Differenz Spannung zw Methoden
5_1;	mm 1,05	mm² 0,87	g 1495,60	N N/mm² 14,67 16,94	sec 156,00	g 1560	N 15,30	N 0,63		N/mm ² 2,42
5_2i 5_3i	0,55	0,24	768,90	7,54 31,75 9,83 41,36	75,00 97,00	750 970	7,36 9,52	0,19 0,31		9,13
5_4 5_5 5_6	0.50	0.20	1018 10	9 99 50 87	99.00	990	9.71	0.28		10.71
5_00 5_70 5_80	0,75	0,44	1408,45	13,82 31,28	138,18	1381,8	13,56	0,26		4,44
5_9; 5_10;	1,55	1,89	2786,65	27,34 14,49	279,00	2790	27,37	0,03		0,12
5_11; 5_12; 5_12;	1,25	1,23	2870,50	28,16 22,95	287,07	2870,7	28,16	0,00		4,16
5_13c 5_14c 5_15c	0,95	0,55	1831,10 3261,70	23,43 23,03 17,96 25,34 32,00 36,95	182,85	1828,5 3290,7	25,05 17,94 32,28	0,03		7,10
5_16	1,13	0,99	1545,68	15,16 15,25	153,07	1530,7	15,02	0,15		4,13
5_1/6	1,75	2,41	2751,20	20,55 11,22	272,74	2727)4	20,70	0,20		<i>P</i> .
5_176 5_18; 5_9	1,50	1,77	3243,87 10812,76	11,22 31,82 18,01 106,07 16,18 26,62	. 324,74	3247,4 10820	31,86 106,14	0,03		9,85 3,03
5_184 5_184 5_197 5_200 5_200 5_200 5_210 5_220	1,50 3,00 0,75	2,41 1,77 7,07 0,44	3243,87 10812,76 1649,14	31,82 18,01 106,07 15,01 16,18 36,62	324,74 1082,00 164,63	3247,4 10820 1646,3	31,86 106,14 16,15	0,03 0,07 0,03		9,85 3,03 19,83
5_18 5_18 5_19 5_200 6_11 5_22	1,50 3,00 0,75	2,41 1,77 7,07 0,44	3243,87 10812,76 1649,14	1,12 31,82 18,00 106,07 15,03 16,18 36,62	324,74 1082,00	3247,4 10820 1646,3	31,86 106,14 16,15	0,03 0,07 0,07 0,03 durchschn. Diff [N] 0,18		9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] 6,79
DI Sandra Alvarez	1,55 3,00 0,75	2,44 1,77 7,07 0,44	3243,87 10812,76 1649,14	1,12 3,1,82 16,07 16,07 16,18 36,62 16,18 36,62	324,74 1082,00 164,63	3247,4 10820 1646,3	31,86 106,14 16,15	0,03 0,07 0,03 durchschn. Diff [N] 0,18		9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] 6,75
DI Sandra Alvarez	1,55 1,55 3,00 0,75 18.11.2014 d mm	A mm ²	2731,20 3243,87 10812,76 1649,14 Wasser (o.K.) g	F T N N/mm ²	224,74 1082,00 164,63 Zeitdauer sec	2247,4 10820 1646,3 Wasser überprüft Wasser überprüft	31,86 106,14 16,15 F überprüft	0,03 0,07 0,03 durchschn. Diff [N] 0,18 Differenz Gewicht-Zeit		9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] 6,79 Differenz Spannung zw Methoden
5_18 5_18 5_19 5_20	1,55 3,00 0,75 18.11.2014 d mm 1,63	A mm ² 2,07	2131,20 3243,87 10812,76 1649,14 Wasser (о.К.) g 5713,90 6647,20	F T N/mm ² 56.05 65,21 31,42	224,74 324,74 1082,00 164,63 Zeitdauer sec 667,85	2247,4 10820 1646,3 Wasser überprüft & 6678,5	51,86 31,86 106,14 16,15 F überprüft N 65,52	0,03 0,07 0,03 durchschn. Diff [N] 0,18 Differenz Gewicht-Zeit N 0,31		9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] 6,79 Differenz Spannung zw Methoden
DI Sandra Alvarez SERIE 6 WASSERGEWICHT	1,50 3,00 0,75 18.11.2014 d mm 1,63 1,63 1,88 1,88	A mm ² 2,07 2,07 2,07 2,76	2131,20 3243,87 10812,76 1649,14 Wasser (o.K.) g \$713,90 6647,20 5692,00 7002,95 7178 30	F T N N/m ² 55,01 31,42 18,00 166,07 15,00 16,18 36,62 F T N N/m ² 56,02 31,44 55,84 26,92 66,70 24,88 70,92 75,55	224,74 1082,00 164,63 Zeitdauer sec 667,85 570,18 667,28	2247,4 10820 1646,3 Wasser überprüft & & & & & & & & & & & & & & & & & & &	F überprüft N 65,53 68,93 68,93 68,93 68,93 68,93 68,93 68,93	0,03 0,07 0,03 durchschn. Diff [N] 0,18 Differenz Gewicht-Zeit N 0,31 0,31 0,33 0,55		9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] 6,79 Differenz Spannung zw Methoden N/mm
DI Sandra Alvarez SERIE 6 WASSERGEWICH	1,55 1,50 3,00 0,75 0,75 0,75 0,75 0,75 0,75 0,75 1,63 1,63 1,63 1,68 1,88 1,88 1,55 1,55 1,55	2,74 1,777 7,07 0,44 0,44 0,44 0,44 0,44 0,44	2 3243,87 10812,76 1649,14 Wasser (o.K.) 8 5713,90 6647,20 592,00 7002,95 7178,30 6372,12 4557,45	F T N N/mm ² 56,05 56,21 31,44 55,84 26,92 56,52 31,44 55,84 26,92 66,70 24,88 70,42 25,50 62,51 33,13 44,71 25,33	224,74 324,74 1082,00 164,63 22eitdauer sec 667,85 570,18 697,18 712,41 633,30 450,30	2027,4 3227,4 10820 1646,3 Wasser überprüft 8 6678,5 5701,8 6971,8 6971,8 7124,1 6333 4503	F überprüft 65,52 55,93 68,39 62,13 44,17	0,03 0,07 0,03 durchschn. Diff [N] 0,18 Differenz Gewicht-Zeit N 0,31 0,31 0,33 0,53 0,53 0,53 0,53		9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] 6,75 Differenz Spannung zw Methoden N/mm
DI Sandra Alvarez SERIE 6 UNASSERGEWICHT DI Sandra Alvarez SERIE 6 UNASSERGEWICHT G 11 G 12	1,55 3,00 3,00 0,75 18.11.2014 d mm 1,63 1,63 1,63 1,68 1,88 1,88 1,88 1,55 1,38 1,38	A A mm ² 2,07 2,07 2,07 2,76 1,88 1,77 1,48 1,77	2013.87 3424,87 10882,76 1649,14 Wasser (o.K.) 8 5713.90 6647,20 5692,00 7002,95 7178,30 6437,21 5595,70 5396,70 5396,70 4734,90	F T S5,82 18,00 106,07 15,00 16,18 36,62 F T N N/mm² 56,05 16,521 65,70 24,88 70,42 25,52 62,51 33,13 44,71 25,33 52,94 35,65	2eitdauer 2eitdauer sec 570,18 667,85 570,18 697,18 697,18 633,30 533,18 647,25 533,18	2327,4 3227,4 10820 1646,3 Wasser überprüft 8 6678,5 5701,8 6971,8 6971,8 6971,8 6971,8 6971,8 6971,8 34533 6971,8 6971,8 6971,9 6971,8 6971,9 69751,9 69751,9 6971,9 6971	F überprüft N 5,52 F überprüft N 6,5,52 5,5,93 6,8,39 6,8,49 6,	0,03 0,07 0,03 durchschn. Diff [N] 0,18 Differenz Gewicht-Zeit N 0,31 0,10 0,11 0,13 0,13 0,13 0,13 0,14 0,15 0,13 0,53 0,53 0,53 0,54 0,64		9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] 6,75 Differenz Spannung zw Methoden N/mm
DI Sandra Alvarez SERIE 6 USASSERGEWICHT DI Sandra Alvarez SERIE 6 USASSERGEWICHT G 1 G 1 G 2 G 3 G 3 G 3 G 4 G 5 G 6 G 6 G 6 G 6 G 6 G 7 G 7 G 7 G 7 G 7 G 7 G 7 G 7 G 7 G 7	1,50 3,00 0,75 18.11.2014 d mm 1,63 1,63 1,63 1,63 1,63 1,55 1,55 1,55 1,55	2,72 1,777 7,07 0,44 A mm² 2,07 2,07 2,07 2,07 2,07 2,07 2,07 2,17 7 1,89 1,77 1,48 4 1,77	2343,87 3343,87 10812,76 1649,14 Wasser (o.K.) 8 5713,90 6647,20 5692,00 7002,95 7178,30 66372,12 4557,45 5396,70 4734,90	F Т S1,82 18,001 106,07 15,001 16,18 36,62 F T N N/mm² 56,05 16,42 65,21 31,44 55,84 26,92 68,70 24,88 70,42 25,53 62,51 33,13 44,71 25,33 52,94 35,65 46,45 26,25	224,74 1082,00 164,63 2eitdauer sec 667,85 570,18 10,712,41 633,30 450,30 533,18 467,29	2247,4 10820 1646,3 1646,3 Wasser überprüft	F überprüft F überprüft N 65,52 5,33 68,33 68,38 62,13 64,17 5,23 68,34 64,17 5,23 68,34 62,13 68,14 65,52 68,33 68,38 62,13 68,38 6	0,03 0,07 0,03 durchschn. Diff [N] 0,18 Differenz Gewicht-Zeit N 0,31 0,31 0,33 0,33 0,33 0,53 0,64		9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] 6,79 Differenz Spannung zw Methoden N/mm [*]
3_1A 3_18 5_19 5_20 200 201 3_2 01 Sandra Alvarez SERIE 6 WASSERGEWICH1 6_11 6_21 6_31 6_41 6_52 6_62 6_63 6_64 6_63 6_63 6_63 6_63 6_63 6_64	1,50 1,50 3,00 0,75 18.11.2014 d mm 1,63 1,63 1,63 1,88 1,55 1,50 1,50 1,50	2,74 1,777 7,07 0,44 0,44 0,44 0,44 2,07 2,07 2,07 2,76 2,76 2,76 2,76 2,76 2,77 1,48 1,777	23243,87 10812,76 1649,14 Wasser (o.K.) 8 5713 00 6647,20 5692,00 7002,95 7178,30 6647,20 7002,95 7178,30 6647,20 4755,45 5396,70 4734,90	F T N N/mm² 56.05 65.21 65.70 24.88 70,42 25.50 65,21 31,44 55.84 26,52 65,21 31,44 55,84 26,52 64,71 25,30 64,71 25,30 52,94 35,66 46,45 26,22	2eitdauer Sec 507,18 570,19 570,19	2247,4 3247,4 10820 1646,3 1646,3 Wasser überprüft 8 6678,5 5701,8 6678,5 5701,8 6971,8 6971,8 7124,1 6333 4503 5331,8 4672,9 4672,9	F überprüft 6,52 F überprüft 6,55 6,52 6,53 6,33 6,83 6,83 6,83 6,83 6,83 6,98 6,213 44,17 52,30 45,84	0,03 0,07 0,03 durchschn. Diff [N] 0,18 Differenz Gewicht-Zeit N 0,31 0,31 0,31 0,33 0,33 0,53 0,53 0,53 0,64 0,61 0,61 0,61 0,61 0,61 0,61 0,61 0,61		9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] 6,75 Differenz Spannung zw Methoden N/mm
3_14 3_18 5_19 5_20 2 3 3 01 Sandra Alvarez SERIE 6 WASSERGEWICHT 6 1 6 3 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 91 6 6 6 91 6 92 6 93 6 94 6 94 95 94 95 94	1,50 3,00 0,75 18.11.2014 d mm 1,63 1,63 1,63 1,63 1,63 1,63 1,50 1,50 1,50 1,50	2,72 1,777 0,04 A A A A A A A A A A A A A A A A A A 1,777 2,070 2,766 2,276 2,276 2,276 2,276 2,177 2,777 2,707 2,	2 3343,87 3343,87 10812,76 1649,14 8 5713,90 6647,20 5592,00 7002,95 7178,30 6637,21 45594,50 6372,12 4557,45 5396,70 4734,90	F T N N/mm ² 55,01 65,21 65,21 65,21 65,21 70,42 68,70 24,88 70,42 25,58 64,70 24,88 70,42 25,51 33,11 44,71 25,33 52,94 35,62 26,25 26,2	224,74 1082,00 164,63 22eitdauer sec 667,88 570,18 1697,18 1633,30 450,30 3533,18 467,29	3247,4 10820 1646,3 1646,3 Wasser überprüft & & & & & & & & & & & & &	F überprüft	0,03 0,07 0,03 durchschn. Diff [N] 0,18 Differenz Gewicht-Zeit N 0,31 0,31 0,31 0,33 0,53 0,53 0,53 0,64 0,61 0,61 0,61 0,61		9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] 6,75 Differenz Spannung zw Methoden N/mm
3 14 5 18 5 20 1 1	1,50 3,00 0,75 18.11.2014 d mm 1,63 1,63 1,63 1,63 1,55 1,55 1,55 1,55 1,55 1,55 1,55 1,5	2,72 1,777 7,07 0,44 A mm ² 2,07 2,76 1,88 1,87 1,88 1,77 1,88 1,77 1,88 1,77 1,88 1,77 1,88 1,77 2,07 2,276 2,27	23243,87 3243,87 10812,76 1649,14 Wasser (o.K.) 8 5713,90 6647,20 5692,00 7002,95 7178,30 66372,12 4557,45 5592,60 4734,90 4734,90	F T S1,82 18,001 106,07 15,01 16,18 36,62 F T N N/mm² 56,05 31,44 58,70 24,88 70,42 25,55 62,51 33,13 44,71 25,30 52,94 35,65 46,45 26,25 F T N N/mm² Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y	Zeitdauer Sec Zeitdauer Sec Zeitdauer Sec Zeitdauer Zeitdauer Zeitdauer Sec Zeitdauer Sec		F überprüft F überprüft F überprüft F überprüft F überprüft	0,03 0,07 0,03 durchschn. Diff [N] 0,18 Differenz Gewicht-Zeit N 0,31 0,53 0,64 0,53 0,64 0,61 0,53 0,64 0,61 0,53 0,64 0,61 0,53 0,64 0,61 0,53 0,64 0,61 0,53 0,64 0,61 0,53 0,64 0,65 0,67 0,75 0,75 0,75 0,75 0,75 0,75 0,75 0,7		9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] Differenz Spannung zw Methoden
3_1A 5_18 5_20 5_20 <	1,50 1,50 3,00 0,75 18.11.2014 d mm 1,63 1,63 1,63 1,63 1,63 1,88 1,55 1,55 1,55 1,50 25.11.2014 d mm 1,88 1,55	2,74 1,777 7,07 0,44 A A mm ² 2,07 2,76 2,76 2,76 1,88 1,77 1,48 1,77 1,48 1,77 2,76 2,99	213.487 3243,877 10812,76 1649,14 Wasser (o.K.) g 5713,907 6647,207 5692,005 7002,957 7178,30 637,121 4557,455 5396,707 4394,90 4354,94 8104,377 13056,717 11143,54	F T S82 18,00 106,07 15,00 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,21 31,14 155,84 26,52 16,70 24,88 70,42 25,51 33,13 44,71 25,32 16,45 26,28 16,45 26,28 17,94 35,65 16,45 26,28 17,950 28,75 128,07 42,88 109,32 36,66	2eitdauer sec Zeitdauer sec Zeitdauer sec Zeitdauer sec Zeitdauer sec Zeitdauer sec S33,18 467,29 Zeitdauer sec	2027,4 3227,4 10820 1646,3 1646,3 Wasser überprüft 8 6678,5 5701,8 6971,8 6971,8 6971,8 4503 5331,8 4672,9 4734,9 4734	F überprüft	0,03 0,07 0,03 durchschn. Diff [N] 0,18 Differenz Gewicht-Zeit 0,10 0,31 0,10 0,31 0,10 0,31 0,53 0,53 0,53 0,53 0,53 0,53 0,54 0,64 0,61 0,61 0,61 0,61 0,61 0,61 0,61 0,61		9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] 6,75 Differenz Spannung zw Methoden
3_14 5_18 5_20 2 3	1,50 3,00 0,75 18.11.2014 d mm 1,63 1,63 1,63 1,63 1,63 1,63 1,63 1,50 1,55	A A mm ² 2,76 2,76 2,76 2,76 2,76 2,76 2,76 2,76	23243,87 33243,87 10812,76 1649,14 Wasser (o.K.) 8 5713,90 6647,20 5592,00 7002,95 7778,30 6637,212 4557,45 5592,00 4734,90 4734,90 4734,90 8 8 8 800,37 13054,71 11143,54 11705,00 8901,38	F T F T N N/mm² 56,05 16,607 65,21 31,42 56,75 31,42 66,70 15,01 70,42 25,50 66,70 24,88 70,42 25,50 62,51 33,11 44,71 25,32 64,45 26,25 46,45 26,25 70,42 25,30 70,94 25,32 71,94 35,65 46,45 26,28 9 10,932 109,32 36,60 114,83 28,88 87,32 31,66	2eitdauer Sec 2eitdauer Sec 2eitdauer Sec 2eitdauer Sec 2eitdauer Sec 2eitdauer Sec 2eitdauer Sec 3.570,18 3.30 4.67,29 4	23247,4 10820 1646,3 1646,3 1646,3 Wasser überprüft 8 6678,5 5701,8 6971,8 6971,8 7124,1 6133 4503 5311,8 4672,9 4734,1 4734,	F überprüft K K K K K K K K K K K K K	0,03 0,07 0,03 durchschn. Diff [N] 0,18 Differenz Gewicht-Zeit N 0,31 0,53 0,53 0,53 0,53 0,53 0,53 0,54 0,61 0,53 0,53 0,53 0,53 0,54 0,53 0,54 0,53 0,54 0,53 0,53 0,54 0,53 0,54 0,53 0,53 0,53 0,54 0,55 0,51 0,55 0,55 0,55 0,55 0,55 0,55		9,85 3,03 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] 6,79 Differenz Spannung zw Methoden
3_1A 5_18 5_20 7 3_10 3_10 3_11 <td>1,50 3,00 0,75 18.11.2014 d mm 1,63 1,63 1,63 1,55</td> <td>2,73 1,777 7,07 0,44 A mm² 2,07 2,76 1,88 1,87 1,88 1,87 1,87 1,88 1,87 2,76 2,76 2,76 2,76 2,27 2,27 2,27 2,2</td> <td>23243,87 3243,87 10812,76 1649,14 649,14 649,14 649,14 647,20 5692,00 702,85 7108,30 66372,12 4557,45 6592,00 4734,90 4734,90 4734,90 4734,90 4734,90 4734,90 8104,37 13054,71 11143,54 88104,37 13054,71 11143,54 8901,38 10268,00</td> <td>F T S1,82 18,00 106,07 15,01 16,07 15,01 16,07 15,01 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,19 36,62 16,10 1,44 5,84 26,92 66,70 24,88 70,42 25,55 62,51 33,13 44,71 25,30 52,94 35,65 46,45 26,25 128,07 42,88 103,32 36,62 114,83 28,88 87,32 31,63 100,73 32,06</td> <td>Zeitdauer sec Zeitdauer sec Zeitdauer sec Zeitdauer Zeitdauer Sec Sec Zeitdauer Sec Zeitdauer Sec Zeitdauer Sec Zeitdauer Sec Zeitdauer Sec Sec Zeitdauer Sec Sec Sec Sec Sec Sec Sec Sec Sec Sec</td> <td>2247,4 10820 1646,3 1646,4 1646,4 1646,3 1646,4 1646,4 1646,4 1646,4 1646,4 1646,4</td> <td>F überprüft F überprüft F überprüft F überprüft F überprüft F überprüft F überprüft N S 2,30 S 2,30</td> <td>0,03 0,07 0,03 durchschn. Diff [N] 0,18 Differenz Gewicht-Zeit N 0,31 0,31 0,33 0,33 0,33 0,33 0,33 0,53 0,64 0,61 0,61 0,61 0,61 0,61 0,61 0,61 0,61</td> <td></td> <td>9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] Differenz Spannung zw Methoden</td>	1,50 3,00 0,75 18.11.2014 d mm 1,63 1,63 1,63 1,55	2,73 1,777 7,07 0,44 A mm ² 2,07 2,76 1,88 1,87 1,88 1,87 1,87 1,88 1,87 2,76 2,76 2,76 2,76 2,27 2,27 2,27 2,2	23243,87 3243,87 10812,76 1649,14 649,14 649,14 649,14 647,20 5692,00 702,85 7108,30 66372,12 4557,45 6592,00 4734,90 4734,90 4734,90 4734,90 4734,90 4734,90 8104,37 13054,71 11143,54 88104,37 13054,71 11143,54 8901,38 10268,00	F T S1,82 18,00 106,07 15,01 16,07 15,01 16,07 15,01 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,19 36,62 16,10 1,44 5,84 26,92 66,70 24,88 70,42 25,55 62,51 33,13 44,71 25,30 52,94 35,65 46,45 26,25 128,07 42,88 103,32 36,62 114,83 28,88 87,32 31,63 100,73 32,06	Zeitdauer sec Zeitdauer sec Zeitdauer sec Zeitdauer Zeitdauer Sec Sec Zeitdauer Sec Zeitdauer Sec Zeitdauer Sec Zeitdauer Sec Zeitdauer Sec Sec Zeitdauer Sec Sec Sec Sec Sec Sec Sec Sec Sec Sec	2247,4 10820 1646,3 1646,4 1646,4 1646,3 1646,4 1646,4 1646,4 1646,4 1646,4 1646,4	F überprüft N S 2,30	0,03 0,07 0,03 durchschn. Diff [N] 0,18 Differenz Gewicht-Zeit N 0,31 0,31 0,33 0,33 0,33 0,33 0,33 0,53 0,64 0,61 0,61 0,61 0,61 0,61 0,61 0,61 0,61		9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] Differenz Spannung zw Methoden
3_1A 5_18 5_20 5_20 201	1,50 3,00 3,00 0,75 18.11.2014 d mm 1,63 1,63 1,63 1,63 1,63 1,63 1,63 1,50	2,72 1,77 7,07 0,44 A A mm ² 2,07 2,76 2,76 2,76 1,88 1,77 1,48 1,77 1,48 2,77 2,99 2,99 3,98 2,76 3,14 	213.487 3243,877 10812,76 1649,14 Wasser (o.K.) g 5713,90 6647,20 5692,00 7002,95 7178,30 6647,20 5692,00 7002,95 7178,30 6647,20 5692,00 7002,95 7178,30 6647,20 5692,00 8647,20 8647,20 870,20 4734,90 870,20 8104,37 1005,00 8001,38 10268,00	F T S3,82 18,00 106,07 15,00 16,18 36,62 F T N N/mm² 56,05 56,21 66,70 24,88 70,42 25,54 66,70 24,88 70,42 25,52 62,51 33,11 44,71 25,33 52,94 35,65 46,45 26,22 24,88 70,42 25,51 31,44 35,66 46,45 26,25 24,88 70,42 25,52 31,63 35,594 35,65 26,25 26,25 26,25 28,75 128,07 42,88 87,32 31,63 100,73 32,06 23,20	2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer 353,18 467,29 2eitdauer sec 2eitdauer 353,18 467,29 20,106,20 20,200,20 20,200,200,200,200,200,200	3247,4 13247,4 10820 1646,3 1646,3 Wasser überprüft 8 6678,5 5701,8 6971,8 7124,1 6333 5331,8 4503 5334,8 4672,9 4672,9 13565 13669 13691 13692 13693 131609 12102 9182 10613	F überprüft S S S S S S S S S S S S S	0,03 0,07 0,07 0,03 durchschn. Diff [N] 0,18 Differenz Gewicht-Zeit 0,31 0,01 0,31 0,33 0,53 0,64 0,61 0,61 0,61 0,61 0,61 0,61 0,75 0,43 0,43 0,43 0,43 0,43 0,43 0,43 0,43		9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] Differenz Spannung zw Methoden
3_1A 5_18 5_20 3_20	1,50 3,00 0,75 18.11.2014 d mm 1,63 1,63 1,63 1,63 1,63 1,63 1,50	A A mm ² 2,07 2,76 2,76 2,76 2,76 2,76 2,76 2,76 2,7	23243,87 33243,87 10812,76 1649,14 649,14 5711,300 6647,20 5692,000 70702,95 7778,300 6372,12 4557,45 5396,700 4734,90 9 10305,47,11 8 10305,17 10305,47,11 11143,54 110268,00	F T F T N N/mm² 56,05 16,07 65,21 31,42 70,42 25,50 65,21 31,44 58,84 26,92 66,70 24,88 70,42 25,50 62,51 33,11 44,71 25,32 46,45 26,25 46,45 26,26 F T N N/mm² 79,50 28,78 109,32 36,66 1100,73 32,06	2eitdauer Sec 2eitdauer Sec 2eitdauer Sec 2eitdauer Sec 2eitdauer Sec 2eitdauer Sec 2eitdauer Sec 2eitdauer Sec 2eitdauer Sec 3.30 3.53,31 4.67,29 2.67,29 3.57,018	- 3247,4 10820 1646,3 1646,3	F überprüft F überpr F F F F F F F F F F F F F	0,03 0,07 0,03 durchschn. Diff [N] 0,18 Differenz Gewicht-Zeit N 0,31 0,53 0,53 0,53 0,64 0,61 0,53 0,64 0,61 0,53 0,64 0,61 0,53 0,64 0,61 0,53 0,64 0,61 0,53 0,64 0,61 0,53 0,53 0,64 0,61 0,53 0,53 0,53 0,53 0,64 0,65 0,53 0,53 0,53 0,53 0,53 0,53 0,53 0,5		9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] 0,77 0,77 0,77 0,77 0,77 0,77 0,77 0,7
3 14 5 18 5 20 1 1	1,50 1,50 3,00 0,75 1,55 1,63 1,63 1,63 1,63 1,63 1,55 1	A mm ² 2,77 2,07 0,44 2,07 2,07 2,07 2,07 2,07 2,07 2,07 2,07	213.67 3243.87 3243.87 10812,76 1649,14 649,14 9713.90 6647,20 5692,00 702,85 710,800 6372,12 4557,45 5396,70 4734,90 9 13054,71 11143,54 11705,00 8104,37 10268,00 9	F T F T N N/mm² 56.05 31,62 65.21 31,64 25.605 31,64 65,21 31,44 58,70 24,88 70,42 25,55 62,51 33,31 44,71 25,30 52,94 35,65 46,45 26,25 70,950 28,75 70,950 28,75 128,07 42,88 109,32 36,62 114,83 28,88 70,32 32,06 144,71 25,30 52,94 35,65 128,07 42,88 109,32 36,62 114,83 28,86 100,73 32,06 100,73 32,06 100,73 32,06 100,73 32,06	Zeitdauer Sec Zeitdauer Sec Zeitdauer Sec Zeitdauer Sec Zeitdauer Zeitdauer Sec Zeitdauer Sec Zeitdauer Sec Zeitdauer Sec		F überprüft F überprüft F überprüft F überprüft F überprüft F überprüft N S S S S S S S S S S S S S S S S S S	0,03 0,07 0,03 durchschn. Diff [N] 0,18 Differenz Gewicht-Zeit N 0,31 0,03 0,04 0,04 0,05 0,05 0,05 0,05 0,05 0,05		9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden
3_1A \$_18 \$_20 \$_20 \$_20 \$_20 \$_20 \$_20 \$_20 \$_20 \$_20 \$_20 \$_20 \$_20 \$_20 \$_20 \$_20 \$_20 \$_20 \$_20 \$_20 \$_21 \$_21 \$_21 \$_21 \$_21 \$_21 \$_21 \$_21 \$_21 \$_21 \$_21 \$_21 \$_21 \$_21 \$_21 \$_21 \$_21 \$_22 \$_22 \$_22 \$_22 \$_22	1,50 1,00 3,00 0,75 1,01 18.11.2014 d mm 1,63 1,63 1,63 1,63 1,63 1,50	A mm ² 2,76 2,07 2,	2013.87 3243.87 10812,76 1649,14 Wasser (o.K.) g 57113,90 6647,20 5692,00 7002,95 71178,30 6647,20 5692,00 7002,95 71178,30 6372,12 4557,45 5396,70 4734,90 47	F T N N/mm² 56,05 31,82 16,18 36,62 F T N N/mm² 56,05 31,44 55,84 26,92 68,70 24,88 70,42 25,52 62,51 33,13 44,71 25,33 52,94 35,65 46,45 26,25 68,70 24,88 70,42 25,53 68,70 24,88 70,42 25,32 52,94 35,65 46,45 26,228 24,88 79,50 28,75 128,07 42,88 100,32 36,66 114,83 28,88 87,32 31,63 100,73 32,06 F T N N/mm² 100,62 48,52	2eitdauer Sec 2eitdauer Sec	3247,4 10820 1646,3 1646,3 467,9 8 6678,5 5701,8 6971,8 7124,1 6333 5331,8 4503 5331,8 4672,9 4672,9 13565 13565 13565 13565 10613 0 10613 0 0 10613 0 10834	F überprüft N 82,23 133,07 113,88 118,72 90,08 104,11 F überprüft N 106,77 106,77	0,03 0,07 0,03 durchschn. Diff [N] 0,18 Differenz Gewicht-Zeit N 0,10 0,31 0,31 0,31 0,33 0,33 0,48 0,64 0,61 0,61 0,61 0,61 0,61 0,61 0,61 0,61		9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden
3_1A 5_18 5_20 3_20	1,00 1,00 3,00 0,75 1,01 1,01 1,01 1,03 1,05 1,03 1,05 1,03 1,05 1,03 1,05	A A mm ² 2,07 2,07 2,07 2,07 2,07 2,77 2,77 1,88 1,77 1,77 1,77 1,77 2,77 2,76 2,77 2,79 2,99 3,98 2,76 3,144 2,97 2,97 3,144 2,97 2,97 3,144 2,97 2,97 3,144 2,97 2,97 3,147 2,76 2,97 2,97 3,147 2,76 2,77 2,77 2,76 2,77 2,76 2,77 2,76 2,77 2,76 2,77 2,76 2,77 2,76 2,77 2,76 2,77 2,76 2,77 2,77 2,76 2,77 2,76 2,77 2,76 2,77 2,76 2,77 2,76 2,76 2,77 2,76 2,76 2,77 2,76 2,77 2,76 2,77 2,76 2,77 2,76 2,77 2,76 2,777 2,777 2,777	23243,87 33243,87 10812,76 1649,14 649,14 649,14 649,14 647,20 5711,800 6647,20 5692,000 7002,95 7078,300 6372,12 4557,45 5396,700 4734,900 Wasser (o.K.) g 8104,37 10268,000 Wasser (o.K.) g Kobel 7.01 Laa 10256,77 6616,960 91,45 904,707	F T F T S1,82 18,00 166,07 15,01 16,18 36,62 F T N N/mm² 56,05 14,44 58,84 26,92 68,70 24,88 70,42 25,52 62,51 33,13 44,71 25,33 52,94 35,65 46,45 26,25 64,45 26,26 100,73 28,77 128,07 42,88 109,32 36,60 14,83 28,88 109,32 36,62 100,73 32,06 100,73 32,06 100,73 32,06 100,62 48,52 64,91 48,55 64,91 38,81 78,94 36,92	2eitdauer Sec 2eitdauer Sec 2eitdauer Sec 2eitdauer Sec 2eitdauer 2eitdauer Sec 2eitdauer Sec 2eitdauer Sec 2eitdauer Sec 2eitdauer Sec 1356,50 1160,90 1210,20 918,20 1366,50 120,20 1366,50 120,20 100,20	23247,4 10820 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1645,3 1645,3 1645,3 1645,3 1645,3 1645,3 17124,1 16333 16678,5 5701,8 6971,8 6971,8 17124,1 6333 4503 1531,8 4672,9 1455,3 13565 135755 135755 135755 135755 135755 135755 1	F überprüft N Sec 23 Sec 24	0,03 0,07 0,03 durchschn. Diff [N] 0,18 Differenz Gewicht-Zeit 0,31 0,31 0,33 0,33 0,33 0,44 0,53 0,53 0,64 0,61 0,53 0,64 0,61 0,53 0,64 0,61 0,53 0,64 0,61 0,53 0,64 0,61 0,53 0,64 0,61 0,53 0,64 0,61 0,53 0,64 0,61 0,53 0,53 0,64 0,61 0,53 0,53 0,64 0,61 0,53 0,53 0,64 0,65 0,67 0,67 0,78 0,78 0,78 0,78 0,78 0,78 0,78 0,7		9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] 6,79 Differenz Spannung zw Methoden
3 1.4 5 1.8 5 1.9 5 2.0 1 1.2 1 1.2 1 1.2 1 1.2 1 1.2 1 1.2 1 1.2 1 1.2 1 1.2 1 1.2 1 1.2 1 1.4 1 1.6 1 1.6 1 1.6 1 1.6 1 1.6 1 1.6 1 1.6 1 1.6 1 1.6 1 1.6 1 1.6 1 1.6 1 1.6 1 1.6 1 1.6 1 1.6 1 1.6 1 1.6 1 <t< td=""><td>1,50 1,00 3,00 0,75 1,01 18.11.2014 d mm 1,63 1,63 1,63 1,63 1,63 1,55</td><td>A mm² 2,70 0,44 2,07 2,07 2,07 2,07 1,88 1,87 1,88 1,87 1,88 1,87 2,07 2,07 2,276 2,276 2,276 2,276 2,276 2,276 2,276 2,276 2,299 2,297 2,276 2,76 2,76 2,76 2,76 2,977 2,9777 2,9777 2,9777 2,9777 2,97777 2,97777777777</td><td>23243,67 3243,67 10812,76 1649,14 649,14 649,14 647,20 5692,00 6372,12 657,00 4734,90 708,857,45 8104,37 13054,71 11143,54 13054,71 11143,54 11143,54 11256,77 6616,96 691,45 8047,07 6619,45 890,52 3461,09</td><td>F T S1,82 18,00 106,07 15,01 16,18 36,62 F T N N/mm² 56,05 14,44 58,40 26,52 65,21 31,44 58,84 26,52 66,70 24,88 70,42 25,55 62,51 33,13 44,71 25,30 52,94 35,65 46,45 26,25 64,45 26,22 79,500 28,75 128,07 42,88 103,32 36,62 114,83 28,88 7,32 31,63 100,73 32,06 F T N N/mm² 64,91 64,91 64,91 36,92 64,91 36,92 64,91 36,92 64,91 36,92 76,60 47,22 64,91 36,92</td><td>2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer 33,318 467,29 116,09 120,000 120,0000 120,0000 120,0000 120,0000 120,0000000000</td><td></td><td>F überprüft F überprüft N F Überpr S S S S S S S S S S S S S</td><td>0,03 0,07 0,03 durchschn. Diff [N] 0,18 Differenz Gewicht-Zeit 0,31 0,03 0,33 0,03 0,04 0,01 0,01 0,01 0,03 0,03 0,03 0,03 0,03</td><td></td><td>9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden</td></t<>	1,50 1,00 3,00 0,75 1,01 18.11.2014 d mm 1,63 1,63 1,63 1,63 1,63 1,55	A mm ² 2,70 0,44 2,07 2,07 2,07 2,07 1,88 1,87 1,88 1,87 1,88 1,87 2,07 2,07 2,276 2,276 2,276 2,276 2,276 2,276 2,276 2,276 2,299 2,297 2,276 2,76 2,76 2,76 2,76 2,977 2,9777 2,9777 2,9777 2,9777 2,97777 2,97777777777	23243,67 3243,67 10812,76 1649,14 649,14 649,14 647,20 5692,00 6372,12 657,00 4734,90 708,857,45 8104,37 13054,71 11143,54 13054,71 11143,54 11143,54 11256,77 6616,96 691,45 8047,07 6619,45 890,52 3461,09	F T S1,82 18,00 106,07 15,01 16,18 36,62 F T N N/mm² 56,05 14,44 58,40 26,52 65,21 31,44 58,84 26,52 66,70 24,88 70,42 25,55 62,51 33,13 44,71 25,30 52,94 35,65 46,45 26,25 64,45 26,22 79,500 28,75 128,07 42,88 103,32 36,62 114,83 28,88 7,32 31,63 100,73 32,06 F T N N/mm² 64,91 64,91 64,91 36,92 64,91 36,92 64,91 36,92 64,91 36,92 76,60 47,22 64,91 36,92	2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer 33,318 467,29 116,09 120,000 120,0000 120,0000 120,0000 120,0000 120,0000000000		F überprüft N F Überpr S S S S S S S S S S S S S	0,03 0,07 0,03 durchschn. Diff [N] 0,18 Differenz Gewicht-Zeit 0,31 0,03 0,33 0,03 0,04 0,01 0,01 0,01 0,03 0,03 0,03 0,03 0,03		9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden
3_1A \$_18 \$_200 <td>1,50 1,50 3,00 0,75 1,50 1,63 1,63 1,63 1,63 1,63 1,50</td> <td>A A A A A A A mm² 2,07 2,76 2,76 2,76 2,76 1,88 1,77 1,48 4 mm² 2,76 2,76 2,76 2,76 2,76 2,76 3,88 1,77 1,07</td> <td>23243,87 33243,87 10812,76 1649,14 Wasser (o.K.) g 57713,90 6647,20 5592,00 7002,95 77178,30 6647,20 5592,00 7002,95 77178,30 6637,21 4557,45 5396,70 4734,90</td> <td>F T N N/mm² 55,01 31,82 16,607 15,01 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,27 31,14 58,84 26,92 68,70 24,88 70,42 25,52 62,51 33,13 52,94 35,65 46,45 26,28 100,71 42,88 103,32 36,62 114,83 28,88 87,32 31,63 100,73 32,06 100,73 32,06 100,62 48,52 64,91 59 66,59</td> <td>2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer 2eitdauer sec 1356,50 1160,90 1210,20 918,20 918,20 1061,30 20,1061,30</td> <td>3247,4 10820 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 6678,5 5701,8 6678,5 5701,8 6971,8 6971,8 6971,8 61333 4503 5318,8 4672,9 1 4672,9 1 1 8382 13565 11609 12102 9182 10613 10613 10613 10613 10613 10824 10834 70148 1084 70148 33567</td> <td>F überprüft F überprüft N F I 06,77 K N S S S S S S S S S S S S</td> <td>0,03 0,07 0,03 durchschn. Diff [N] 0,18 Differenz Gewicht-Zeit N 0,31 0,31 0,33 0,33 0,33 0,33 0,48 0,64 0,61 0,61 0,61 0,61 0,61 0,61 0,61 0,61</td> <td></td> <td>9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden</td>	1,50 1,50 3,00 0,75 1,50 1,63 1,63 1,63 1,63 1,63 1,50	A A A A A A A mm ² 2,07 2,76 2,76 2,76 2,76 1,88 1,77 1,48 4 mm ² 2,76 2,76 2,76 2,76 2,76 2,76 3,88 1,77 1,07	23243,87 33243,87 10812,76 1649,14 Wasser (o.K.) g 57713,90 6647,20 5592,00 7002,95 77178,30 6647,20 5592,00 7002,95 77178,30 6637,21 4557,45 5396,70 4734,90	F T N N/mm² 55,01 31,82 16,607 15,01 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,27 31,14 58,84 26,92 68,70 24,88 70,42 25,52 62,51 33,13 52,94 35,65 46,45 26,28 100,71 42,88 103,32 36,62 114,83 28,88 87,32 31,63 100,73 32,06 100,73 32,06 100,62 48,52 64,91 59 66,59	2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer 2eitdauer sec 1356,50 1160,90 1210,20 918,20 918,20 1061,30 20,1061,30	3247,4 10820 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 6678,5 5701,8 6678,5 5701,8 6971,8 6971,8 6971,8 61333 4503 5318,8 4672,9 1 4672,9 1 1 8382 13565 11609 12102 9182 10613 10613 10613 10613 10613 10824 10834 70148 1084 70148 33567	F überprüft N F I 06,77 K N S S S S S S S S S S S S	0,03 0,07 0,03 durchschn. Diff [N] 0,18 Differenz Gewicht-Zeit N 0,31 0,31 0,33 0,33 0,33 0,33 0,48 0,64 0,61 0,61 0,61 0,61 0,61 0,61 0,61 0,61		9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden
3 14 5 18 5 10 5 20 0 10 5 20 0 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 11 10 11 10 12 10 13 10 14 10 15 10 10 10 10 10 11 10 12 10 13 10 14 10 15 10 14 10 15 10 <t< td=""><td>1,50 1,50 3,00 0,75 1,63 1,63 1,63 1,63 1,63 1,63 1,55 1</td><td>A mm² A mm² A A mm² A A mm² A A mm² 2,76 2,76 2,77 1,88 1,77 1,89 1,77 1,89 2,76 2,76 2,76 3,98 3,98 2,76 3,98 3,98 2,76 3,98 3</td><td>23243,87 3243,87 10812,76 1649,14 Wasser (o.K.) 8 5713,90 6647,20 5692,00 7708,30 66372,12 4557,45 5396,70 4734,90 474</td><td>F T S1,82 18,00 106,07 15,01 16,18 36,62 F T N N/mm² 56,05 16,31,42 65,21 31,44 55,84 26,52 62,51 33,13 44,71 25,33 52,94 35,65 46,45 26,25 79,50 28,72 79,50 28,72 79,50 28,72 79,50 28,72 79,50 28,72 79,50 28,72 73,32 36,62 100,73 32,06 100,73 32,06 100,73 32,06 100,73 32,06 100,73 32,06 100,73 32,06 100,62 48,52 64,91 36,92 66,91 38,81 78,94 36,92 67,60 47,22 33,95</td><td>2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 33,22 33,12 34,50 35,318 34,50 35,318 34,50 35,318 34,50 35,318 34,50 35,318 34,50 35,318 34,50 35,318 34,50 35,318 34,50 35,318 34,50 35,318 34,50 35,318 34,50 35,318 34,50 35,318 34,50 35,318 34,50 35,318 34,50 35,50 36,70 35,70 35,670 35,0700 35,0700 35,0700 35,0700 35,0700000000000000</td><td>3247,4 10820 1646,3 1646,3 6678,5 5701,8 6678,5 5701,8 677,8 6333 4503 5331,8 4672,9 9 9 9 9 9 9 9 9 10613 9 9 9 9 9 9 9 9 10613 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 10613 9 10884 7044 7010 8332 10832 1084 7018 3567</td><td>F überprüft F überprüft N 82,23 133,07 113,88 118,72 90,08 104,11 F überprüft N 106,77 69,10 70,73 81,74 69,83 34,99</td><td>0,03 0,07 0,03 durchschn. Diff [N] 0,18 Differenz Gewicht-Zeit N 0,31 0,53 0,64 0,61 0,61 0,53 0,64 0,61 0,53 0,64 0,61 0,53 0,64 0,61 0,61 0,53 0,64 0,61 0,53 0,64 0,61 0,53 0,64 0,61 0,53 0,64 0,61 0,53 0,64 0,61 0,53 0,53 0,64 0,61 0,53 0,53 0,64 0,61 0,53 0,53 0,64 0,61 0,53 0,53 0,64 0,61 0,53 0,53 0,64 0,61 0,53 0,53 0,64 0,61 0,53 0,53 0,64 0,61 0,53 0,53 0,64 0,61 0,53 0,53 0,64 0,61 0,53 0,53 0,53 0,53 0,53 0,53 0,53 0,53</td><td></td><td>9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden</td></t<>	1,50 1,50 3,00 0,75 1,63 1,63 1,63 1,63 1,63 1,63 1,55 1	A mm ² A mm ² A A mm ² A A mm ² A A mm ² 2,76 2,76 2,77 1,88 1,77 1,89 1,77 1,89 2,76 2,76 2,76 3,98 3,98 2,76 3,98 3,98 2,76 3,98 3	23243,87 3243,87 10812,76 1649,14 Wasser (o.K.) 8 5713,90 6647,20 5692,00 7708,30 66372,12 4557,45 5396,70 4734,90 474	F T S1,82 18,00 106,07 15,01 16,18 36,62 F T N N/mm² 56,05 16,31,42 65,21 31,44 55,84 26,52 62,51 33,13 44,71 25,33 52,94 35,65 46,45 26,25 79,50 28,72 79,50 28,72 79,50 28,72 79,50 28,72 79,50 28,72 79,50 28,72 73,32 36,62 100,73 32,06 100,73 32,06 100,73 32,06 100,73 32,06 100,73 32,06 100,73 32,06 100,62 48,52 64,91 36,92 66,91 38,81 78,94 36,92 67,60 47,22 33,95	2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 33,22 33,12 34,50 35,318 34,50 35,318 34,50 35,318 34,50 35,318 34,50 35,318 34,50 35,318 34,50 35,318 34,50 35,318 34,50 35,318 34,50 35,318 34,50 35,318 34,50 35,318 34,50 35,318 34,50 35,318 34,50 35,318 34,50 35,50 36,70 35,70 35,670 35,0700 35,0700 35,0700 35,0700 35,0700000000000000	3247,4 10820 1646,3 1646,3 6678,5 5701,8 6678,5 5701,8 677,8 6333 4503 5331,8 4672,9 9 9 9 9 9 9 9 9 10613 9 9 9 9 9 9 9 9 10613 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 10613 9 10884 7044 7010 8332 10832 1084 7018 3567	F überprüft N 82,23 133,07 113,88 118,72 90,08 104,11 F überprüft N 106,77 69,10 70,73 81,74 69,83 34,99	0,03 0,07 0,03 durchschn. Diff [N] 0,18 Differenz Gewicht-Zeit N 0,31 0,53 0,64 0,61 0,61 0,53 0,64 0,61 0,53 0,64 0,61 0,53 0,64 0,61 0,61 0,53 0,64 0,61 0,53 0,64 0,61 0,53 0,64 0,61 0,53 0,64 0,61 0,53 0,64 0,61 0,53 0,53 0,64 0,61 0,53 0,53 0,64 0,61 0,53 0,53 0,64 0,61 0,53 0,53 0,64 0,61 0,53 0,53 0,64 0,61 0,53 0,53 0,64 0,61 0,53 0,53 0,64 0,61 0,53 0,53 0,64 0,61 0,53 0,53 0,64 0,61 0,53 0,53 0,53 0,53 0,53 0,53 0,53 0,53		9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden
3 1.4 5 1.8 5 2.0 5 2.0 0 3.0	1,50 1,50 3,00 0,75 1,50 1,63 1,63 1,63 1,63 1,63 1,50 1,50 1,50 1,50 1,50 1,50 1,50 1,50 1,50 1,50 1,50 1,50 1,50 1,50 1,50 1,50 1,50 1,50 1,55 2,25 1,55 2,25 1,55 2,25 1,55 2,25 1,55 2,25 1,55 2,25 1,55 2,25 1,55 2,25 1,55 2,25 1,55 1	A mm ² 2,76 2,07 2,07 2,07 2,07 2,07 2,07 2,07 2,07	23243,87 33243,87 10812,76 1649,14 Wasser (o.K.) g 5713,90 6647,20 5692,000 7002,95 7178,30 6137,13,90 4734,90 Wasser (o.K.) g 8104,37 11143,54 91,11143,54 Wasser (o.K.) g Wasser (o.K.) g 10256,77 615,96 6991,43 8047,07 6615,96 6991,45 8404,07 6404,09 Wasser (o.K.) g Wasser (o.K.) g Wasser (o.K.) g Wasser (o.K.) g	F T F T N N/mm² 55,21 31,44 55,84 26,97 68,70 24,88 70,42 25,54 66,70 24,88 70,42 25,55 66,70 24,88 70,42 25,56 46,45 26,25 46,45 26,25 114,83 28,88 87,32 31,63 100,32 36,66 111,483 28,88 87,32 31,63 100,62 48,52 66,59 38,81 76,60 47,22 55,60 46,45 26,25 26,25 100,73 32,06 100,62 48,52 66,59 38,81 76,60 47,22 33,95 47,90 47,90 47,90 47,90 47,90	2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 1356,50 1160,90 1210,20 1061,30 220,1061,30 220,1061,30 220,1061,30 220,1061,30 220,1061,30 220,1061,30 220,1061,30 220,1061,30 220,1061,30 220,1061,30 220,1061,30 220,1061,30 220,1061,30 20,1061,30	3247,4 10820 1646,3 1646,3 9 6678,5 5701,8 6971,8 7124,1 6333 3533,8 4503 5331,8 4672,9 9 9 13565 13565 10613 9 10613 9 10613 9 10613 9 10633 9 10613 9 10884 7018 8332 9 10884 7014 7118 3567 9 9 10884 7014 7118 3567 9 9 9 9 9 108	F überprüft	0,03 0,07 0,03 0,07 0,03 0,03 0,03 0,03		9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] 6,75 Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden
3 1.4 5 1.8 5 2.0 3 2.0 3 2.0 3 2.0 3 2.0 3 2.0 3 2.0 3 2.0 3 2.0 3 2.0 3 0.1 0.1 0.1 </td <td>1,50 1,00 3,00 0,75 1,01 1,01 1,01 1,01 1,03 1,163 1,163 1,163 1,188 1,55 1,155 1,155 1,150 1,50 1,50 1,50 1,50 1,50 1,50 1,55 1,155 1,55</td> <td>A A mm² 2,76 2,76 2,76 2,76 2,76 2,76 2,76 1,88 1,77 1,48 4 1,77 2,76 2,76 2,76 2,76 2,76 2,76 2,76 3,14 4 3,98 2,76 3,98 2,76 3,14 </td> <td>23243,87 3243,87 10812,76 1649,14 549,14 5713,90 6647,20 5592,00 7002,95 7778,30 6647,20 5592,00 7002,95 7778,30 647,20 5592,00 7002,95 7778,30 647,20 5592,00 7002,95 7778,30 647,20 5592,00 4734,90 4744,90 4744,90 4744,90 4744,90 4744,90</td> <td>20,52 1,1,2 31,82 18,00 106,07 15,00 16,18 36,62 5 1 7 N N N/mm² 56,05 14,44 55,84 26,92 68,70 24,88 70,42 25,50 62,51 33,11 44,71 25,32 58,40 26,25 64,45 26,25 64,45 26,26 46,45 26,26 64,45 26,26 70,42 28,77 79,50 28,77 79,50 28,72 100,32 36,60 114,83 28,88 87,32 31,65 100,73 32,06 100,62 48,52 64,91 36,52 64,91 36,52 64,91 36,52 76,60 47,22 33,95 47,90 76,60</td> <td>2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 5 3 3 1 3 5 3 3 3 3</td> <td>3247,4 10820 1646,3 1646,3 4673 400</td> <td>F überprüft F überprüft</td> <td>0,03 0,07 0,03 0,07 0,03 0,18 0,18 0,18 0,18 0,18 0,18 0,11 0,10 0,10</td> <td></td> <td>9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] 6,79 Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden</td>	1,50 1,00 3,00 0,75 1,01 1,01 1,01 1,01 1,03 1,163 1,163 1,163 1,188 1,55 1,155 1,155 1,150 1,50 1,50 1,50 1,50 1,50 1,50 1,55 1,155 1,55	A A mm ² 2,76 2,76 2,76 2,76 2,76 2,76 2,76 1,88 1,77 1,48 4 1,77 2,76 2,76 2,76 2,76 2,76 2,76 2,76 3,14 4 3,98 2,76 3,98 2,76 3,14 	23243,87 3243,87 10812,76 1649,14 549,14 5713,90 6647,20 5592,00 7002,95 7778,30 6647,20 5592,00 7002,95 7778,30 647,20 5592,00 7002,95 7778,30 647,20 5592,00 7002,95 7778,30 647,20 5592,00 4734,90 4744,90 4744,90 4744,90 4744,90 4744,90	20,52 1,1,2 31,82 18,00 106,07 15,00 16,18 36,62 5 1 7 N N N/mm² 56,05 14,44 55,84 26,92 68,70 24,88 70,42 25,50 62,51 33,11 44,71 25,32 58,40 26,25 64,45 26,25 64,45 26,26 46,45 26,26 64,45 26,26 70,42 28,77 79,50 28,77 79,50 28,72 100,32 36,60 114,83 28,88 87,32 31,65 100,73 32,06 100,62 48,52 64,91 36,52 64,91 36,52 64,91 36,52 76,60 47,22 33,95 47,90 76,60	2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 5 3 3 1 3 5 3 3 3 3	3247,4 10820 1646,3 1646,3 4673 400	F überprüft	0,03 0,07 0,03 0,07 0,03 0,18 0,18 0,18 0,18 0,18 0,18 0,11 0,10 0,10		9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] 6,79 Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden
3 1.4 5 1.8 5 1.9 5 2.0 0 2.2 0 2.2 0 2.2 0 2.2 0 2.2 0 2.2 0 3.2 0 2.2 0 6.2 0 6.2 0 6.3 0 6.4 0 6.4 0 6.4 0 6.4 0 6.5 0 6.6 0 6.7 0 6.9 0 0.1 0 8.1 0 8.1 0 8.1 0 8.1 0 8.1 0 8.1 0 8.1 0 8.1 0 1.0 0 1.0 0 <t< td=""><td>1,50 1,50 3,00 0,75 1,12014 d mm 1,63 1,163 1,163 1,163 1,163 1,163 1,163 1,163 1,163 1,163 1,155 1,155 1,188 1,155 1,155 1,188 1,155</td><td>A mm² 2,07 2,</td><td>23243,87 33243,87 10812,76 1649,14 649,14 649,14 647,20 5713,90 6647,20 5692,00 7178,30 6372,12 4557,45 5396,70 4734,90 200 201 8104,37 13054,71 11143,54 11705,00 8901,38 10268,00 201 8047,07 66890,52 3461,09 Wasser (o.K.) g Wasser (o.K.)</td><td>F T S1,82 18,00 106,07 15,01 16,18 36,62 F T N N/mm² 56,05 16,52,1 65,21 31,44 55,84 26,52 62,51 33,13 44,71 25,33 55,94 35,65 46,45 26,25 62,51 33,13 44,71 25,33 52,94 35,65 46,45 26,25 79,50 28,72 79,50 28,72 128,07 42,82 109,32 36,66 114,83 28,88 87,32 31,65 100,73 32,06 100,73 32,06 100,73 32,05 64,91 36,92 66,91 38,81 78,94 36,92 67,60 47,22 33,95 47,90 44,32</td><td>2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 33,22 33,22 34,54 35,55 35,70,18 712,41 633,30 450,30 35,31,18 450,20 1356,50 1160,90 1210,20 120,20 10</td><td>3247,4 10820 1646,3 1646,3 1646,3 6678,5 5701,8 6971,8 7124,1 6333 4503 331,8 4672,9 9 9 9 9 9 9 9 9 10613 9 9 9 9 9 9 9 10613 9 10824 10832 10844 7044 7124,1 8322 10843 7044 718 3567 9 9 9 9 9 9 9 10844 7044 7014</td><td>F überprüft F überpr F F</td><td>0,03 0,07 0,03 0,03 0,03 0,03 0,03 0,03</td><td></td><td>9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden</td></t<>	1,50 1,50 3,00 0,75 1,12014 d mm 1,63 1,163 1,163 1,163 1,163 1,163 1,163 1,163 1,163 1,163 1,155 1,155 1,188 1,155 1,155 1,188 1,155	A mm ² 2,07 2,	23243,87 33243,87 10812,76 1649,14 649,14 649,14 647,20 5713,90 6647,20 5692,00 7178,30 6372,12 4557,45 5396,70 4734,90 200 201 8104,37 13054,71 11143,54 11705,00 8901,38 10268,00 201 8047,07 66890,52 3461,09 Wasser (o.K.) g Wasser (o.K.)	F T S1,82 18,00 106,07 15,01 16,18 36,62 F T N N/mm² 56,05 16,52,1 65,21 31,44 55,84 26,52 62,51 33,13 44,71 25,33 55,94 35,65 46,45 26,25 62,51 33,13 44,71 25,33 52,94 35,65 46,45 26,25 79,50 28,72 79,50 28,72 128,07 42,82 109,32 36,66 114,83 28,88 87,32 31,65 100,73 32,06 100,73 32,06 100,73 32,05 64,91 36,92 66,91 38,81 78,94 36,92 67,60 47,22 33,95 47,90 44,32	2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 33,22 33,22 34,54 35,55 35,70,18 712,41 633,30 450,30 35,31,18 450,20 1356,50 1160,90 1210,20 120,20 10	3247,4 10820 1646,3 1646,3 1646,3 6678,5 5701,8 6971,8 7124,1 6333 4503 331,8 4672,9 9 9 9 9 9 9 9 9 10613 9 9 9 9 9 9 9 10613 9 10824 10832 10844 7044 7124,1 8322 10843 7044 718 3567 9 9 9 9 9 9 9 10844 7044 7014	F überprüft F überpr F F	0,03 0,07 0,03 0,03 0,03 0,03 0,03 0,03		9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden
3 1.4 5 1.8 5 2.0 5 2.0 5 2.0 5 2.0 5 2.0 5 2.0 5 2.0 5 2.0 5 6.1 6 2.1 6 3.1 6 4.4 6 6.2 6 6.3 6 6.4 6 6.5 6 6.5 6 6.5 6 6.3 6 9.1 6 9.1 6 9.1 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 7 5 5 5 9.2 9.2 9.2 9.2 9.2	1,50 1,50 3,00 0,75 1,50 1,63 1,63 1,63 1,63 1,63 1,63 1,50 1,50 1,50 1,50 1,50 1,50 1,50 1,50 1,50 1,50 1,50 1,50 1,50 1,50 1,55 2,25 1,55 2,25 1,55 2,25 1,55 2,25 1,55 2,25 1,55 2,25 1,55 2,25 1,55 2,25 1,55 2,25 1,55 2,25 1,55 2,25 1,55 1,55 1,55 1,55 2,25 1,55 1	A mm ² 2,76 2,07 2,07 2,07 2,07 2,07 2,07 2,07 2,07	23243,87 33243,87 10812,76 1649,14 Wasser (o.K.) g 5713,90 6647,20 5692,000 7002,95 7178,30 6372,12 4557,45 5396,700 4734,90 9 8104,37 11043,57,45 801,33 8104,37 10256,77 6616,96 6991,47 9447,07 641,09 9453,864,09 9453,90 94544,00 94544,00 94544,00 94544,00 94544,00 94544,00 94544,00 94544,00 94544,133 94544,133 94544,133 94544,133 94544,133 94544,133 94544,133 94544,133 94544,133 94544,134 94544,134	20,52 11,72 31,82 18,00 166,07 15,00 16,18 36,62 F T N N/mm² 56,05 14,42 76,521 31,144 55,84 26,92 68,70 24,88 70,42 25,53 62,51 33,13 44,71 25,33 52,94 35,65 46,45 26,25 68,70 24,88 70,42 25,54 66,51 36,62 46,45 26,25 66,45 26,25 128,07 42,88 100,32 36,66 114,83 28,88 87,32 31,63 100,73 32,06 111,483 20,62 66,59 38,81 76,50 47,22 66,59 38,81 76,50 47,90 66,59 38,81 76,50	2eitdauer sec 2eitdauer 3ec 3ec 3ec 2eitdauer 3ec 3ec 3ec 3ec 3ec 3ec 3ec 3ec 3ec 3ec	3247,4 10820 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1647,3 6678,5 5701,8 6678,5 5701,8 6971,8 6971,8 6333 4503 5331,8 4672,9 1 4672,9 1 4672,9 1 4672,9 13565 13565 13565 13565 13565 13565 11609 12102 9132 9132 10613 10613 10613 10613 10613 10613 10613 10613 10613 10613 10613 10884 7014 8 33567	31,66 31,66 106,14 106,14 16,15 i	0,03 0,07 0,03 0,03 0,03 0,03 0,03 0,03		9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] 0ifferenz Spannung zw Methoden 0 0ifferenz Spannung zw Methoden 0 0ifferenz Spannung zw Methoden 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
3 1.4 3 1.8 3 1.8 3 1.9 3 1.0 3 1.0 5 ERIE 10 WASSERGEWICHT SERIE 9 WASSERGEWICHT 3 1.0 3 1.0 3 1.0 5	1,00 1,00 3,00 0,75 1,00 1,00 1,00 1,63 1,63 1,63 1,63 1,63 1,50	A mm ² 2,07 2,07 2,07 2,07 2,07 2,07 2,07 2,76 1,88 1,77 1,77 1,77 1,77 4,47 4,07 1,77 1,48 1,77 1,	23243,87 10812,76 1649,14 1649,14 1649,14 1649,14 1649,14 1649,14 1649,14 1649,14 1649,14 1649,14 1649,14 1649,14 1649,14 1649,14 1649,14 1649,14 1649,14 1655,745 1635,212 1025,77 1025,07 1025,77 1025,07 1025,77 1025,07	20,52 11,72 31,82 18,00 106,07 15,01 16,18 36,62 5 1 7 N N N/mm² 55,05 25,52 65,21 31,44 55,84 26,92 66,70 24,88 70,42 25,52 62,51 33,11 44,71 25,33 52,94 35,65 46,45 26,25 64,45 26,26 70,42 25,30 71,28,07 42,87 109,32 36,60 114,83 28,88 87,32 31,65 100,73 32,06 7 7 7 7 87,32 36,62 100,62 48,52 66,59 38,81 78,94 36,52 66,59 38,81 78,94 36,52 66,59 38,81	2eitdauer Sec 2eitdauer 2eitdauer 2eitdauer Sec 2eitdauer 2eitdauer 2eitdauer Sec 2eitdauer 2eitdauer Sec 2eitdauer 2eit	3247,4 10820 1646,3 1646,3 6678,5 5701,8 6971,8 7124,1 6333 4503 5318,8 9971,8 4672,9 0 11609 12102 9182 10613 0 1202 9182 10613 0 10613 0 11609 12102 9182 10613 0 11609 1202 9182 10613 0 1202 9182 10613 0 1202 1203 1204 12073 12073 12073 12073 12073 12073 12073	F überprüft K K K K K K K K K K K K K	0,03 0,07 0,03 0,07 0,03 0,18 0,18 0,18 0,18 0,18 0,11 0,10 0,10		9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] 6,79 Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden
3_14 \$_18 \$_20 \$_21 \$_21 \$_21 \$_21 \$_21 \$_21 \$_21 \$_21 \$_22 \$_23 \$_24 \$_25 \$_261 \$_21 \$_22 \$_23 \$_24 \$_25 \$_261 \$_27 \$_261 \$_27 <trr> \$_261</trr>	1,30 3,00 3,00 0,75 1,12014 d mm 1,63 1,63 1,63 1,63 1,63 1,63 1,63 1,55 1,55 1,138 1,155 1,55 1	A mm ² 2,07 2,	23243,87 33243,87 10812,76 1549,14 1649,14 9 9 9 9 9 10612,76 9 9 10647,20 9	20,52 1,1,2 31,82 18,00 106,07 15,01 16,18 36,62 F T N N/mm² 56,05	2eitdauer sec 2eitdauer sec 33,31 33,12 33,12 34,54 35,570,18 36,67,85 370,18 371,24 3	3247,4 10820 1646,3 1646,3 1646,3 6678,5 5701,8 6678,5 571,1 7124,1 6678,5 5701,8 6971,8 7124,1 7124,1 7124,1 7124,1 7124,1 7124,1 7124,1 7124,1 7124,1 7124,1 7124,1 7124,1 7124,1 7124,1 7124,1 7133 313565 10613 9182 10613 9182 10613 9182 10613 10613 10613 10613 10832 1084 7044 7118 12948 12073 12948 12073	11,86 106,14 106,14 16,15 65,52 65,53 68,39 69,89 62,13 64,14 44,17 52,33 68,39 62,13 64,13 64,14 106,77 52,33 63,34 113,87 113,87 113,87 113,87 113,87 113,87 113,87 113,87 113,87 113,87 113,87 113,87 113,87 113,87 113,87 114,11 114,11 114,11 114,11 116,77 116,77 118,23 118,23 118,24 118,24 118,41 118,41 118,23 118,23 </td <td>0,03 0,07 0,03 0,03 0,03 0,03 0,03 0,04 0,04 0,18 0,18 0,19 0,10 0,10 0,10 0,10 0,10 0,10 0,10</td> <td></td> <td>9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden</td>	0,03 0,07 0,03 0,03 0,03 0,03 0,03 0,04 0,04 0,18 0,18 0,19 0,10 0,10 0,10 0,10 0,10 0,10 0,10		9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden
3 1.1 5 1.1 5 2.0 1 1.1 5 2.0 1 1.1 1 <t< td=""><td>1,50 1,50 3,00 0,75 1,50 1,63 1,63 1,63 1,63 1,63 1,88 1,55 1,155 1,150 1,55 1,55</td><td>A mm² 2,76 2,07 2,09 2,99 2,99 2,99 2,07 2,</td><td>23243,87 33243,87 10812,76 1649,14 Wasser (o.K.) g 57713,90 6647,20 5592,00 7002,95 7002,95 7002,95 6372,12 4557,45 5396,70 4734,90 </td><td>23,82 18,00 33,82 18,00 16,07 15,00 16,18 36,62 5 36,62 6 16,18 5 16,18 5 16,18 5 16,18 5 1 5 1 5 1 5 1 5 1 68,70 24,88 70,42 25,52 62,51 33,13 44,71 25,32 52,94 35,65 46,45 26,22 64,645 26,26 100,32 36,67 100,32 36,67 100,73 32,06 114,83 28,88 87,32 31,61 100,73 32,06 100,62 48,57 64,91 65,59 76,60 47,92 76,60 47,92 77,60 44,55</td><td>2eitdauer sec 2eitdauer 2eitdauer sec 2eitdauer 2eitdauer 2eitdauer 335,550 11061,30 2eitdauer 2eitdauer 335,700,100,000,000,000,000,000,000,000,000</td><td>3247,4 10820 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1647,3 1647,3 1647,3 1647,3 1647,3 1647,3 1647,3 1647,3 11609 12102 9182 10613 11609 12102 9182 10613 11609 12102 9182 10613 11609 11609 11609 11609 11609 11609 11609 11609 11609 11609 11609 11609 11609 11609</td><td>F überprüft F überprüft K N</td><td>0,03 0,07 0,03 0,07 0,03 0,03 0,03 0,04 0,18 0,18 0,18 0,13 0,13 0,13 0,23 0,04 0,04 0,05 0,04 0,05 0,04 0,05 0,04 0,05 0,05</td><td></td><td>9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] 6,75 Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden N/mm Differenz Spannung zw Methoden</td></t<>	1,50 1,50 3,00 0,75 1,50 1,63 1,63 1,63 1,63 1,63 1,88 1,55 1,155 1,150 1,55 1,55	A mm ² 2,76 2,07 2,09 2,99 2,99 2,99 2,07 2,	23243,87 33243,87 10812,76 1649,14 Wasser (o.K.) g 57713,90 6647,20 5592,00 7002,95 7002,95 7002,95 6372,12 4557,45 5396,70 4734,90	23,82 18,00 33,82 18,00 16,07 15,00 16,18 36,62 5 36,62 6 16,18 5 16,18 5 16,18 5 16,18 5 1 5 1 5 1 5 1 5 1 68,70 24,88 70,42 25,52 62,51 33,13 44,71 25,32 52,94 35,65 46,45 26,22 64,645 26,26 100,32 36,67 100,32 36,67 100,73 32,06 114,83 28,88 87,32 31,61 100,73 32,06 100,62 48,57 64,91 65,59 76,60 47,92 76,60 47,92 77,60 44,55	2eitdauer sec 2eitdauer 2eitdauer sec 2eitdauer 2eitdauer 2eitdauer 335,550 11061,30 2eitdauer 2eitdauer 335,700,100,000,000,000,000,000,000,000,000	3247,4 10820 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1647,3 1647,3 1647,3 1647,3 1647,3 1647,3 1647,3 1647,3 11609 12102 9182 10613 11609 12102 9182 10613 11609 12102 9182 10613 11609 11609 11609 11609 11609 11609 11609 11609 11609 11609 11609 11609 11609 11609	F überprüft K N	0,03 0,07 0,03 0,07 0,03 0,03 0,03 0,04 0,18 0,18 0,18 0,13 0,13 0,13 0,23 0,04 0,04 0,05 0,04 0,05 0,04 0,05 0,04 0,05 0,05		9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] 6,75 Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden N/mm Differenz Spannung zw Methoden
3_14 \$_19 \$_20	1,00 1,00 3,00 0,75 1,00	A A mm ² 2,76 2,99 2,99 3,98 2,76 3,14 4,43 0,71 2,76 2,76 3,14 4,44 2,97 2,99 3,32 3,14 4,44 2,97 2,99 3,32 3,14 4,44 2,97 2,99 3,32 3,14 4,44 4,91 3,55 3,14 4,43 2,76 2,99 3,55 3,14 4,44 2,96 3,55 3,14 4,44 2,96 3,55 3,14 4,44 2,96 3,55 3,14 4,54 2,96 3,55 3,14 4,54 2,96 3,55 3,14 4,54 2,96 3,55 3,14 4,54 2,96 3,55 3,14 4,54 2,96 3,55 3,14 4,54 2,96 3,55 3,14 4,54 2,96 3,55 3,14 4,54 2,96 3,55 3,14 4,54 2,96 3,55 3,14 4,54 2,96 3,55 3,14 4,54 2,96 3,55 3,14 4,54 2,96 3,55 3,14 4,54 2,96 3,55 3,14 4,54 2,96 3,55 3,14 4,54 2,96 3,55 3,14 1,77 2,14 3,55 3,14 1,77 2,14 1,77	23243,87 33243,87 10812,76 1549,14 1649,14 9 9 9 9 9 9 9 9 1010,000 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 10268,00 9 10268,00 9 10268,00 9 10268,00 9 10268,00 9 10268,00 9 10268,00 9 10268,00 9 10268,00 9 10268,00 9 10268,00 9 10268,00 9 10268,00 10268,00 <t< td=""><td>11.1.2 11.1.2 31.82 18.01 106,07 15.01 115,18 35.62 5 1 F T N N/mm² 56,05 14.42 55,84 26.92 68,70 24.88 70,42 25.53 62,51 33.13 44,71 25.32 52,94 35.66 46,45 26,25 F T N N/mm² 79,50 28,77 128,07 42,88 109,32 36,60 144,83 28,88 109,32 36,60 144,83 28,88 100,73 32,00 F T N N/mm² 40,32 44,55 66,91 38,81 76,84 36,92 77,80 47,92 67,60 47,22 75,94 36,92 <td>2eitdauer sec 2eitdauer sec 33,2 34,74 2eitdauer sec 34,0 35,3 31,1 34,0 35,3 31,1 34,0 35,3 31,1 34,0 35,3 31,1 34,0 35,3 31,1 34,0 35,3 31,1 34,0 35,3 31,1 34,0 35,3 31,1 35,5 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,0 35,0 1160,9 1210,0 31,0 35,0 31,0 35,0 1160,9 1210,0 31,0 35,0 1160,9 1210,0 31,0 35,0 1061,3 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2</td><td>3247,4 10820 1646,3 1646,3 1646,3 6678,5 5701,8 6971,8 6971,8 7124,1 6333 4503 5318,8 997,8 4503 4513 5331,8 4672,9 2 3531,8 4672,9 2 3531,8 4672,9 1262 3531,8 4673,3 1262 9182 10613 2 9182 10613 2 3567 3567 3567 3567 3567 3567 3567 3567 3567 3567 3567 3567 3567 3567 3567 <tr< td=""><td>F überprüft F überprüft</td><td>0,03 0,07 0,03 0,07 0,03 0,03 0,03 0,03</td><td></td><td>9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden N/mm¹</td></tr<></td></td></t<>	11.1.2 11.1.2 31.82 18.01 106,07 15.01 115,18 35.62 5 1 F T N N/mm² 56,05 14.42 55,84 26.92 68,70 24.88 70,42 25.53 62,51 33.13 44,71 25.32 52,94 35.66 46,45 26,25 F T N N/mm² 79,50 28,77 128,07 42,88 109,32 36,60 144,83 28,88 109,32 36,60 144,83 28,88 100,73 32,00 F T N N/mm² 40,32 44,55 66,91 38,81 76,84 36,92 77,80 47,92 67,60 47,22 75,94 36,92 <td>2eitdauer sec 2eitdauer sec 33,2 34,74 2eitdauer sec 34,0 35,3 31,1 34,0 35,3 31,1 34,0 35,3 31,1 34,0 35,3 31,1 34,0 35,3 31,1 34,0 35,3 31,1 34,0 35,3 31,1 34,0 35,3 31,1 35,5 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,0 35,0 1160,9 1210,0 31,0 35,0 31,0 35,0 1160,9 1210,0 31,0 35,0 1160,9 1210,0 31,0 35,0 1061,3 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2</td> <td>3247,4 10820 1646,3 1646,3 1646,3 6678,5 5701,8 6971,8 6971,8 7124,1 6333 4503 5318,8 997,8 4503 4513 5331,8 4672,9 2 3531,8 4672,9 2 3531,8 4672,9 1262 3531,8 4673,3 1262 9182 10613 2 9182 10613 2 3567 3567 3567 3567 3567 3567 3567 3567 3567 3567 3567 3567 3567 3567 3567 <tr< td=""><td>F überprüft F überprüft</td><td>0,03 0,07 0,03 0,07 0,03 0,03 0,03 0,03</td><td></td><td>9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden N/mm¹</td></tr<></td>	2eitdauer sec 2eitdauer sec 33,2 34,74 2eitdauer sec 34,0 35,3 31,1 34,0 35,3 31,1 34,0 35,3 31,1 34,0 35,3 31,1 34,0 35,3 31,1 34,0 35,3 31,1 34,0 35,3 31,1 34,0 35,3 31,1 35,5 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,2 35,0 31,2 35,0 1160,9 1210,0 31,0 35,0 1160,9 1210,0 31,0 35,0 31,0 35,0 1160,9 1210,0 31,0 35,0 1160,9 1210,0 31,0 35,0 1061,3 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	3247,4 10820 1646,3 1646,3 1646,3 6678,5 5701,8 6971,8 6971,8 7124,1 6333 4503 5318,8 997,8 4503 4513 5331,8 4672,9 2 3531,8 4672,9 2 3531,8 4672,9 1262 3531,8 4673,3 1262 9182 10613 2 9182 10613 2 3567 3567 3567 3567 3567 3567 3567 3567 3567 3567 3567 3567 3567 3567 3567 <tr< td=""><td>F überprüft F überprüft</td><td>0,03 0,07 0,03 0,07 0,03 0,03 0,03 0,03</td><td></td><td>9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden N/mm¹</td></tr<>	F überprüft	0,03 0,07 0,03 0,07 0,03 0,03 0,03 0,03		9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden N/mm ¹
3_14 3_14 3_14 3_14 3_14 3_14 3_14 3_14 1 <t< td=""><td>1.1.2014 1.0.0 1.0.0 0.75 1.0.0</td><td>A mm² A mm² A A mm² A A mm² A A mm² A A mm² A A mm² A A mm² A A mm² A A mm² A A A A A A A A A A A A A</td><td>2343,87 3343,87 10812,76 1649,14 645,14 647,20 5713,90 6647,20 5592,00 702,95 7178,30 6372,12 4557,45 5396,70 4734,90 9 8104,37 13054,71 11143,54 11705,00 8001,38 8001,38 10266,70 8407,07 6616,96 6991,45 8047,07 68047,07 8043,87 13060,04 941,133060,04 941,133060,04 941,133060,04 941,133060,04 941,133060,04 941,133060,04 941,133060,04 941,133060,04 941,133060,04 941,133060,04 941,133060,04 941,133060,04 91,0346,48 91,313912,99 103461,48</td><td>11,12 11,12 31,82 18,00 16,07 15,01 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,20 31,44 55,84 26,52 62,51 33,13 44,71 25,32 52,94 35,65 46,45 26,22 100,73 28,72 128,07 42,88 109,32 36,66 114,83 28,88 100,73 32,06 100,73 32,06 100,73 32,06 100,73 32,06 100,62 48,52 64,91 36,92 100,62 48,52 64,91 36,92 <t< td=""><td>2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 33.3 35.3,18 450,20 2eitdauer sec 33.0 35.3,18 450,20 1160,92 1210,20 120,20 120</td><td>3247,4 10820 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1647,4 2 6678,5 5701,8 6971,8 7124,1 6333 4503 313,65 313,65 13565 11609 21210 213565 11609 2182 30613 10613 10613 10613 10613 10613 10613 10613 10613 10613 10613 10614 10615 1061613 10613 10614 10615 1061613 10614</td><td>F überprüft F überpr</td><td>0,03 0,07 0,03 0,03 0,03 0,03 0,03 0,04 0,04 0,18 0,18 0,13 0,04 0,04 0,04 0,05 0,04 0,05 0,04 0,05 0,04 0,05 0,04 0,05 0,04 0,05 0,05</td><td></td><td>9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden</td></t<></td></t<>	1.1.2014 1.0.0 1.0.0 0.75 1.0.0	A mm ² A mm ² A A mm ² A A mm ² A A mm ² A A mm ² A A mm ² A A mm ² A A mm ² A A mm ² A A A A A A A A A A A A A	2343,87 3343,87 10812,76 1649,14 645,14 647,20 5713,90 6647,20 5592,00 702,95 7178,30 6372,12 4557,45 5396,70 4734,90 9 8104,37 13054,71 11143,54 11705,00 8001,38 8001,38 10266,70 8407,07 6616,96 6991,45 8047,07 68047,07 8043,87 13060,04 941,133060,04 941,133060,04 941,133060,04 941,133060,04 941,133060,04 941,133060,04 941,133060,04 941,133060,04 941,133060,04 941,133060,04 941,133060,04 941,133060,04 91,0346,48 91,313912,99 103461,48	11,12 11,12 31,82 18,00 16,07 15,01 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,18 36,62 16,20 31,44 55,84 26,52 62,51 33,13 44,71 25,32 52,94 35,65 46,45 26,22 100,73 28,72 128,07 42,88 109,32 36,66 114,83 28,88 100,73 32,06 100,73 32,06 100,73 32,06 100,73 32,06 100,62 48,52 64,91 36,92 100,62 48,52 64,91 36,92 <t< td=""><td>2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 33.3 35.3,18 450,20 2eitdauer sec 33.0 35.3,18 450,20 1160,92 1210,20 120,20 120</td><td>3247,4 10820 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1647,4 2 6678,5 5701,8 6971,8 7124,1 6333 4503 313,65 313,65 13565 11609 21210 213565 11609 2182 30613 10613 10613 10613 10613 10613 10613 10613 10613 10613 10613 10614 10615 1061613 10613 10614 10615 1061613 10614</td><td>F überprüft F überpr</td><td>0,03 0,07 0,03 0,03 0,03 0,03 0,03 0,04 0,04 0,18 0,18 0,13 0,04 0,04 0,04 0,05 0,04 0,05 0,04 0,05 0,04 0,05 0,04 0,05 0,04 0,05 0,05</td><td></td><td>9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden</td></t<>	2eitdauer sec 2eitdauer sec 2eitdauer sec 33.3 35.3,18 450,20 2eitdauer sec 33.0 35.3,18 450,20 1160,92 1210,20 120,20 120	3247,4 10820 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1646,3 1647,4 2 6678,5 5701,8 6971,8 7124,1 6333 4503 313,65 313,65 13565 11609 21210 213565 11609 2182 30613 10613 10613 10613 10613 10613 10613 10613 10613 10613 10613 10614 10615 1061613 10613 10614 10615 1061613 10614	F überprüft F überpr	0,03 0,07 0,03 0,03 0,03 0,03 0,03 0,04 0,04 0,18 0,18 0,13 0,04 0,04 0,04 0,05 0,04 0,05 0,04 0,05 0,04 0,05 0,04 0,05 0,04 0,05 0,05		9,85 3,03 19,83 durchschn. Diff [N] Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden Differenz Spannung zw Methoden

nur schwarze Zahlen sind Daten störungsfreier Versuche

Durchschnittliche Differenz der	Kraft nach Gewichtr	nessung und Zeitmessung [N]				
Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	alle	ohne Serie 4
0,74	0,78	0,16	i 17,11	0,18	3,79	1,98
			ohne Probe 4_3b			
			8,02			

Seite 105

16.2 Anhang II Ergebnisse der Versuche an der Kraftmessdose Herstellers Zwick/Roell Type: 1445 mit einer Nennlast von 500 N mit Daten der Software TestXpert(R) II Version 3.1*

SERIE 1						Weg KMD					SERIE 1	02.07.2014				
	Datum/Uhrzeit	F _{low}	F _{high}	E _{mod}	F _{max}	dL bei F _{max}	F _{Bruch}	dL bei Bruch	d _o	S ₀	KRAFTMESSDOSE	d	A	F	т	Zeitdauer
		N	N	MPa	N	mm	N	mm	mm	mm²		mm	mm²	N	N/mm²	sec
Probe 1	41822,60589	0,80984843	0,87570721	19,8178985	46,3930702	14,7521439	45,101078	14,69123077	1,45	1,651299639	1_1	1,45	1,65	46,39	28,09	
Probe 2	41822,61586	0,89797026	0,95968616	16,6616952	51,5932465	13,8015747	51,5827675	13,8081665	1,53	1,838538561	1_2	1,80	2,54	51,59	20,27	
Probe 3	41822,62704	0,48504144	0,53369105	24,5874038	24,4183025	8,96276951	24,4183025	8,962769508	1,12	0,985203456	1_3	1,38	1,48	24,42	16,44	
Schnur fixiert 1	41822,63497								0,9		SCHNUR fixiert					
Probe 5	41822,64016	0,31588349	0,35737357	32,0492594	17,3822365	7,63413286	16,0976753	7,795235157	0,9	0,636172512	1_5	1,05	0,87	17,38	20,07	
Probe 6	41822,64824	0,16701272	0,19436938	39,0793221	17,3537178	9,11358261	17,2785397	9,134365082	0,66	0,34211944	1_6	0,95	0,71	17,35	24,48	
Probe 7	41822,65624	0,21094672	0,23928893	32,3426255	17,9943523	10,9765215	16,5173016	10,93401051	0,74	0,430084034	1_7	1,05	0,87	17,99	20,78	
Probe 8	41822,66729	0,16767548	0,19046566	31,8938949	17,198204	9,05282593	17,1928406	9,063720703	0,66	0,34211944	1_8	1,00	0,79	17,20	21,90	
Schnur fixiert 2	41822,68331	0,31566158	0,35639	31,3589763	50,2647247	10,6713705			0,9	0,636172512	SCHNUR fixiert			50,26		
Probe 11	41822,69507	0,18072952	0,20806849	39,2562889	16,0977173	7,6850934	4,77327967	13,75281239	0,68	0,363168111	1_11	0,90	0,64	16,10	25,30	
Probe 12	41822,70184	0,17094876	0,19539489	33,7637814	6,10009241	5,94424343	2,2933147	13,84930325	0,67	0,352565236	1_12	0,83	0,53	6,10	11,41	
Probe 14	41822,70668	0,30702028	0,3442319	27,6167738	25,4683628	8,60362244	25,3640347	8,725143433	1	0,636172512	1_14	1,10	0,95	25,47	26,80	
Probe 15	41822,71495	0,31483337	0,35854149	33,1169779	20,2794628	7,70056295	20,1736794	7,744599819	0,9	0,636172512	1_15	1,05	0,87	20,28	23,42	
Probe 16	41822 72169	0 20885029	0 24215151	39 4634704	10 8608942	6 27726793			0.73	0 418538681	1 16	1.00	0.79	10.86	13.83	

SERIE 2											SERIE 2	03.07.2014				
	Datum/Uhrzeit	Flow	F _{high}	E _{mod}	F _{max}	dL bei F _{max}	F _{Bruch}	dL bei Bruch	d ₀	S ₀	KRAFTMESSDOSE	d	A	F	т	Zeitdauer
		N	N	GPa	N	mm	N	mm	mm	mm²		mm	mm²	N	N/mm²	sec
Probe 1	41823,40155	0,09756984	0,11200103	0,03469182	19,960495	37,4376984			0,5	0,196349541	2_1	0,7	0,38	15,77	40,99	
Probe 2	41823,41159	3,9191699	4,0512352	0,00881106	177,257584	28,1033535			3,2	8,042477194	2_2	3,2	8,04	177,26	22,04	
Probe 4	41823,44617	0,1921722	0,22885133	0,0453559	15,6321411	11,0203075			0,7	0,3848451	2_4	0,7	0,38	15,63	40,62	
Probe 6	41823,45432	0,09463856	0,10939395	0,03809664	14,5059233	9,93229008	14,4690981	9,935067177	0,5	0,196349541	2_6	0,65	0,33	14,51	43,71	
Probe 7	41823,46095	0,2473828	0,29264286	0,04379723	14,9794645	6,72546816	14,9249258	6,731419086	0,8	0,502654825	2_7	0,95	0,71	14,98	21,13	
Probe 8	41823,4663	0,50924534	0,57926857	0,03293557	21,9730835	6,37484217			1,15	1,038689071	2_8			21,97		
Probe 9	41823,47344	0,51150763	0,57955599	0,03175486	26,6400337	4,65104485			1,15	1,038689071	SCHNUR fixiert			26,64		
Probe 10	41823,47816	0,51494038	0,59793705	0,03875946	26,7224064	34,0433273			1,15	1,038689071	. 2_10	1,375	1,48	26,72	18,00	
Probe 11	41823,48628	0,38374802	0,42793056	0,02734668	22,7833366	9,46105003	20,8465595	9,581228256	1	0,785398164	2_11	1,05	0,87	22,78	26,31	
Probe 12	41823,49293	0,65281594	0,74673033	0,03445835	47,2867355	10,0450916	45,3745346	10,1021595	1,3	1,327322896	2_12	1,5	1,77	47,29	26,76	
Probe 13	41823,50259	0,46766844	0,53588295	0,03428477	30,4992561	8,85472679	28,2198677	8,82576561	1,1	0,950331778	2_13	1,25	1,23	30,50	24,85	
Probe 14	41823,51122	0,65693188	0,73773021	0,0306244	63,5879288	11,3043251	63,4509659	11,35614395	1,3	1,327322896	2_14	1,7	2,27	63,59	28,01	
Broho 1E	41922 E2426	0 55490057	0.62175550	0.02207919	26 1022000	7 04645924	24 7426271	7 062257009	1 2	1 120072255	2 15	1 5	1 77	26.49	14.00	

SERIE 3/4											SERIE 3/4	15.07.2014				
	Datum/Uhrzeit	Flow	F _{high}	E _{mod}	F _{max}	dL bei F _{max}	F _{Bruch}	dL bei Bruch	d _o	S ₀	KRAFTMESSDOSE					
		N	N	GPa	N	mm	N	mm	mm	mm²						
Probe 1	41835,48648	0,05352466	-0,00484822	0,08268056	67,3011856	17,6900368			0,5	0,196349541	SCHNUR fixiert					
Probe 2	41835,50016	0,11256284	0,16501479	0,13079937	5,06611061	27,5669308			0,5	0,196349541	Gewicht A			5,07		
Probe 3	41835,50294	0,11383897	0,19912034	0,22083553	4,96109819	26,8836269			0,5	0,196349541	Gewicht B			4,96		
Probe 4	41835,50609	0,11220913	0,17578283	0,15737755	9,90450001	28,551136			0,5	0,196349541	Gewicht C			9,90		
Probe 5	41835,50946	0,11260509	0,17099951	0,14705723	3,14278197	20,9591656			0,5	0,196349541	ohne Gewicht			3,14		
Probe 6	41835,51485	0,34692588	0,46487209	0,08986822	22,6450634	7,83550501	20,9068222	7,765863895	0,9	0,636172512	3_1	1,05	0,87	22,65	26,15	217,00
Probe 8	41835,53216	0,11627229	0,17989099	0,15968468	10,9361715	5,98690796	4,26264477	6,158813477	0,5	0,196349541	3_2	0,75	0,44	10,94	24,75	110,00
Probe 9	41835,53991	0,42352241	0,492089	0,03895891	13,9282331	5,33863258	5,30082703	12,80430031	1	0,785398164	3_3	1,25	1,23	13,93	11,35	138,00
Probe 10	41835,54782	0,43092206	0,58751923	0,09870286	35,5680504	8,65225983	31,7685814	8,494728088	1,3	0,785398164	3_4	1,50	1,77	35,57	20,13	346,00
Probe 11	41835,55682	0,28036833	0,33911949	0,04573084	25,7216339	8,47259617	25,5957737	8,552796364	0,8	0,502654825	3_5	1,20	1,13	25,72	22,74	254,00
Probe 12	41835,61348	2,1715951	2,8080914	0,07622394	58,4991646	9,55608082			2,3	4,154756285	4_1	2,81	6,21	58,50	9,42	566,00
Probe 14	41835,64317	0,7001664	0,90206605	0,0784018	46,8041306	10,3299599	45,7992973	10,37903214	1,3	1,327322896	4_2	1,75	2,41	46,80	19,46	457,00
Probe 15	41835,65427	2,38347888	2,71827865	0,05463894	179,158783	23,5837688	173,709808	23,5543499	2,4	4,523893422	4_3	3,25	8,30	179,16	21,60	1748,00
Probe 16	41835,68372	2,46957421	2,87762403	0,04006514	49,6810646	9,70871067	49,662262	9,727784157	2,5	4,908738522	4_4	2,63	5,41	49,68	9,18	474,00
Probe 17	41835,70866	2,93385673	3,60319734	0,05772198	134,053894	15,7607679	128,739395	15,87145519	2,7	5,725552612	4_5	3,13	7,67	134,05	17,48	1306,00
Probe 7	41835 52299	0 35189611	0 48627153	0 10455585	24 035162	10 5631313	4 73781395	19 81850243	0.9	0 636172512						

SERIE 5											SERIE 5	16.07.2014				
	Datum/Uhrzeit	Flow	F _{high}	E _{mod}	F _{max}	dL bei F _{max}	F _{Bruch}	dL bei Bruch	d ₀	S ₀	KRAFTMESSDOSE	d	A	F	т	Zeitdauer
		N	N	GPa	N	mm	N	mm	mm	mm²		mm	mm²	N	N/mm²	sec
Probe 1	41836,37779	0,21171352	0,27444068	0,07901924	13,1824274	8,76110649			0,7	0,3848451	5_1	1,08	0,91	13,18	14,52	. 130,00
Probe 2	41836,3866	0,03827669	0,05075316	0,0808381	4,44075823	6,77258682	2,34459734	23,35696793	0,3	0,070685835	5_2	0,50	0,20	4,44	22,62	. 45,00
Probe 3	41836,39306	0,11970066	0,18025532	0,15287279	9,31695366	6,92408228	9,18448448	7,181620121	0,5	0,196349541	5_3	0,60	0,28	9,32	32,95	92,00
Probe 4	41836,39955	0,22091949	0,32637569	0,13548862	12,2100935	6,34989023	11,7803068	6,403631687	0,7	0,3848451	5_4	0,88	0,60	12,21	20,31	120,00
Probe 5	41836,40882	0,06986744	0,09527054	0,10064962	10,0965424	7,95822334	9,98412323	7,993135452	0,4	0,125663706	5_5	0,70	0,38	10,10	26,24	102,00
Probe 6	41836,41488	0,03761291	0,05074384	0,08232834	6,38697672	7,77471066			0,3	0,070685835	5_6	0,45	0,16	6,39	40,16	64,00
Probe 7	41836,4199	0,11217631	0,16673811	0,13608881	14,7424622	10,5441704			0,5	0,196349541	5_7	0,73	0,41	14,74	35,71	. 145,00
Probe 8	41836,42775	0,35265127	0,46600556	0,08986634	25,2140522	7,83789253	24,8109913	7,879854202	0,9	0,636172512	5_8	1,10	0,95	25,21	26,53	248,00
Probe 9	41836,43889	0,43490556	0,48209673	0,0786494	31,0440903	10,2979164	28,7396698	10,2680397	1	0,785398164	5_9	1,13	0,99	31,04	31,23	300,00
Probe 10	41836,44825	0,44118667	0,54084164	0,04132068	28,8784256	8,49104309	27,7981339	8,475234985	1	0,785398164	5_10	1,60	2,01	28,88	14,36	283,00
Probe 11	41836,45623	0,43676779	0,62700194	0,11943689	34,0852203	9,2804575	33,1672516	9,242341042	1	0,785398164	5_11	1,50	1,77	34,09	19,29	333,00
Probe 12	41836,47204	0,62401503	0,877918	0,11023667	43,2283669	9,61156082	41,8449821	9,768909454	1,2	1,130973355	5_12	1,43	1,59	43,23	27,10	415,00
Probe 13	41836,48395	0,35955942	0,52796757	0,13139297	28,3257942	7,60979366	28,3217506	7,618979454	0,9	0,636172512	5_13	1,13	0,99	28,33	28,50	281,00
Probe 14	41836,49263	0,16179137	0,24223241	0,14039904	19,5068684	8,18319035	19,5068684	8,183190346	0,6	0,282743339	5_14	0,88	0,60	19,51	32,44	195,00
Probe 15	41836,50116	0,28805172	0,42884818	0,13836776	28,1977272	7,80066633	27,4187756	7,720954418	0,8	0,502654825	5_15	1,20	1,13	28,20	24,93	273,00
Probe 16	41836,535	0,76239455	0,92800117	0,09319441	40,2003136	12,0309134	37,0405693	12,18282986	1,3	1,327322896	5_16	1,63	2,07	40,20	19,38	379,00
Probe 17	41836,54355	1,09112906	1,4541744	0,08970569	37,9695168	6,74671602	37,2010078	6,891613483	1,6	2,010619299	5_17	1,94	2,96	37,97	12,85	376,00
Probe 18	41836,55236	0,73170739	1,0451802	0,11755976	19,6161728	5,60824156	19,4026127	5,679316998	1,3	1,327322896	5_18	1,75	2,41	19,62	8,16	188,00
Probe 19	41836,55829	1,68214142	2,15753412	0,09077769	92,0941467	12,6620617	85,3632355	12,64423943	2	3,141592654	5_19	2,55	5,11	92,09	18,03	877,00
Probe 20	41836,57197	0,07313321	0,12870182	0,21493834	13,295249	30,5130539			0,4	0,125663706	5_20	0,80	0,50	8,44	16,79	89,00
Probe 21	41836,57763	0,11431298	0,17603251	0,1432753	12,3811865	28,4101639			0,5	0,196349541	5_21	0,60	0,28	12,38	43,79	J
Probe 22	41836,58317	0,11296991	0,18508922	0,17897242	8,08138371	5,82580853			0,5	0,196349541	5_22	0,70	0,38	8,08	21,00	80,00
Probe 23	41836,585	0,11500052	0,1866516	0,17752961	55,2395744	7,3622241			0,5	0,196349541	SCHNUR fixiert					

* grau unterlegt sind die Daten der nicht störungsfreien Versuche; sie wurden nicht in die Interpretation der Daten miteinbezogen

16.3 Anhang IIIa geordnete Ergebnisse der ungestörten Versuche an der Kraftmessdose mit 0,1 N/sec und mit Wassergewicht Q=1000ml/100sec

in chronologischer Reihenfolge der Versuchsdurchführung

Messung der Kraft bis zum Bruch geordnet nach Größe der Durchmesser

Probennummer	d	A	Fs	τ	Anzahl
1_1	mm 1,45	mm² 1,65	N 46,39	N/mm² 28,09	n 1
1_2	1,80	2,54	51,59 24,42	20,27	2
1_5	1,05	0,87	17,38	20,07	4
1_6 1_7	0,95	0,71	17,35	24,48 20,78	5
1_8 1 11	1,00	0,79	17,20 16,10	21,90 25,30	7
1_14	1,10	0,95	25,47	26,80	9
2_1	1,05	0,87	20,28	40,99	10
2_4	0,7	0,38	15,63 14,51	40,62	12 13
2_7	0,95	0,71	14,98	21,13	14
2_11 2_12	1,05	0,87	47,29	26,31 26,76	15
2_13	1,25	1,23	30,50	24,85	17
2_15	1,5	1,77	26,48	14,99	19
1_1a 1_2a	1,13	0,99 2,41	21,31 42,48	21,44	1
1_3a	1,43	1,59	30,20	18,94	3
1_58	0,88	0,60	19,73	32,81	4
1_7a 1_8a	1,05	0,87	18,22 20,63	21,04 26,27	6
1_11a	0,90	0,64	22,60	35,52	8
1_12a	1,20	1,13	28,17	24,91	10
1_15a	1,05	0,87	15,83	18,28	11
2_1a	0,93	0,71	21,00	47,54	13
2_6a 2_7a	0,70	0,38	15,90 19.17	41,32 31.88	14 15
2_10a	1,25	1,23	33,58	27,36	16
2_11a 212a	1,05	0,87	18,74 38,35	21,64	17 18
2_14a 2_15a	1,63	2,07	50,50	24,35	19 20
2_138	1,45	0,87	27,01	31,19	20
3_1 3_2	1,05	0,87	22,65 10,94	26,15 24,75	1
3_3	1,25	1,23	13,93	11,35	3
3_5	1,50	1,13	25,72	22,74	5
4_2	1,75	2,41 8,30	46,80	19,46 21,60	6
4_5	3,13	7,67	134,05 13.18	17,48	8
5_3	0,60	0,28	9,32	32,95	10
5_4	0,88	0,60	12,21 10,10	20,31 26,24	11 12
<u> </u>	0,45	0,16	6,39 25,21	40,16	13 14
5_9	1,13	0,99	31,04	31,23	15
5_10	1,60	2,01	28,88 34,09	14,36	16
5_12	1,43	1,59	43,23	27,10	18
5_14	0,88	0,60	19,51	32,44	20
<u> </u>	1,20	1,13	28,20 37,97	24,93 12,85	21 22
5_18	1,75	2,41	19,62	8,16	23
5_20	0,80	0,50	8,44	16,79	25
<u> </u>	0,70	0,38	8,08 14,67	21,00	26 1
<u> </u>	0,55	0,24	7,54	31,75	2
5_6a	0,50	0,20	9,99	50,87	4
<u> </u>	0,75	0,44	13,82 27,34	31,28 14,49	5
5_12a	1,25	1,23	28,16	22,95	7
5_14a	0,95	0,55	17,96	25,34	9
5_15a 5_16a	1,05	0,87	32,00 15,16	36,95 15,25	10 11
5_17a	1,75	2,41	26,99	11,22	12
5_19a	3,00	7,07	106,07	15,01	14
5_20a 3_1a	0,75	0,44	16,18 20,16	36,62 21,22	15 16
3_2a	0,75	0,44	14,81	33,53	17 18
3_4a	1,30	1,33	32,99	24,85	19
3_5a 4_3b	1,20 3,75	1,13 11,04	22,45 217,52	19,85 19,69	20 21
4_4a	2,13	3,55	86,09	24,27	22
4_4b	2,38	4,43	98,99	22,34	24
6_2a 6_3a	1,63 1,63	2,07	65,21 55,84	31,44 26,92	1
6_4a	1,88	2,76	68,70	24,88	3
6_6a	1,55	1,89	62,51	33,13	5
6_7a	1,50 1,38	1,77 1,48	44,71 52,94	25,30 35,65	6 7
6_9a	1,50	1,77	46,45	26,28	8 1
8_2a	1,95	2,99	128,07	42,88	2
8_3a 8_4a	1,95 2,25	2,99 3,98	109,32 114,83	36,60 28,88	3
8_5a	1,88	2,76	87,32 100 73	31,63	5
9_2a	1,63	2,07	100,62	48,52	1
9_4a 9_5a	1,50 1,65	1,77 2,14	68,59 78,94	38,81 36,92	2
9_6a 9_7a	1,35	1,43	67,60	47,22	4
	1,13	0,99	44,32	44,59	1
10_2a 10_3a	2,05	3,30	113,79 128,12	34,48 40,78	2
10_4a	1,30	1,33	50,44	38,00	4
10_6a	0,75	0,44	18,41	41,67	6
11_1a	2,50 2,13	4,91	136,49 103.46	27,80 29.17	1
11_20	2,00	3,14	101,75	32,39	3
11_4a 11_5a	2,50	4,91 3,63	141,77 107,31	28,88 29,56	4 5

d	Fs	Probennummer	Serie 1-5	DI Alvarez
mm 0.45	N 6.20	E G	n=90	n = 120
0,50	9,99	5_6a	2	2
0,55	7,54	5_2a 5_3a	3	3
0,60	9,32	5_3	5	5
0,70	14,51	2_0	7	7
0,70	15,63 15.90	2_4 2 6a	8	8
0,70	10,10	5_5	10	10
0,75	21,00	<u>5_22</u> 2_1a	11	11
0,75	10,94	3_2	2	2
0,75	16,18	5_7a	4	4
0,75	14,81 16,52	3_2a 10 5a	5	5
0,75	18,41	10_6a	6	7
0,80	24,27	5_20 1_5a	5	8
0,88	19,73 7.54	1_6a 1 12a	8	10 11
0,88	19,17	2_2_7a	10	12
0,88	12,21	5_4 5_14	11	13 14
0,90	16,10	1_11 1_11a	13 14	15 16
0,95	17,35	1_6	15	17
0,95	14,98	2_7 1 16a	16 17	18 19
0,95	17,96	5_14a	18	20
0,95	33,95	9_7a 1_8	19	21 22
1,00	20,63	1_8a	20	23
1,05	17,99	1_3	2	2
1,05	20,28	1_15 2 11	3	3
1,05	18,22	1_7a	5	5
1,05	15,83	1_15a 2_11a	6 7	6 7
1,05	27,01	2_11b	8	8
1,05	14,67	5_1a	10	10
1,05	32,00 13,18	5_15a 5_1	11 12	11 12
1,10	25,47	1_14	13	13
1,10	20,16	3_1a	14	14
1,10	22,09 21,31	3_3a 1_1a	16 17	16 17
1,13	31,04	5_9	18	18
1,13	23,49	5_13a	20	20
1,13	15,16 44,32	5_16a 10 1a	21	21 22
1,20	28,17	1_14a	22	23
1,20	25,72	3_5 5_15	23 24	24 25
1,20	22,45	3_5a	25 26	26 27
1,25	33,58	2_10a	27	28
1,25	28,16	<u>3_3</u> 5_12a	28 29	29 30
1,30	32,99	3_4a	30	31
1,35	67,60	9_6a		33
1,38	52,94	1_3 6_8a	1	1
1,43	30,20	1_3a 2_15a	2	3
1,43	43,23	5_12	4	5
1,45	46,39	1_1 2_12	5	6 7
1,50	26,48	2_15 2_12a	7	8
1,50	35,57	3_4	9	10
1,50	34,09 31,82	5_11 5_18a	10 11	11 12
1,50	44,71	6_7a		13
1,50	68,59	6_9a 9_4a		14
1,55	27,34 62,51	5_10a 6 6a	12	16 17
1,60	28,88	5_10	13	18
1,63	65,21	2_14a 6_2a	14	20
1,63	55,84 100,62	6_3a 9 2a		21 22
1,65	78,94	9_5a		1
1,70	63,59 42,48	2_14 1_2a	1	2
1,75	46,80	4_2	3	4
1,75	26,99	5_17a	5	6
1,80 1,88	51,59 68,70	1_2 6_4a	6	7
1,88	70,42	6_5a		9
1,88	87,32	8_5a		11
1,94 1,95	37,97 128,07	5_17 8_2a	7	12
1,95	109,32	8_3a		2
2,00	100,73	0_0a 10_3a		4
2,00	101,75 113.79	11_3a 10_2a		5
2,13	86,09	4_4a	1	-
2,13 2,15	103,46 107,31	11_2a 11_5a		7
2,25	114,83	8_4a	n	9
2,38	136,49	4_4D 11_1a	2	10
2,50	141,77 92,09	11_4a	3	11
2,75	113,02	4_5a	4	
3,00	106,07 134,05	5_19a 4 5	5	
3,25	179,16	4_3	7	
	/1/5/	4 ⊰h		

- Versuchsanzahl Wassergewicht
 - Versuchsanzahl Kraftmessdose Summe
- 45 **90**

Versuchsanzahl Wasser DI Alvarez

Seite 107

Anhang IIIb geordnete Ergebnisse der ungestörten Versuche an der Kraftmessdose mit 0,1 N/sec und mit Wassergewicht Q=1000ml/100sec

5 46

19 60 20 61

28 69 29 70

Berechnung der Spannung bis zum Bruch geordnet nach Größe der Durchmesser

Messungen im November DI Sandra Alvarez

d	τ	Probennummer	Serie 1-5
mm	N/mm²		n = 90
0,45	40,16	5_6	1
0,50	50,87	5_6a	2
0,55	31,75	5_2a	3
0,55	41,36	5_3a	4
0,60	32,95	5_3	5
0,65	43,71	<u> </u>	5
0,70	40,99	2_1	8
0,70	41.32	 2 6a	9
0,70	26,24	5_5	10
0,70	21,00	5_22	11
0,75	47,54	2_1a	12
0,75	24,75	3_2	13
0,75	31,28	5_7a	14
0,75	36,62	5_20a	15
0,75	33,53	3_2a	16
0,80	40 37	<u> </u>	18
0,88	32,81	1 6a	19
0,88	12,54	1_12a	20
0,88	31,88	2_7a	21
0,88	20,31	5_4	22
0,88	32,44	5_14	23
0,90	25,30	1_11	24
0,90	35,52	1_11a	25
0,95	24,48	2 7	20
0,95	18,77	1 16a	28
0,95	25,34	5_14a	29
1,00	21,90	1_8	30
1,00	26,27	1_8a	31
1,05	20,07	1_5	32
1,05	20,78	1_7	33
1,05	23,42	1_15	34
1,05	26,31	2_11	35
1,05	21,04	1_7a	36
1,05	18,28	1_15a 2_11a	37
1,03	31 19	2_11a 2_11b	38
1,05	26.15	3 1	40
1,05	16,94	5 1a	41
1,05	36,95	5_15a	42
1,08	14,52	5_1	43
1,10	26,80	1_14	44
1,10	26,53	5_8	45
1,10	21,22	3_13	46
1,10	23,24	<u> </u>	47
1,13	31,23	5 9	49
1,13	28,50	5_13	50
1,13	23,63	5_13a	51
1,13	15,25	5_16a	52
1,20	24,91	1_14a	1
1,20	22,74	3_5	2
1,20	24,93	5_15 3 5a	3
1,25	24.85	2 13	5
1.25	27,36	2 10a	6
1,25	11,35	3_3	7
1,25	22,95	5_12a	8
1,30	24,85	3_4a	9
1,38	16,44	1_3	10
1,43	18,94	1_38	11
1,43	27 10	2_15a 5_12	12
1,45	28,09	1 1	14
1,50	26,76	2_12	15
1,50	14,99	2_15	16
1,50	21,70	2_12a	17
1,50	20,13	3_4	18
1,50	19,29	5_11	19
1,50	18,01	5_188	20
1,55	14,45	5 10	21
1,63	24,35	2 14a	23
1,70	28,01	2_14	24
1,75	17,66	1_2a	25
1,75	19,46	4_2	26
1,75	8,16	5_18	27
1,75	11,22	5_17a	28
1,80	20,27	<u> </u>	29
2.13	24.27	<u>5_</u> 17 4 4a	31
2,38	22,34	4 4b	32
2,55	18,03	5_19	33
2,75	19,03	4_5a	34
3,00	15,01	5_19a	35
3,13	17,48	4_5	36
3,25	21,60	4_3	37
5,75 Mittelwert	19,09	4_30	58
	,/0		

d	τ	Probennummer	DI Alvarez
mm	N/mm²		n = 30
0,75	37,40	10_5a	1
0,75	41,67	10_6a	2
0,95	47,90	9_7a	3
1,13	44,59	10_1a	4
1,30	38,00	10_4a	5
1,35	47,22	9_6a	6
1,38	35,65	6_8a	7
1,50	25,30	6_7a	8
1,50	26,28	6_9a	9
1,50	38,81	9_4a	10
1,55	33,13	6_6a	11
1,63	31,44	6_2a	12
1,63	26,92	6_3a	13
1,63	48,52	9_2a	14
1,65	36,92	9_5a	15
1,88	24,88	6_4a	16
1,88	25,50	6_5a	17
1,88	28,79	8_1a	18
1,88	31,63	8_5a	19
1,95	42,88	8_2a	20
1,95	36,60	8_3a	21
2,00	32,06	8_6a	22
2,00	40,78	10_3a	23
2,00	32,39	11_3a	24
2,05	34,48	10_2a	25
2,13	29,17	11_2a	26
2,15	29,56	11_5a	27
2,25	28,88	8_4a	28
2,50	27,80	11_1a	29
2,50	28,88	11_4a	30

Seite 108

16.4 Anhang IV Normalverteilung der Scherspannungswerte der Serien 1-5 und DI Alvarez mit Kennwerten

NORMALVERTEILUNG DER SPANNUNGSWERTE der Serien 1-5 Durch esser 0,45 - 3,75 mm I/mm²]

> 8,16 11,22 0,01328168 11,35 0,01360197 12,54 0,01677116

14,36 14,49

15,25

16,44 16,79 16,94

17,66

18,01

18,03

18,28 18,77 18,94 19,03

19,29 19,46 0,0385185 19,56 0,0388075 19,85 0,03957839 20,07 0,04017764 20,13 0,0403147

20,31

0,02264584 762

43181

251284

0,02906415 32462

033054

0341621

,03424114 ,03500911

0,03728212 0,0380358

,0406884 ,0407649

20,78 0,04190284 21,00 0,04239101 21,04 0,04247944 21,13 0,04267977 21,22 0,04286045 21,44 0,043307 0,0436121

 21,60
 0,04361212

 21,64
 0,04369629

 21,70
 0,04380852

 21,90
 0,04415879

 22,34
 0,04488049

 22,74
 0,04542817

22,95 0,04567231 23,24 0,04598126 23,42 0,04614368 23,63 0,04630783 24,27 0,0466423 24,35 0,0466638 466638

24,75 0,04671899 24,85 0,04671662 24,85 0,0467165 24,91 0,04671219 24,93 0,04670999 25,30 0,04662582

26,27 0,04599699 26,31 0,04595820

0,0457288 26,76 0,0454619 26,80 0,0454109 7,10 27,36 0,04460476 28,01 0,0434541 28,09 0,04329728 28,50 0,0424639 31,19 0,03518485 31,23 0,035072 31,28 0,034934 31,75

033437 31,88 0,03302068 32,44 0,03119189 32,81 0,02996561 32,95

29502

),0275726

0,008334

41,36 0,0070732 43,71 0,0039814

50,87 0,00

33,53

35,52 0,0211319 36,62 0,0178215 36,95 0,01686969 40,16 0,00919914 40,37 0,00880159

0,62 40,99 0,0076855 41,32 0,0071277

4669358

24,48

25,34 26,15 0,0466121

26,24 0,046030

ANNUNGSWERTE der Serien 1-5

x	f(x)
t [N/mm²]	
8,16	0,005591
11,22	0,012903
11,35	0,013310
12,54	0,017461
12,05	0,018629
14,50	0.025601
14,52	0,025766
14,99	0,027898
15,25	0,029155
16,44	0,034856
16,79	0,036522
10,54	0.040635
18,01	0,042223
18,28	0,043429
18,77	0,045540
18,94	0,046243
19,29	0,047644
19,46	0,048298
19,85	0.049708
20,07	0,050487
20,13	0,050663
20,27	0,051139
20,31	0,051235
20,78	0,052633
21,04	0,053535
21,22	0,053738
21,44	0,054224
21,64	0,054628
21,70	0,054741
21,90	0,055081
22,34	0.056076
22,95	0,056198
23,24	0,056294
23,42	0,056305
23,63	0,056272
24,27	0,055862
24,35	0.055632
24,75	0,055261
24,85	0,055111
24,85	0,055107
24,91	0,055013
24,93	0,054976
25,30	0,054274
26,15	0.052167
26,27	0,051817
26,31	0,051697
26,53	0,051012
26,76	0,050266
26,80	0,050128
27,10	0,048089
28,01	0,045475
28,09	0,045137
28,50	0,043399
31,19	0,030664
31,23	0,030492
31,88	0,027442
32,44	0,024875
32,81	0,023229
33,53	0,020179
35,52	0,012982
36,62	0,009834
30,95	0.003184
40,37	-,

Durchmesser 0	,75 -2,50 mm	
(f(x)	
t [N/mm²]		
24,88	0,022549748	
25,30	0,024385194	
25,50	0,025296915	
26,28	0,028904096	
26,92	0,031942114	
27,80	0,036176644	
28,79	0,040843958	
28,88	0,041237684	
28,88	0,041249619	
29,17	0,04256659	
29,56	0,04426973	
31,44	0,051365643	
31,63	0,051917903	
32,06	0,053118226	
32,39	0,053896418	
33,13	0,055268806	
34,48	0,056265222	
35,65	0,05548522	
36,60	0,053769945	
36,92	0,053004073	
37,40	0,051644202	
38,00	0,049702179	
38,81	0,046640969	
40,78	0,037853682	
41,67	0,033593875	
42,88	0,027828511	
44,59	0,020319136	
47,22	0,011155535	
47,90	0,00935234	
48,52	0.007905947	

x τ [N/mm²]	t(x)	
8,16	0,005095081	
11,22 11,35	0,009607118 0,009842817	
12,54	0,01220017	
14,36	0,016400702	
14,49	0,016712258 0.016803779	
14,99	0,017985839	
15,01	0,01803712	
16,44	0,021919006	
16,94	0,02332053	
17,48	0,024836635 0,025358971	
18,01	0,026350751	
18,28	0,027121881	
18,77	0,028519082 0,029000053	
19,03	0,029256133	
19,46	0,030464792	
19,56 19,69	0,030753021 0,031116731	
19,85	0,031534191	
20,07	0,032298782	
20,27 20,31	0,032694719 0,032776437	
20,78	0,034024518	
21,00 21,04	0,034581447	
21,13 21,22	0,03491819 0,035131958	
21,44	0,035672171	
21,60 21,64	0,036050785	
21,70	0,036299996	
22,34	0,037754282	
22,74 22,95	0,038589365	
23,24	0,03955476	
23,63	0,040242286	
24,27 24,35	0,041249773 0,041354426	
24,48	0,041535533	
24,85	0,041994651	
24,85 24,88	0,041997059	
24,91	0,042062815	
25,30	0,042468665	
25,30 25,34	0,04247258	
25,50 26.15	0,04265183 0.043099817	
26,24	0,043142157	
26,28	0,043165708	
26,31 26,53	0,043177878 0,043264337	
26,76	0,043327663	
26,92	0,043357183	
27,10 27,36	0,043373527 0,043367753	
27,80	0,043278744	
28,09	0,043166183	
28,50 28,79	0,042940458	
28,88	0,04265034 0,042648122	
29,17	0,04238013	
29,56 31,19	0,041961096	_
31,23 31,28	0,039385608 0,039302119	0,00
31,44	0,038980009	
31,03	0,038362915	
31,88	0,03809195 0,037696173	
32,39	0,036971617	
32,44	0,035984929	
32,95 	0,035647727	
33,53	0,034194315	
35,52	0,028781281	
35,65 36,60	0,028404608	
36,62 36,92	0,025645679 0,024791143	
36,95	0,024695257	
37,40 38,00	0,023412987	
38,81 40,16	0,019523514 0,016052258	
40,37	0,015544864	
40,62	0,014939288 0,014557183	
40,99 41.32	0,014078841 0,013321006	
41,36	0,01324588	
41,67 42,88	0,012562419	0,00
43,71 44,59	0,008636102 0,007248464	
47,22	0,004045727	
47,90	0,003437133	
48,52	0,002950266	
50,87	0,001578805	

Serien 1-5	Durchmesser 0,45 - 3,75 mm		
n = 90	х	f(x)	
	τ [N/mm²]		
arithm. Mittel	24,76	0,046719024	
Standardabweichung	8,54	0,00768286	
untere Toleranzgrenze	16,23	0,0283365	
obere Toleranzgrenze	33,30	0,0283365	
Toleranzbreite	17,08	0,03115815	

Serien 1-5	Durchmesser 0,75 - 2,50 mm		
n = 73	х	f(x)	
	τ [N/mm²]		
arithm. Mittel	23,38	0,056305419	
Standardabweichung	7,09	0,003995525	
untere Toleranzgrenze	16,30	0,034150963	
obere Toleranzgrenze	30,47	0,034150963	
Toleranzbreite	14,17	0,024177988	

Serie DI Alvarez	Durchmesser 0,75 -2,50 mm		
n = 30	x	f(x)	
	τ [N/mm²]		
arithm. Mittel	34,47	0,056265246	
Standardabweichung	7,09	3,25536E-05	
untere Toleranzgrenze	27,38	0,034126597	
obere Toleranzgrenze	41,56	0,034126597	
Toleranzbreite	14,18	0,000938442	

alle	Durchmesser 0,45 - 3,75 mm		
n = 120	x	f(x)	
	τ [N/mm²]		
arithm. Mittel	27,19	0,043375399	
Standardabweichung	9,20	0,006400157	
untere Toleranzgrenze	17,99	0,026308509	
obere Toleranzgrenze	36,39	0,026308509	
Toleranzbreite	18,39	0,027457249	

VERGLEICH

	Serie DI Alvarez	eigene Serien 1-5
nzahl	n = 30	n=73
Ourchmesser	0,75 - 2,50 mm	0,75 - 2,50 mm
	τ [N/mm²]	τ [N/mm²]
rithm. Mittel	34,47	23,38
tandardabweichung	7,09	7,09
intere Toleranzgrenze	27,38	16,30
bere Toleranzgrenze	41,56	30,47
oleranzbreite	14,18	14,17



10,00

20,00

30,00 maximale Scherspannung [N/mm²]

40,00

50,00

60,00

