

Biomechanische Beschreibung der Baumwurzel und ihre Verankerung im Erdreich

P. Müller

Institut für Materialforschung

April 2005

Forschungszentrum Karlsruhe

in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 7104

Biomechanische Beschreibung der
Baumwurzel und ihre Verankerung im
Erdreich*

Peter Müller

Institut für Materialforschung

*Von der Fakultät für Maschinenbau

der Universität Karlsruhe (TH)

genehmigte Dissertation

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

2005

Impressum der Print-Ausgabe:

**Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor**

**Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe**

**Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft
Deutscher Forschungszentren (HGF)**

ISSN 0947-8620

urn:nbn:de:0005-071048

Biomechanische Beschreibung der Baumwurzel und ihre Verankerung im Erdreich

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

von der Fakultät für Maschinenbau der
Universität Karlsruhe (TH)

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Peter Müller

Walzbachtal

Tag der mündlichen Prüfung: 25. Januar 2005

Hauptreferent: Prof. Dr. Claus Mattheck

Korreferent: Prof. Dr. Dietrich Munz

Biomechanische Beschreibung der Baumwurzel und ihre Verankerung im Erdreich

Bäume dienen der Biomechanik schon seit Jahren als Ideenlieferant für Optimierungsstrategien zur Lösung mechanischer Probleme, wobei bisher hauptsächlich die oberirdischen Baumteile als Vorbild genutzt wurden. Das lastadaptive Wachstum setzt sich jedoch auch unter der Erde fort. Diese Arbeit untersucht die Biomechanik der Baumwurzel: In mehreren Feldstudien wurden Erkenntnisse über die wesentlichen Strategien der Baumverankerung gewonnen. Ausgehend von Untersuchungen an geworfenen Bäumen im Forst, wurden Größe und Form der mechanisch wirksamen Wurzelplatte vom Stammdurchmesser und -länge einerseits und der Baumart andererseits miteinander in Beziehung gebracht. Unterscheiden lassen sich demnach die boden- und die wurzelbetonte Verankerung, wobei insbesondere die bodenbetonte Variante über die Scherfestigkeit der Erde ankert. Eine Bodenscherfestigkeitserhöhung am Rand der mechanisch wirksamen Wurzelplatte wurde festgestellt; das Wurzelwerk komprimiert dabei bei Krafteinleitung lokal die Erde. Des weiteren wurden Wurzelstränge aus dem Erdreich ausgezogen und die Auszugskraft sowie die mit der Stammentfernung veränderliche Querschnittsfläche ermittelt. Eine Untersuchung zur lastgesteuerten Zug- und Biegefestigkeit von Wurzelholz schliessen diese Arbeit ab.

Biomechanical Description of Tree Roots and their Anchorage in Soil

In biomechanics, trees act since several years as a supplier for optimization strategies regarding mechanical problems. So far, mostly overground tree components have been used for this purpose.

This thesis wants to show that load controlled growth is carried on below ground, where the biomechanics of tree roots are examined. In several field studies, insights into the recent strategies of tree anchorage have been gained. Starting with examinations of wind throws in the forest, size and form of the mechanical effective root plate have been found dependent on stem diameter and -length on one hand and tree species on the other. Thus, the anchorage can be divided up into a soil focussed anchorage and a root focussed one. An increase of the soil shear strength at the edge of the mechanical effective root plate has been localized; here, the root compresses the soil when being loaded. As a further experiment, roots have been pulled out of the soil, and the pulling force has been measured, as well as the root cross section, depending on its distance from the stem. This work closes with examinations of load controlled tensile- and bending strength of root wood.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Grundlagen	5
2.1. Biologische Betrachtung des Baums und seiner Bestandteile	5
2.1.1. Die oberirdischen Strukturen des Baums und ihre Grundfunktionen	6
2.1.2. Die unterirdischen Strukturen des Baums und ihre Grundfunktionen	13
2.2. Der Baum unter Last	18
2.2.1. Das Axiom der konstanten Spannung	18
2.2.2. Lastquellen	20
2.2.3. Lastsenken	25
2.3. Relevante Aspekte der Bodenmechanik	28
2.3.1. Aufbau des Bodens	29
2.3.2. Erdstoffe unter mechanischer Belastung	32
2.3.3. Scherfestigkeit und Wassergehalt	36
2.3.4. Besonderheiten oberflächennaher Bodenschichten	37
3. Die Verankerungsmechanismen des Baums: Material und Methoden	39
3.1. Der Verankerungsraum	40
3.2. Messung des maximalen Verankerungsmoments	40
3.3. Ausreissversuche an Baumwurzeln	42
3.4. Der Wurzelgesamtquerschnitt in Abhängigkeit vom Abstand zum Stamm	44
3.5. Bodenbewegungen innerhalb der belasteten Wurzelplatte	45
3.6. Die Bodenscherfestigkeitsverteilung innerhalb der Wurzelplatte	47
3.7. Festigkeitsuntersuchungen an Wurzelholz	48
4. Die Verankerungsmechanismen des Baums: Ergebnisse	51
4.1. Die Ergebnisse der Feldstudie „Verankerungsraum“	51
4.2. Die gemessenen Verankerungsmomente des Umziehversuchs	54
4.3. Ausreissversuche an Baumwurzeln: Ergebnisse	55
4.4. Die gemessenen Wurzelgesamtquerschnitte in Abhängigkeit vom Abstand zum Stamm	59
4.5. Die ermittelten Bodenbewegungen innerhalb der belasteten Wurzelplatte	62
4.6. Die Bodenscherfestigkeitsverteilung innerhalb der Wurzelplatte: Ergebnisse	65
4.7. Festigkeitswerte von Wurzelholz	67

5. Diskussion und Ausblick	73
. Literaturverzeichnis	81
A. Verläufe der Bodenscherfestigkeiten aus Abschnitt 4.6	85
B. Verformungsbilder des Wurzelballenmodells	93
C. Verläufe der Biege- und Zugfestigkeiten aus Abschnitt 3.7	97

Tabellenverzeichnis

2.1. Wurzelklassen	14
2.2. Partikelgrößen von Erdstoffen	29
2.3. Konsistenzklassen	31
4.1. Holzzugfestigkeit beim Ausreissversuch	56
4.2. Vergleich der Biegefestigkeiten	70

Abbildungsverzeichnis

1.1. Beispiel für Versagen technischer Verankerungen	1
2.1. Nahrungsströme im Baum	7
2.2. Makroskopischer Holzaufbau	8
2.3. Ersatzmodell für Holzstrahlen	9
2.4. Der Aufbau von Laubholz	10
2.5. Der Aufbau von Nadelholz	11
2.6. Elektronenmikroskopisches Bild eines Hoftüpfels	12
2.7. Wuchsformen europäischer Baumwurzeln	14
2.8. Altersbedingte Änderung der Verankerung	15
2.9. Mikroskopierte Wurzelquerschnitte	16
2.10. Die Spitze einer Jungwurzel	17
2.11. Wurzelquerschnittsformen als Lastprotokolle	18
2.12. Reaktionsholzarten	19
2.13. Turbulente Umströmung eines Baums	20
2.14. Faserstauchen am Stamm	21
2.15. Prinzip des ausgelenkten Stammgewichts	22
2.16. Vier Fälle der Momentenerhöhung durch Stammauslenkung	23
2.17. Kurvenverläufe zu 2.16	24
2.18. Rückstellmoment durch das Wurzelballengewicht	26
2.19. Verankerung über Erdschub	27
2.20. Fichtenwurzel als Verankerungsarm	28
2.21. Fließgrenzenkurve	30
2.22. Plastizitätszahl	31
2.23. Verteilung der Auflast im Erdreich	32
2.24. Kohäsion zwischen zwei Bodenteilchen	33
2.25. Rahmenscherversuch	34
2.26. Mohr- Coulombsches Gesetz für Böden mit Reibwinkelanteil	35
2.27. Reibwinkel und Kohäsion	35
2.28. Spannungszustand eines undrainierten, gesättigten Bodens	36
2.29. Scherfestigkeit und Konsistenzzahl	37
3.1. Zwei exemplarische Verankerungsmechanismen	39
3.2. Messung des mechanisch wirksamen Wurzelballens	40
3.3. Versuchsaufbau des Umziehversuchs	41

3.4. Freilegemethode von Wurzelgeflechten	42
3.5. Die Versuchsanordnung des Ausreissversuchs	43
3.6. Ausgerissene Wurzelstränge	43
3.7. Morphologieunterschiede von tief- und flachwurzelnden Strängen	44
3.8. Messuhrenanordnung beim Kompressionsversuch	45
3.9. Messspieß und Abmessungen	46
3.10. Messung der Scherfestigkeit in der Wurzelplatte	47
3.11. Lage der Probenkörper bei der materialkundlichen Untersuchung	48
3.12. Biege- und Zugversuch am Wurzelholz	49
4.1. Windwurfdiagramm I	51
4.2. Versagensgrenze und Stammhöhe/Durchmesserverhältnis	52
4.3. Windwurfdiagramm II	53
4.4. Vergrößerung des Verankerungsraums	53
4.5. Vergleich von Wurfmoment und theoretischem Stammbruchmoment	54
4.6. Ergebnisse des Wurzelauseissversuchs	55
4.7. Vergleich verschiedener Ausreisskräfte	56
4.8. Konische Wurzelform und Erdschub	57
4.9. Vergleich der Auszugskräfte bei konischer und zylindrischer Wurzelform	58
4.10. Gemittelte Wurzelquerschnitte	59
4.11. Das Wurzelquerschnittsareal: Messergebnisse	60
4.12. Vergleich von Abriss- und intakten Querschnitten	61
4.13. Die Messergebnisse des Kompressionsversuchs, zugbelastete Wurzelplatte.	63
4.14. Durchschnittliche Wurzelplattenstauchung bei biegebelastetem Stamm	63
4.15. Die Messergebnisse des Kompressionsversuchs, druckbelastete Wurzelplatte.	64
4.16. Durchschnittliche Bodenscherfestigkeitsverteilung, Buche	65
4.17. Durchschnittliche Bodenscherfestigkeitsverteilung, Fichte	66
4.18. Scherfestigkeit zwischen zwei Bestandsbäumen	67
4.19. Die Entwicklung der Biegefestigkeit entlang einer Fichtenwurzel	68
4.20. Die Entwicklung der Biegefestigkeit innerhalb eines Segments	69
4.21. Verknottetes Wurzelendstück	70
4.22. Die Entwicklung der Zugfestigkeit entlang einer Fichtenwurzel	71
4.23. Biege- und Zugfestigkeiten bei der Buchenwurzel	72
5.1. Optimierungstechniken des Wurzelgeflechts	73
5.2. Die Lochplatte als Lehrmeister	74
5.3. Das Wurzelballenmodell	75
5.4. Wurzelballenmodell mit leeseitiger Horizontalwurzel	77
5.5. Mechanismen zur lokalen Scherfestigkeitserhöhung	78
5.6. Die Hauptverankerungstypen	79
A.1. Bodenscherfestigkeitsverläufe der Versuche aus Abschnitt 4.6, Herzwurzel 1-4 (a) und 5-7 (b).	86

A.2. Bodenscherfestigkeitsverläufe der Versuche aus Abschnitt 4.6, Herzwurzer 8-11 (a) und 12-15 (b).	87
A.3. Bodenscherfestigkeitsverläufe der Versuche aus Abschnitt 4.6, Flachwurzer 1-4 (a) und 5-8 (b).	88
A.4. Bodenscherfestigkeitsverläufe der Versuche aus Abschnitt 4.6, Flachwurzer 9-12 (a) und 13-16 (b).	89
A.5. Bodenscherfestigkeitsverläufe der Versuche aus Abschnitt 4.6, Flachwurzer 17-20 (a) und 21-24 (b).	90
A.6. Bodenscherfestigkeitsverläufe der Versuche aus Abschnitt 4.6, Flachwurzer 25-28 (a) und 29-32 (b).	91
A.7. Bodenscherfestigkeitsverläufe der Versuche aus Abschnitt 4.6, Flachwurzer 33-36 (a) und 37-39 (b).	92
B.1. Wurzelballenmodell ohne Zugwurzel.	93
B.2. Wurzelballenmodell ohne Zugwurzel, mit simulierter Staunässe.	94
B.3. Wurzelballenmodell mit luvseitiger Zugwurzel.	94
B.4. Wurzelballenmodell mit luvseitiger Zugwurzel und simulierter Staunässe.	95
B.5. Wurzelballenmodell mit beidseitiger Zugwurzel.	95
B.6. Wurzelballenmodell mit beidseitiger Zugwurzel und simulierter Staunässe.	96
C.1. Die Biegefestigkeiten der untersuchten Fichte.	98
C.2. Die Zugfestigkeiten der untersuchten Fichte.	99
C.3. Die Biegefestigkeiten der untersuchten Buche.	100

1. Einleitung

Standfest wie eine Eiche im Sturm!

Dieser Satz trifft nicht im geringsten auf den Sonnenschirm zu, der an einem sonntäglichen Nachmittag, durch ein laues Lüftchen aus der Balance gebracht, auf der adrett gedeckten Kaffeetafel ein Bild der Verwüstung hinterlässt. Eine lächerliche Böe, gepaart mit der Segelfläche des Schirms, verteilt ohne Ansehen der Person Schwarzwälder Kirschtorte und Latte Macchiato auf Schwiegermüttern und Großvätern - kaum zu glauben, schien doch der mühsam aus der Garage gewuchtete Ständerfuss aus Beton als Ankervorrichtung mehr als ausreichend zu sein. Nicht auszudenken, was passieren könnte, wenn die Tanne im Vorgarten ihre Verankerung auf ähnlich dilettantische Art und Weise ausführen würde. Wie dieses alltägliche Beispiel zeigt, stecken in der Befestigung von Gegenständen auf - beziehungsweise in der Erdoberfläche viele Tücken oder gar Gefahren, denn selbst die Standfestigkeit im privaten Umfeld kann, wie etwa der umgestürzte Baum im Vorgarten, schnell bedrohliche Züge annehmen. Betrachtet man gar Bauwerke oder technisches Großgerät, wird schnell klar, dass die Verankerung im oder am Boden ein Schlüsselpunkt bei der Berechnung und Ausführung solcher Projekte darstellen muss. Trotzdem sind Meldungen über umgestürzte Baukräne, Windräder und Masten ein ständiger Begleiter in der Tagespresse.



Abbildung 1.1.: Ein Beispiel einer technischer Verankerung, die der Windlast nicht gewachsen war: Ein Windgenerator mit unterdimensionierter Bodenplatte [1].

1. Einleitung

Das Beispiel des geworfenen Windgenerators (Abbildung 1.1) illustriert eindrucksvoll, dass trotz immensen Materialverbrauchs - vorsichtig geschätzt kamen hier mehr als 500 t Stahlbeton zum Einsatz - keine ausreichende Standfestigkeit gewährleistet war. Sicherlich ist das Kippmoment einer solchen Anlage immens, doch sollte man bedenken, dass auch mächtige Bäume, ausgestattet mit großen Windangriffsflächen, mit nur wenigen Tonnen Material wesentlich ökonomischer ankern können. Ein Beispiel: Gemessene Wurzeltrockengewichte von Fichten mit Höhen zwischen 29-36 m betragen gerade einmal zwischen 74 und 793 kg, bei Stammdurchmessern zwischen 32 und 63 cm [2].

Offensichtlich stellt sich die Natur geschickter an als der Ingenieur - der Baum als hohes Bauwerk mit großer Segelfläche kommt mit einem minimalen Materialeinsatz zu einer bestmöglichen Verankerungslösung. Doch welchen genialen Lösungen bedient sich der Baum bei dieser Leistung? Gemeinhin bekannt ist lediglich, dass das Wurzelgeflecht eine sich zunehmend verzweigende Struktur ist, deren Form, Tiefenwachstum und Reichweite von Baumart zu Baumart differieren kann. Ob diese Unterschiede nun rein biologische Anforderungen erfüllen, oder ob sie auch aus mechanischer Sicht verschiedene Verankerungslösungen darstellen, versucht diese Arbeit aufzudecken. Die überwiegend experimentellen Ergebnisse aus zahlreichen Versuchen im Wald mögen einerseits ein Ausgangspunkt dafür sein, eine neue Art technischer Bodenverankerung zu entwickeln, andererseits können sie beurteilen helfen, ob und wo Veränderungen wie Schachtarbeiten oder Rohrleitungsbau im Wurzelbereich von Bäumen an Straßen und Wegen getätigt werden dürfen, ohne ihn zur potentiellen Gefahrenquelle zu machen.

Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 werden die Grundlagen, die für diese Arbeit wesentlich sind, vorgestellt. Begonnen wird mit den biologischen Aspekten, die es neben den mechanischen zu beachten gilt. Aufgeteilt in oberirdische und unterirdische Strukturen, werden die Funktionen und der Aufbau der einzelnen Baumkomponenten erklärt.

Es folgt eine Auflistung der Lastquellen und -senken, denen der Baum ausgesetzt ist, sowie ihre rechnerische Abschätzung. Anhand der erörterten Größen zeichnen sich die Belastungs - und Längenbereiche ab, die für die Vorbereitung beziehungsweise Validierung der nachfolgenden Feldstudien hilfreich sind.

Als wichtiges Gebiet wird anschließend die Bodenmechanik behandelt. Auch wenn generell nur die Oberfläche dieser komplexen Materie gestreift werden kann, werden einige Aspekte, die für die biologischen Verankerungslösungen von Belang sind, eingehender behandelt.

Kapitel 3 handelt von der Motivation, den Materialien und der Methodik der Feldstudien im Forst. Es wurden Messungen des Verankerungsraums, der gemessenen Umziehungsmomente sowie der Ausreisskraft von Wurzeln vorgenommen. Ebenso wurden Wurzelquerschnitte in Abhängigkeit vom Stammabstand ermittelt und Bodenbewegungen in der Wurzelplatte bei statisch belasteten Bäumen gemessen. Abschließend werden die Versuche zur Bodenschersfestigkeitsermittlung und zur Festigkeit von Wurzelholz vorgestellt.

1. Einleitung

Die Auswertung dieser Versuche ist in Kapitel 4 zu finden, wobei Ergebnisse mit umfangreichem Diagrammmaterial zum Teil im Anhang wieder zu finden sind.

Das Kapitel 5 widmet sich der Diskussion, in der zwei grundlegend verschiedene Verankerungstypen einheimischer Bäume vorgestellt werden: Die bodenbetonte und die wurzelbetonte Verankerung. Anhand der Feldstudienresultate werden die unterschiedlichen Ankermechanismen verglichen. Ein Lochplattenmodell, das die Spannungsverhältnisse in der Scherfuge veranschaulicht, wird hier ebenfalls vorgestellt.

Im Anhang sind Diagrammreihen, die für den Ergebnisteil zu umfangreich waren, untergebracht. Auch die Verformungsbilder des Lochplattenmodells sind hier zu finden.

1. *Einleitung*

.

2. Grundlagen

2.1. Biologische Betrachtung des Baums und seiner Bestandteile

Es genügt nicht, allein die mechanische Wirkungsweise des Baums zu untersuchen. Wie jedes andere Lebewesen unterliegt der Baum unterschiedlichsten Anforderungen, um sein Überleben und den Fortbestand seiner Art sichern zu können. Im Laufe der Evolution hat er die verschiedensten Strategien entwickelt, um zum einen den Anforderungen seiner Umwelt, zum anderen dem Druck der biologischen Konkurrenz Paroli bieten zu können. Daß dies vom mechanischen Standpunkt aus nicht immer von Vorteil ist, zeigen drei Beispiele:

- **Phototropismus** (Wachstum zum Licht): Der Baum verschafft sich gegenüber anderen Pflanzen wie Gräsern und Büschen durch sein ausgeprägtes Höhenwachstum den Vorteil der erstrangigen Lichtnutzung. Damit nimmt der Baum allerdings einen gravierenden Nachteil in Kauf: Mit steigender Höhe nimmt die Windgeschwindigkeit über dem Erdboden zu [3]. Der erhöhte Winddruck führt, in Kombination mit einem langen Hebelarm, zu einer verstärkten Belastung des Stamms und der Verankerung, die im Extremfall zum Versagen durch Stammbruch oder Windwurf führen kann (siehe Kapitel 2.2).
- **Apikaldominanz** (Vormachtstellung des Wipfeltriebes): Das Höhenwachstum des Wipfeltriebes wird gestärkt, ein himmelwärts gerichtetes Wachstum der Seitenäste wird unterdrückt, Äste unter dem Wipfeltrieb wachsen bevorzugt nach aussen und nicht nach oben. Dies verhindert eine gegenseitige Lichtkonkurrenz benachbarter Äste und vergrößert gleichzeitig die von der Sonne beschienene Fläche. Zudem wird die Lichtausbeute benachbarter, jüngerer Baumkonkurrenten eingeschränkt und damit die eigene Vormachtstellung gefestigt. Der Nachteil: Die Ausladung der Äste bewirkt eine Belastungserhöhung an der Stammanbindung. Dies ist umso gravierender, als der Übergang von Stamm zu Ast im mechanischen Sinn eine Kerbe darstellt, was normalerweise mit einer lokalen Spannungsüberhöhung einher geht. Diese Spannungsüberhöhung baut der Baum durch lastgesteuertes Wachstum ab, was eingehender im Abschnitt 2.2.1 beschrieben wird.
- **Negativer Geotropismus** (von der Erde weg gerichtetes Wachstum der Seitentriebe) Zwar unterdrückt die Apikaldominanz das senkrecht aufstrebende Wachstum der Seitentriebe, trotzdem ist das Wachstum tendenziell aufwärts gerichtet, um die Lichtausbeute zu verbessern. Mechanisch hat dies Vor- und Nachteile:

2. Grundlagen

Der Hebelarm des Astes entwickelt sich mit größer werdender Steigung günstiger, allerdings wandern Schwerpunkt der Krone und Windangriffsfläche weiter vom Erdboden weg, was den Hebelarm des Stamms negativ beeinflusst.

2.1.1. Die oberirdischen Strukturen des Baums und ihre Grundfunktionen

Nimmt man zuerst die übergeordneten Baumstrukturen in Augenschein, sind **Blätter** und **Nadeln** die auffälligsten Baumbestandteile: Sie versorgen den gesamten Baum, auch das Wurzelwerk, mit Produkten aus der Photosynthese; Kohlendioxid wird über ihre Oberfläche aufgenommen und zusammen mit Wasser und Nährsalzen, welches von den Wurzeln über ein Leitungssystem bis zu den Blättern gefördert wird, im Blatt zu Assimilaten, in der Hauptsache Zuckern, verarbeitet. Dies sind (nach [4]) in der Hauptsache Fructose und Glucose, daneben werden in geringen Mengen noch Aminosäuren und Vitamine der B - Gruppe gebildet. Dieser *Assimilatestrom* verteilt diese Produkte bis hinab ins Wurzelwerk. Neben der Bildung der Nährstoffe haben die Blätter eine weitere wichtige Funktion, nämlich die der Transpiration (wobei dieser Effekt genauso, aber in abgeschwächter Form, bei Nadeln zu beobachten ist). Ein Teil des im Blattwerk ankommenden Wassers wird nicht für die Photosynthese verbraucht, sondern über Spaltöffnungen an der Blattoberfläche an die in der Regel mit weit weniger Wasser gesättigten Umgebung abgegeben - durch dieses, vom Blatt steuerbare „Schwitzen“ schützt es sich einerseits bei starker Sonneneinstrahlung vor Verbrennungen, andererseits entwickelt sich so im gesamten Leitungssystem ein Unterdruck, der Wasser und Nährsalze aus dem Boden nach oben fördert. Dieser Transportvorgang wird auch *Transpirationsstrom* genannt. Die Aufteilung der beiden Stoffströme ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

Äste haben drei grundlegende Funktionen:

- Funktion eins: Sie dienen als Leitungssystem in zwei Richtungen. Von ihrer Spitze zum Stamm hin werden die Assimilate transportiert, in umgekehrter Richtung passieren Wasser und die Nährsalze die Transportwege.
- Funktion zwei: Sieht man den Ast als „Arm zum Licht“, übernimmt er die Aufgabe, die nutzbare Lichtaufnahme­fläche zu vergrößern, indem er sich als Blattträger weit vom Stamm entfernt - was in mechanischer Hinsicht das Problem eines langen Hebelarms aufwirft.
- Funktion drei: Nicht zuletzt fungiert der Ast als Träger der Fortpflanzungsorgane, die im Lauf der Wachstumsphase gebildet werden, und in möglichst großer Entfernung zum Stamm platziert werden müssen.

Der **Stamm** schliesslich ist die tragende Säule des ausgebreiteten Stoffwechselschirms, und gleichzeitig das gebündelte Leitungssystem beider gegenläufiger Transportströme. Während der kalten Wintermonate dient er gleichzeitig als Speicher für Reservestoffe, die der Baum zum Beginn der nächsten Wachstumsperiode als Starthilfe benötigt. Vor allem Fette und Stärke werden im *Bast* und den *Parenchymzellen* eingelagert (vgl. dazu den Abschnitt „Der Aufbau des Stammholzes“ weiter unten).

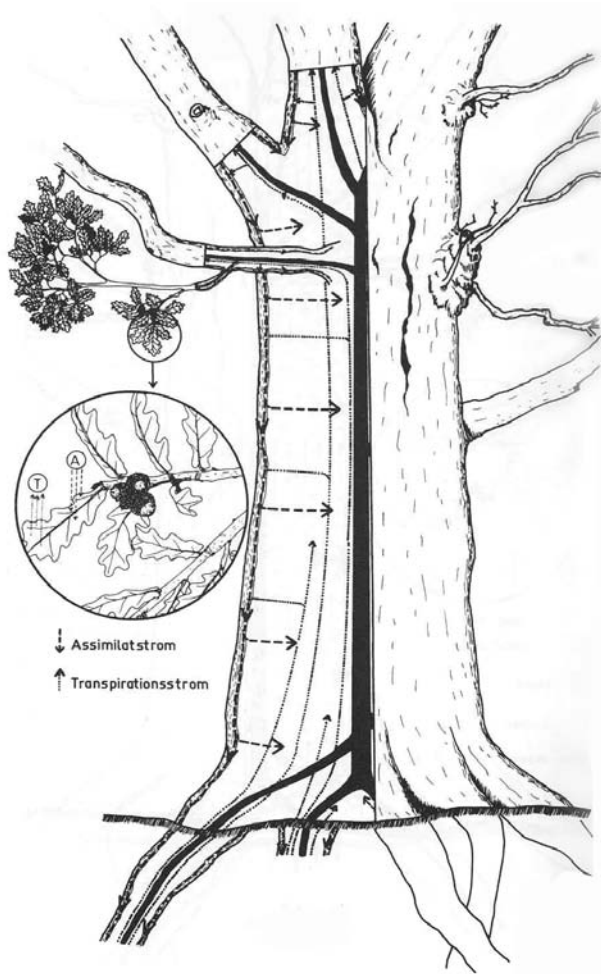


Abbildung 2.1.: (aus [4]) So sind im Baum während der Wachstumsphase die Nahrungsströme organisiert: Der Transpirationsstrom wird über das Zentrum geleitet, während die Assimilate über den sog. *Bast* transportiert werden.

Der Aufbau des Stammholzes

Auf den ersten Blick lässt das Stammholz einen radialen Aufbau erkennen. Eine grobe Unterteilung von innen nach aussen ergibt folgende Bereiche (siehe Abbildung 2.2):

Mark Das im Zentrum des Stammholzes befindliche Mark (auch Markröhre genannt) misst meist nur wenige Millimeter im Durchmesser und besteht aus frühzeitig abgestorbenen *parenchymatischem* Gewebe. In späteren Jahren funktionslos, dient es dem jungen Baum zur Wasserleitung. Bei wenigen Arten (z.B. Rotbuche, Eiche, Erle) übernimmt es auch innerhalb der ersten Jahre, bis zum Zeitpunkt des Absterbens, Speicherfunktionen.

Jahrring Der ringförmige Wachstumsabschnitt, der während einer einjährigen Periode gebildet wird, ist der Jahrring. Oft erkennt man innerhalb eines Jahrrings eine weitere radiale Unterteilung zwischen *Frühholz* und *Spätholz*, so genannt nach der frü-

2. Grundlagen

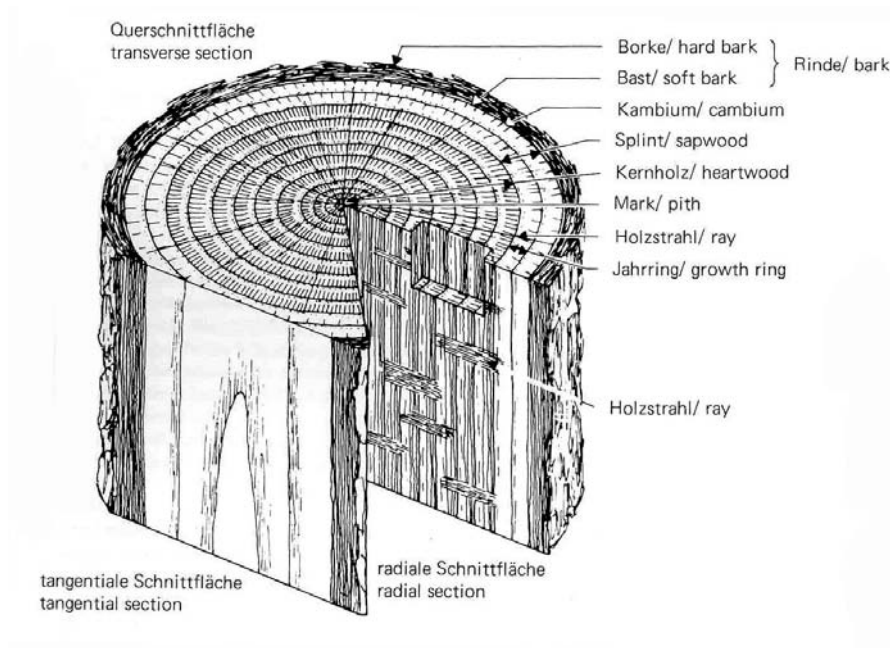


Abbildung 2.2.: Makroskopischer Aufbau von Stammholz nach [5].

hen bzw. späten Wachstumsphase des Jahrrings. Zellulär besteht der Unterschied darin, dass im Frühholz größere, dünnwandigere Gefäße gebildet werden, das Spätholz dagegen ist dickwandiger und mit kleinerem Leitungsquerschnitt aufgebaut und hat aus diesem Grund auch höhere mechanische Festigkeiten ([6], [7]).

Kernholz Mit zunehmendem Alter trennt sich das Holz in zwei Zonen, dem innenliegenden Kernholz und dem aussenliegenden Splint. Kernholz besteht aus abgestorbenen parenchymatischen Zellen. Es unterscheidet sich mehr oder weniger deutlich im Wassergehalt und oft in der Färbung vom angrenzenden *Splintholz*. Mit der Verkernung ist immer ein Abbau des zelleigenen Stärkedepots verbunden, sowie eine Inkrustierung der Zellmembranen.

Splintholz Splintholz wird aus physiologisch aktiven Zellen gebildet. In ihnen findet Wasserleitung statt, in der Depositionsphase übernehmen sie auch Speicheraufgaben.

Holzstrahl Holzstrahlen sind Zellbündel, die vom Mark ausgehend, radial strahlenförmig Kern - und Splintholz durchziehen: Primäre Holzstrahlen stehen mit dem Mark in Verbindung, die später gebildeten sekundären Holzstrahlen sind mehr in die Stammperipherie verschoben. Sind im Nadelholz die Holzstrahlen nicht mit dem blossen Auge erkennbar und oft nur eine Zelle breit, haben die Holzstrahlen in Laubhölzern eine deutlichere Ausprägung und sind zum Beispiel bei der Buche oder der Eiche gut erkennbar.

Neben der radialen Leitungs - und Speicherfunktion erfüllen die Holzstrahlen auch den wesentlichen Zweck der radialen Armierung des Stammholzes, wie es Abbildung 2.3 verdeutlicht; die hohe, spindelförmige Gestalt wirkt, ähnlich einem technischen I - Balken, bei Biegebelastung des Stamms als Verstärkung.

2. Grundlagen

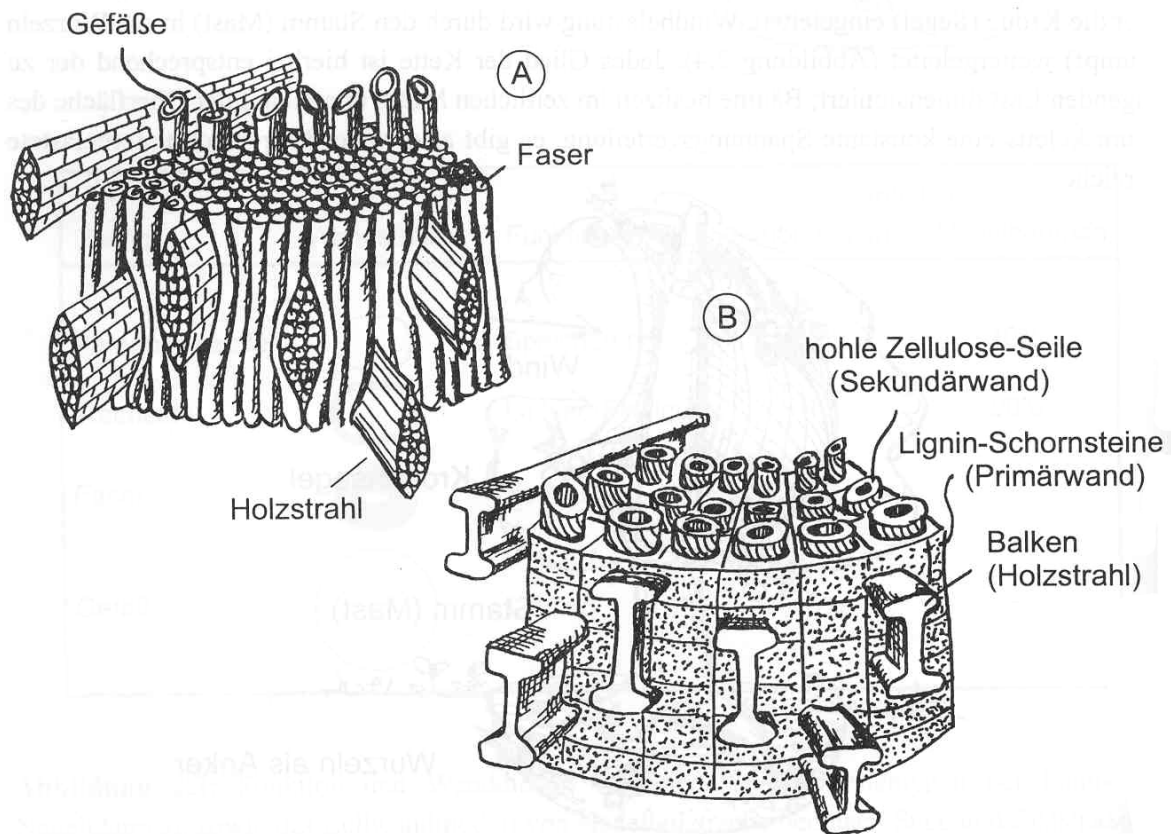


Abbildung 2.3.: Die Holzstrahlen wirken als radialer Verstärkungsmechanismus: Oben die tatsächliche Anordnung im Holz, unten das ingenieurmässige Ersatzmodell: Der Holzstrahl als biegesteifer I- Balken (Zeichnung: C. Matt-heck).

Kambium Das eigentliche Dickenwachstum des Stammholzes geht im Kambium, einer sehr dünnen Zellschicht zwischen Rinde und Holz, vonstatten. Nach aussen werden dabei die Zellen der Borke gebildet, nach innen die Zellen des Stamms, inklusive der sekundären Holzstrahlen. Kambiumzellen sind sowohl tangential als auch longitudinal teilbar: Mit Hilfe einer tangentialen Trennwand teilt sich die Ausgangszelle in eine Zelle, die das Ausgangsstadium beibehält (deswegen auch Embryonalzelle genannt), sowie in eine Xylem- (Holz) oder eine Phloem- (Rinden) -zelle, je nachdem, ob sich der Teilungsprozess im äusseren oder im inneren Teil des Kambiums abspielt.

Bast Der Bast ist der innere Teil der Rinde. Man kann ihn, ähnlich dem Früh- und Spätholz, in Früh- und Spätbast einteilen: Frühbast entsteht während der beginnenden Wachstumsperiode und bildet, im Gegensatz zum Spätbast, keine Festigungszellen aus. Deswegen bezeichnet man die beiden Bastarten auch als Weich- und Hartbast. Analog zu den Holzstrahlen sind innerhalb des Bastes Baststrahlen vorhanden.

Borke Die äusserste Schicht des Phloems ist die Borke, deren Zellen vom Korkkam-

2. Grundlagen

bium gebildet werden. Durch zunehmende Einlagerung des Korkstoffs Suberin in die äusseren Zellwände werden diese Zellen wasser- und luftundurchlässig und sterben ab. Man unterscheidet

- dünnwandige Schwammkorkzellen
- dickwandige Steinkorkzellen und
- Phlobaphenkorkzellen.

Ein Überblick über den zellularen Aufbau des Laubholzes gibt Abbildung 2.4: Das

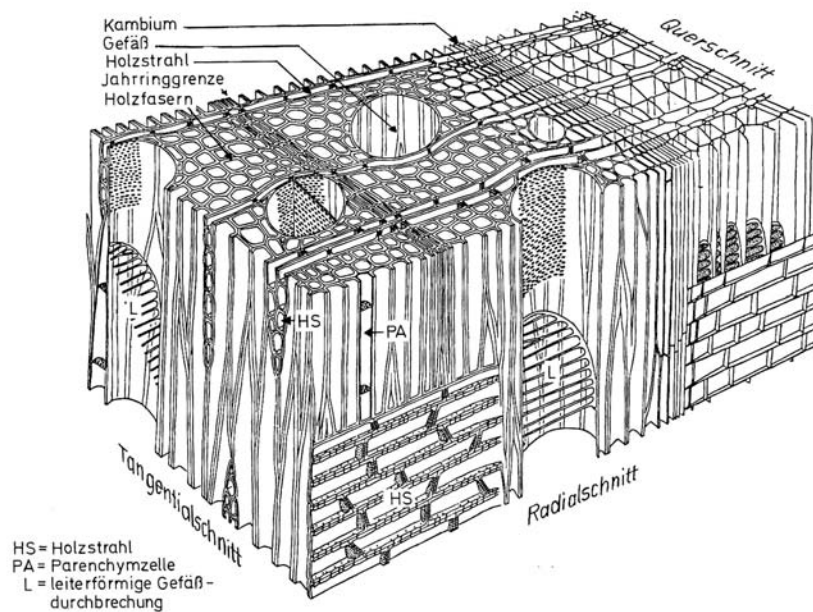


Abbildung 2.4.: Aufbau von Laubholz in schematischer Darstellung nach [8]

Grundgerüst des Laubholzes wird von den Libriform- oder Holzfasern gebildet, die hauptsächlich der Festigung dienen. Von langgestreckter Form, sind sie meist englumig und recht dickwandig. Nach [9] schwankt der Anteil an Holzfasern zwischen 2 und 65%. Tracheen sind als Gefäße ausgebildet und hauptsächlich für die Wasserleitung in vertikaler Richtung verantwortlich. Sie sind der Länge nach über weite Strecken nur durch leiter- oder treppenförmige Durchbrüche abgeteilt, so dass eine Trachee mehrere Meter Länge erreichen oder gar den ganzen Stamm durchziehen kann. Je nach Querschnittsgröße und Anordnung dieser Gefäße unterscheidet man Holzarten auch in *ringporige* (Beispiel: Robinie, Esche) oder *zerstreutporige* Hölzer (wie Linde, Birke, Ahorn); bei den ringporigen besteht ein deutlicher Größensprung zwischen Tracheen des Früh- und Spätholzes, bei zerstreutporigen ist der Übergang kaum sichtbar oder kontinuierlich. Um auch Leitung in der horizontalen Ebene gewährleisten zu können, sind Tracheen an den Seitenwänden

2. Grundlagen

mit so genannten Tüpfeln ausgestattet, bei denen es sich um eine Art Ventil handelt. Je nach dem gerade vorherrschenden osmotischen Druck können diese Tüpfel den horizontalen Assimilate- oder Transpirationsfluss regulieren. Bei dieser einfachen Tüpfelart findet die Regelung dabei mittels einer semipermeablen Membran statt. Darüber hinaus findet man im Holz die so genannten Parenchymzellen. Diese Zellform bildet verholzte, schwach verdickte Zellwände aus, die untereinander ebenfalls mit einfachen Tüpfeln verbunden sind. Während in unmittelbarer Nähe der Gefäße die *parenchymatischen accessorischen Gewebe* zu finden sind, ist das Holzfasergewebe mit *interfibrillärem Parenchym* durchsetzt. In radialer Richtung sind Parenchymzellen in den Holzstrahlen zu finden. Der Gesamtanteil an parenchymatischem Gewebe kann bei europäischen Hölzern bis etwa 10% betragen. Wie man sieht, setzen die Laubhölzer also auf eine Arbeitsteilung der Zellgewebe: Holzfasern und -strahlen übernehmen weitgehend die Aufgabe der Festigung und Speicherung, während die Wasserleitungen durch die Tracheen bereitgestellt werden.

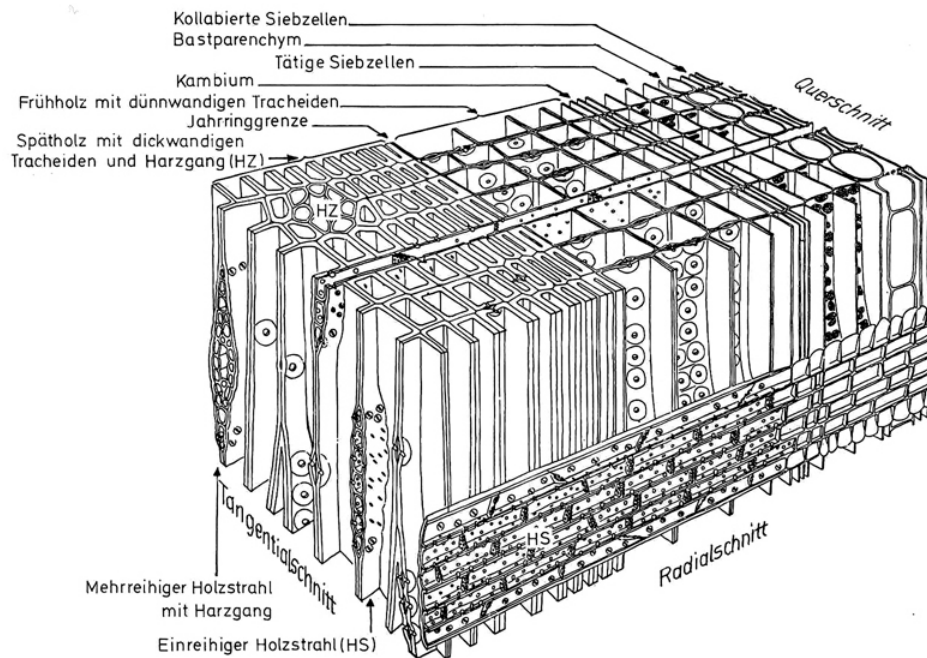


Abbildung 2.5.: Aufbau von Nadelholz in schematischer Darstellung nach [8]

Anders verhält es sich bei den Nadelhölzern: Im Gegensatz zu den Laubhölzern sind hier keine Holzfasern zu finden. Vielmehr hat das Nadelholzgewebe wichtige Funktionen in einer Zellart vereinigt, die der Festigung als auch die der Wasserleitung: Beides wird von den sogenannten *Tracheiden* bewerkstelligt (Abbildung 2.5). Diese Zellen sind, im Gegensatz zu den Laubholzgefäßen, nicht über weite Strecken durchgängig, sondern axial voneinander abgeteilt. Zahlreiche *Hoftüpfel* ermöglichen aber einen zügigen Wassertransport entlang der Stammachse; mit etwa $1,2 - 1,4 \text{ m/s}$ ist er allerdings wesentlich langsamer als die Fördergeschwindigkeit im Laubholz (bis 44 m/s). Diese etwas aufwändigere Tüpfelart besitzt einen Verschlussdeckel, der je nach Bedarf, sowohl die eine als

2. Grundlagen

auch die andere Flussrichtung sperren kann - das Prinzip ist in Abbildung 2.6(b) zu sehen. Der Festigkeitsfunktion kann die Tracheide gerecht werden, indem ihre Zellwände

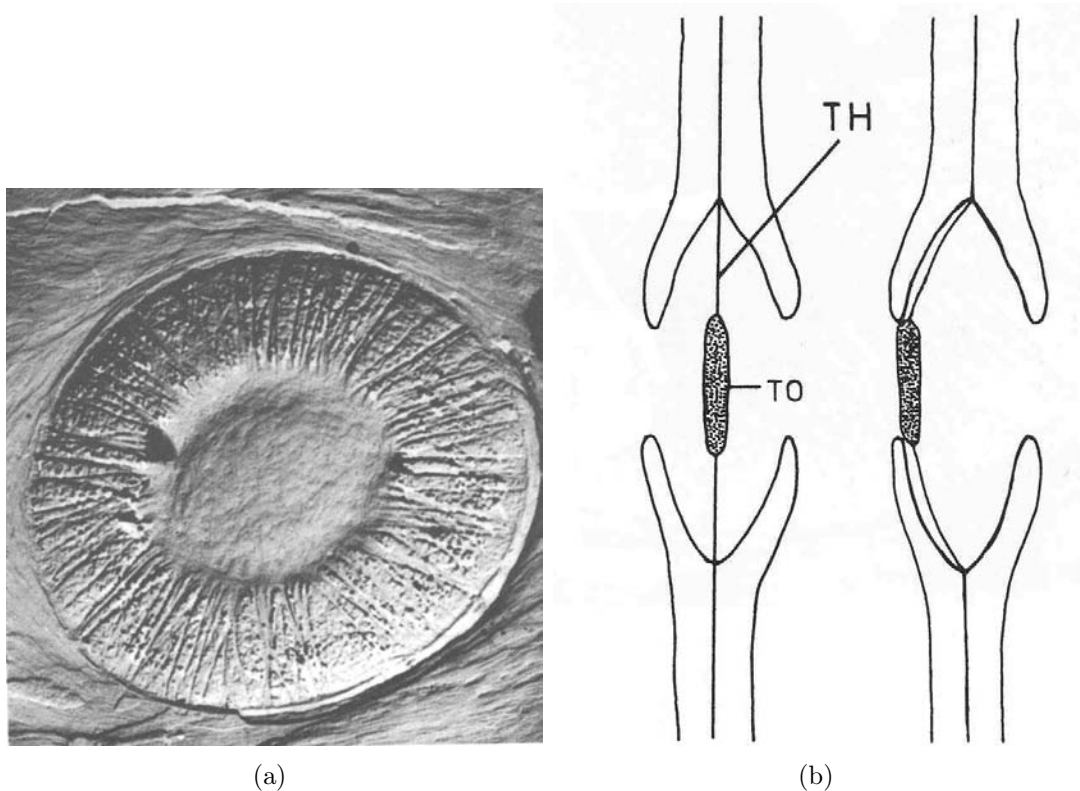


Abbildung 2.6.: Hoftüpfel in der elektronenmikroskopischen Draufsicht (a) und schematisch im Seitenschnitt (b). Der Verschlussdeckel oder *Torus* (mit TO gekennzeichnet) wird durch die *Tüpfelschliesshaut* (TH) bewegt; im Schema ist links die geöffnete, rechts die geschlossene Stellung zu sehen (Abbildungen aus [4]).

mehrschichtig aufgebaut ist: In den einzelnen Schichten sind schraubenförmig elastische, zugfeste Zellulose- „Seile“ in eine druckfeste und steife Ligninmatrix eingebettet, die Zelle bildet schon in sich eine Art Faserverbundwerkstoff. Das Wirkungsprinzip ist in Abbildung 2.3 unten dargestellt. Ein weiterer wesentlicher Unterschied zum Laubholzaufbau ist das Vorhandensein von Harzkanälen. Es handelt sich hierbei um röhrenartige Gänge, die mit harzausscheidenden Drüsenzellen ausgekleidet sind. Die Kanäle durchziehen zum einen axial den Stamm, stehen aber auch mit radial in den Holzstrahlen verlaufenden Harzkanälen in Verbindung und bilden so ein Netzwerk. Das mit ätherischen Ölen und Säure angereicherte Harz dient vor allem dem antiseptischen Wundverschluss bei Beschädigungen, kann aber auch zur Abwehr von Insektenschädlingen eingesetzt werden.

2.1.2. Die unterirdischen Strukturen des Baums und ihre Grundfunktionen

Die zwei wesentlichen unterirdischen Baumbestandteile sind der *Stock* und die Wurzeln. Beim Stock handelt es sich um die im Boden befindliche Verlängerung des Stamms, in die die Wurzelanläufe und bei manchen Arten die Pfahlwurzel münden. Das Wurzelwerk hat die Aufgabe, den gesamten Baum mit Wasser und Nährsalzen zu versorgen, die in gelöster Form im Boden vorkommen, und wird im Gegenzug von den in den Blättern gebildeten Assimilaten ernährt. Um an das im Erdreich vorkommende Wasser zu gelangen, gibt es allerdings einigen Widerstand zu überbrücken, da Wasser in folgenden Modifikationen im Boden gebunden ist:

1. Kapillarwasser: Jeder durchwurzelbare Boden ist mit Poren durchsetzt. Diese Poren sind mit Wasser und/oder Luft gefüllt. Sie bilden ein zusammenhängendes Netzwerk, so dass durch Wurzeln abgesaugtes Wasser einen Unterdruck erzeugt, der umliegende Wasservorräte nachzieht - ein bedeutender Effekt, auf den im Kapitel 2.3.2 noch näher eingegangen wird. Ist der Boden über längere Zeit vollständig gesättigt (sogenannte Staunässe), haben fast alle einheimischen Baumarten ein Problem: Die Wurzeln benötigen zur Atmung Sauerstoff, der ohne Staunässe in ausreichender Menge von der Oberfläche in die Tiefe diffundiert. Ist Staunässe vorhanden, wurzeln die meisten einheimischen Baumarten lediglich oberhalb des Wasserspiegels.
2. Adsorptionswasser: Durch elektrostatische Anziehungskräfte ist Wasser in direkter Umgebung eines Bodenteilchens stärker gebunden; dieser Binnendruck (er beträgt nach [4] in Mitteleuropa bis 5 bar, kann in Salzwüsten aber bis 100 bar ansteigen!) muss von der Saugkraft der Wurzel überwunden werden. Im Gegenzug muss ein Mechanismus vorhanden sein, der die wassergesättigte Wurzel im ausgetrockneten Boden vor Feuchtigkeitsabgabe schützt: Ein spezieller Ventilmechanismus im Zellgefüge (die sogenannten Caspary- Bänder) verhindert den umgekehrten Wasserfluss.
3. Quellungswasser: Tonminerale sind aus flachen Plättchen aufgebaut, die an ihrer Oberfläche nicht elektroneutral sind: Ihre Anziehungskraft auf Wassermoleküle ist derart groß, dass dieses Quellungswasser für Pflanzen nicht zur Verfügung steht.

Wurzeln lassen sich vorab nach ihrer Größe klassifizieren, in [10] ist die Aufteilung nach Tabelle 2.1 dargestellt.

Wurzelmorphologie

Die Form des Wurzelgeflechts, also auch Art und Anzahl der Verzweigungen, ist bei Baumwurzeln von verschiedenen Faktoren abhängig. Den größten Einfluss hierauf haben jedoch:

2. Grundlagen

Wurzelklasse	Durchmesser [mm]
Starkwurzel	über 50
Derbwurzel	20-50
Grobwurzel	5-20
Schwachwurzel	2-5
Feinwurzel	1-2
Feinstwurzel	<1

Tabelle 2.1.: Einteilung der Wurzeln nach Durchmesserklassen

- Art des Baums: Unter normalen Wachstumsbedingungen tendiert jede Baumart dazu, eine von drei charakteristischen Wurzelgeflechtsformen zu bilden. Nach diesen Formen teilt man Bäume klassischerweise ein in:

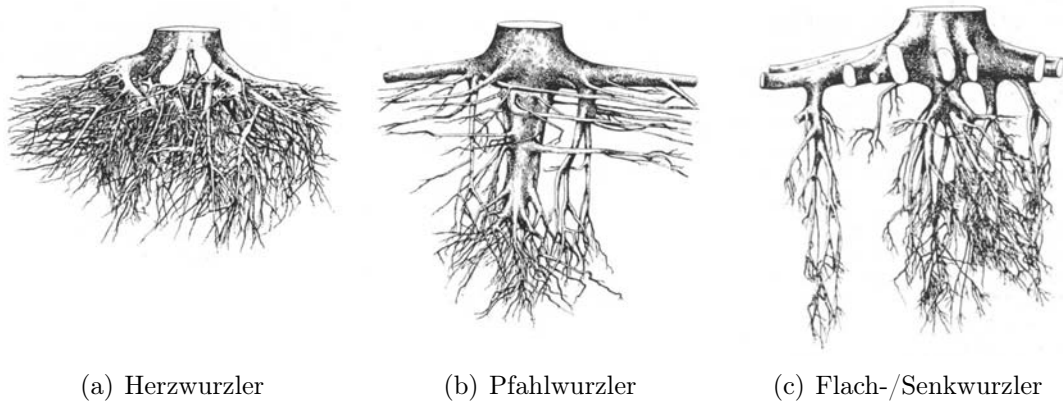


Abbildung 2.7.: Die hauptsächlich vorkommenden Wuchsformen europäischer Baumwurzeln, dargestellt in ihrer jeweils charakteristischen Ausprägung. Je nach vorherrschenden Wachstumsbedingungen kann die Form stark abweichen (Abbildungen aus [10]).

- Herzwurzler (Abbildung 2.7(a)): Bäume dieses Typs bilden tief reichende, schon direkt am Stamm schnell verzweigende Wurzelgeflechte aus. Die Durchwurzelung ist sehr dicht. Typische Vertreter sind Buche und Linde.
- Pfahlwurzler: (Abbildung 2.7(b)): Während im Frühstadium die meisten Bäume eine in Verlängerung des Stamms in die Tiefe wachsende Wurzel ausbilden (die später höchstens sekundäre Bedeutung hat), hält bei Pfahlwurzlern wie der Kiefer das Wachstum dieser *Initialwurzel* auch in späteren Jahren an. Meist stirbt dieser Wurzelteil erst in hohem Alter zurück, die horizontal weitreichenden Starkwurzeln gewinnen dann an Bedeutung.

2. Grundlagen

- Flach- bzw. Senkwurzler:(Abbildung 2.7(c)): Flachwurzelnende Bäume ankern mit starken, horizontal weitreichenden Hauptwurzeln; von diesen können vertikal schwächer ausgebildete *Senkerwurzeln* abgehen, die tiefer liegende Wasservorkommen erschliessen können und die flache Wurzelplatte im Untergrund fixieren.
- Alter: Im Laufe seines Lebens verändert sich das Wurzelgeflecht eines Baumes. Wird zum Beispiel das Stamminnere von einer Fäule befallen, wirkt sich das ebenfalls auf die in Stammverlängerung ankernden Wurzeln aus: Oft mutiert so ein Pfahlwurzler zu einem Flachwurzler (Abbildung 2.8).

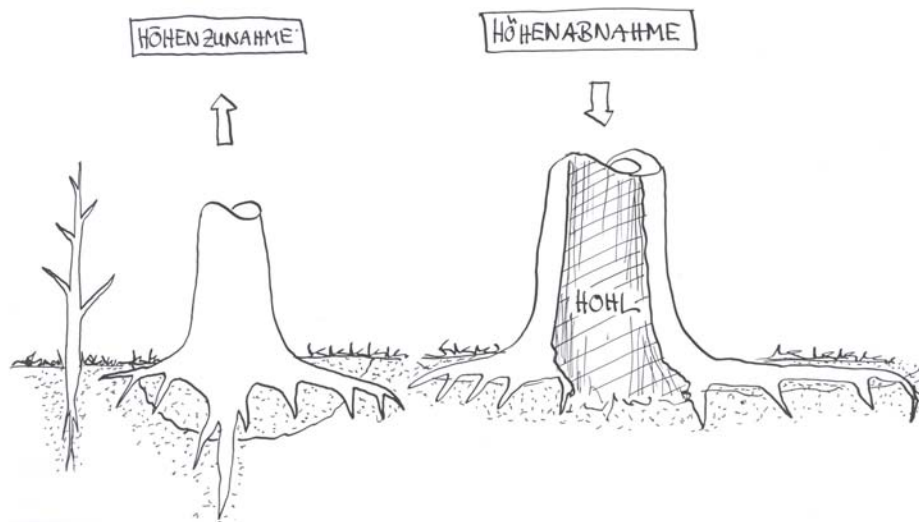


Abbildung 2.8.: Eine durch Fäule im Stamminnern bedingte „Umerziehung“ des Wurzelsystems: Als Jungbaum (links) mit einer Pfahlwurzel ausgestattet, weitet der herangewachsene Baum (mitte) sein Wurzelgeflecht in die Tiefe aus; der ausgehöhlte Altbaum (rechts) verliert die tiefreichenden Wurzeln unterhalb des Stamms, deren Aufgaben müssen von den horizontalen Wurzeln übernommen werden. (Zeichnung: C.Mattheck).

- Bodenbeschaffenheit: Selbst wenn eine Baumart normalerweise ein bestimmtes Wurzelsystem bevorzugt, kann der Untergrund die charakteristische Ausbildung verhindern. Felsiger Untergrund oder solcher mit Staunässe erschwert das Tiefenwachstum des Wurzelgeflechts oder machen es gänzlich unmöglich, ein tiefwurzeln-der Baum muss also auf ein untypisches Wurzelgeflecht ausweichen, um überleben zu können.
- Klima: In wärmeren Klimazonen wird das Vegetationswachstum generell angekur- belt (ausreichende Feuchtigkeit vorausgesetzt), die Bodenwärme scheint aber auch

2. Grundlagen

eine direkte Auswirkung auf das Wurzelwachstum auszuüben. Ein Versuch mit Erhöhung der Bodentemperatur um 5°C ergab ein um 41 Tage früher einsetzendes Wurzelwachstum bei Robinien [11].

Der Aufbau des Wurzelholzes

Ist Wurzelholz stammnah weitgehend der Struktur des Stammholzes ähnlich, verändert sich der Aufbau mit zunehmender Entfernung vom Wurzelanlauf. Anders als im Stamm, wo Festigungs-, Leit- und Speicheraufgaben über die Stammlänge recht konstant bleiben, nehmen im Wurzelholz die Speicher- und Leitaufgaben mit steigendem Abstand zu. Dies wird anschaulich durch zwei mikroskopierte Querschnitte einer Buchenwurzel verdeutlicht (Abbildung 2.9).

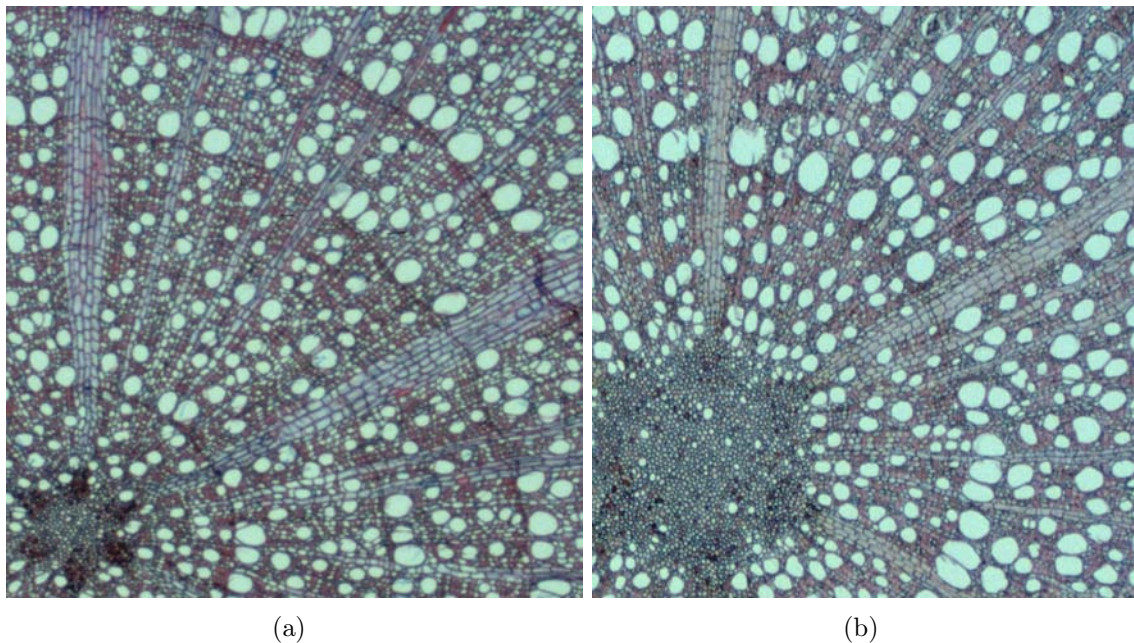


Abbildung 2.9.: Zwei Wurzelquerschnitte der gleichen Wurzel, einmal stammnah (a) und stammfern (b) mikroskopiert, Vergrößerung 25-fach. Die unterschiedlichen Aufgaben spiegeln sich in der Anatomie wider: Die eingeleitete Biegebelastung in direkter Nähe des Stamms erfordert mehr festigkeitssteigernde Holzzellen, während in den Aussenbereichen die Wasserleitung überwiegt; hier ist der Gefäßanteil deutlich höher. (Abbildungen aus [12]).

Dringt man schliesslich zur Wurzelspitze vor, ergibt sich ein gänzlich anderer Aufbau (Abbildung 2.10): Im radialen Schnitt (der den Abschnitt einige Millimeter bzw. Zentimeter vor der äussersten Wurzelspitze zeigt) erkennt man als äusserste Schicht die *Rhizodermis* („Wurzelhaut“, im Bild mit RHD gekennzeichnet) mit den auslaufenden Wurzelhaaren, die die wasseraufnehmende Oberfläche stark vergrößern. Der Weg der

2. Grundlagen

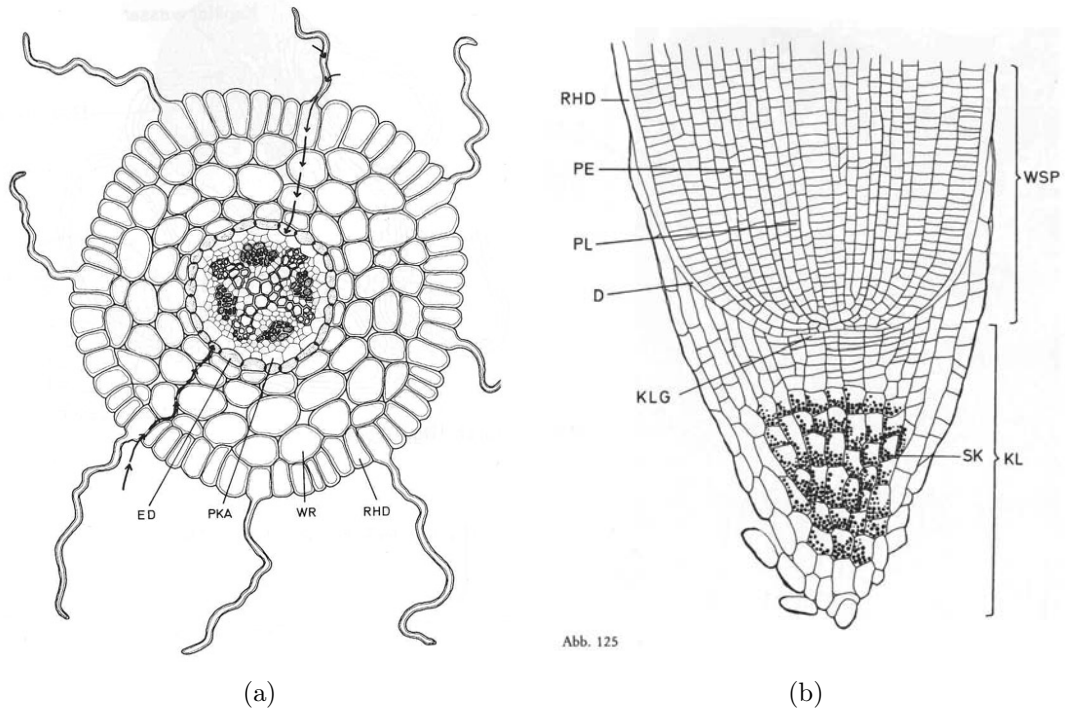


Abbildung 2.10.: Die Spitze einer Jungwurzel, einmal im Längs- (a) und im Querschnitt (b). Die Wurzelhaube (*Kalyptra*, KL) setzt sich deutlich von der übrigen Wurzelspitze (WSP) ab. (Abbildung aus [4]).

Wasseraufnahme ist mit Pfeilen gekennzeichnet. In der nächsten Schicht folgen *Wurzelrindenzellen* (WR), gefolgt von der innersten Wurzelrindenschicht, der *Endodermis*. Sie umschliesst den sogenannten *Zentralzylinder*, der wiederum aus dem *Perikambium* (PKA) und strahlenförmig angeordneten Leitbündeln besteht. Der Längsschnitt zeigt den „Bohrkopf“ der Jungwurzel: Die *Wurzelspitze* (WSP) hat eine „Bohrkrone“, *Kalyptra* (KL) genannt, die aus verschleimten Zellen des *Kalyptrogens* (KLG) besteht und das Vordringen im Boden erleichtert. Die mit SK bezeichneten Stärkekörnchen dienen der Wurzelspitze zur vertikalen Orientierung; sie stellen eine Art Schwerkraftortung dar.

Wird die Wurzel auf der Suche nach neuen Wasser- und Nährsalzvorkommen behindert, setzt verstärktes Dickenwachstum ein: Der entstehende Radialdruck kann nach indirekten Messungen bis $2,5\text{ MPa}$ [13] betragen. Durch die radiale Ausdehnung wird das Erdreich (oder das Hindernis) nach oben und unten verdrängt, die Keilwirkung schafft Platz für ein weiteres Vordringen der Wurzelspitze. Des weiteren gehen die Feinwurzeln eines Baums eine Symbiose mit sogenannten Mykorrhiza- Pilzen ein: Die enorme Oberfläche des weitreichenden Pilzgeflechts wirkt wie eine weitere Verzweigung der Feinwurzeln, der Pilz liefert zusätzliches Wasser und Nährsalze an die Wurzel. Im Gegenzug erhält er Nährstoffe zurück, die er selbst nicht bilden kann.

2.2. Der Baum unter Last

Im makro- und mikroskopischen Aufbau des Holzes stösst man auf Phänomene, die eine Reaktion des Baums auf mechanische Belastung widerspiegeln. Form und Anatomie lassen Rückschlüsse zu, welcher Art von Belastung der Baum im Mittel ausgesetzt ist. Da sein Wachstum nur allmählich von statten geht (und zudem in der kalten Jahreszeit noch die Vegetationspause hinzukommt), schlagen sich lediglich die durchschnittlichen Veränderungen nieder. Spitzenlasten fängt der Baum über einen Sicherheitsfaktor ab, der nach [14] zwischen 4 und 4,5 liegt.

2.2.1. Das Axiom der konstanten Spannung

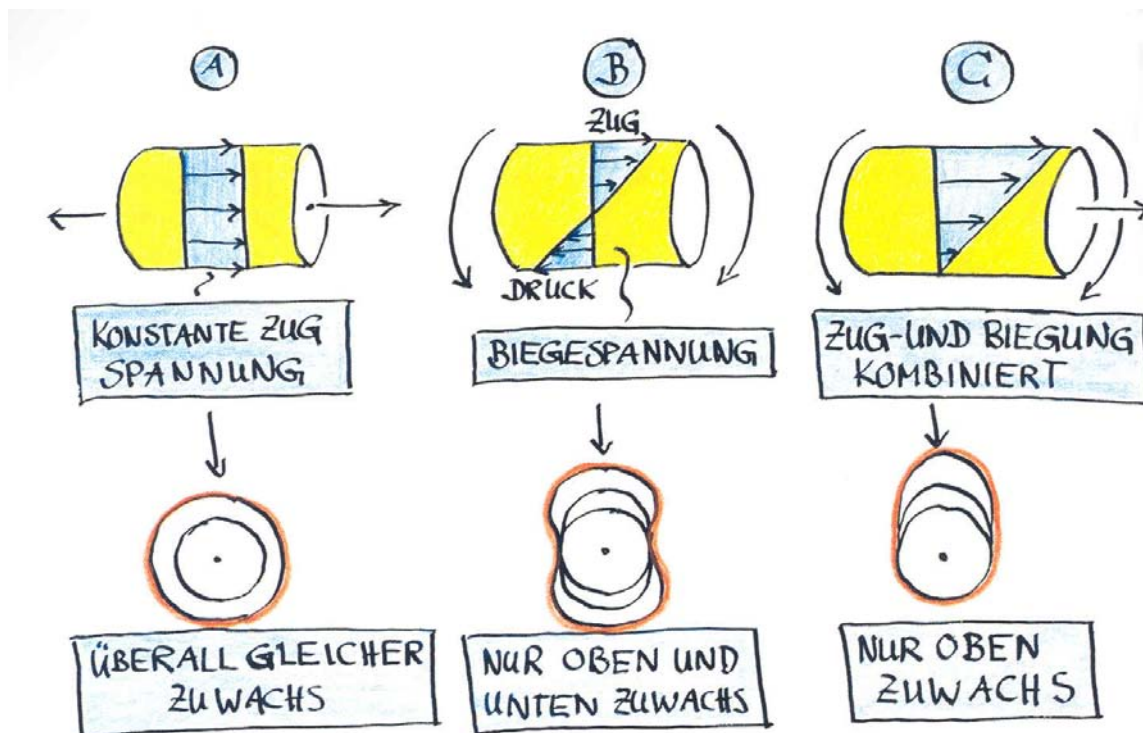


Abbildung 2.11.: Die Querschnittsformen von Wurzeln können wie Lastprotokolle gelesen werden: An Randschichten hoher Spannung wird mehr Material angebaut; so kommen bei Zug runde (A), bei reiner Biegung achtförmige (B) oder bei überlagertem Zug und Biegung ovalisierte Querschnitte (C) zustande (Zeichnungen: C.Mattheck).

Bäume wachsen nicht regellos in den Himmel und versuchen, durch alleinigen Gewinn an Höhe die Konkurrenz auszustechen; schnell würden sie durch solch ein Verhalten ein Opfer des nächsten Sturms und so im Evolutionskampf unterliegen. Viel mehr muss der Baum auch auf seine mechanische Bedürfnisse achten und hat zu diesem Zweck

2. Grundlagen

einen eingebauten Spannungsmesser im Kambium (dessen genauer Mechanismus zur Zeit noch Gegenstand aktueller Forschung ist). Registriert dieser Spannungsmesser eine lokale Lastüberhöhung, lagert der Baum solange mehr Material an, bis eine homogene Lastverteilung eingetreten ist. Der Oberbegriff für diese Homogenität ist das *Axiom der konstanten Spannung*: Es besagt, dass jede mechanisch belastete Struktur, gleich ob lebender oder künstlicher Art, aus mechanischer Sicht nur dann optimal ist, wenn die Spannungen an jedem Ort ausgeglichen ist [15]. Ein illustres Beispiel stellt die lastabhängige Querschnittsänderung der Baumwurzel dar (Abbildung 2.11). Am Oberflächenstück, an dem das Kambium die höchste Belastung festgestellt hat, wächst die Wurzel verstärkt zu; der Baum vergrößert so den belasteten Querschnitt beziehungsweise das Widerstandsmoment, und zwar je nach dem, welche Belastungsart er am ärgsten wahrnimmt. So kann zum Beispiel bei vorherrschender Biegebelastung eine Wurzel einen achtförmigen Querschnitt annehmen, der nahezu einem ingenieurmässigen Doppel-T-Träger gleicht.

Auch Kerbspannungen baut der Baum auf diese Art und Weise ab; an Übergängen zwischen Stamm und Ast, ebenso an Wurzelanläufen, wird an Orten höchster Spannung solange Material angelagert, bis die Spannungsspitzen verschwinden - ein Mechanismus, der Vorbild für das rechnergestützte Optimierungsprogramm *Computer Aided Optimization* (CAO) gewesen ist und weite Verbreitung in der Industrie gefunden hat [15].

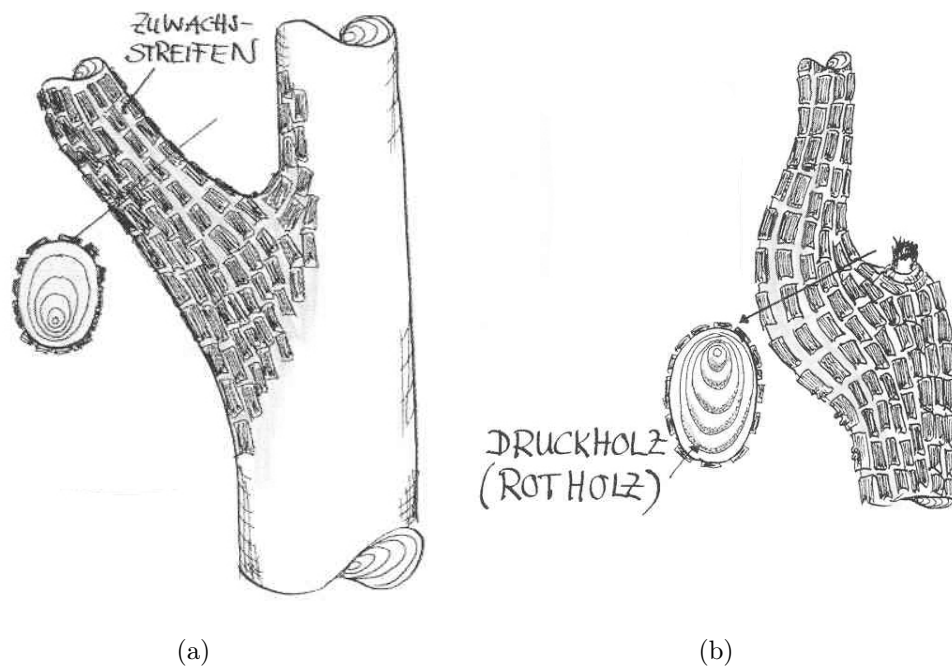


Abbildung 2.12.: Zwei verschiedene Reaktionsholzarten im Vergleich: Laubbäume bilden Zugholz wie in der linken Darstellung aus, die verkürzten Fasern ziehen den Ast nach oben. Rechte Seite: Nadelbäume produzieren Druckholz, sie wachsen auf der Unterseite verstärkt in die Länge und drücken damit den Ast hoch (Zeichnung: C.Mattheck).

Nicht nur formabhängige, auch materialbehaftete Änderungsmöglichkeiten hat der Baum zur Verfügung, um mechanische Missstände auszumerzen: Bei dauerhaften einseitigen Belastungserhöhungen, die zum Beispiel auf einen schräggestellten Baum nach einem Erdbeben einwirken, kann sich ein Stamm oder Ast wieder aufrichten. Laubbäume erledigen diese Aufgabe, indem sie auf der Oberseite Zugholz bilden, Nadelbäume bilden auf der Unterseite Druckholz. Schematisch ist dieser Vorgang in Abbildung 2.12 zu sehen.

2.2.2. Lastquellen

Der Baum hat die vielfältigsten Belastungen zu ertragen, die teils statischer, teils dynamischer Natur sind. Im Einzelnen wirken folgende Komponenten hauptsächlich auf den Baum:

Winddruck

In der Tat stellt der Wind eine der Hauptbelastungen des Baums dar, wie viele „Baumleichen“ nach einem Sturm aufzeigen. Die Frage allerdings, ab welchen Geschwindigkeiten ein Baum gefährdet ist, lässt sich nicht ohne weiteres beantworten. Die normalerweise herangezogenen Windstärken nach *Bofors* geben nur einen kleinen Teil dessen wider, was sich tatsächlich um den Baum herum abspielt:



Abbildung 2.13.: Wirbelbildung auf der Leeseite eines Nadelbaums (nach [16])

In den allerwenigsten Fällen wird der Baum gleichmäßig angeströmt, vielmehr handelt es sich bei der Windgeschwindigkeit u um eine in Ort und Zeit variierende Größe [16]. Turbulenzen und Druckunterschiede auf der Luv- und Leeseite von Krone und Stamm können starke Sprünge im Vergleich zum momentanen Mittel darstellen, sicher einer der Hauptgründe dafür, dass Sturmschäden in einem gleichartigen, gesunden Bestand oft lokal eng begrenzt sind. Eine mögliche Umströmung eines Nadelbaums zeigt Abbildung 2.13. Eine grobe Abschätzung der Kraft, die durch Wind auf eine Baumkrone einwirkt, lässt sich mit Formel 2.1 bewerkstelligen:

$$F_{Windlast} = \frac{\rho}{2} u^2 A_K c_w, \quad (2.1)$$

mit den Parametern

ρ	Dichte der Luft
u	Windgeschwindigkeit
A_K	Projektionsfläche der Krone
c_w	Widerstandsbeiwert der Krone.

2. Grundlagen

Allerdings ist insbesondere der Parameter c_w schwer zu bestimmen, was eine aussagekräftige Lastabschätzung so gut wie unmöglich macht.

Auflasten durch Regen, Eis und Schnee

Niederschläge jedweder Art können beträchtliche Flächenlasten auf die Krone ausüben. Ausschlaggebend ist die horizontale Kronenfläche. Betrachtet man einen Einzelast, ist zudem seine Länge für die Momentenbelastung von Bedeutung. Gaffrey [17] gibt als Überschlagswert für Schnee eine Flächenbelastung von $50 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$ an, was in dem von ihm angeführten Rechenbeispiel für eine 30 m hohe Douglasie eine Zusatzbelastung von 7500 N entspricht.

Eigengewicht



Abbildung 2.14.: Ein Beispiel für ein Druckversagen der Holzfasern: Das Eigengewicht des Baums staucht die Fasern lokal, was durch einen „Schwimmring“ repariert wird (Abbildung aus [18]).

Natürlich sind Alter und Größe maßgeblich für den Umfang der vom Baum gebildeten Holzmasse; das Spektrum reicht von einigen Gramm eines Keimlings bis zu den berechneten 6167 Tonnen des „General Sherman“ im Sequoia- Nationalpark, USA [19](wobei hier gerade mal die oberirdische Masse berücksichtigt wurde). Stellt die axial wirkende Gewichtskraft auf den Stamm meist kein oder nur ein geringes Problem dar (Faserknicken am Stammfuß, Abbildung 2.14), kann eine durch Windlast oder einseitigen Wuchs herbeigeführte Verlagerung des Schwerpunktes eine ernste Bedrohung für den Baum darstellen, wie in Abschnitt 2.2.2 gezeigt wird.

Momentenbelastung durch gewichtsbedingte Biegung

Wird der Baum durch Wind gebogen, erfährt er im Stammfuß durch die angreifende Windkraft die höchste Momentenbelastung. Diese erhöht sich allerdings noch um einen wesentlichen Faktor, wie Abbildung 2.15 zeigt:

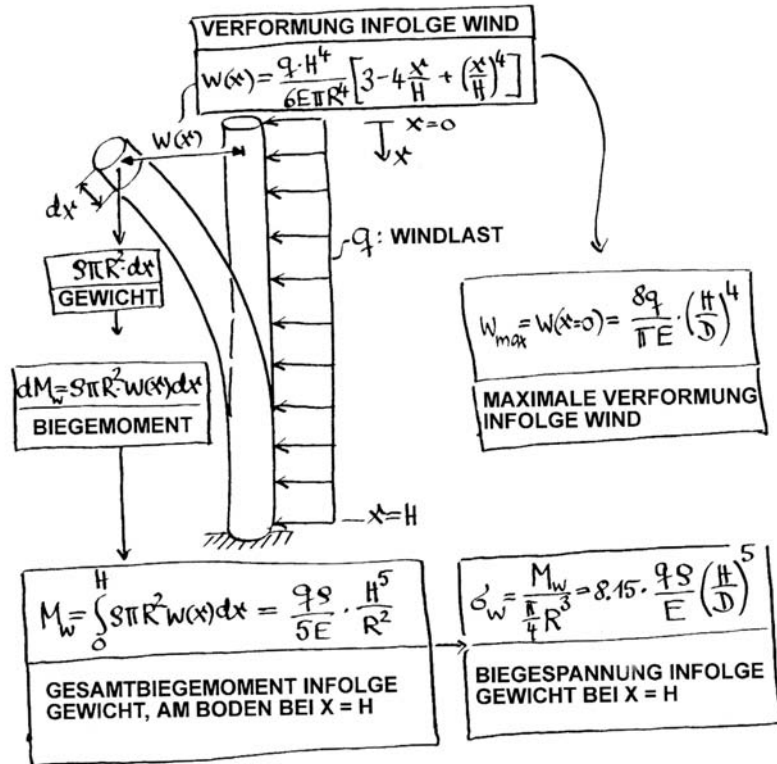


Abbildung 2.15.: Eine Sekundärwirkung der angreifenden Windlast ist der Momentenanteil durch das gebogene Eigengewicht des Stamms, hier in Näherung als Vollzylinder abgebildet. Die Abholzigkeit des realen Stamms und die hier fehlende Kronenmasse kompensieren sich zum Teil (aus [20]).

Das Eigengewicht von Krone und Stamm, das aus der senkrechten Position ausgelenkt wird, bringt einen weiteren Momentenbeitrag in den Stammfuß ein. Dabei sind zwei Faktoren von Bedeutung: Zum einen spielt die Masseverteilung über der Baumlänge eine Rolle, zum anderen das Widerstandsmoment des Baumstamms über der Baumlänge. Diese beiden Parameter bekämpfen sich gegenseitig: Ist ein Stamm stark *abholzig* (das heisst, sein Durchmesser nimmt mit zunehmender Höhe stark ab; zur Einteilung siehe auch [21], sinkt zwar sein Widerstandsmoment mit zunehmender Höhe, die am weitesten ausgelenkten Massenanteile sind aber auch am geringsten.

Wie hoch nun dieser Anteil an der gesamten durch den Wind eingetragenen Momentenbelastung ist, wurde an vier Fällen untersucht (Abbildung 2.16):

Auf einen Zylinder und einen Kegelstumpf werden jeweils eine rechteckige und eine

2. Grundlagen

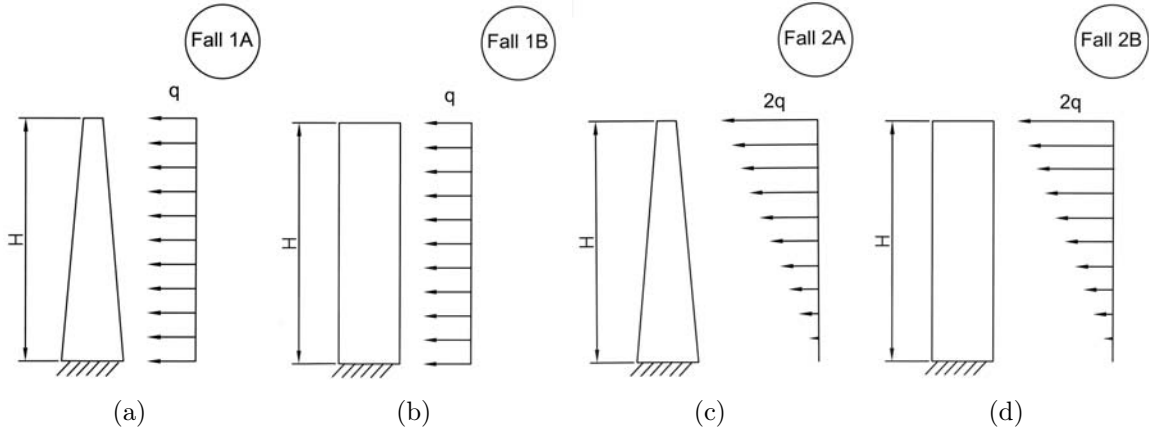


Abbildung 2.16.: Die vier untersuchten Fälle des Momentenbeitrags durch ausgelenktes Eigengewicht.

dreieckige Flächenlast aufgebracht, wobei die rechteckige eher die Anströmung eines freistehenden Baums an einem Hang annähert, die Dreieckslast eher die Verhältnisse im Bestand widerspiegelt. Um die Gesamtbelastung der Fläche gleich groß zu halten, wurde die maximale Dreieckslast $q_{max,D}$ doppelt so groß wie die Rechtecklast gewählt. Die Gleichungen der Biegelinien von Vollzylindern kann man gängigen Tabellenwerken entnehmen, da das Widerstandsmoment konstant ist [22]. Für eine Rechtecklast mit den Größen aus Abbildung 2.15 lautet sie

$$w_{Zyl,R}(x) = \frac{qH^4}{6E\pi R^4} \left[3 - 4\frac{x}{H} + \left(\frac{x}{H}\right)^4 \right] \quad (2.2)$$

Eine Dreieckslast biegt den Zylinder nach der Gleichung

$$w_{Zyl,D}(x) = \frac{q_{max,D}H^4}{30E\pi R^4} \left(11 - 15\frac{x}{H} + 5\left(\frac{x}{H}\right)^4 - \left(\frac{x}{H}\right)^5 \right) \quad (2.3)$$

Bei abholzigen Stämmen muss, wegen des veränderlichen Widerstandsmoments, auf die allgemeine Herleitung der Biegelinie zurückgegriffen werden:

$$\frac{d^2}{dx^2} [EI(x)w''(x)] = \frac{d^2 M_B}{dx^2} \quad (2.4)$$

Das gewichtsbedingte Moment eines Stammes der Wichte γ berechnet sich dann mit den Biegelinien zu

$$M_W = \int_0^H \gamma \pi R^2(x) w(x) dx, \quad (2.5)$$

Die erhaltenen Differentialgleichungen wurden zum Teil mit Hilfe der mathematischen Software *Maple* gelöst, die Momentenverläufe sind in Abbildung 2.17 dargestellt. Man

2. Grundlagen

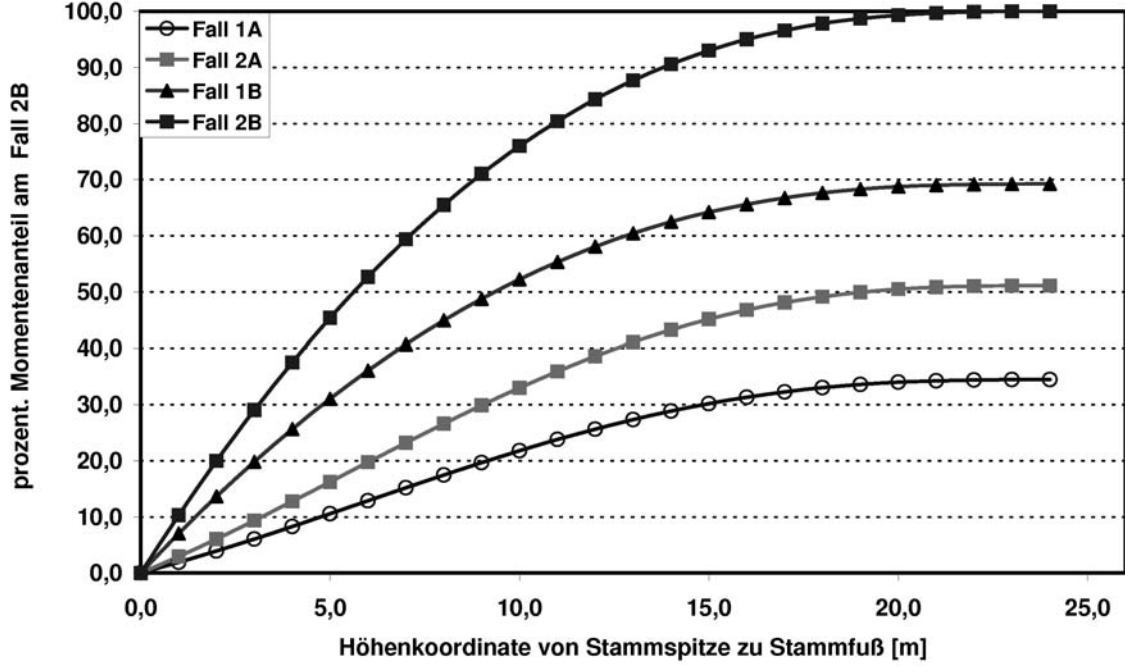


Abbildung 2.17.: Die vier Momentenentwicklungen durch ausgelenktes Eigengewicht im Vergleich, von oben nach unten aufgetragen, also der Spitze bei 0 Metern bis zum Stammfuß bei 24 m. Stammdurchmesser am Fuß: 30 cm, Stammdurchmesser an der Spitze: 10 cm.

sieht, dass die größere Masse des ausgelenkten Vollzylinders deutlich den Vorteil des höheren Widerstandsmomentes zunichte macht; selbst mit der für das Stammmodell günstigeren Rechtecklast weist der Vollzylinder ein höheres Moment auf als die dreiecksbelastete abholzige Form. Wieviel nun dieser zusätzliche Momentenbeitrag an der Gesamtlast ausmacht, sei anhand des ungünstigsten Falls **2B** gezeigt: Das gesamte Moment addiert sich aus dem durch die Flächenlast induzierten Moment M_q und M_W , mit

$$M_q = \int_0^H (H - x)q(1 - \frac{x}{H}) dx = \frac{1}{3}H^2q \quad (2.6)$$

und

$$M_W = \frac{13\gamma q_{max,D}H^5}{90ER^2} \quad (2.7)$$

Setzt man nun in diese beiden Gleichungen für die Flächenlasten $q = 100 \frac{N}{m^2}$ beziehungsweise $q_{D,max} = 200 \frac{N}{m^2}$ und für hiesige Hölzer gängige Werte von $E = 7000 \frac{N}{mm^2}$ und $\gamma = 7000 \frac{N}{m^3}$ (nach [23]) ein, erhält man immerhin ein Verhältnis $\frac{M_W}{M_{Gesamt}} = 0,34$, also macht das ausgelenkte Eigengewicht ein gutes Drittel der Gesamtbelastung von knapp $30000Nm$ aus.

Das maximal einleitbare Moment

Während die Größenverhältnisse für die Gewichtsbelastung durch Niederschläge und Eigengewicht noch gut abzuschätzen sind, ist die Windlast als Hauptkomponente nur sehr schwer quantitativ erfassbar; die Parameter aus Gleichung 2.1 lassen so viel Spielraum, dass für eine zuverlässige Vorhersage umfangreiche Versuche am Einzelbaum durchgeführt werden müssten. Um das ertragbare Gesamtmoment ermitteln zu können, betrachtet man deshalb den Baum nach Mattheck [15] als eine Kette gleich fester Glieder. Dies erklärt, warum der Baum seine Optimierungsstrategien an allen überbelasteten Stellen wirken lässt. Der Baum kann also über seine gesamte Höhe maximal so viel Moment „einsammeln“, wie der Holzquerschnitt am Stammfuß ertragen kann. Für einen zylindrischen Stamm mit dem Durchmesser R_S (gemessen über den Wurzelanläufen) und der Holzbiegefestigkeit σ_B bedeutet dies:

$$M_{Stamm} = \sigma_B \frac{\pi}{4} R_S^3. \quad (2.8)$$

Dies ist gleichzeitig das maximale Verankerungsmoment, mehr kann in den Boden nicht eingeleitet werden.

2.2.3. Lastsenken

Aus mechanischer Sicht ist die Aufgabe des Wurzelgeflechts, die oben beschriebene Lastansammlung wirkungsvoll über eine große Fläche an das Erdreich abzugeben. Aus den folgenden Abschnitten ist ersichtlich, welche Komponenten dem Lastaufkommen entgegenwirken.

Rückstellmoment durch das Gewicht des Wurzelballens

Die Masse eines herausgedrehten Wurzelballens beziehungsweise einer hochklappenden Wurzelplatte wirken als Gegengewicht zur Lasteinleitung durch den Stamm.

Abbildung 2.2.3 verdeutlicht die zwei verschiedenen Grundtypen: Ein Wurzelballen mit der Form eines Kugelabschnittes 2.18(a) und eine Wurzelplatte in Form einer halben Scheibe 2.18(b). Das Rückstellmoment des Wurzelballens bei Drehung um O berechnet sich danach mit

$$M_{Ballen} = \frac{R^*}{4} \sin \varphi (G_1 + 2,7G_2), \quad (2.9)$$

wobei das Stammgewicht

$$G_1 = \pi r^2 \frac{R^*}{2} \gamma_{Holz} \quad (2.10)$$

und das Wurzelballengewicht

$$G_2 = \frac{5}{24} \pi R^{*3} (a\gamma_{Holz} + (1-a)\gamma_{Boden}) \quad (2.11)$$

Das Rückstellmoment der Wurzelplatte berechnet sich nach folgender Gleichung:

2. Grundlagen

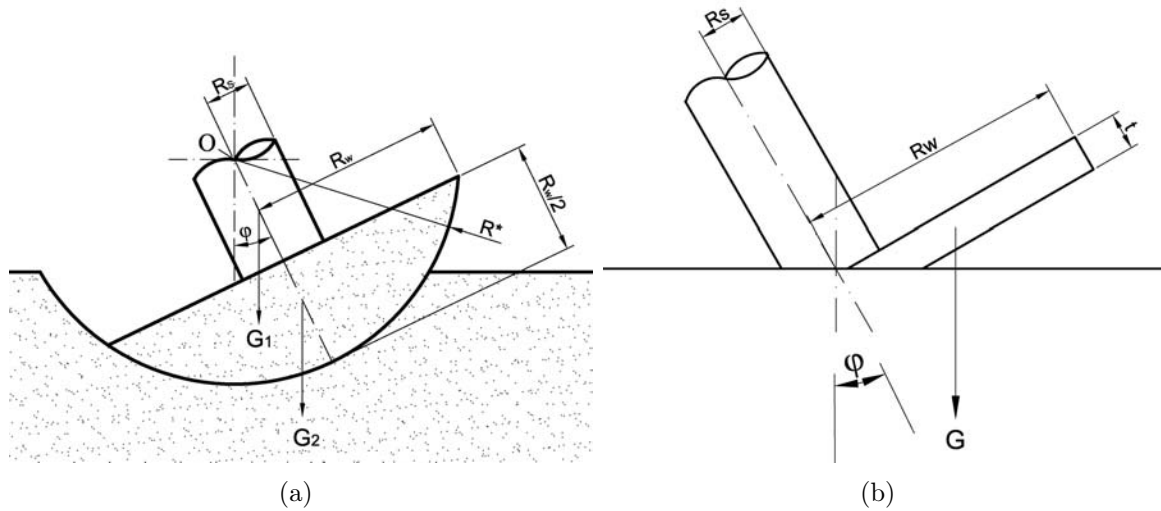


Abbildung 2.18.: Ballen (a)- und plattenförmig (b) angehobene Wurzelteller und ihre dem Herausdrehen entgegenwirkenden Gewichtskräfte.

$$M_{Platte} = \frac{2}{3} R_W^3 t \cos \varphi (a \gamma_{Holz} + (1 - a) \gamma_{Boden}) \quad (2.12)$$

Dabei bedeuten

R^*	der Radius vom Drehpunkt bis zur Scherfläche beim Wurzelballen
φ	der Auslenkungswinkel
G_1	das Gewicht des Stamms vom Drehpunkt bis zur Erdoberfläche
G_2	das Gewicht des Wurzelballens
G	das Gewicht der Wurzelplatte
γ_{Holz}	die Wichte des Frischholzes
γ_{Boden}	die Bodenwichte
a	der prozentuale Volumenanteil des unterirdischen Holzes.

Für die Wurzelplatte ist das Rückstellmoment bei $\varphi = 0$ maximal, für den Wurzelballen dagegen 0. Wird der Wurzelballen um einige Grad ausgelenkt, hat die Verankerung bereits versagt: Wurzeln sind gebrochen oder ausgerissen, und in der Scherfuge wirkt nur noch die Restscherfestigkeit (siehe Abschnitt 2.3.2). Deswegen kann das Ballengewicht für dieses Modell unberücksichtigt bleiben.

Um eine Vergleichsgröße für das Rückstellmoment der Wurzelplatte zu bekommen, seien in Gleichung 2.12 die Beispielwerte $R_w = 1,5m$, $t = 0,3m$, $\varphi = 0^\circ$, $a = 0,3$, $\gamma_{Holz} = 700 \frac{kg}{m^3}$ und $\gamma_{Boden} = 1800 \frac{kg}{m^3}$ eingesetzt. Das Moment beträgt dann etwa $3300Nm$, was etwa 11% des Gesamtmoments der Beispielrechnung in Abschnitt 2.2.2 aufwiegen würde.

Verankerungsmoment durch Erdschub des Wurzelballens

Betrachtet man das Versagensbild tiefwurzelnder Bäume, sticht im Normalfall der um den Stammfuß herausgedrehte Ballen in Form eines Halbkugelabschnitts ins Auge. Zwischen Ballen und umgebender Erde wirken Scherkräfte, die der Baum in diesem Fall als Verankerung nutzt. Zur Berechnung des Schermomentes des in Modell 2.2.3 dargestellten Ballens schneidet man die Ballenfläche zuerst senkrecht in Abschnitte der Größe dA (Abbildung 2.2.3): Das Versagemoment für den Wurzelballen errechnet sich dann mit

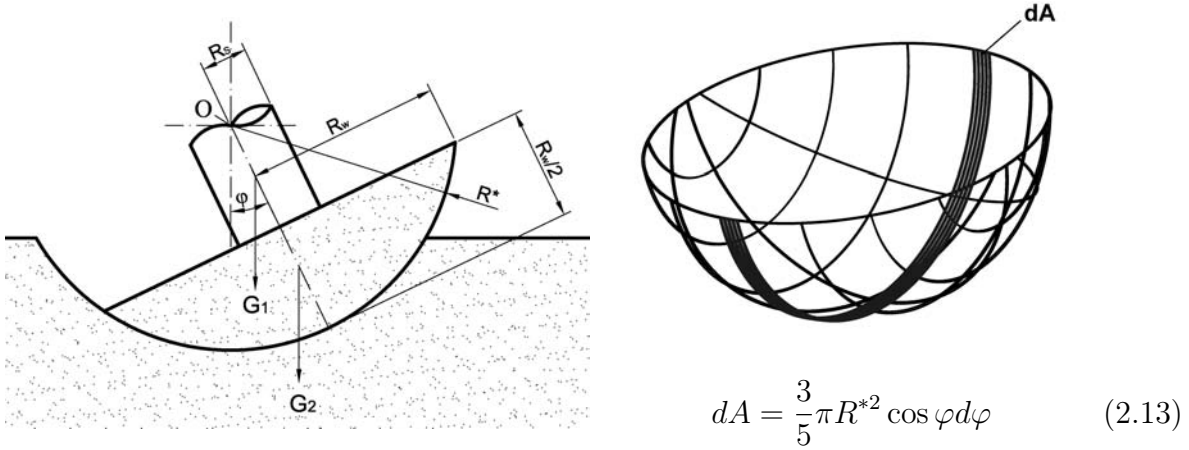


Abbildung 2.19.: Die Größen des Erdschubmodells (links) und die Lage von dA (rechts).

dem Hebelarm $R^* \cos \varphi$ zu

$$M_{Schub} = \int_A R \cos \varphi \tau_f dA, \quad (2.14)$$

was letztendlich diese Formel ergibt:

$$M_{Schub} = \frac{75}{128} \tau_f \pi^2 R_w^3 \quad (2.15)$$

Der Parameter τ_f ist hierbei die Bodenscherfestigkeit, auf die in Abschnitt 2.3.2 näher eingegangen wird.

Die Ankerung über die Wurzel als Zugseil

Flachwurzelnde Bäume wie die Fichte können sich offensichtlich nicht auf eine Scherfläche wie tiefwurzelnde Bäume verlassen. Die vom Stamm weglaufenden Wurzeln verzweigen dagegen erst spät und sind in Stammnähe wesentlich stärker ausgebildet. Abbildung 2.20 zeigt die Umrisszeichnung eines im Feldversuch ausgegrabenen Exemplars: Gut lässt sich diese Form mit einem Arm vergleichen, der einen stammnahen, also ungünstigen, Hebelarm überbrückt und sich erst in größerer Distanz mit der Hand in den Boden krallt. In Stammnähe wird also eine biegesteife Struktur gebildet, die mit zunehmender Entfernung in ein Zugseil übergeht. Wesentliche Parameter wie die Zug- und Biegefestigkeit

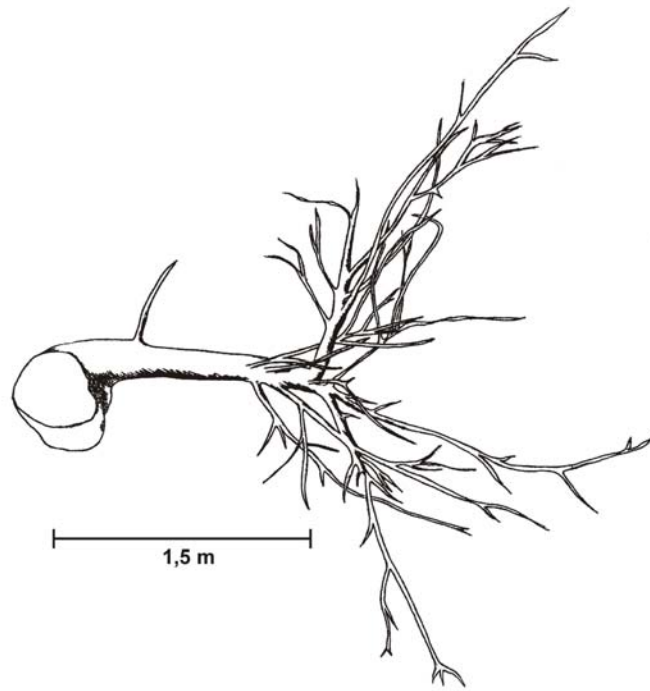


Abbildung 2.20.: Umrisszeichnung einer ausgegrabenen Fichtenwurzel.

sowie die Änderung der Wurzelquerschnitte werden daher im Kapitel 3 unter die Lupe genommen.

2.3. Relevante Aspekte der Bodenmechanik

Sieht man die Verankerung des Baums als Verbund zwischen Wurzel und Boden, anders gesagt den gesamten Verankerungsraum als Verbundwerkstoff zwischen der Wurzel“faser“ und der Boden“matrix“, stösst man auf die Schwierigkeit, dass mit dem Begriff „Boden“ im allgemeinen sehr unterschiedliche Dinge bezeichnet werden. Genauso unterschiedlich sind damit auch die mechanischen Eigenschaften, weswegen im folgenden einige Grundzüge der Bodenmechanik und Bodenphysik angeschnitten werden, und zudem auf einige für die Baumverankerung relevanten Details näher eingegangen wird. Als Vorbemerkung sei darauf hingewiesen, dass es sich bei natürlich vorkommenden Böden um zum Teil hochgradig inhomogene Stoffe handelt, deren mechanisches Verhalten zudem noch mehr oder weniger stark von der Witterung abhängt. Um diesen Abschnitt nicht zu ausführlich werden zu lassen, werden hier nur einige wichtige Grundlagen vorgestellt. Für weiterführende Studien auf diesem Gebiet sei besonders auf [24] und [25] verwiesen.

2.3.1. Aufbau des Bodens

Grenzt man Fels und die mit organischen Zerfallsprodukten vermengte oberste Deckschicht in bewachsenem Gebiet aus (auf diese wird in 2.3.4 näher eingegangen), besteht Bodenmaterial aus verwittertem Felsgestein. Diese Verwitterungsprodukte liegen in verschiedenen Korngrößen vor, die man nach Tabelle 2.2 einteilt [24]:

Korndurchmesser d[mm]	Bezeichnung
0,002 < d	Ton
0,002 < d < 0,006	Feinschluff
0,006 < d < 0,02	Mittelschluff
0,02 < d < 0,06	Grobschluff
0,06 < d < 0,2	Feinsand
0,2 < d < 0,6	Mittelsand
0,6 < d < 2,0	Grobsand
2,0 < d < 6,0	Feinkies
6,0 < d < 20,0	Mittelkies
20,0 < d < 60,0	Grobkies
d > 60	Steine

Tabelle 2.2.: Bezeichnung der Bodenpartikel in Abhängigkeit der Korngröße

Hat ein Boden einen hohen Anteil an Ton oder verkittenden organischen Beimengungen, so nennt man ihn *bindig*, wogegen Böden mit hohem Sand- oder Schluffanteil *rollig* genannt werden. Die Struktur des Bodens bildet einen weiteren Schlüssel zur Klassifizierung. Neben dem Effekt, dass normalerweise verschiedene Korngrößen vermengt vorkommen, ist auch die Lagerungsdichte gleich großer Partikel unterschiedlich. In jedem Fall bilden sich zwischen den einzelnen Partikeln Poren aus, die entweder mit Luft oder mit Wasser gefüllt sind (was einen erheblichen Unterschied hinsichtlich ihrer Reaktion auf mechanische Belastung darstellt, siehe Kapitel 2.3.2). Die Porosität n ist definiert als Quotient des Porenvolumens V_p zum Gesamtvolumen V :

$$n = \frac{V_p}{V} \quad (2.16)$$

Verringert ein Bodenkörper durch Belastung oder Eigengewicht sein Volumen, wird dies Konsolidierung genannt. Dabei wird die Porosität verringert, also Porenwasser oder -luft aus dem Korngerüst verdrängt. Bleibt dieser Bodenkörper nach Entlastung in diesem Zustand, nennt man ihn auch überkonsolidiert [26].

Eine Kenngröße, die insbesondere die für den Baum relevante Scherfestigkeit stark beeinflusst, ist die sogenannte Konsistenz eines Bodens. Sie setzt sich aus zwei weiteren Größen zusammen:

- Fließgrenze: Die Fließgrenze markiert den Übergang, an dem ein Boden vom flüssigen in den plastischen Zustand übergeht. Die Grenze wird nach [24] mit folgendem

2. Grundlagen

Versuch bestimmt: Ein Boden mit bekanntem Wassergehalt ω (der Wassergehalt ist das Gewicht des Wasseranteils geteilt durch das Trockengewicht des Bodens) wird in eine Schale gefüllt und eingeritzt. Die Schale wird anschliessend solange geschlagen, bis sich die Furche geschlossen hat. Dieser Versuch wird mit weiteren Proben und verändertem Wassergehalt wiederholt. In einer halblogarithmischen Auftragung (Abbildung 2.21) ergibt sich eine Gerade. Die Fließgrenze ω_L ist nun derjenige Wassergehalt, bei dem sich nach 25 Schlägen die Furche geschlossen hat.

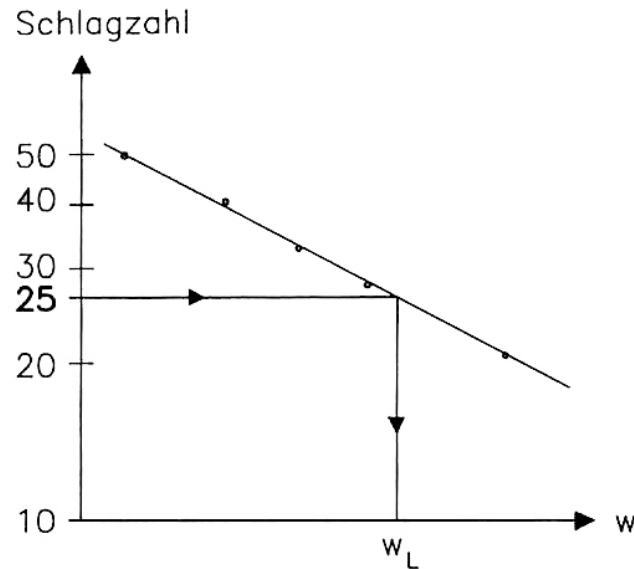


Abbildung 2.21.: Auftragung der Schlagzahl über dem Wassergehalt bei Ermittlung der Fließgrenze. Die Fließgrenze ω_L ist der Wassergehalt bei exakt 25 Schlägen.

- Ausrollgrenze: Sie markiert den Übergang zwischen plastischem und steifem Verhalten eines Bodens. Zu diesem Zweck werden Bodenröllchen mit 3mm Durchmesser auf Filterpapier ausgerollt. Sobald sie zerbröckeln, wird der Wassergehalt bestimmt. Dieser Wassergehalt ω_p ist die Ausrollgrenze.

Die Konsistenzzahl berechnet sich bei aktuellem Wassergehalt ω nun wie folgt:

$$I_c = \frac{w_L - w}{w_L - w_p}, \quad (2.17)$$

wobei der Nenner auch Plastizitätszahl genannt wird und die Spanne markiert, in der ein Boden bildsam, also plastisch verformbar, bleibt:

$$I_p = w_L - w_p \quad (2.18)$$

2. Grundlagen

Eine Auftragung der Plastizitätszahl über der Fließgrenze wurde nach DIN 18196 [27] vorgenommen, um Bodenklassen hinsichtlich ihrer Bildsamkeit bei unterschiedlichen Wassergehalten besser einteilen zu können (Abbildung 2.22). Erwartungsgemäß haben

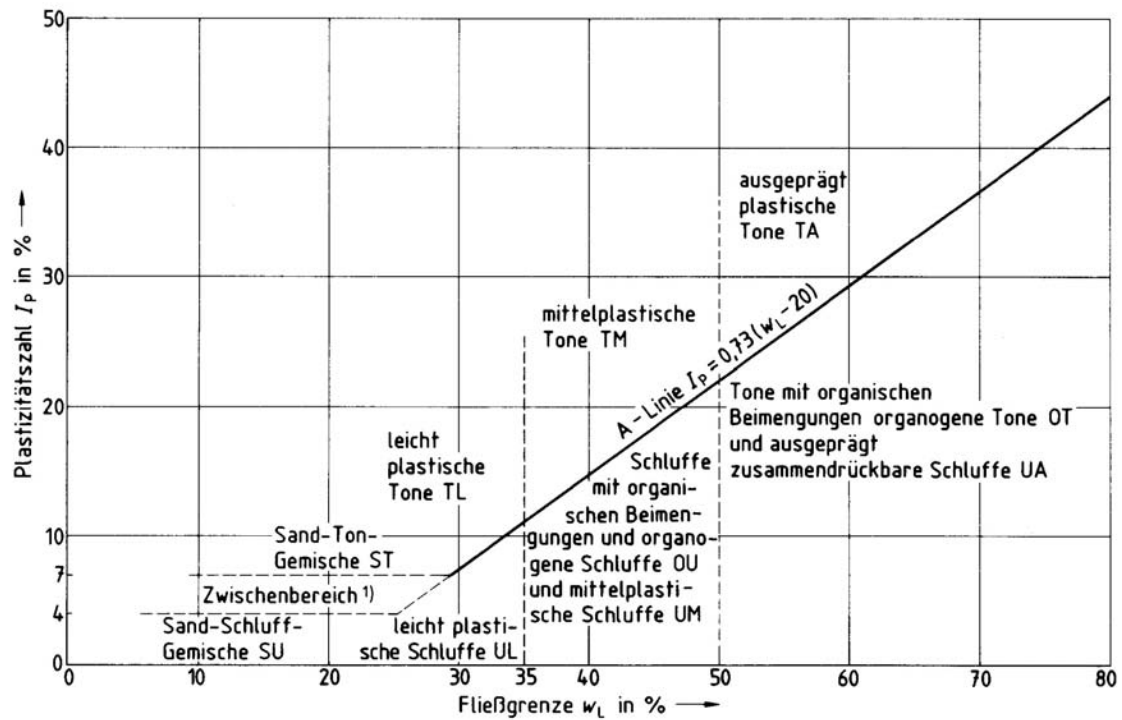


Abbildung 2.22.: Die Plastizitätszahl aufgetragen über der Fließgrenze: Sandige und schluffige Böden zeigen in der Regel geringere Plastizität und sind im Vergleich zu Tonen im unteren Bereich des Diagramms zu finden (Abbildung aus [27]).

sandige Böden eine niedrigere Fließgrenze; die Wasserbindefähigkeit bei Tonen ist, entsprechend der enormen Oberfläche der mikroskopisch kleinen Tonplättchen, um einiges größer. Entsprechend steigt damit auch ihre Bildsamkeit.

Eine Bodeneinteilung kann auch nach der Konsistenz erfolgen, man bezeichnet ihn dann wie folgt:

$I_c < 0,5$	breiig
$0,5 < I_c < 0,75$	weich
$0,75 < I_c < 1$	steif
$I_c > 1$	fest/hart

Tabelle 2.3.: Bodenansprache in Abhängigkeit der Konsistenz

2.3.2. Erdstoffe unter mechanischer Belastung

Die Baumwurzel leitet die vom Stamm eingebrachte Belastung an das Erdreich weiter; um dies effektiv bewerkstelligen zu können, hat sich die Wurzelstruktur an die Art und Weise, wie sich Bodensstoffe belasten lassen, optimal angepasst. Um zu verstehen, welche Möglichkeiten die Wurzel überhaupt nutzen kann, seien hier Erdstoffe hinsichtlich der drei Hauptbelastungsarten untersucht.

- Zug

Abgesehen von einigen Sonderfällen, die in [24] angeschnitten werden, übertragen Erdstoffe keine oder unwesentliche Zugkräfte. Dies ist in der Haufwerkstruktur begründet: Zwei Bodenteilchen lassen sich ohne nennenswerten Widerstand voneinander abheben.

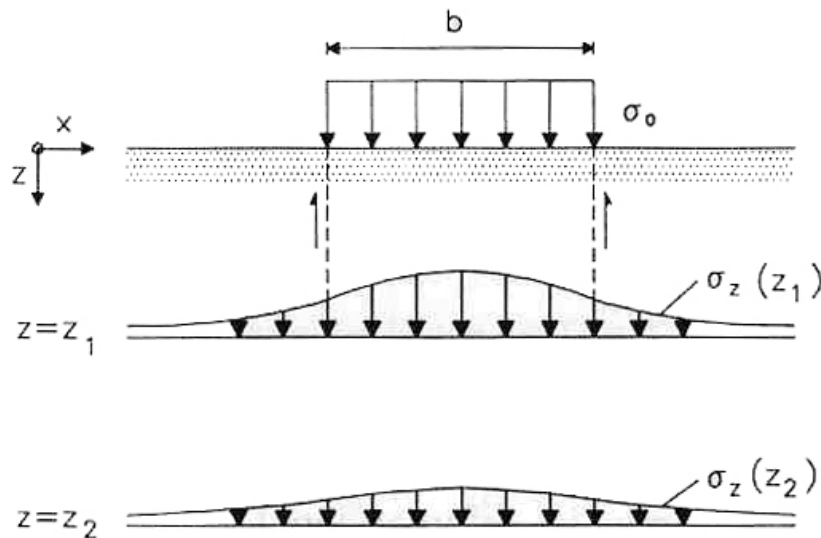


Abbildung 2.23.: Wirkt eine Flächenlast auf eine Bodenoberfläche, nimmt die Maximaldruckspannung mit zunehmender Tiefe ab: Die einzelnen Erdteilchen geben über Schub einen Teil ihrer Last an ihre Nachbarn weiter, die Lastflächen verbreitern sich (Abbildung aus [24]).

- Druck

Reine Druckkräfte führen im Erdreich nicht zu einem Versagenszustand; zwar können einzelne Körner brechen und Porenräume verdichtet werden, eine isotrope Druckbelastung kommt aber, ausser im Labor, eigentlich nie vor: Die Erdpartikel übertragen die Belastung zum Teil per Schub an die angrenzenden Nachbarn, so dass die Druckspannungen mit fortschreitendem Abstand zur Krafteinleitung abnehmen. Für eine Auflast auf eine ebene Erdoberfläche ist dies in Abbildung 2.23 dargestellt.

Ist der Erdkörper räumlich begrenzt (zum Beispiel eine schlanke, zylindrische Probe), wird sich relativ schnell eine plastische Verformung einstellen, falls eine mit

2. Grundlagen

Wasser teilgesättigte Probe vorliegt. Trockene Proben können auch entlang einer schrägen Scherfläche versagen.

- **Scherung**

Aus bodenmechanischer Sicht ist die Scherung die maßgeblichste Belastungsgröße; Erdstoffe können hauptsächlich Schub übertragen, ihre Fähigkeit dazu hängt allerdings von einigen Parametern ab. Der Grenzzustand, bei dem schubbelasteter Boden gerade versagt, ist die Scherfestigkeit τ_f . Sie berechnet sich nach dem Gesetz von Mohr- Coulomb:

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \varphi, \quad (2.19)$$

wobei

c die Bodenkohäsion darstellt,
 σ_n die auf den Boden wirkende Normalspannung ist, und mit
 φ der bodenabhängige Reibwinkel bezeichnet wird.

Kohäsion

Die Kohäsion c kann man als Grundscherfestigkeit eines Bodens ansehen; sie wird durch elektromagnetische Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Bodenteilchen einerseits und dem Porenwasser andererseits hervorgerufen.

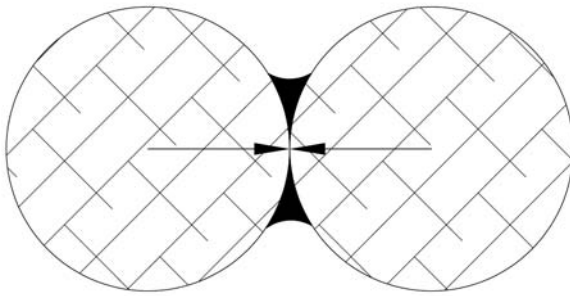


Abbildung 2.24.: Das Kapillarwasser in den Zwickeln zweier Bodenteilchen verursacht einen Binndruck, der die Teilchen aneinander drückt.

Die Kohäsion ist belastungsunabhängig, variiert aber mit dem Wassergehalt und der Korngröße: In bindigen Böden sinkt die Kohäsion mit steigender Korngröße, in rolligen Böden spielt die elektromagnetische Wechselwirkung der Körner eine vernachlässigbare Rolle; hier werden die Anziehungskräfte der Teilchen durch Kapillarkräfte des Porenwassers in den Zwickeln zweier benachbarter Körner hervorgerufen (Abbildung 2.24), weswegen sie auch Kapillarkohäsion oder scheinbare Kohäsion genannt wird [28].

Reibwinkel

Auch der Reibwinkel ist eine bodenabhängige Größe, die den Einfluss des normalspannungsbedingten Scheranteils beschreibt. Dies ist in ähnlicher Form bei der Haftreibungszahl zwischen zwei Auflageflächen zu beobachten. Der Reibwinkel steigt mit größer werdenden Körnern und eckiger werdenden Formen. Für Tone wird ebenfalls ein Reibwinkel gemessen, der im Vergleich zu Sanden oder Kiesen aber kleiner ist. Im sogenannten

2. Grundlagen

Rahmenscherversuch sieht man anschaulich, wie sich die Scherfestigkeit eines Bodens bei Auflast verändert: Eine Bodenprobe wird in zwei Kastenhälften gefüllt, die gegen-

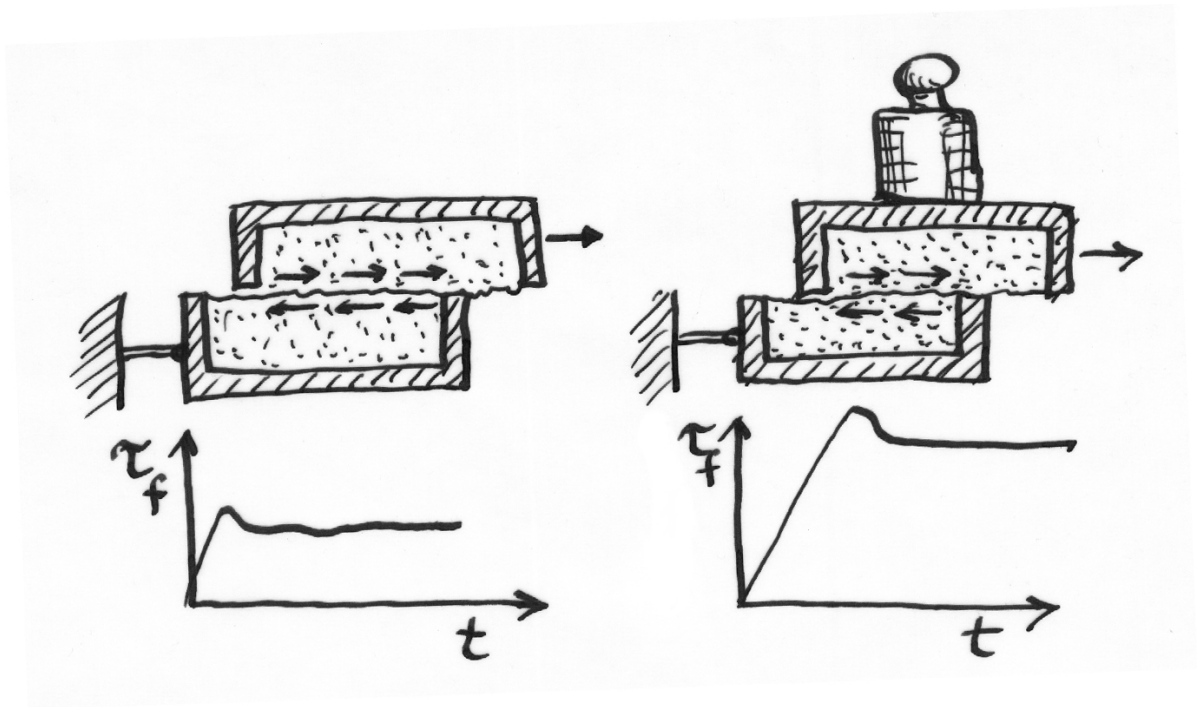


Abbildung 2.25.: Der Rahmenscherversuch, als Schema dargestellt, mit den zugehörigen Scherfestigkeits- Weg- Kurven: Der rechte, mit einer Normalkraft beaufschlagte Versuch lässt die Maximalscherfestigkeit ansteigen (Zeichnung: C.Mattheck).

einander verschoben werden. Der Quotient von Verschiebekraft und Scherfläche ergibt die Scherfestigkeit. Belastet man in einem zweiten Versuch den oberen Rahmen mit einem Gewicht, steigt die Scherfestigkeit proportional mit der Belastung an. Der Abfall nach dem höchsten Punkt auf die Restscherfestigkeit lässt sich in etwa mit dem Unterschied zwischen Haft- und Gleitreibung vergleichen: Sind die Bodenteilchen innerhalb einer Scherfuge in Bewegung, sind sie nicht mehr so stark miteinander verkeilt wie im Ruhezustand. Trägt man die Scherfestigkeit über der Normalspannung auf, beschreibt der Term $c + \sigma_n \tan \varphi$ die maximal erträgliche Scherspannung des Bodens, wie grafisch in [Abbildung 2.26](#) zu sehen ist. Einige typische Messwerte für c und φ sind in [Tabelle 2.27](#) angegeben:

2. Grundlagen

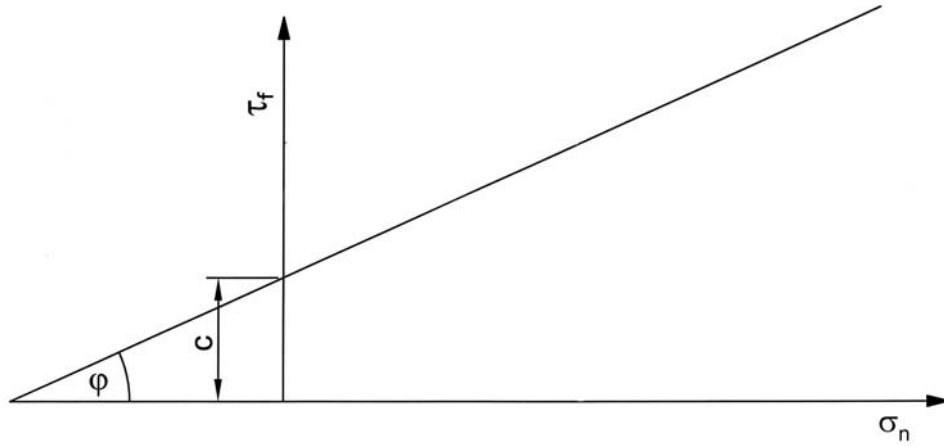


Abbildung 2.26.: Grafische Darstellung des Mohr- Coulombschen Gesetztes: Unterhalb der Geraden mit dem Achsenabschnitt c und der Steigung $\sigma_n \tan \varphi$ befinden sich die für einen Boden möglichen Spannungszustände.

Bodenart	Reibwinkel [°]	Kohäsion [kPa]
<i>Nichtbindige Böden</i>		
Sand, locker, rund	30	0
Sand, locker, eckig	32,5	0
Sand, mitteldicht, rund	32,5	0
Sand, mitteldicht, eckig	35	0
Sand, dicht, eckig	37,5	0
Kies ohne Sand	37,5	0
Naturschotter, scharfkantig	40	0
<i>Bindige Böden</i>		
Ton, halbfest	25	25
Ton, schwer knetbar, steif	20	20
Ton, leicht knetbar, weich	17,5	10
Geschiebemergel, fest	30	25
Lehm, halbfest	27,5	10
Lehm, weich	27,5	0
Schluff	27,5	0
Klei, org., tonarm, weich	20	10
Klei, stark org., tonreich, weich	15	15
Torf	15	5
Torf, mäßig vorbelastet	15	10

Abbildung 2.27.: Mittelwerte für Reibwinkel und Kohäsion nach [29] und [30]

2.3.3. Scherfestigkeit und Wassergehalt

Die forstliche Praxis zeigt, dass insbesondere eine Kombination Windwürfe begünstigt: Hohe Windgeschwindigkeiten bei Stürmen reichen oft nicht aus, einen Baum zu entwurzeln; hat es aber tage- oder wochenlang starke Niederschläge gegeben, richten Stürme oft verheerende Schäden in Waldgebieten an- so geschehen während des Sturmes „Lothar“ in Südwestdeutschland 1999. Der Grund: Die Scherfestigkeit des Bodens ist gerade bei bindigen Böden, die die meisten heimischen Baumarten bevorzugen, mit dem Wassergehalt verknüpft. In der Geotechnik wird dabei eine Beziehung zwischen der Konsistenzzahl I_c und der undrainierten Scherfestigkeit c_u hergestellt; undrainiert bedeutet, dass im Versuch ein Entweichen des Porenwassers verhindert wird. Dies hat zur Konsequenz, dass, insbesondere bei wassergesättigten Böden, eine eventuell vorhandene Normalspannung nur den Porenwasserdruck erhöht, das Korngerüst „merkt“ von dieser Belastung aber solange nichts, bis das Wasser entweichen kann. Im undrainierten, gesättigten Zustand ist die normalspannungsabhängige Scherspannung also gleich Null, womit man für eine Spannungsauftragung nach Mohr ein Schaubild nach Abbildung 2.28 erhält.

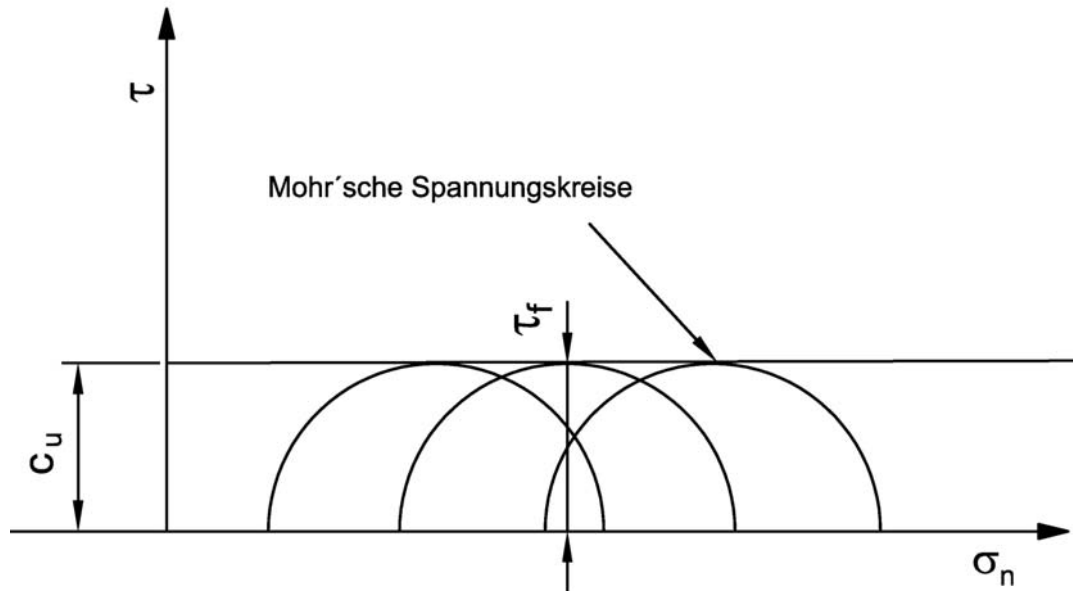


Abbildung 2.28.: Der Spannungszustand eines undrainierten, gesättigten Bodens: Kann kein Porenwasser entweichen, wirkt allein die Kohäsion; der Reibwinkelanteil kommt nicht zum Tragen.

Auch für teilgesättigte, bindige Böden lassen sich Scherfestigkeit und Wassergehalt in Verbindung bringen; in [31] wird als Beziehung zwischen der undrainierten Scherfestigkeit und der Konsistenzzahl folgender Zusammenhang angegeben:

$$c_u = e^{4,59I_c + 0,68} \quad (2.20)$$

2. Grundlagen

Der Verlauf der Geraden bei logarithmischer Auftragung durch die klassischen Konsistenzbereiche ist in Abbildung 2.29 zu sehen.

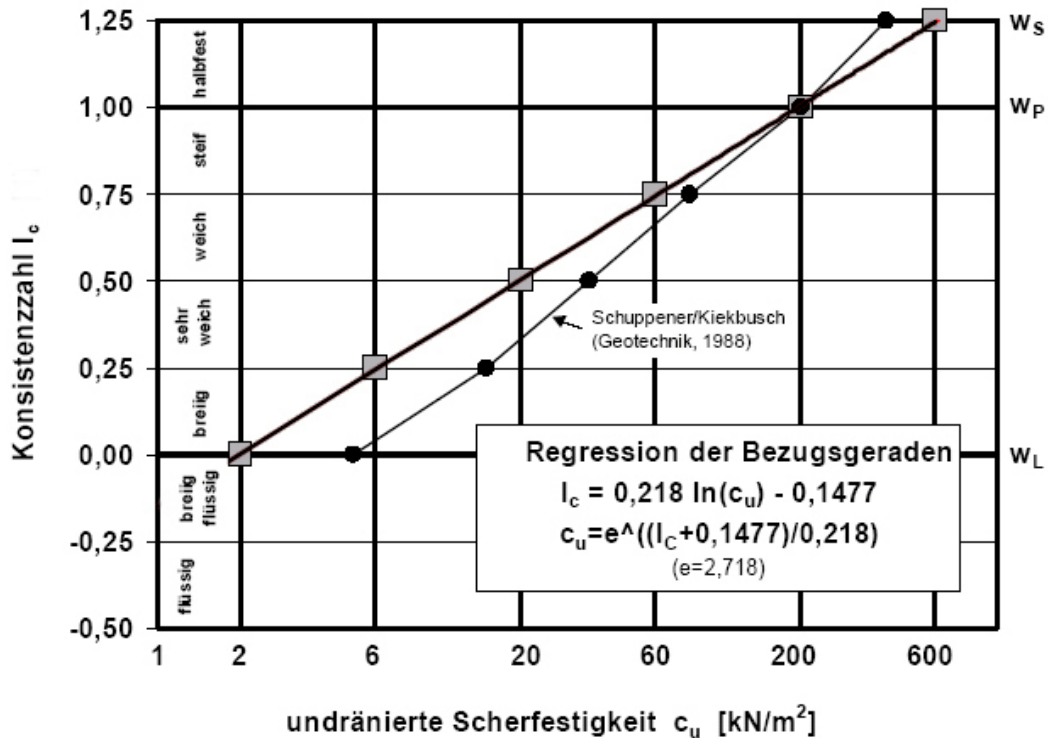


Abbildung 2.29.: Die Scherfestigkeit teilgesättigter, bindiger Böden ist mit der Konsistenzzahl verbunden. Mit steigendem I_c erhöht sich auch die Scherfestigkeit (nach [31]).

2.3.4. Besonderheiten oberflächennaher Bodenschichten

Oberflächennahe Bodenschichten weisen einen erhöhten Anteil an organischen Beimengungen auf, die zwischen einigen Zentimetern und mehreren Dezimetern mächtig sein kann. Die organischen Bodenanteile lassen sich zurückführen auf:

- Vegetationsrückstände
- Kleinlebewesen (Bakterien, Insekten)
- Pilz- und Wurzelgeflechte
- organische Düngemittel

Diese Bestandteile können die mechanischen Eigenschaften eines eigentlich rolligen Bodens beeinflussen; nach [29] erhöht sich die Bindefähigkeit für Wasser, die Kohäsion steigt an, und damit auch die Scherfestigkeit τ_f im unbelasteten Zustand.

2. Grundlagen

.

3. Die Verankerungsmechanismen des Baums: Material und Methoden



Abbildung 3.1.: Zwei Vertreter der grundsätzlichen Verankerungsmechanismen: (a) zeigt den charakteristischen Halbkugelabschnitt des bodenbetonten Verankerungstyps. In Bild (b) ist die geringe Tiefenausdehnung der flachwurzelnden, wurzelbetonten Vertreter gut zu erkennen.

Während der ersten Feldstudie kristallisierten sich bereits zwei grundsätzliche Versagensformen im Wurzelbereich heraus, die exemplarisch in Abbildung 3.1 zu sehen sind. Herzwurzelnde Bäume versagten überwiegend über einen herausgedrehten, großvolumigen Ballen in Form eines Halbkugelabschnitts (Abbildung 3.1(a)). Flachwurzelnde Bäume klappten im Versagensfall auf der Windseite eine Wurzelplatte in Form einer Scheibenhälfte hoch (Abbildung 3.1(b)). Besonders ausgeprägt traten diese Effekte bei zwei Baumarten auf: Die Buche repräsentiert besonders gut den herzwurzelnden Typ, die Fichte scheint ein Paradevertreter der flachwurzelnden Variante zu sein. Deswegen wurde der größte Teil der Feldstudien an diesen zwei Baumarten durchgeführt.

3.1. Der Verankerungsraum

Der Gedanke ist naheliegend, dass sich die Optimierungsstrategie des Baums nicht nur ober-, sondern auch unterirdisch fortsetzt. Natürlich versagt aber auch die bestmöglich optimierte Struktur, wenn eine Spitzenlast die Regelbelastung samt Sicherheitsfaktor überschreitet; der Versagensfall „Windwurf“ bietet dann schon einmal einen guten Einblick in die Größenverhältnisse und die prinzipielle Wirkungsweise der natürlichen Verankerungsstrategie. Ein Parameter, der auf jeden Fall den minimal benötigten Verankerungsraum eingrenzt, ist der *Radius des mechanisch wirksamen Wurzelballens* R_W . Dies ist der Radius, an dem der Erde- Wurzel- Verbundwerkstoff hauptsächlich versagt, was bei geworfenen Bäumen als herausgedrehte Platte oder Halbkugelabschnitt erscheint, und von der liegenden Stammmitte senkrecht zur Stammachse nach oben bis zum Rand gemessen wird (Abbildung 3.2).



Abbildung 3.2.: Der mechanisch wirksame Wurzelballen R_W wird von der Stammmitte senkrecht zur Stammachse nach oben gemessen.

3.2. Messung des maximalen Verankerungsmoments

Zur Überprüfung des berechneten Maximalmoments in Abschnitt 2.2.2 war es notwendig, das tatsächlich aufzubringende Moment am lebenden Objekt angreifen zu lassen. Zu diesem Zweck wurden Umziehversuche im Forst durchgeführt. Dabei wurde folgendermaßen vorgegangen:

3. Die Verankerungsmechanismen des Baums: Material und Methoden

- Vor dem Umziehen wird der Stammdurchmesser in 1,30 m Höhe ermittelt.
- In Brusthöhe wird einem Zuwachsbohrer eine Holzprobe entnommen und mit Hilfe des *Fractometer II* die Druckfestigkeit des frischen Stammholzes ermittelt, die in guter Näherung die Hälfte der Biegefestigkeit beträgt [32].
- In etwa 7-8 m Höhe wird ein Stahlseil angebracht und die exakte Höhe mit einem Bandmaß gemessen.
- Die zum Umziehen benötigte Kraft wird durch einen Greifzug bereitgestellt, der mit einer Kraftmessdose gekoppelt ist und an einem ausreichend dimensionierten Stammfuß verankert wird.



Abbildung 3.3.: Der Versuchsaufbau beim Umziehversuch: Die Kraft wird mittels eines Greifzuges auf das Stahlseil aufgegeben. Die Umlenkung erfolgt aus Sicherheitsgründen. Die Kraftmessdose ist am Greifzug angebracht.

- Durch den Greifzugmechanismus bedingt, kann keine kontinuierliche Krafterhöhung stattfinden, sondern in kleinen Krafterhöhungsschritten. Die Maximalkraft

3. Die Verankerungsmechanismen des Baums: Material und Methoden

wird mittels Schleppzeiger festgehalten. Nach Erreichen der Maximalkraft fällt der Baum jedoch noch nicht, sondern muss mit fallender Last weiter umgezogen werden.

- Am liegenden Baum kann die Gesamtlänge H und der Wurzeltellerdurchmesser R_w abgenommen werden.

Die Ergebnisse des Umziehversuchs sind in Abschnitt 4.2 aufgeführt.

3.3. Ausreissversuche an Baumwurzeln

Ein sicher nicht unwesentlicher Beitrag bei der Messung des Umziehmomentes wird vom Abriss beziehungsweise vom Pull-Out-Veragen zwischen Wurzel und Erdreich bereitgestellt, und muss nicht zwangsläufig am Rand der mechanisch wirksamen Wurzelplatte erfolgen. Zur Erfassung der benötigten Ausreisskraft wurde deswegen der folgende Versuch durchgeführt:



Abbildung 3.4.: Eine zügige Methode, Wurzeln schonend freizulegen, wird in diesem Bild demonstriert: Mit Hilfe von Druckluft bläst man Erde und Steine bis Faustgröße aus dem Wurzelgeflecht aus.

3. Die Verankerungsmechanismen des Baums: Material und Methoden

Ein Baum wird gefällt und der Wurzelstock in einem Radius von etwa 0,5 bis 1m mit einer speziellen Druckluftlanze freigespült. Die Starkwurzeln werden anschließend so abgesägt, dass ein Stück des verdickten Wurzelanlaufs ein Abrutschen des angelegten Zuggurtes verhindert. Die Verwendung eines Textilzuggurtes vergrößert die Auflagefläche und verhindert den Abriss an der Anbindestelle infolge von Kerbeffekten. An den



Abbildung 3.5.: Die Versuchsanordnung des Ausreissversuchs im Forst: Die Motorwinde kann eine maximale Nennlast von $60kN$ aufbringen, was die Wahl der Baumgröße auf Exemplare mit Stammdurchmessern kleiner $15cm$ beschränkt.

Textilgurten wurde die Kraftmessdose gekoppelt, die mit dem Zugseil einer Motorwinde verbunden war (Abbildung 3.5). Bei einer ersten Erprobung der Versuchsanordnung zeigte sich, dass die gewählte Fichte mit einem Stammdurchmesser von $30cm$ viel zu starke Zugwurzeln besaß. Der Versuch wurde bei einer Messkraft von $80kN$ abgebrochen, ohne dass die Wurzel eine nennenswerte Bewegung aus der Erde heraus gemacht hätte.

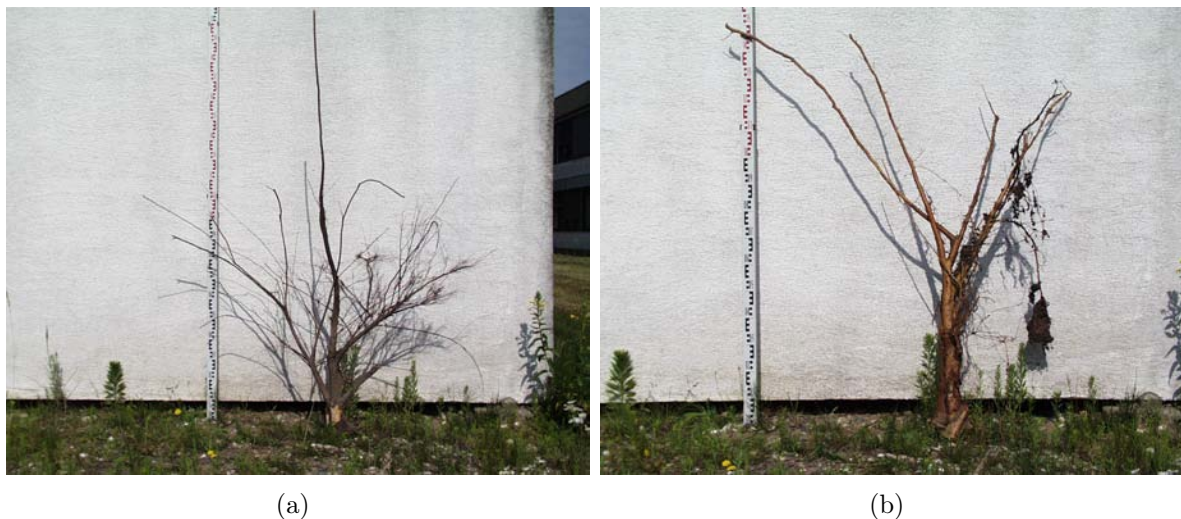


Abbildung 3.6.: Ein deutlicher Unterschied in der Morphologie ist an den ausgerissenen Wurzeln einer Buche (a) und einer Fichte (b) zu erkennen.

Für die weiteren Versuche wurden deswegen Bäume der Durchmesserklasse 8-13 cm gewählt. Ausgezogen wurden insgesamt drei Fichten- und zwei Buchenwurzeln. Die ausgezogenen Stränge wurden anschließend gereinigt und die abgerissenen Wurzelquerschnitte vermessen sowie ihr Abstand zur Stammmitte festgehalten. Eine Buchen- und eine Fichtenwurzel sind exemplarisch in Abbildung 3.6 zu sehen.

3.4. Der Wurzelgesamtquerschnitt in Abhängigkeit vom Abstand zum Stamm

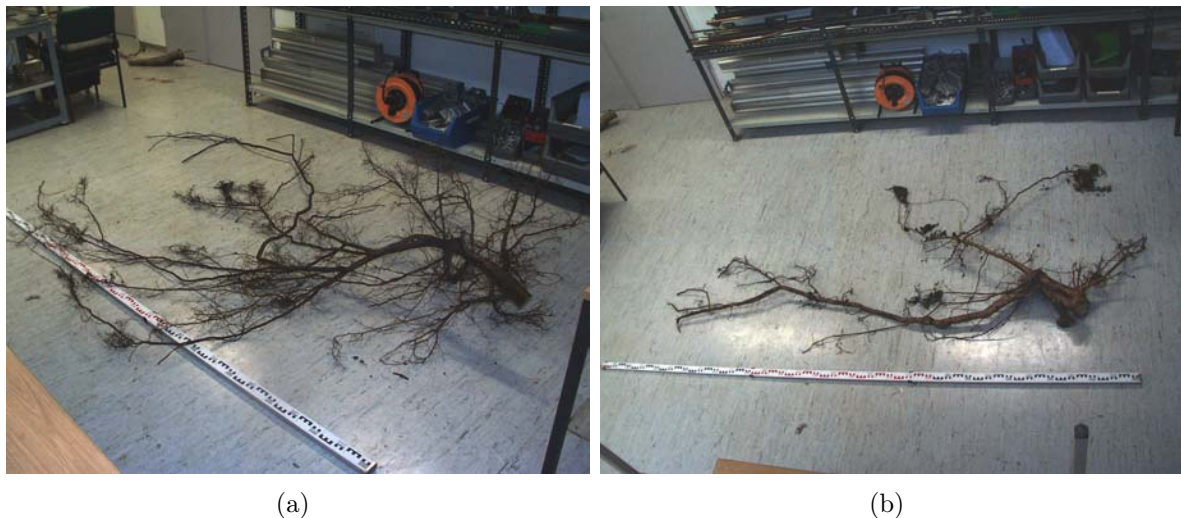


Abbildung 3.7.: Zwei der freigelegten, intakten Wurzeln vor der Vermessung. Links eine Buchenwurzel, rechts Fichte.

Das Hauptcharakteristikum eines Wurzelstranges lässt sich einfach beschreiben: Ein einzelner, großer Querschnitt fächert sich in immer zahlreichere, kleinere Querschnitte auf. Aus mechanischer Sicht, insbesondere in Hinblick auf den Versuch im vorangegangenen Abschnitt, stellt sich folgende Frage: Wie entwickeln sich Einzel- und Gesamtdurchmesser der Wurzeln in Abhängigkeit vom Abstand zur Stammmitte? Untersuchungen zu diesem Thema wurden bereits durch andere Autoren durchgeführt ([2],[33],[34]). Als Fachbegriff für den Gesamtquerschnitt in einem festgelegten Abstand hat sich das **Wurzelquerschnittsareal** WQA (oder Root Cross Sectional Area im englischsprachigen Raum) eingebürgert. Da speziell ein Vergleich mit den ausgerissenen Wurzeln angestrebt wurde, wurden wiederum Wurzelstränge von Bäumen mit Stammdurchmessern von 8 – 13cm gewählt. Ein weiteres Mal geschah dies mit Hilfe der Druckluftlanze, die vor allem im Feinwurzelbereich eine beschädigungsfreie und zügige Freilegung ermöglichte. Die erhaltenen Wurzelstränge wurden anschliessend einer Reinigung unterzogen und vermessen: In einem festen Radius wurden die Wurzeln abgetrennt und ausgemessen,

und dieser Vorgang dann mit jeweils 20cm kleineren Radius wiederholt. Die erhaltenen Daten des Versuchs sind in Abschnitt 4.4 ausgewertet.

3.5. Bodenbewegungen innerhalb der belasteten Wurzelplatte

Die immensen Zugbelastungen, die ein einzelner Wurzelstrang übertragen kann, führen nur zum Teil zum vollständigen Abriss einzelner Querschnitte, ein ebenso oft beobachteter Mechanismus ist ein Pull- Out- Versagen, bei dem lange Wurzelsegmente aus dem Erdreich herausgerissen werden. In jedem Fall muss bis zum Versagensstadium eine messbare Interaktion zwischen dem Wurzel-Erd-Verbund stattfinden. Zum einen kam hier die Frage auf, wo diese Interaktion wohl am größten sei, zum anderen stand die Frage im Raum, ob die in Abschnitt 4.6 vorgestellte Scherfestigkeitserhöhung am Rand der mechanisch wirksamen Wurzelplatte durch einen Kompressionseffekt hervorgerufen sein könnte. Zur Messung der Bodenverformungen während einer Biegebelastung des Stamms wurde deshalb eine spezielle Messanordnung entworfen:



Abbildung 3.8.: Die Anordnung der Messuhren im zugbelasteten Wurzelplattenbereich.

3. Die Verankerungsmechanismen des Baums: Material und Methoden

- Radial vom Stamm weg werden alle 30cm Erdspieße 40cm tief in die Erde gedrückt (Zur Anordnung siehe Abbildung 3.8). Mit den Spießen sind Messuhrenhalter verschraubt. Die Anordnung erfolgt in einer Linie sowohl in Richtung der Stammbiegung als auch entgegengesetzt dazu.
- Pro Spieß sind zwei übereinander liegende Messuhren angebracht, um Schrägbewegungen der Spieße erfassen zu können. Die Spitzen der Messuhren tasten auf Platten des nächsten Messspießes (Abbildung 3.9).

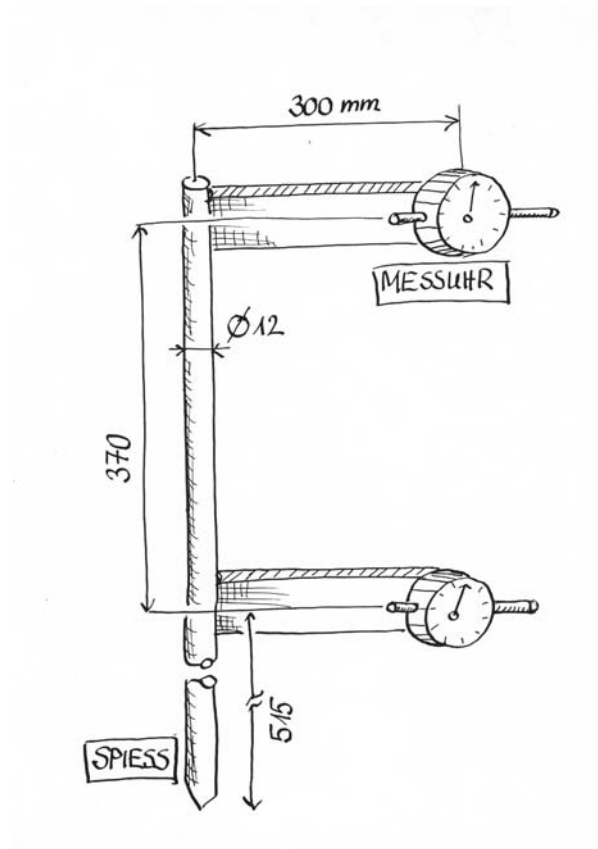


Abbildung 3.9.: Darstellung des Messspießes mit den wichtigsten Abmessungen (Zeichnung: C.Mattheck).

- Vier Fichten und zwei Buchen wurden wie im Umziehversuch belastet, um eine angreifende Windlast zu simulieren. Die Versuchslast wurde jedoch beschränkt, und folgendermaßen ermittelt: Über den Stammdurchmesser und einen Mittelwert der Holzbiegefestigkeit, abhängig von der Holzart, kann man nach Gleichung 2.8 das maximal einleitbare Moment ermitteln. Über die Anbindehöhe des Stahlseils und den Ablesewert der Kraftmessdose errechnet sich das Versuchsmoment. Ein Probeversuch ergab, dass eine Versuchslast von 50% des Maximalmomentes nicht überschritten werden sollte, da erste Bodenrisse und starke Verformungen eine

zunehmende Schrägstellung der Messanordnung zur Folge hatte und unbrauchbare Messwerte lieferte.

- Bei Erreichen der Versuchslast werden die Längenänderungen zwischen den Messuhren notiert.

3.6. Die Bodenscherfestigkeitsverteilung innerhalb der Wurzelplatte

Wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben wurde, ist die maßgebliche Bodenfestigkeit die Scherfestigkeit τ_f . Verschiedene Arbeiten haben sich in der Vergangenheit mit der Beziehung zwischen durchwurzeltem Boden und der Bodenscherfestigkeit beschäftigt ([34], [35], [36], [37], [38]). In allen bisherigen Untersuchungen wird die scherfestigkeitserhöhende Wirkung der Wurzeln hervorgehoben. Da Pflanzenwurzeln nur selten in größere Tiefen vorstoßen, in denen die Erdauflast einen nennenswerten Beitrag zur Scherspannung liefert (siehe Abschnitt 2.3.2), wird oft der zusätzliche Wurzelbeitrag einfach der Kohäsion c zugeschlagen [39]. Da sicherlich die Anzahl und die Größe der Wurzeln in einem

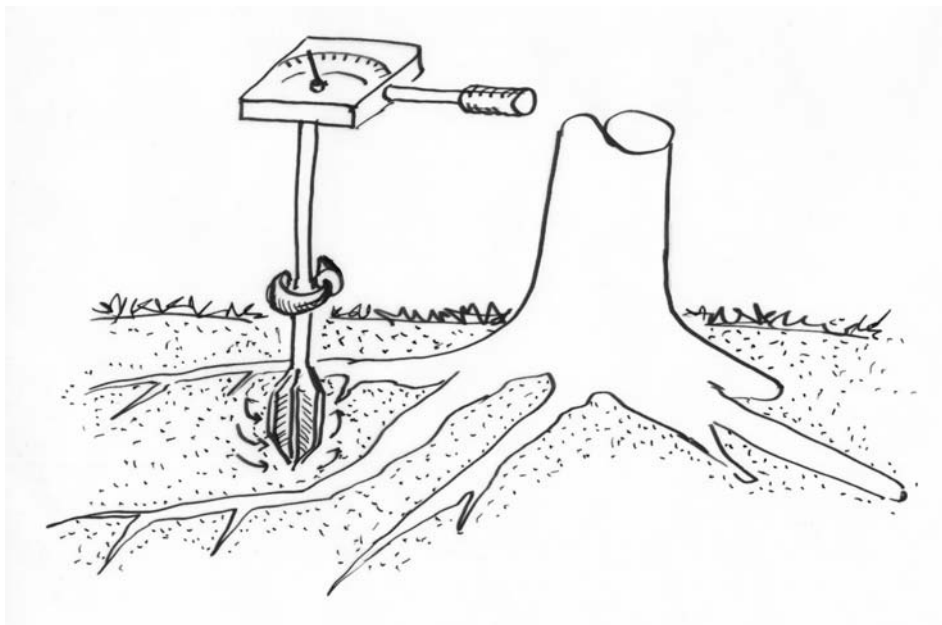


Abbildung 3.10.: Die Schermessungen im Bereich der Wurzelplatte: Ausgehend vom Stamm wurden radial Schermessungen mit der Feldflügelsonde vorgenommen (Zeichnung: C.Mattheck).

Bodenvolumen bei einer solchen Überlegung eine Hauptrolle spielen, wurden im Forst Scherfestigkeitsmessungen im Wurzelbereich von Bäumen durchgeführt. Die Messungen erfolgten mit einer Feldflügelsonde nach DIN4096 [40]. Bei dieser Messung wird ein vierflügeliger Messdorn in die Erde eingeschlagen und mit einem Drehmomentenschlüssel so

lange gedreht, bis die Höchstscherfestigkeit überschritten ist (die typische Verlaufskurve ähnelt der des Rahmenscherversuchs in Abbildung 2.25). Der Maximalwert wird per Schleppzeiger festgehalten. Die Messreihe wird zwischen zwei Wurzelanläufen begonnen und radial vom Stamm weg fortgeführt (Abbildung 3.10). Ausgehend vom Stamm wurden bei 54 Einzelbäumen im Bereich $0,4 - 2,8\text{m}$ alle 40cm Messungen vorgenommen. Bei 35 der Einzelbäume wurde überdies die Messung bis zum nächsten Baum fortgeführt, um etwaige Interaktionen mit benachbarten Wurzelgeflechten bewerten zu können.

3.7. Festigkeitsuntersuchungen an Wurzelholz

Die Selbstoptimierung des Baums beschränkt sich nicht allein auf seine Gestalt, sondern bezieht auch den Werkstoff Holz mit ein. Für oberirdische Baumteile wurden mechanisch induzierte Festigkeitsunterschiede in [7], [41],[42] nachgewiesen, eine Untersuchung der Druck- und Schubfestigkeitsentwicklung an Pappel-, Esche- und Fichtenwurzeln erfolgte durch G. Bruder 1998 [43].

Der Zug- und Biegefestigkeitsverlauf entlang einer Baumwurzel wurde im Rahmen einer Diplomarbeit von C. Kolesinski untersucht und vom Autor betreut [44]. Im Zuge dieser Arbeit wurde unter anderem jeweils ein Wurzelstrang einer Fichte und einer Buche materialkundlich untersucht. Die ausgegrabenen Wurzelstränge wurden gesäubert und in 10cm lange Segmente zerlegt. Dabei wurden abwechselnd nur Zug- oder Biege-

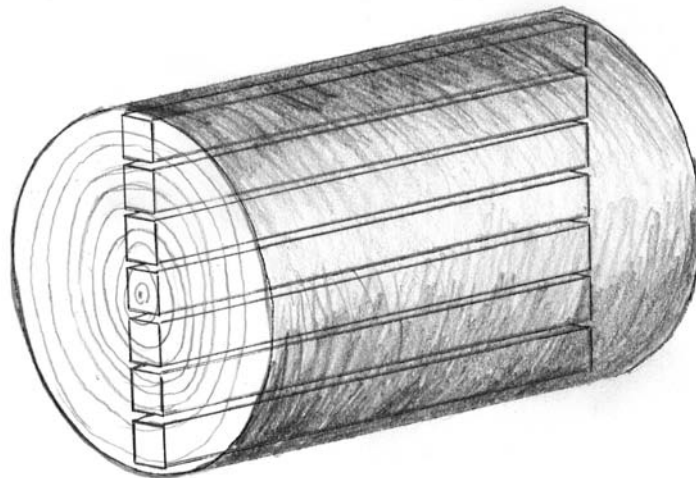


Abbildung 3.11.: Lage der Probenkörper innerhalb eines untersuchten Wurzelsegments.

proben entnommen, so dass jeweils die Entwicklung alle 20cm verfolgt werden konnte. Die Proben wurden aus der vertikalen Zentralachse (nach Abbildung 3.11) präpariert, was zusätzlich eine Aussage über den radialen Verlauf innerhalb eines Segmentes ermöglichte. Baumdarstellungen aller Messwerte sind im Anhang C zu sehen. Um auch aus den kleinen Querschnitten der stammfernen Wurzelsegmente noch Proben erhalten zu können, wurden Form und Abmessung nicht nach den in DIN 52186 (Biegeversuch,[45])

3. Die Verankerungsmechanismen des Baums: Material und Methoden

und DIN 52188 (Zugversuch parallel zur Faser, [46]) vorgeschlagenen Dimensionen ausgeführt; die Maße der Biegeproben wurden mit $80 \times 6 \times 6 \text{ mm}^3$ festgelegt, die Zugproben wurden auf einen Durchmesser von 6 mm tailliert, um ein Kerbversagen an den Einspannungen auszuschließen. Alle Proben wurden vor dem Versuch ausreichend gewässert und im gesättigten Zustand belastet. Die Biegeproben wurden auf einer Standardprüfmaschine im Vierpunkt- Biegeversuch belastet (Abbildung 3.12(a)). Diese Form des Biegever-

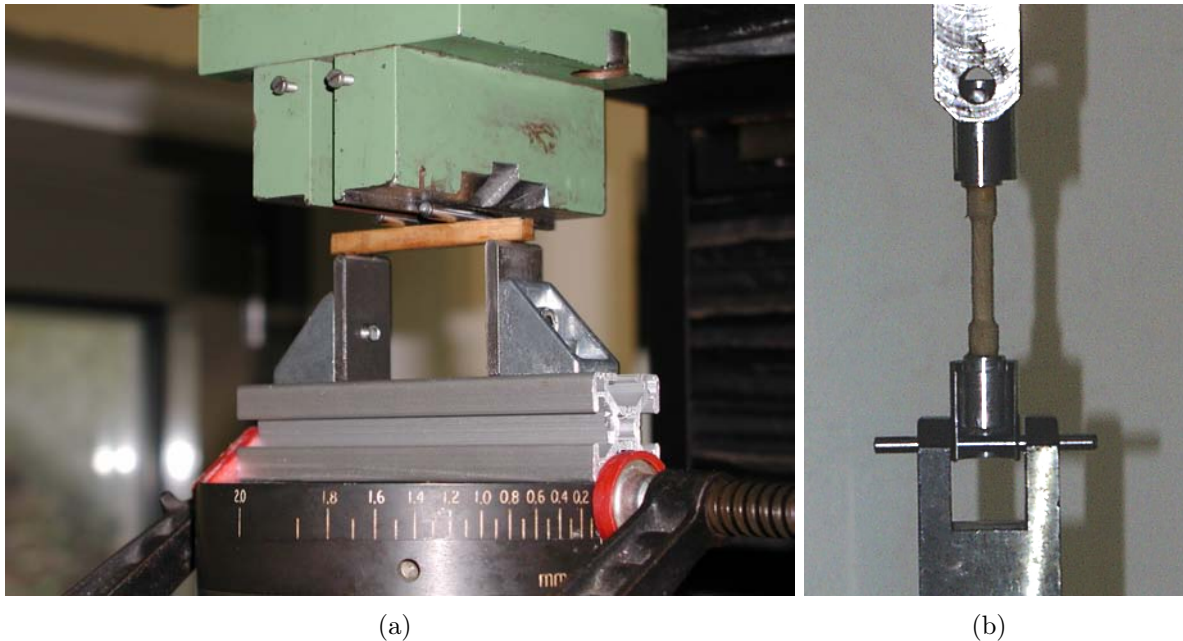


Abbildung 3.12.: Der Versuchsaufbau beim Biege- (a) und Zugversuch (b).

suchs gewährleistet über einen breiten Bereich ein konstantes Biegemoment, womit zum einen strukturelle Schwachstellen eher erfasst werden und zum anderen kein Druckstück am Ort höchster Belastung das Ergebnis verfälscht, wie es beim Dreipunkt- Versuch der Fall sein kann. Die Zugproben wurden auf der gleichen Maschine gezogen (Abbildung 3.12(b)). Exemplarische Messkurven und die ausgewerteten Daten werden in Abschnitt 4.7 vorgestellt, farbkodierte Diagramme und Messwerte sind in Anhang C zu finden.

3. Die Verankerungsmechanismen des Baums: Material und Methoden

.

4. Die Verankerungsmechanismen des Baums: Ergebnisse

4.1. Die Ergebnisse der Feldstudie „Verankerungsraum“

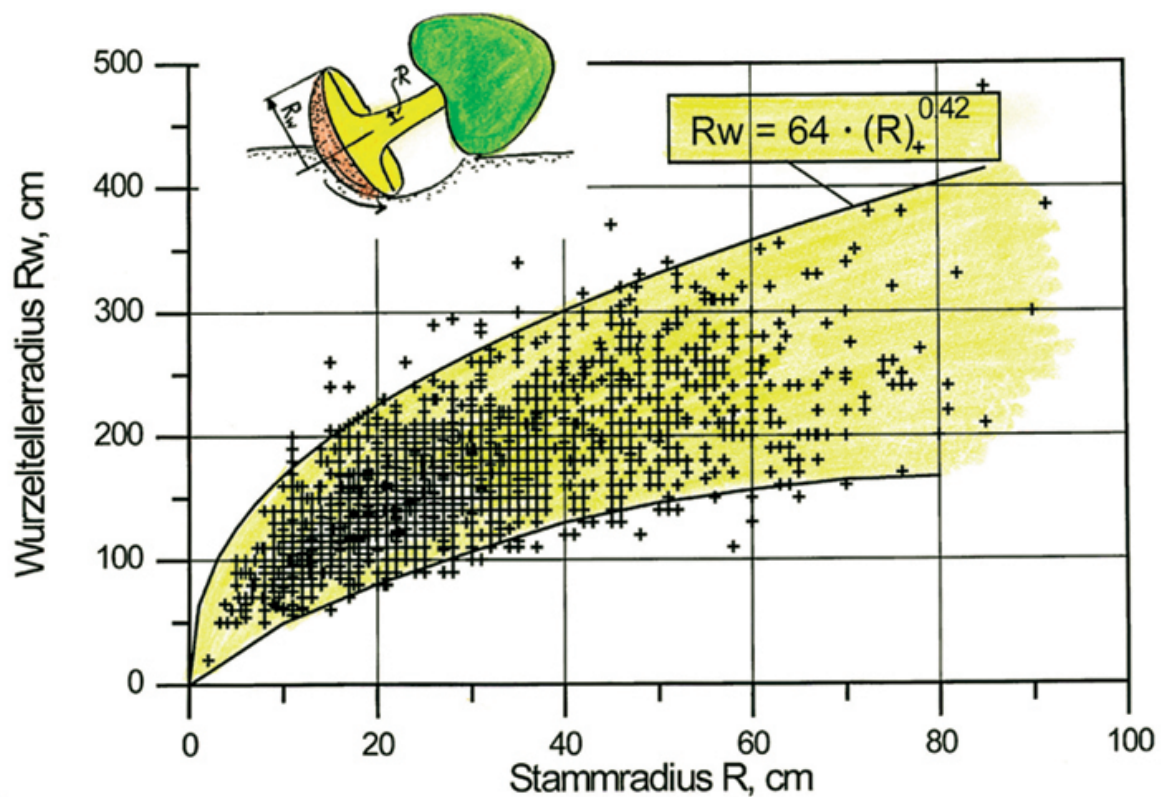


Abbildung 4.1.: Das Windwurfdiagramm (aus [14]) zeigt den Zusammenhang zwischen Stamm- und Wurzeltellerradius anhand 2500 gemessener Exemplare auf. Die Gleichung gibt den ungefähren Verlauf des oberen Grenzbereichs an.

Es ist einleuchtend, dass mit steigender Baumgröße (beziehungsweise einem größeren Stammfußdurchmesser) auch mehr Verankerungsraum benötigt wird. Dieser Zusammenhang findet sich im sogenannten „Windwurfdiagramm“ wieder, in dem Wurzeltellerradien und Stammdurchmesser von 2500 Bäumen aufgetragen wurden (Abbildung 4.1).

4. Die Verankerungsmechanismen des Baums: Ergebnisse

Deutlich zeichnet sich hier eine Ober- und eine Untergrenze ab; Bäume, die über der oberen Grenze liegen, scheinen im Wurzelbereich so ausreichend dimensioniert zu sein, dass ein Wurf nicht stattfindet (aber ein Stammbruch dennoch möglich sein kann). Eine

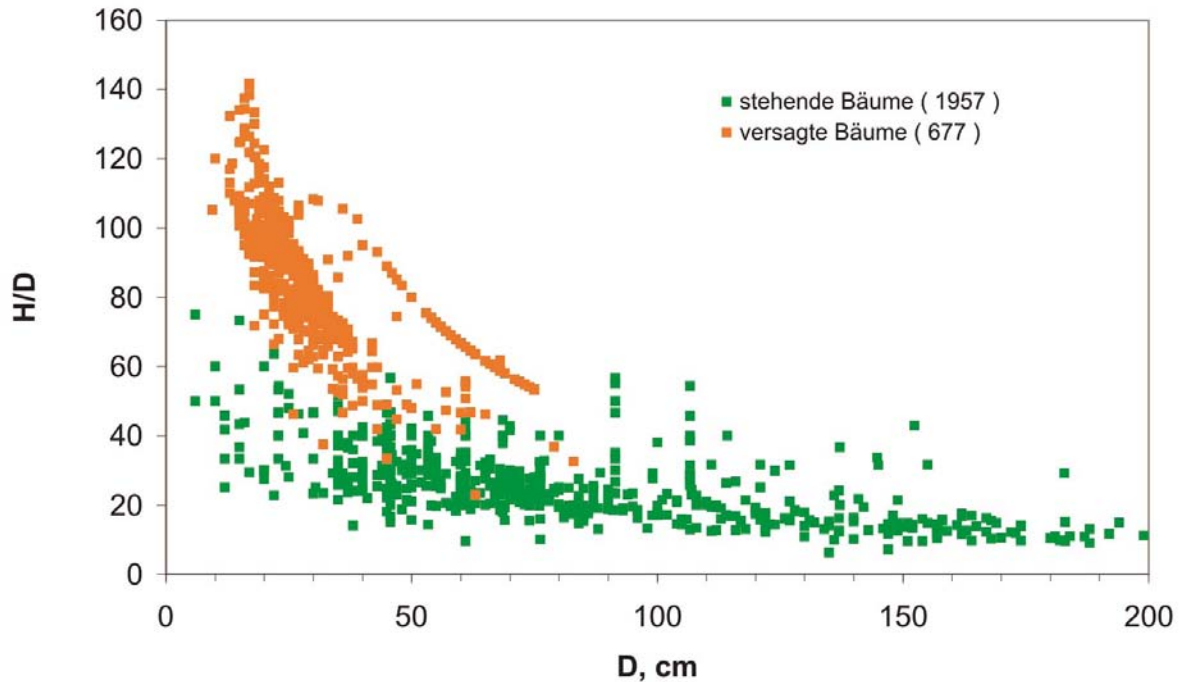


Abbildung 4.2.: Intakte und geworfene Bäume, nach H/D- Verhältnis und Stammdurchmesser aufgetragen (aus [14]). Die Grenze, ab der Bäume bei ungünstigen Verhältnissen wurfgefährdet sind, liegt demnach über einem H/D-Verhältnis von 50.

weitere Untersuchung an stehenden und versagten Bäumen hat ergeben, dass die Standfestigkeit offensichtlich vom Verhältnis der Höhe und des Stammdurchmessers abhängt, dem *H/D- Verhältnis* [14]. Die Studie zeigt, dass Bäume mit hohem H/D- Verhältnis wurfgefährdeter als ihre gedrungeneren Artgenossen sind; als kritische Grenze wurde ein H/D- Verhältnis von 50 ermittelt (Abbildung 4.2). In der Forstwirtschaft führen aber enge Bestandshaltung und die bessere Verwertbarkeit von Stämmen mit geringer Abholzigkeit zu H/D- Verhältnissen, die deutlich darüber liegen. Zur weiteren Untersuchung von H/D- Verhältnis und Wurzeltellergröße wurden in einer weiteren Feldstudie deshalb nicht nur Stamm- und Wurzeltellerradien aufgezeichnet, sondern auch die Baumhöhen aufgenommen. Dies war insofern möglich, als nach dem verheerenden Sturm „Lothar“ 1999 im Herbst 2001 neuerliche Stürme Südwestdeutschland heimsuchten. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.3 zu sehen. Ein direkter Zusammenhang zwischen niedrigem H/D-Verhältnis und einer großen Wurzelplatte, wie zunächst vermutet wurde, lässt sich nicht ableiten. Jede H/D- Klasse ist sowohl im unteren als auch im oberen Größenbereich der Wurzelteller vertreten.

4. Die Verankerungsmechanismen des Baums: Ergebnisse

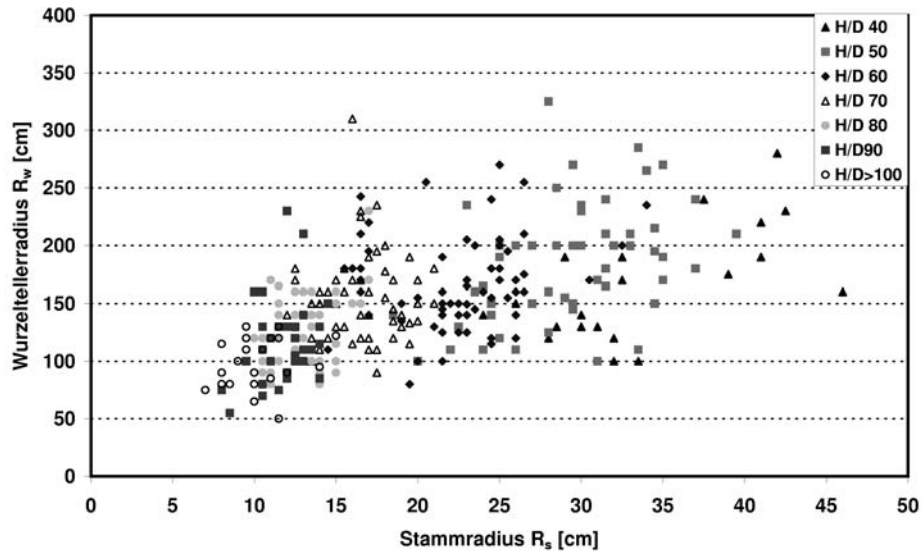


Abbildung 4.3.: Eine weitere Feldstudie an etwa 350 geworfenen Bäumen bezieht zusätzlich die Baumhöhe in das Windwurfdiagramm ein; die Bäume sind nach dem Höhe- Durchmesser Verhältnis (H/D) in Klassen eingeteilt.

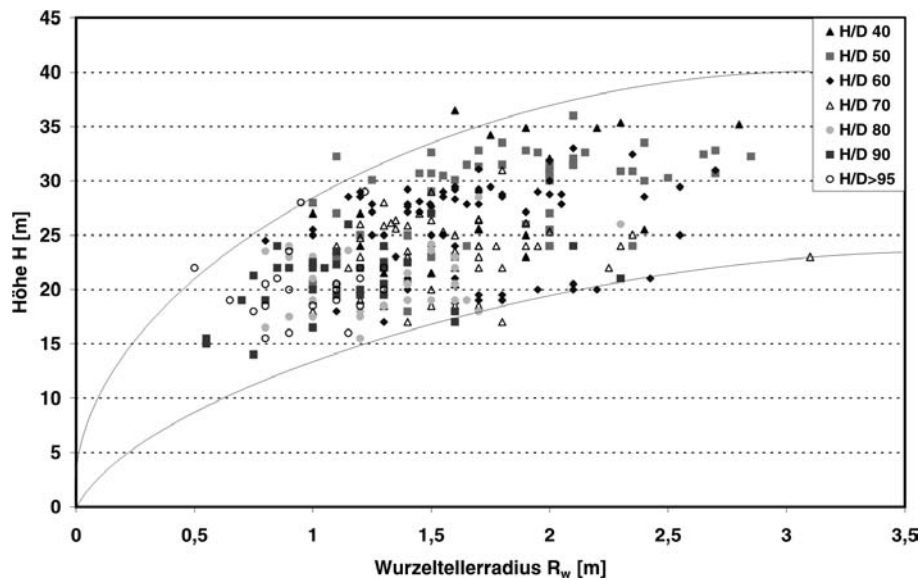


Abbildung 4.4.: Eine andere Auftragung der Messdaten zeigt: Bäume vergrößern mit zunehmender Höhe ihren Wurzelteller überproportional, der Höhengewinn muss mit einer deutlichen Investition in die Bodenverankerung erkaufte werden.

Allerdings ist ein Effekt sichtbar: Bäume mit großem Stammdurchmesser haben einen niedrigen H/D -Wert, was man unter anderem darauf zurückführen kann, dass Bäume in fortgeschrittenem Alter im Kronenbereich zurücksterben [47]. Die Höhe scheint zudem sehr wohl mit dem erforderlichen Verankerungsraum zusammenzuhängen: Wie Abbildung 4.4 zeigt, flachen die Grenzkurven bei einer Auftragung der Baumhöhe über

dem Wurzeltellerradius ab; ein Höhengewinn scheint also einen überproportionalen Einsatz im Verankerungsbereich zu erfordern, was wegen dem gleichzeitigen Anwachsen der Windgeschwindigkeit, des Hebelarms und der ausgelenkten Masse durchaus sinnvoll erscheint.

4.2. Die gemessenen Verankerungsmomente des Umziehversuchs

Die im Umziehversuch gewonnenen Werte sind in Abbildung 4.5 dargestellt; zum Vergleich wurde das Umziehmoment über dem aus der Biegefestigkeit berechneten Stammbruchmoment nach Gleichung 2.8 aufgetragen. Da die Biegefestigkeiten direkt an den umzuziehenden Stämmen ermittelt wurden, erhält man so zwei vergleichbare Werte desselben Baums; das Schaubild zeigt, dass das Umziehmoment generell etwas geringer ausfällt als das theoretische Stammbruchmoment. Wäre das Axiom der konstanten Spannung in diesem Diagramm ersichtlich, würden die Messpunkte etwa um die mit „Ideal“ bezeichnete Gerade liegen.

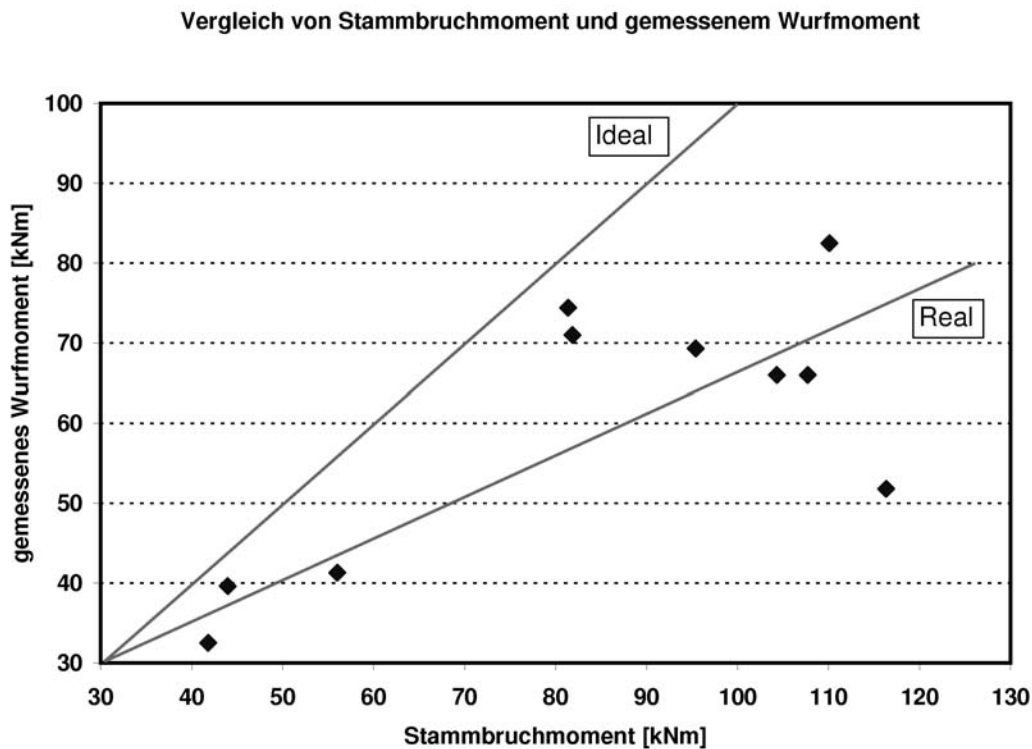


Abbildung 4.5.: Vergleich von Wurfmoment und theoretischem Stammbruchmoment

Die Differenz ist aber leicht erklärbar: Während des Umziehversuchs werden zwar alle Widerstandskomponenten, also auch das Rückstellmoment durch das Gewicht der

Wurzelplatte, gemessen, nicht jedoch das wurfbegünstigende Moment durch gebogenes Stammgewicht. Wie im Rechenbeispiel in Abschnitt 2.2.2 gezeigt, ist eine zusätzliche Belastung von 30% realistisch, womit sich die Messpunkte tatsächlich recht gut der Ideallinie annähern würden. Gleichzeitig zeigt der höchste gemessene Wert einer Fichte mit 29cm Stammdurchmesser auch, zu welcher enormen Verankerungsleistung ein Baum fähig ist: Der Wert betrug $82500Nm$.

4.3. Ausreissversuche an Baumwurzeln: Ergebnisse

Beim Ausreissversuch an zwei Buchen- und drei Fichtenwurzeln am gleichen Standort wurden zwei wesentliche Werte gewonnen: Zum einen erhielt man die maximale Auszugskraft, zum anderen wurden die abgerissenen Einzelquerschnitte des ausgerissenen Strangs vermessen und summiert; diese Werte sind im Diagramm 4.6 gegenübergestellt. Die Balken zeigen den Querschnitt, die Ausreisskraft ist als Messpunkt im gleichen

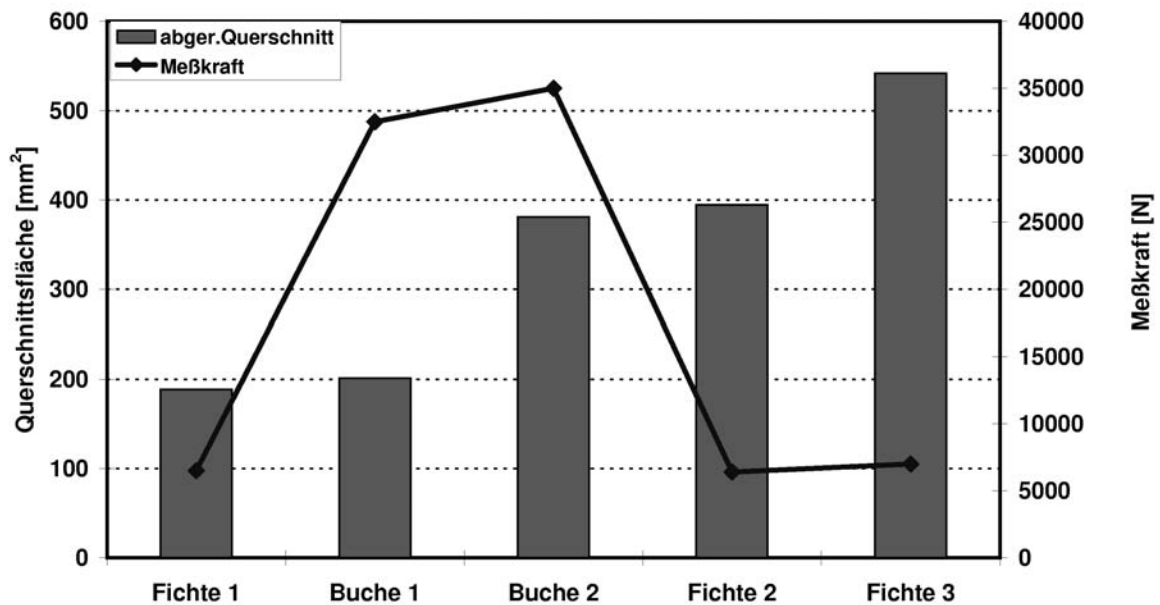


Abbildung 4.6.: Die Werte des Ausreissversuchs: Die abgerissenen Wurzelquerschnitte sind als Balken sichtbar gemacht, die Punkte repräsentieren die Ausreisskräfte.

Schaubild sichtbar.

Offensichtlich bestimmt die reine Größe des Gesamtquerschnitts nicht allein die Auszugskraft. Einen entscheidender Faktor ist, welcher Anteil des Gesamtquerschnitts gleichzeitig im Moment der maximalen Zugkraft versagt. Anders gesagt: Zwei Wurzelstränge gleichen Querschnitts können deswegen völlig verschieden geartete Versagenscharakteristika aufweisen, weil

4. Die Verankerungsmechanismen des Baums: Ergebnisse

- ein Geflecht kaskadenförmig, also Stück für Stück, oder schlagartig mit allen Querschnitten versagen kann;
- das eine Geflecht mehr über Wurzelabrisse versagt, das andere mehr über Pull-Out- Mechanismen;
- die Holzfestigkeiten unterschiedlich hoch sind.

Versuchsbaum	Zugfestigkeit σ_z in MPa
Fichte 1	71,2
Fichte 2	74,8
Fichte 3	54,4
Buche 1	132
Buche 2	112

Tabelle 4.1.: Holzzugfestigkeiten der fünf Bäume im Ausreissversuch

Da bei den Versuchsbäumen Bohrkerne zur Ermittlung der Holzfestigkeit entnommen wurden, lässt sich der letztgenannte Punkt gut überprüfen. Die Werte sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst. Die Zugfestigkeit wurde als das Vierfache der mit dem Fractometer II gemessenen Druckfestigkeit berechnet.

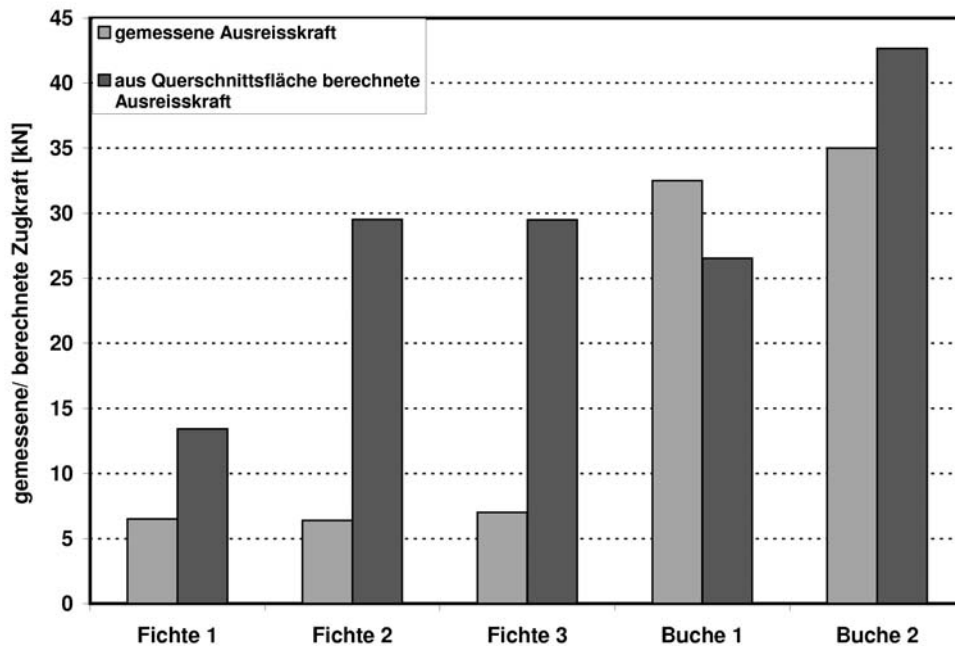


Abbildung 4.7.: Vergleich zwischen der gemessenen und der aus Querschnitt und Holzzugfestigkeit berechneten Ausreisskraft der fünf Versuchsbäume. Der Auszugswiderstand hängt offensichtlich nicht nur vom Wurzelgesamtquerschnitt ab.

4. Die Verankerungsmechanismen des Baums: Ergebnisse

Stellt man nun die Ausreisskraft und die theoretisch benötigte Kraft gegenüber, die zum gleichzeitigen Abriss des Gesamtquerschnitts vonnöten gewesen wäre, ergibt sich das in Abbildung 4.7 dargestellte Diagramm. Es verdeutlicht zwei Sachverhalte: Die wesentlich höhere Zugfestigkeit des Buchenholzes macht sich bemerkbar, denn trotz kleinerer Querschnitte haben die Buchen sowohl für den tatsächlichen als auch für den theoretischen Fall den größeren Auszugswiderstand; weiterhin tritt bei Buche 1 ein besonderer Fall ein: Der berechnete Wert für den Abriss aller Querschnitte gleichzeitig ist sogar niedriger als der gemessene Wert, was zuerst nicht nachvollziehbar scheint.

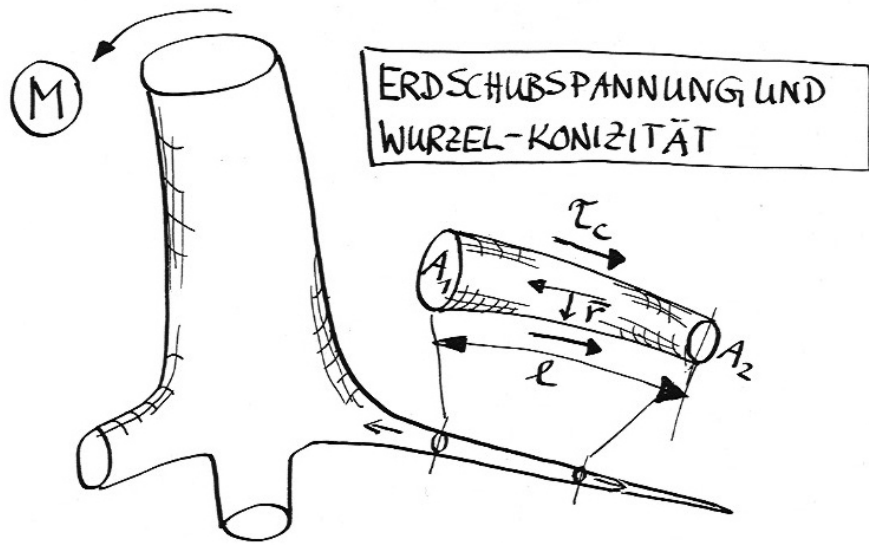


Abbildung 4.8.: Ein Wurzelabschnitt gibt nach Gleichung 4.1 einen Teil seiner Zugbelastung über Schub an die umliegende Erde ab (Zeichnung: C.Mattheck).

Der oben erwähnte Pull- Out- Widerstand liefert aber eine Erklärung für den fehlenden Betrag; nicht jede Wurzelverzweigung muss zwangsläufig abreißen, sie kann auch über Formschluss und Schub den Auszug behindern. Im vorliegenden Fall der Buche 1 hieße das: Starke schubtragende Wurzeln halten einen hohen Ausreisswiderstand aufrecht, während kleinere Wurzeln nach und nach abreißen. Wird ein Schwellenwert überschritten, versagen diese Schubträger durch Pull- Out und nicht durch Abriss.

Ist diese Schubkomponente abschätzbar? Das Modell in Abbildung 4.8 zeigt den mechanischen Zusammenhang an einem konischen Wurzelstück. Die über den Wurzelanlauf eingeleitete Zugkraft wird sukzessive per Schub über die Aussenfläche des Wurzelmantels abgebaut. Dies ermöglicht auch eine Verringerung des Durchmessers mit steigender Entfernung vom Stamm, könnten keine Kräfte abgebaut werden, müsste der Baum endlos einen konstanten Querschnitt in die Erde treiben.

4. Die Verankerungsmechanismen des Baums: Ergebnisse

Für einen konischen Verlauf kann man aber eine einfache Berechnung anstellen (nach Mattheck [12]): Herrscht Kräftegleichgewicht, gilt die Gleichung 4.1.

$$\sigma_z (A_1 - A_2) = 2\tau_c \pi \bar{r} l, \quad (4.1)$$

dabei ist

σ_z die Zugfestigkeit des Wurzelholzes,
 A_1 und A_2 die Wurzelquerschnitte,
 τ_c die Scherfestigkeit zwischen Wurzel und Erde
 $\bar{r}$ der mittlere Radius des Wurzelsegments
 und l die Segmentlänge.

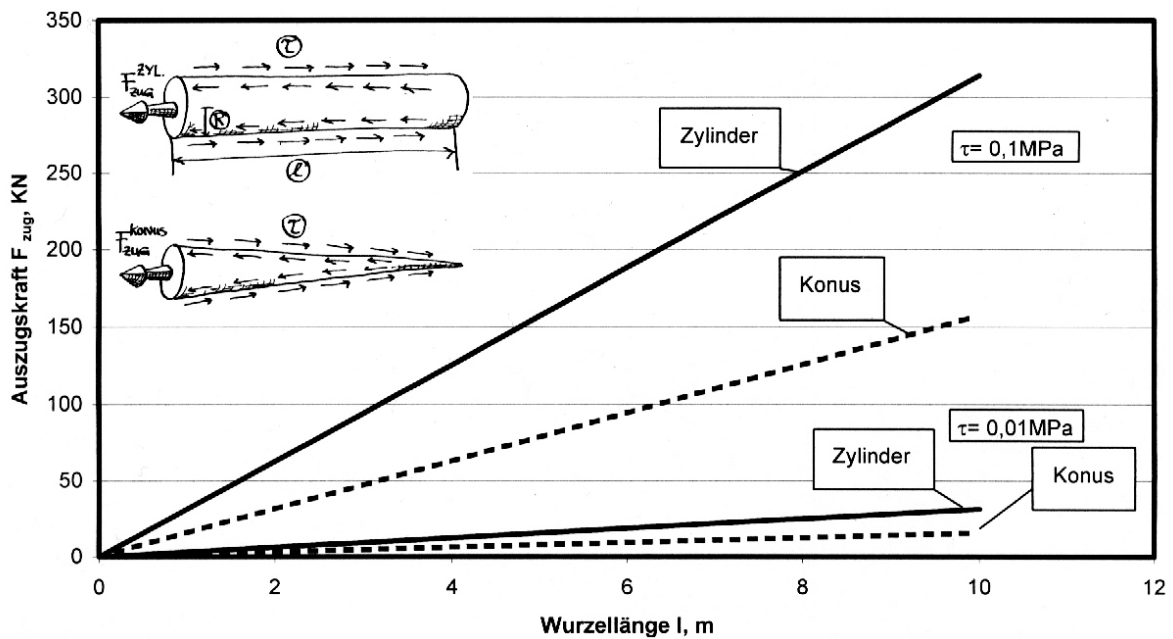


Abbildung 4.9.: Zwei verschiedene Wurzelgeometrien und ihre maximal über Schub entwickelbaren Auszugskräfte: Die durchgezogene Linie kennzeichnet den Kraftverlauf einer zylinderförmigen Wurzel, die gestrichelte die einer konusförmigen. Die Kräfte steigen mit der Wurzellänge linear an, die obere Paarung gilt für eine Scherfestigkeit von 100 kPa , die untere für 10 kPa (Zeichnung: C. Mattheck).

Wie hoch der Anteil der Schubwirkung an der Auszugskraft sein kann, lässt sich anhand des Schaubilds 4.9 abschätzen. Dargestellt sind jeweils eine zylindrische und eine konische Wurzelform. Die an der konischen Wurzel anfallende Kraft normal zur Schubkraft kann wegen des kleinen Verjüngungswinkels vernachlässigt werden. Der Anfangsdurchmesser der Wurzeln beträgt 10 cm , als Scherfestigkeit wurden gängige Bodenschersfestigkeiten zwischen 10 und 100 kPa eingesetzt. Dies ist insofern etwas ungenau,

als strenggenommen die Scherfestigkeit zwischen der Wurzeloberfläche und dem Erdreich angesetzt werden müsste. Da Wurzelhaare und unebene Rindenoberfläche aber die Scherfläche etwas von der Rinde weg in das Erdreich rücken, ist die Bodenscherfestigkeit eine gute Näherung.

Ein Scherversagen zwischen Rinde und Wurzelkern, wie es von Tobias [35] beobachtet wurde, konnte während der Versuche nicht festgestellt werden. Die aus dem Diagramm ersichtlichen Werte decken sich in ihrer Größenordnung recht gut mit den Ergebnissen des Ausreissversuchs, laut Diagramm würde beispielsweise eine Wurzel der Länge $3m$ einen Auszugswiderstand zwischen 10 und $100kN$ erzeugen, die gemessenen Werte liegen in diesem Bereich.

4.4. Die gemessenen Wurzelgesamtquerschnitte in Abhängigkeit vom Abstand zum Stamm

Die Einzelergebnisse der Wurzelquerschnittsarealmessungen zeigen die unterschiedlichen Querschnittsverläufe von Buche und Fichte (Abbildung 4.11, (a)-(e)). Aufgetragen sind die Querschnitte über dem Stammabstand, die Messradien haben einen Abstand von $20cm$. Die Fichten (Bäume (a)-(c)) starten mit einem hohen Anfangswert, fallen aber innerhalb des ersten Meters auf Werte unter 10% ab. Die Buchenwurzeln zeigen dagegen wesentlich niedrigere Startwerte, haben aber einen flacheren Kurvenverlauf und besitzen jenseits der $1m$ - Marke noch etwa 30% ihres Anfangsquerschnitts.

Trägt man die Durchschnittswerte aller Fichten und Buchen im selben Diagramm auf, ergibt sich das Schaubild 4.10.

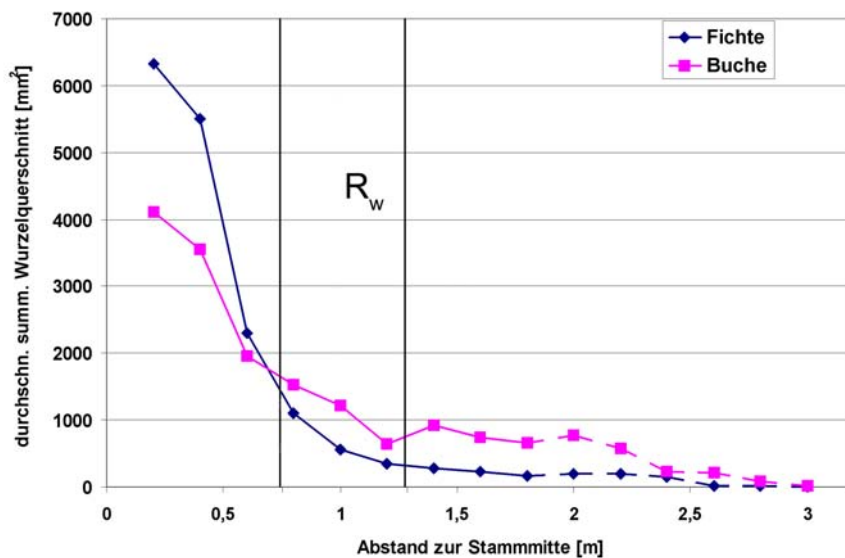


Abbildung 4.10.: Die gemittelten Wurzelquerschnitte der Buchen und Fichten. Zur Orientierung sind die Ober- und Untergrenze der mechanisch wirksamen Wurzelplatte aus dem Windwurfdiagramm (senkrechte R_w - Linien) eingezeichnet.

4. Die Verankerungsmechanismen des Baums: Ergebnisse

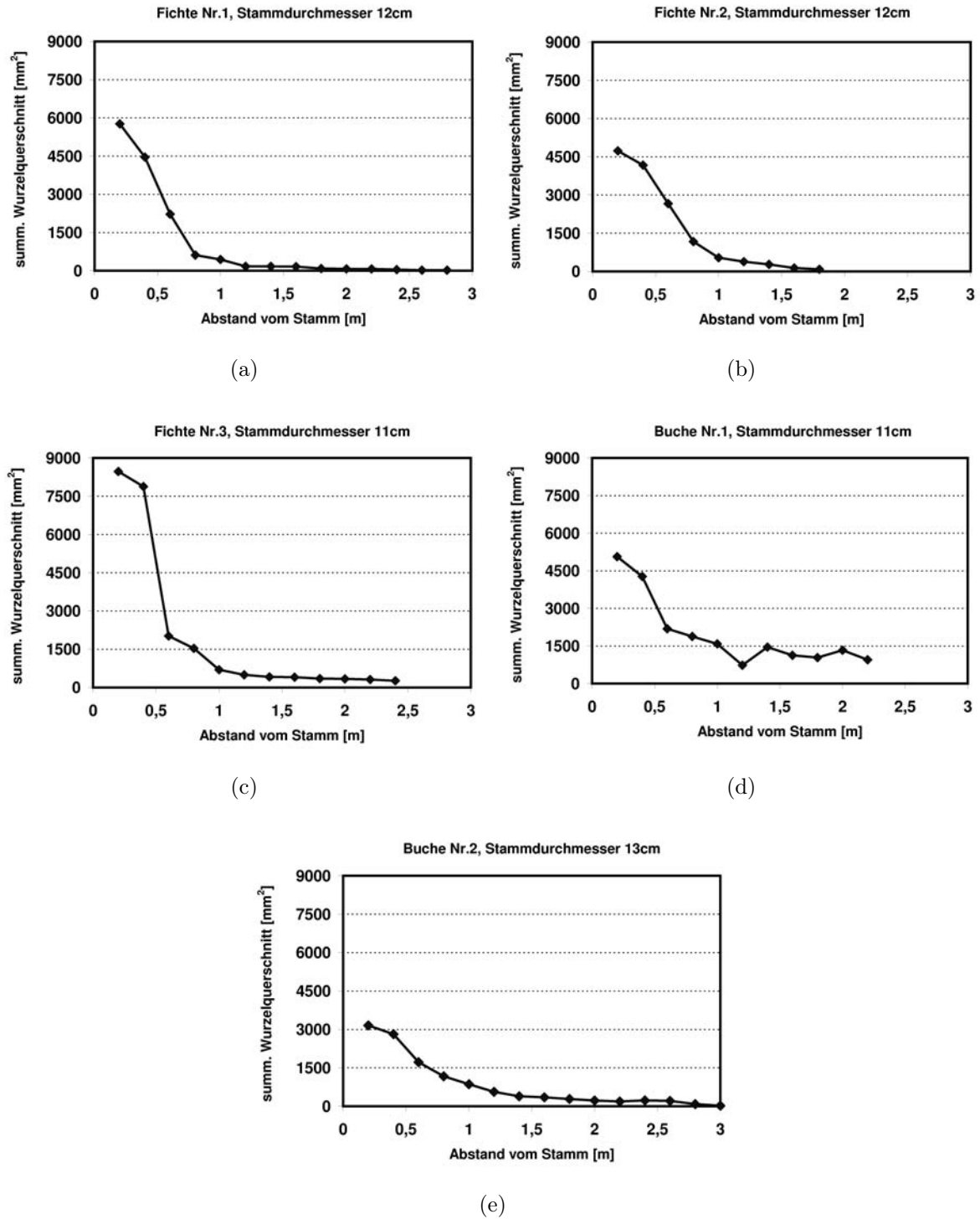


Abbildung 4.11.: Die Messergebnisse der Querschnittsvermessungen an freigeblasenen Wurzeln.

4. Die Verankerungsmechanismen des Baums: Ergebnisse

Stammnah haben die Fichten einen um etwa ein Drittel größeren Querschnitt als die Buche, erst ab ca. 0,7m schlägt das Verhältnis zugunsten der Buche um: Die Werte liegen bis 2,2m um ein Vielfaches höher als die der Fichte. Da man jetzt sowohl die Daten der tatsächlich versagten Wurzeln als auch den Querschnittsverlauf unbeschädigter Exemplare ermittelt hat, bietet es sich an, einen weiteren Vergleich anzustellen: Wie verhalten sich Abrissquerschnitt und der Querschnitt im statistischen Versagensbereich, dem Bereich der mechanisch wirksamen Wurzelplatte?

Zu diesem Zweck werden die WQA- Werte in einem Meter Abstand (kurz: WQA_{100}) zum Stamm herangezogen, was der Mitte des Versagensbereichs aus dem Windwurfdiagramm (Abbildung 4.1) entspricht. Schaubild 4.12 zeigt die beiden Kurvenverläufe: In

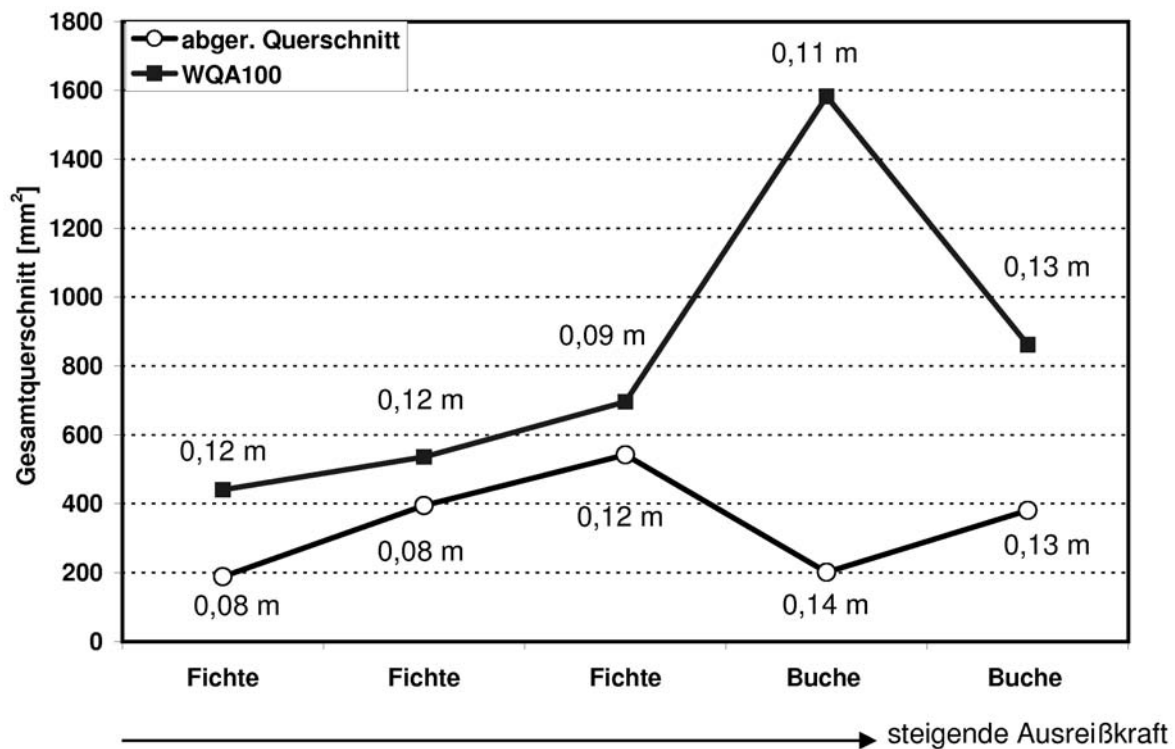


Abbildung 4.12.: Die abgerissenen und die freigelegten Querschnitte im Vergleich.

der unteren Linie sind die Abrissquerschnitte dargestellt, von links nach rechts mit steigender Ausreißkraft. Darüber die WQA_{100} - Werte; die Ähnlichkeit der Kurvenverläufe bei den Fichten springt sofort ins Auge. Die Ergebnisse der Buchen differieren dagegen stark. Dies könnte folgende Ursachen haben:

- Die Buchenwurzeln sind nicht hauptsächlich auf Zug, sondern gemäß ihrer Armierung im Wurzelballen auf Biegebelastung ausgelegt.

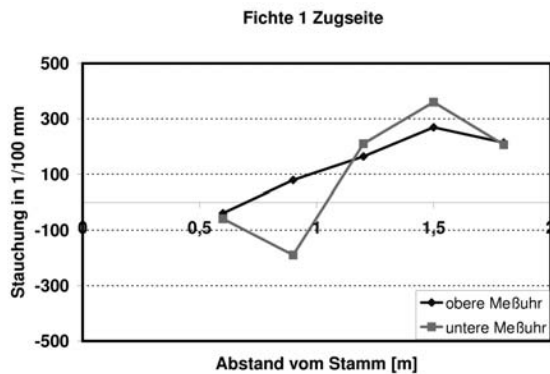
4. Die Verankerungsmechanismen des Baums: Ergebnisse

- Die Wurzelabrisse der Buche finden ausserhalb der mechanisch wirksamen Wurzelplatte statt; würde dort ein Vergleich stattfinden, wäre die Übereinstimmung besser.

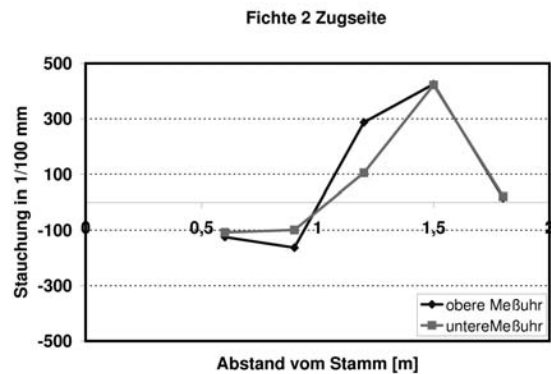
Der letzte Punkt lässt sich entkräften: Bei Buche 1 wurden mit 37% die meisten Abrisse mit $0,8 - 1m$ Abstand vom Stamm gemessen, also gerade vor und im Bereich der mechanisch wirksamen Wurzelplatte. Auch Buche 2 wurden mit 42% ähnliche Werte aufgenommen.

4.5. Die ermittelten Bodenbewegungen innerhalb der belasteten Wurzelplatte

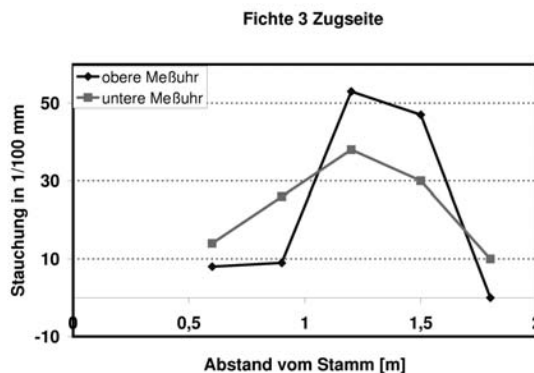
Die Feldstudie über die Bodendehnungsmessung lieferte für die auf Zug belastete Wurzelplatte (also entgegengesetzt zum angreifenden Zugseil am Stamm) verschiedene Ergebnisse zur druckbelasteten Seite; die Zugseite lieferte in einem größeren Bereich Messwerte als die Druckseite, bei der meist schon nach $1 - 1,5m$ keine Verformungen mehr beobachtet werden konnten. Die zugseitigen Ergebnisse sind in Abbildung 4.13 zusammengefasst.



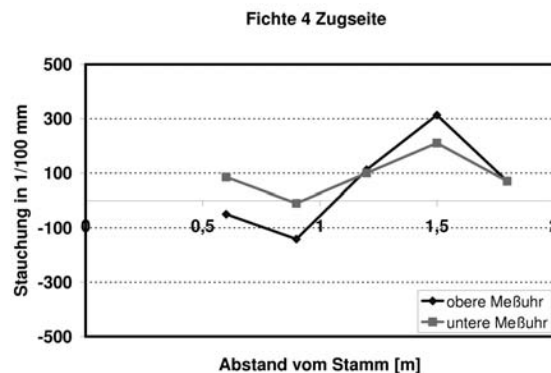
(a)



(b)



(c)



(d)

4. Die Verankerungsmechanismen des Baums: Ergebnisse

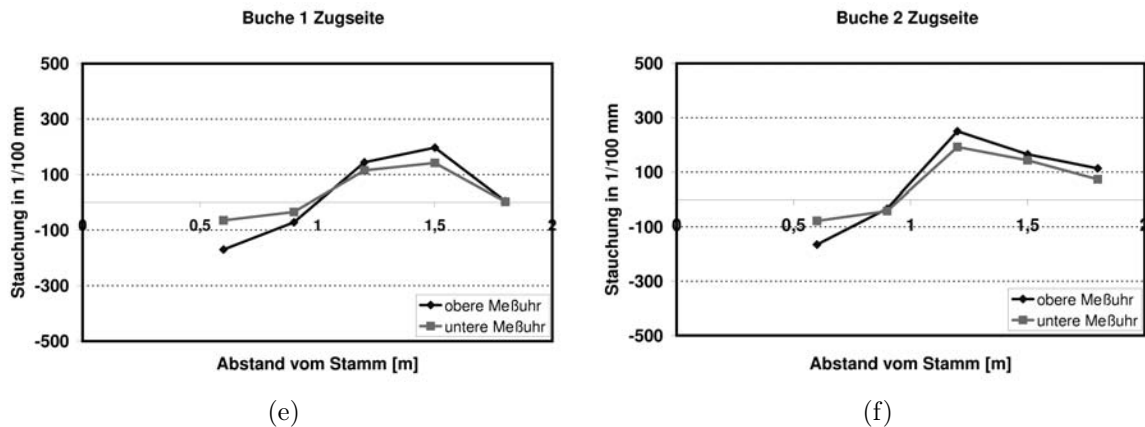


Abbildung 4.13.: Die Messergebnisse des Kompressionsversuchs, zugbelastete Wurzelplatte.

Die Bodendehnungen der jeweils oberen und unteren Messuhren sind in den Diagrammen getrennt aufgetragen, gestauchte Bereiche positiv. Auf der Zugseite sind die beiden Kurvenverläufe ähnlich, was bedeutet, dass eine recht ebene, horizontale Verformung des Bodens stattfand. Auf der Druckseite differieren die Kurven stark, hier wurden die Messspieße gegeneinander schräg gestellt, was auf eine Biegeverformung der Druckwurzel im Messbereich hindeutet (Abbildung 4.15). Generell bewegen sich die Verformungen zwischen den Messspießen im 1/10 Millimeter bis Millimeter- Bereich, über die gesamte Messstrecke wurde maximal eine Stauchung von knapp über 10mm gemessen.

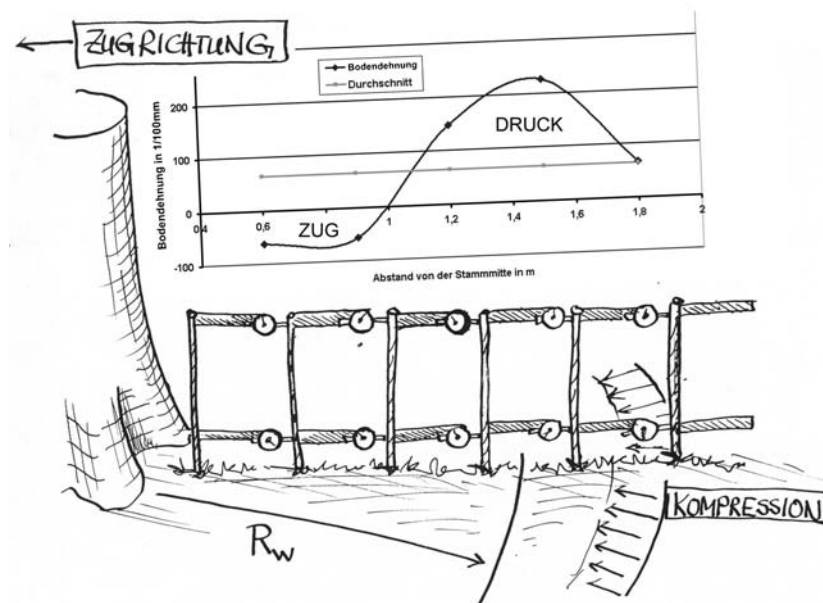


Abbildung 4.14.: Die Durchschnittswerte der Bodendehnungen auf der Windseite des Baums. Komprimierte Bereiche sind positiv aufgetragen (Zeichnung: C.Mattheck).

4. Die Verankerungsmechanismen des Baums: Ergebnisse

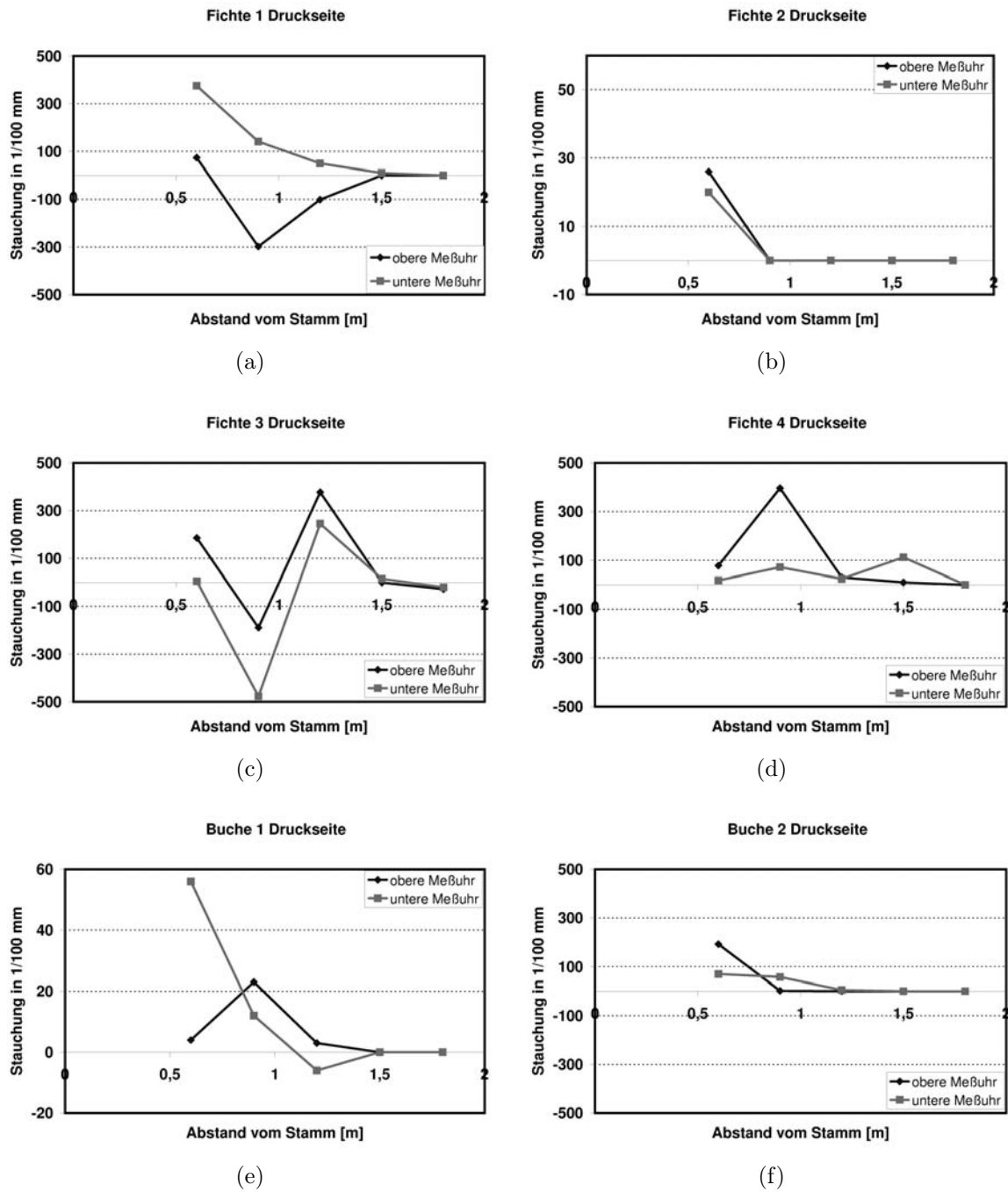


Abbildung 4.15.: Die Messergebnisse des Kompressionsversuchs, druckbelastete Wurzelplatte.

4.6. Die Bodenscherfestigkeitsverteilung innerhalb der Wurzelplatte: Ergebnisse

Die Ergebnisse der Scherfestigkeitsmessungen innerhalb der mechanisch wirksamen Wurzelplatte unterscheiden sich bei herz- und flachwurzelnden Bäumen, weswegen sie in getrennten Diagrammen aufgeführt sind. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse vorgestellt, die von Bäumen der Durchmesserklasse 25–30 cm aufgenommen wurden. Damit konnte zum einen die Ober- und Untergrenze des kritischen Wurzelplattenradius aus dem Windwurfdiagramm (Abbildung 4.1) eingetragen werden, zum anderen war eine zusammengefasste Darstellung des Durchschnitts möglich. Die Ergebnisse der Einzelbäume sind separat im Anhang A aufgeführt. In Abbildung 4.16 sind die Durchschnittswerte der acht gemessenen Buchen zu sehen. Die Messpunkte sind bei jedem Einzelbaum auf den höchsten Wert normiert und prozentual angegeben, aufgetragen über dem Abstand zum Stamm.

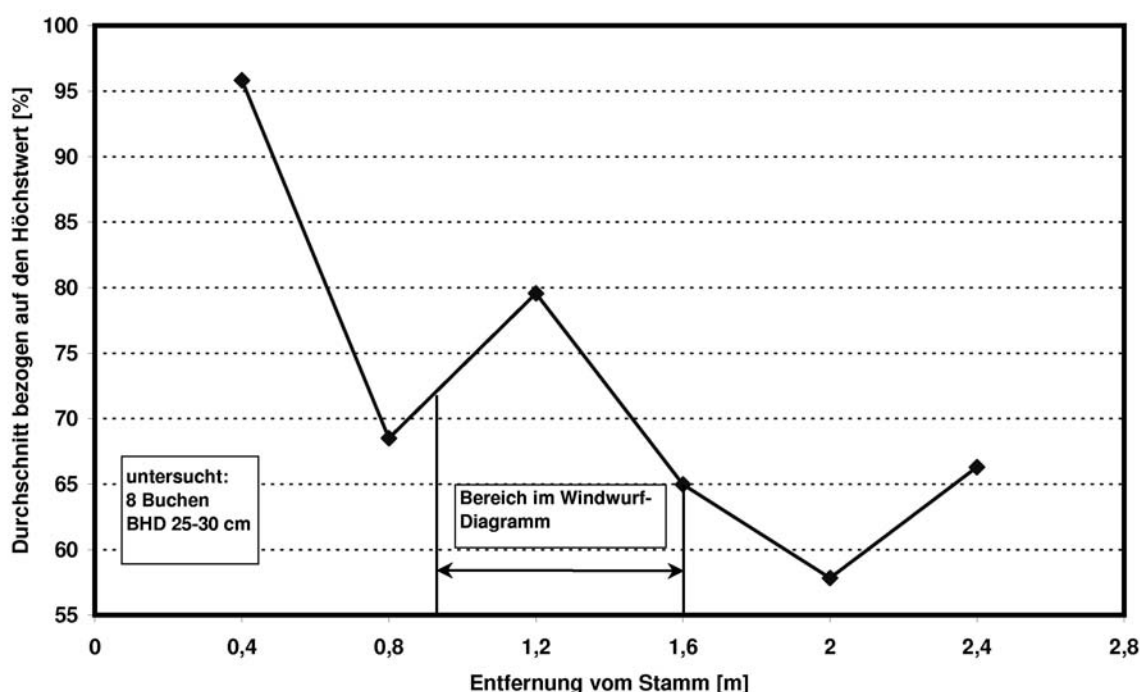


Abbildung 4.16.: Durchschnittliche Bodenscherfestigkeitsverteilung im Buchenwurzelballen

Für weitere acht Fichten und drei Kiefern sind die Messergebnisse in Abbildung 4.17 zu sehen. Vergleicht man beide Schaubilder, treten charakteristische Unterschiede hervor: Die herzwurzelnden Bäume erzielen meist ihren Höchstwert am Stammfuß. Dies ist wahrscheinlich auf das sekundäre Dickenwachstum der Wurzeln an der Stammanbindung zurückzuführen, das bei dem direkt am Stamm auffächerndem Wurzelsystem der

4. Die Verankerungsmechanismen des Baums: Ergebnisse

Buche eine größere Kompression des Erdreichs zwischen den Anläufen zur Folge zu haben scheint. Die Fichte hingegen wartet am Anlauf mit moderaten Werten auf, die dann in Richtung R_W hin einen Höhepunkt erreichen und anschliessend langsam abfallen.

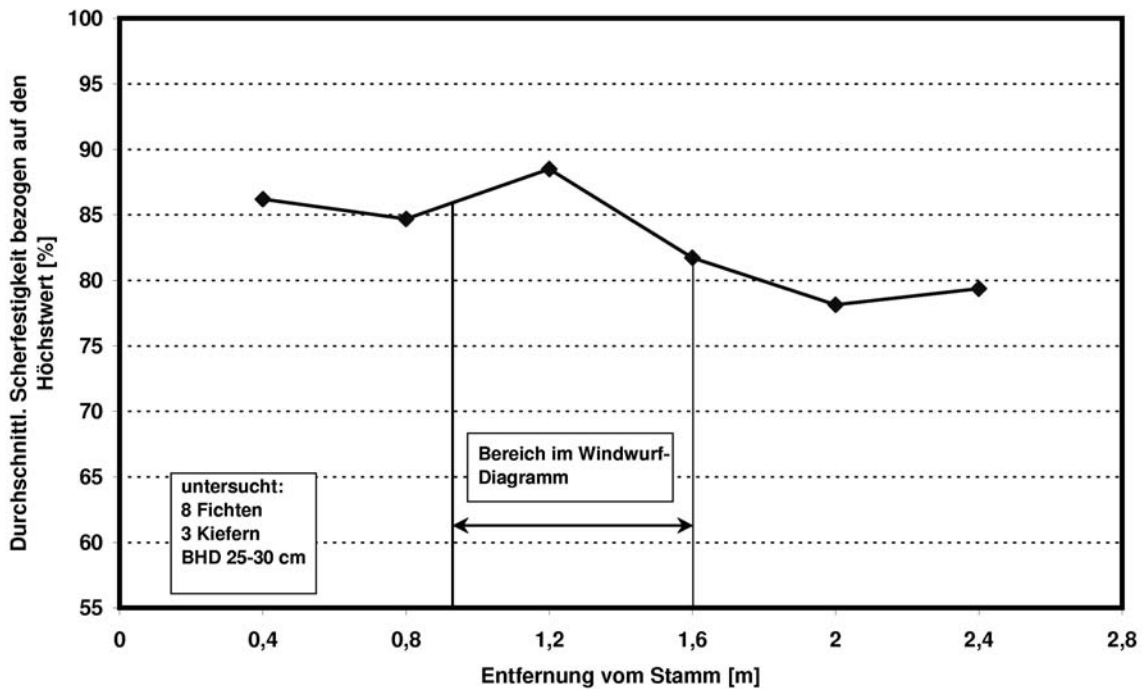


Abbildung 4.17.: Durchschnittliche Bodenscherfestigkeitsverteilung in der Fichtenwurzelplatte

Beiden Diagrammen gemein ist also ein Maximum im Bereich des kritischen Wurzelplattenradius R_W . Es folgt bei den Buchen auf einen starken Abfall des hohen Startwerts, bei den flachwurzelnenden Fichten ist dieser Bereich gleichzeitig das absolute Maximum.

Betrachtet man die Ergebnisse aus dem Kompressionsversuch in Abschnitt 4.5, so scheint zumindest ein Teil dieser Scherfestigkeitserhöhung auf dem Effekt zu beruhen, dass der Baum bei Windbelastung die Erde im am höchsten gefährdeten Bereich komprimiert und so sein eigenes Fundament verfestigt.

Ein weiterer Anteil könnte durch einen erhöhten Feinwurzelanteil in diesem Bereich zustande kommen, was aber in noch weiter entfernten Wurzelregionen ebenfalls bemerkbar sein müsste. Dies wurde aber nicht eindeutig festgestellt, bei den Buchen gab es lediglich ab einer Entfernung von 2m wieder einen Anstieg; bei den Fichten fiel dieser sehr gering aus.

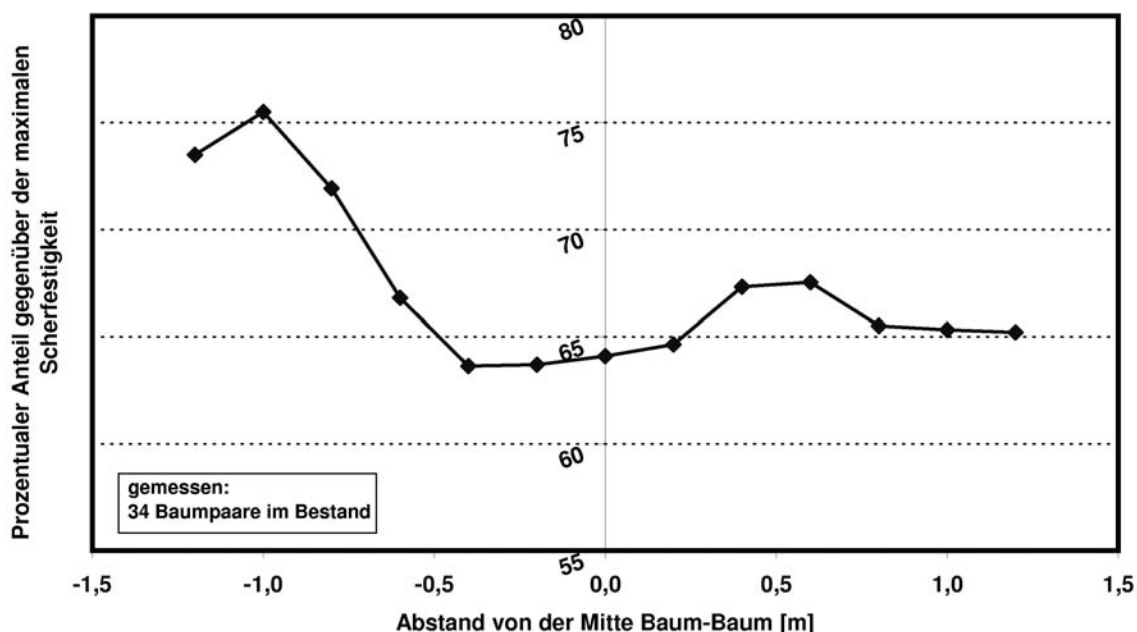


Abbildung 4.18.: Scherfestigkeit zwischen zwei Bestandsbäumen

Gibt es eine Interaktion zwischen benachbarten Wurzelsystemen? Um eine Antwort auf diese Frage zu erhalten, wurde die gleiche Art Messung über den vollen Abstand zwischen zwei Bestandsbäumen ausgedehnt, das Ergebnis ist in Abbildung 4.18 ersichtlich: Offenbar scheint keine verstärkende Wirkung zwischen benachbarten Geflechten zu bestehen, der mittige Bereich zwischen den gemessenen Bäumen zeigt einen vergleichsweise niedrigen Festigkeitswert auf. Im Schaubild ist linksseitig das Geflecht des jeweils größeren Baums zu finden, das lokale Maximum ist auch hier gut sichtbar. Untersucht wurden insgesamt 34 Baumpaare im Bestand.

4.7. Festigkeitswerte von Wurzelholz

Die Festigkeitsuntersuchungen entlang einer Fichten- und einer Buchenwurzel bestätigten den Verdacht, dass der Baum auch seine Holzfestigkeiten entsprechend der eingeleiteten Last optimiert. Die ermittelten Festigkeiten sind allerdings nicht als Absolutwerte für grünes Wurzelholz zu sehen, da die Probenquerschnitte dafür zu wenig Jahresringe beinhalteten und die Geometrien nicht nach DIN gewählt werden konnten.

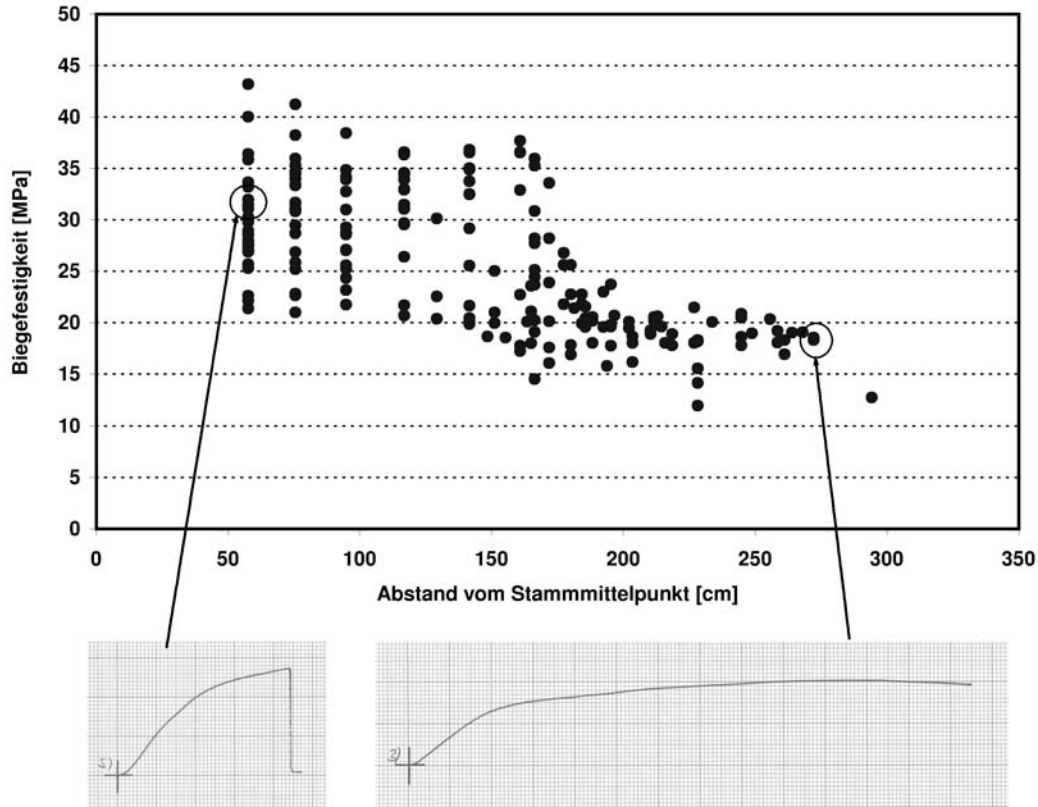


Abbildung 4.19.: Die Entwicklung der Biegefestigkeit entlang einer Fichtenwurzel (oben); unten links: Der Verlauf des Kraft- Zeit- Diagramms eines stammnahen Probenstücks. Unten rechts der Verlauf an einer stammfernen Probe (aus [48]).

Das Diagramm in Abbildung 4.19 zeigt die Verteilung der einzelnen Messpunkte bei der Fichte. Aufgetragen ist hier die Biegefestigkeit des in Abschnitt 3.7 vorgestellten Vierpunkt- Biegeversuchs über dem Abstand zur Stammmitte. Zwei wesentliche Informationen sind hier bereits zu erkennen: Vom Stamm zum Wurzelende hin fallen die Messwerte ab, also bildet der Baum am Ort des höchsten Momenteneintrags, dem Wurzelanlauf, das biegefesteste Holz. Zum Zweiten stellt sich auch eine Entwicklung innerhalb eines untersuchten Segmentes heraus: Die im Querschnitt am höchsten belasteten Randstücke weisen im Vergleich zum Zentrum eine höhere Biegefestigkeit auf, wie in der Diagrammfolge 4.20 zu sehen ist; die Randbereiche sind um den Faktor 1,5-2 biegeester als das Zentrum.

Stammnahe und -ferne Proben hatten neben unterschiedlichen Werten auch gänzlich andere Versagenscharakteristiken: War die Steifigkeit der stammnahen Proben größer, legten die ferneren Probenstücke einen enormen Biegezug zurück, bis die Maximalkraft erreicht war (Abbildungen 4.19 unten). Als gute Illustration dazu mag auch Abbildung 4.21 dienen: Ohne Bruch war es möglich, in das Endstück einer Fichtenwurzel einen Knoten knüpfen. Beim Zugversuch zeigte das Wurzelholz ein abweichendes Verhalten, wie

4. Die Verankerungsmechanismen des Baums: Ergebnisse

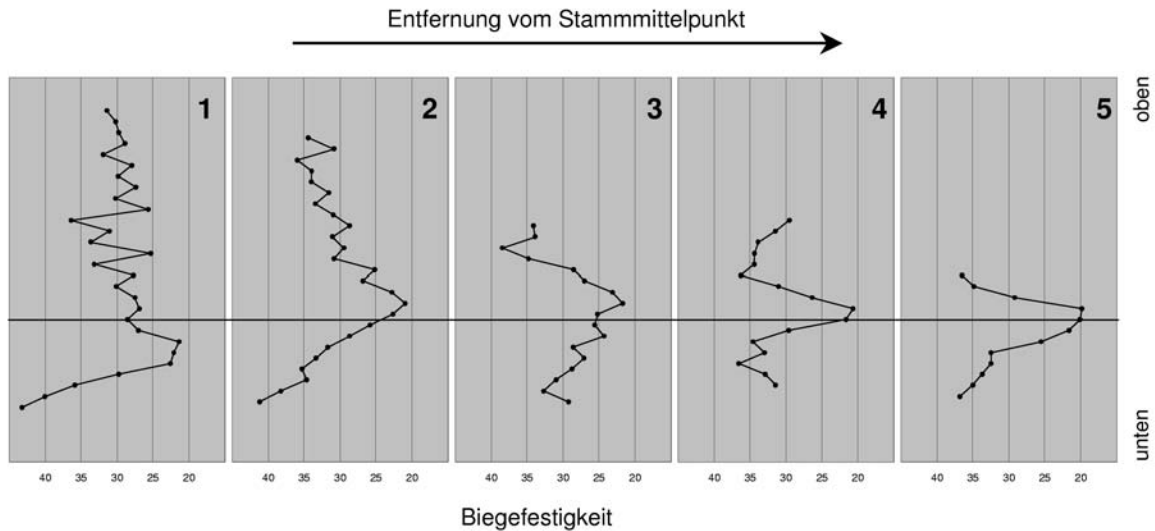


Abbildung 4.20.: Auch innerhalb eines Segments ist eine Entwicklung der Biegefestigkeit ersichtlich; die Randbereiche der Wurzel weisen höhere Festigkeiten auf. Das Zentrum ist mit einer schwarzen Linie gekennzeichnet (aus [48]).

in Abbildung 4.22 zu sehen ist. Die Festigkeiten nehmen vom Stamm weg kontinuierlich zu, bis sie im Bereich der mechanisch wirksamen Wurzelplatte ihr Maximum erreichen. Zum Wurzelende hin nehmen sie dann wieder kontinuierlich ab.

Wie beim Biegeversuch auch, waren die Randbereiche zugfester ausgebildet- was nicht verwundert, da die Randbereiche eines biegebelasteten Wurzelstücks auch die höchsten Zug- beziehungsweise Druckspannungen erfahren. Auch in den Kraft- Zeit- Kurven zeigen der Nah- und Fernbereich wieder unterschiedliche Kurvenverläufe: Während in Stammnähe wieder höhere Festigkeiten und Steifigkeiten vorherrschen, versagen stammferne Proben „duktiler“; die Holzfasern lösen sich unter Zug nicht abrupt und spröde, sondern versagen allmählich.

Die Buchenwurzel lieferte wegen des kleineren Querschnitts weniger Messwerte als die Fichte. Trotzdem ist auch hier im Durchschnitt ein Abfall der Biegefestigkeit auszumachen (Abbildung 4.23(a)). Im Vergleich zur Buche lagen die Werte um etwa 50% höher.

Die Größe des zur Herstellung der Zugproben benötigten Holzkörpers ließ für die Zugfestigkeitsmessung pro Segment nur einen Wert zu. Der Verlauf der Messpunkte ist in Abbildung 4.23(b) zu sehen, wieder erscheint ein Spitzenwert im Bereich des kritischen Wurzelradius R_W .

Die generelle Abnahme bei allen drei Baumarten sowohl der Biege- als auch der Zugfestigkeit spiegelt sich auch in der Anatomie wider, wie in Abschnitt 2.1.2 zu sehen ist: Weit weg vom Stamm ist die Biegefestigkeit kaum, die Zugfestigkeit eher, aber das Transportvermögen für Wasser und Nährsalze enorm gefragt. Statt festem, stammähnlichem

4. Die Verankerungsmechanismen des Baums: Ergebnisse



Abbildung 4.21.: Das Endstück einer Fichtenwurzel zeigt ein biegeweiches Verhalten: Sie lässt sich ohne Probleme verknoten.

Holz sind hier die Leitbündel als „Rohrleitungen“ zu finden. Obwohl wie angesprochen die ermittelten Werte keine Absolutwerte darstellen können, sei für den Biegeversuch in Tabelle 4.2 den Durchschnittswerten für Frischholz aus [49] gegenübergestellt. Wie

Baumart	Wurzelholz [MPa]	Grünes Stammholz nach [49] [MPa]	Lufttrocken nach [49]
Fichte	12-43	53,1	91
Buche	30-56	64,8	118
Kiefer	6-33	46,2	88,9

Tabelle 4.2.: Vergleich der ermittelten Biegefestigkeiten mit einem Literaturwert für grünes Stammholz und lufttrockenem Holz.

erwartet liegen die Wurzelholzwerte insgesamt unter dem Literaturwert für Stammholz; Seitenwurzelanbindungen, schräg angeschnittene Faserverläufe und andere festigkeitsmindernde Faktoren machen sich bei der kleinen Probengröße stärker bemerkbar.

4. Die Verankerungsmechanismen des Baums: Ergebnisse

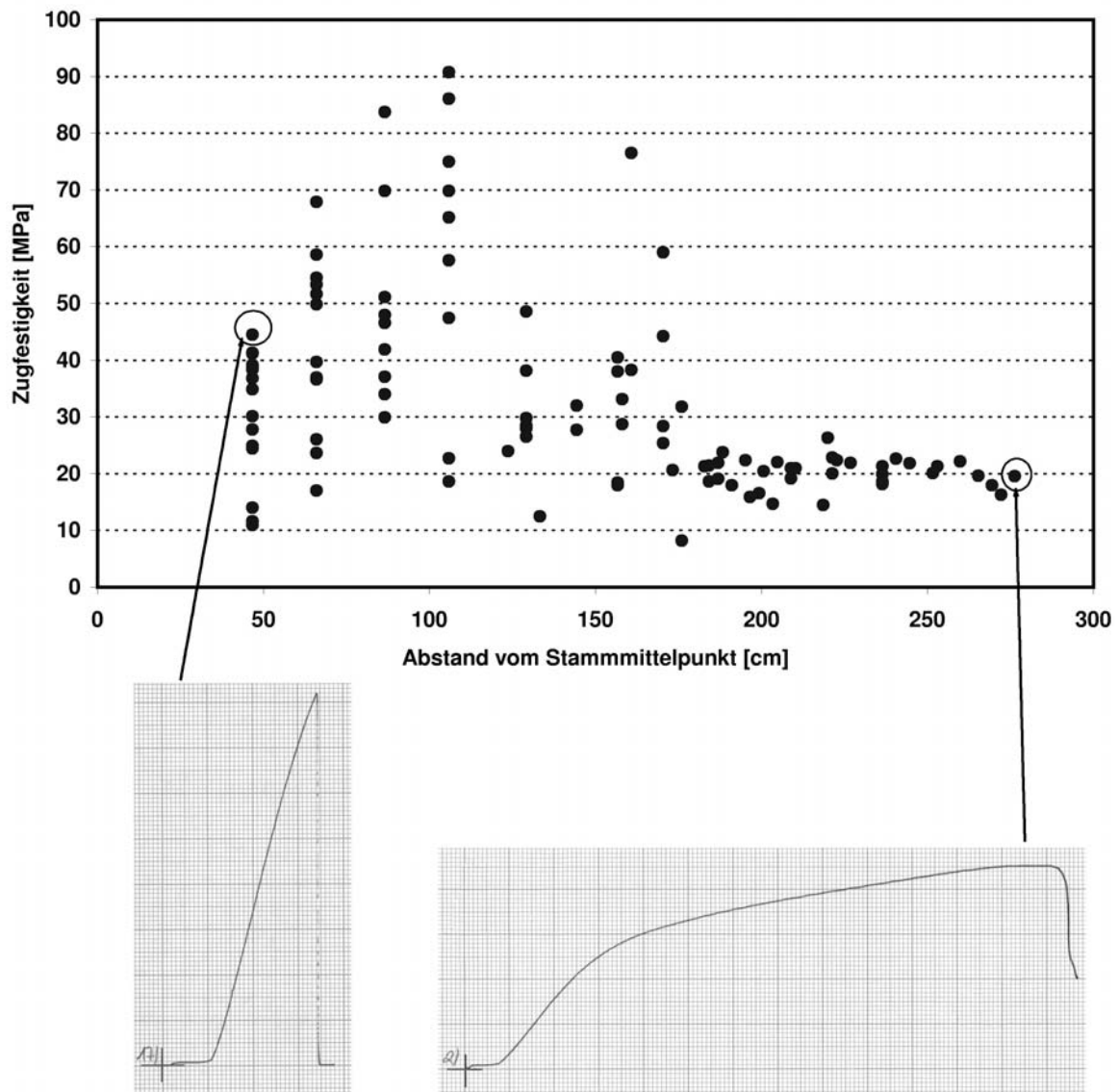
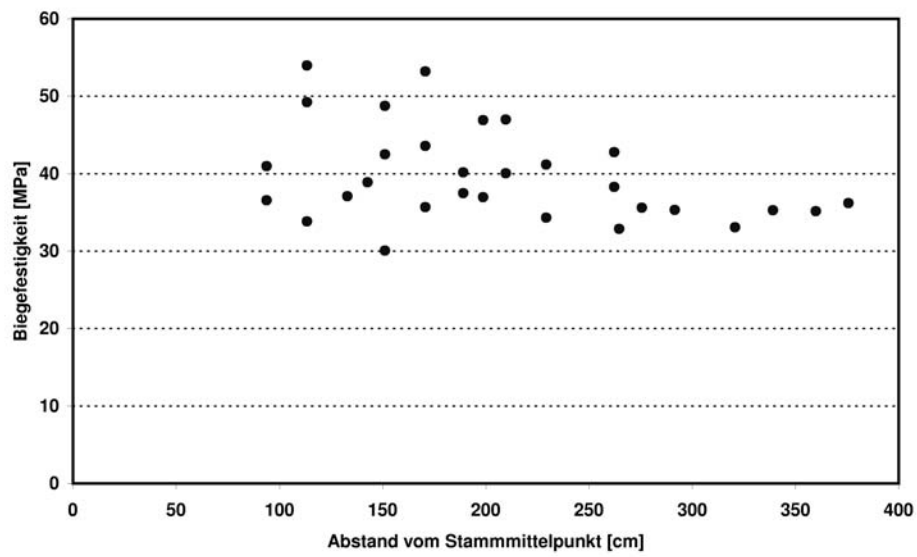
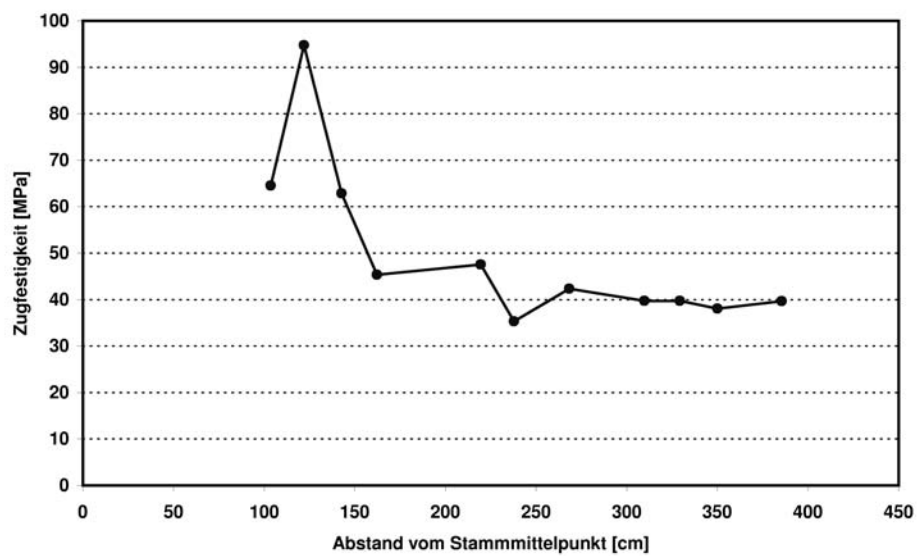


Abbildung 4.22.: Die Entwicklung der Zugfestigkeit entlang einer Fichtenwurzel (oben); unten links: Der Verlauf des Kraft- Zeit- Diagramms eines stammnahen Probenstücks. Unten rechts der Verlauf an einer stammfernen Probe (aus [48]).

4. Die Verankerungsmechanismen des Baums: Ergebnisse



(a)



(b)

Abbildung 4.23.: Die Messergebnisse der Buchenwurzel: (a) zeigt die Festigkeitswerte der Biegeproben, die entlang der Wurzel entnommen wurden. Da für die Herstellung der Zugproben größere Querschnitte nötig waren, konnte in (b) nur ein Messwert pro Segment ermittelt werden.

5. Diskussion und Ausblick

Wie anhand der durchgeführten Feldstudien ermittelt wurde, benützt der Baum offenbar verschiedene Mechanismen, um seine Verankerung im Erdreich sicherzustellen beziehungsweise zu optimieren. Die unterschiedlichen Mechanismen seinen noch einmal anhand Abbildung 5.1 zusammengefasst:

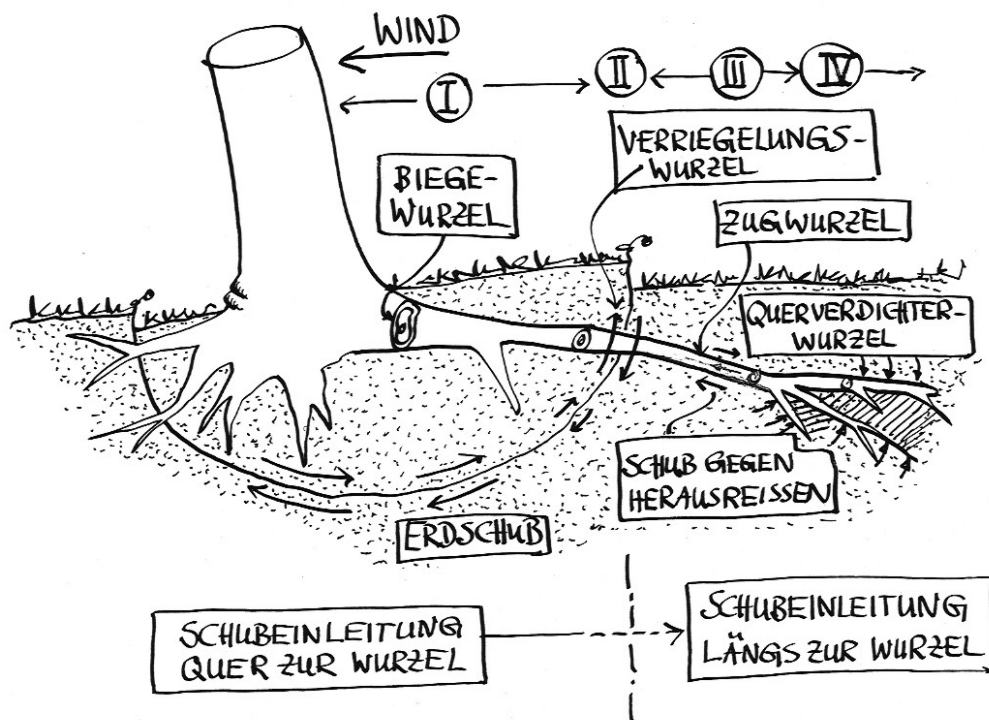


Abbildung 5.1.: Einige der Verankerungsstrategien des Wurzelwerks im Überblick
(Zeichnung: C.Mattheck).

- Die Selbstkompression der Scherfläche des Schubwurzelballens erhöht die Scherfestigkeit.
- Der Baum benutzt den Erdschub des Wurzelballens; eine Vergrößerung der Scherfläche kann durch eine weiter reichende Armierung der umgebenden Erde erreicht werden.

5. Diskussion und Ausblick

- Eine biegesteife Wurzel am Stammfuss befördert das eingeleitete Moment vom Stamm weg und dient als Hebelarm. Form und Festigkeit dieses Wurzelabschnitts sind für diese Aufgabe optimiert.
- Am Rand der mechanisch wirksamen Wurzelplatte verriegelt die Wurzel die potentielle Scherfläche.
- In größerer Entfernung zum Stamm wandelt sich die biegesteife Wurzel zur Zugwurzel mit rundem Querschnitt, die als Bindeglied zum aufgefächerten Ankerpunkt jenseits des kritischen Wurzelplattenradius dient.
- Über die gesamte Stranglänge besitzt die Wurzel einen Ausreisswiderstand durch Schub zwischen Wurzeloberfläche und Erde, der mehrere Tonnen betragen kann.

Zur Veranschaulichung der vom Baum genutzten Ankermechanismen kann ein genauso einfaches wie instruktives Hilfsmittel herangezogen werden, das von *C. Mattheck* entwickelte Lochplattenprinzip: Schneidet man in ein Modell aus sehr elastischem Material kreisrunde Löcher, verformen sich diese gemäß den anliegenden Belastungen; Zug, Druck, Biegung und Schub lassen sich so auf simple Art und Weise sichtbar machen (Abbildung 5.2). Dieses Prinzip wurde nun auch angewandt, um die Schubverhältnisse in der

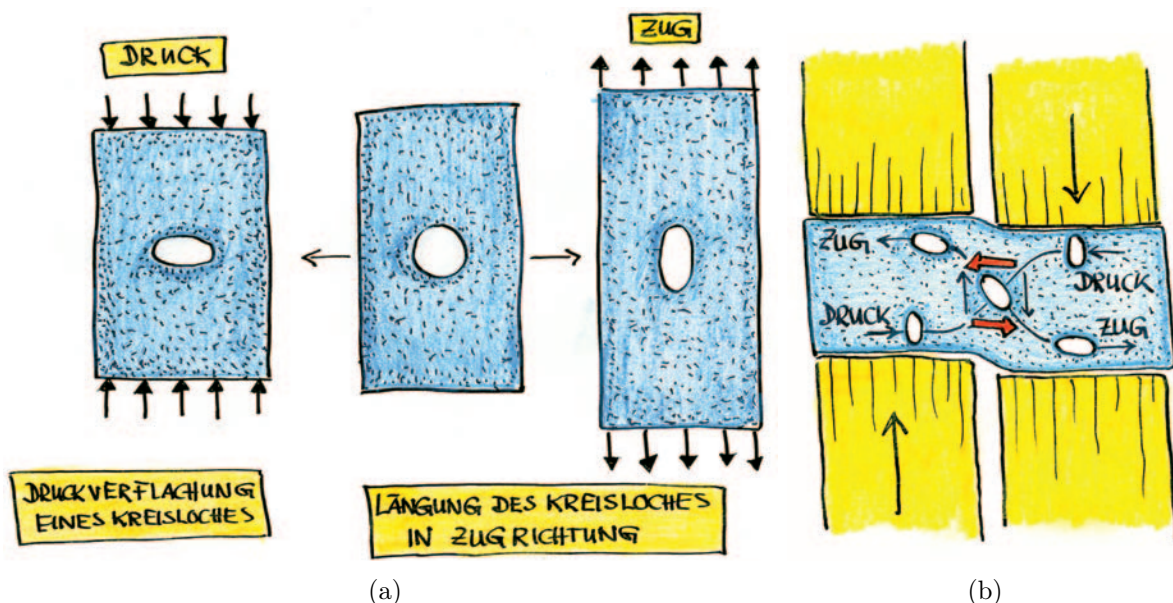


Abbildung 5.2.: So funktionieren die Lochplattenmodelle: (a) zeigt die Lochverformungen bei Zug- und Druckbelastung; in (b) ist die Schrägstellung der Lochhauptachse bei Scherbeanspruchung sichtbar (aus [50]).

Scherfläche des Wurzelballens zu visualisieren. Zu diesem Zweck wurde ein Holzmodell entwickelt, bei dem ein massives Stamm/Wurzelballenmodell aus Holz gegenüber einem ebenfalls massiven Bodenmodell sich drehen und verschieben lässt (Abbildung 5.3).

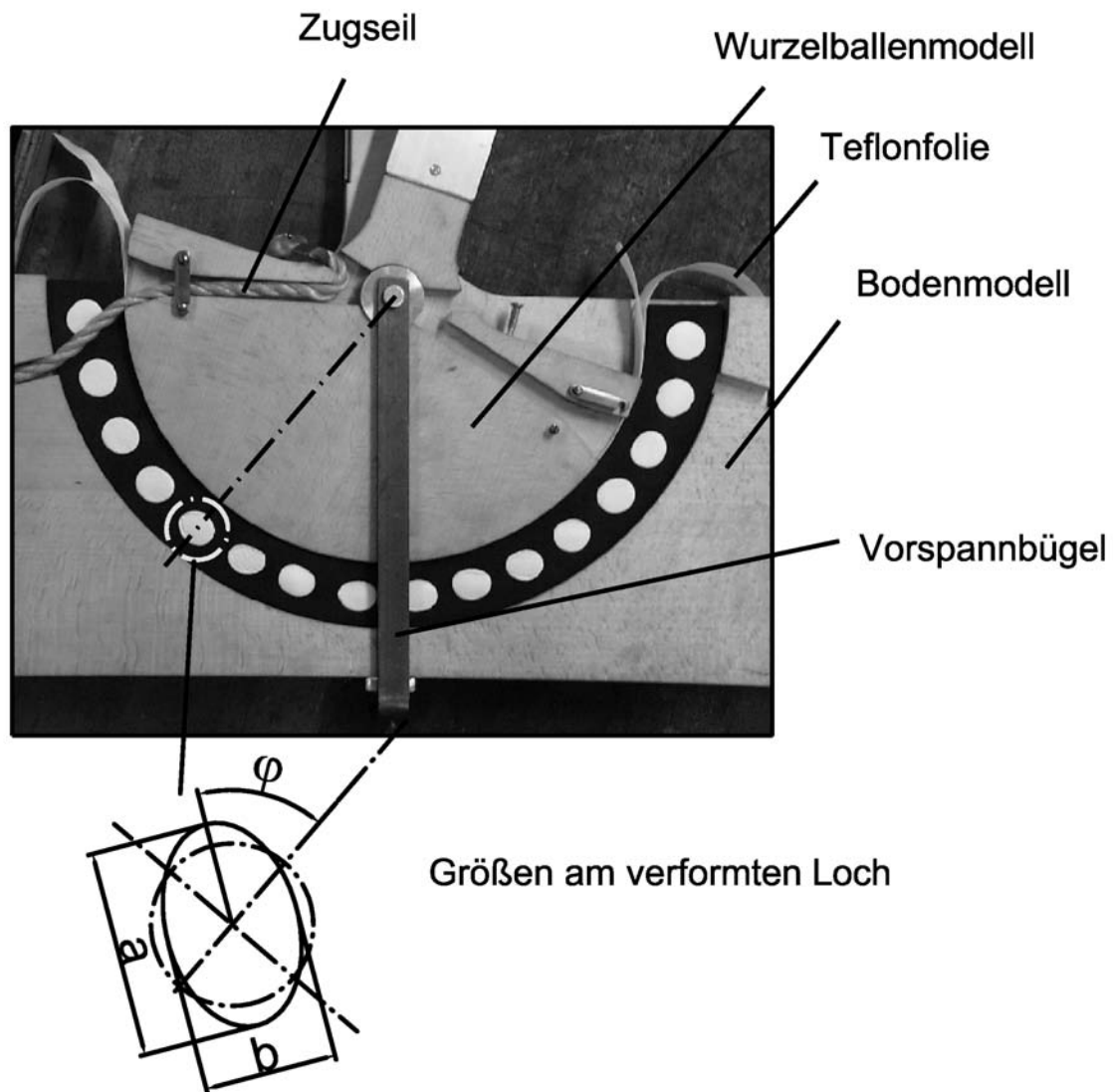


Abbildung 5.3.: Das Wurzelballenmodell mit seinen Einzelteilen. Die Verformung lässt sich mit der Schrägstellung φ und dem Achsenverhältnis $\frac{a}{b}$ erfassen.

Der Raum zwischen den Modellteilen wird durch ein mehrfach gelochtes Moosgummistück ausgefüllt; zur optimalen Lokalisierung der Lochverformungen erfolgte ausserdem eine Füllung der Löcher mit weissem Schaumstoff. Zwischen Wurzelballen und Bodenteil können zwei Seile als Horizontalwurzeln eingelegt und gespannt werden. Zudem ist über einen Bügel, der drehbar am Wurzelballenteil angreift, eine Vorspannung einstellbar, die das Eigengewicht des Baums simulieren soll. Schliesslich lassen sich im Scherspalt noch zwei Streifen aus Teflonfolie einlegen, um die Folgen einer drastische Scherfestigkeitsminderung durch Staunässe darstellen zu können.

Gibt man eine Kraft als simulierte Windlast am Stammstück auf, verdrehen sich Wurzelballen- und Bodenteil gegeneinander, Dadurch wird der Moosgummistreifen mit

einer kombinierten Druck/Schubbelastung beaufschlagt, und es stellen sich je nach gewählter Anordnung verschiedene Verformungsbilder ein, die einen qualitativen Rückschluss auf die vorherrschende Belastung und deren Verteilung zulassen. Die kreisrunden Löcher verformen sich elliptisch, die Schrägstellung und das Achsenverhältnis der Ellipse ermöglichen einen Vergleich der verschiedenen Anordnungen untereinander. Die folgenden Varianten wurden untersucht und sind im Einzelnen im Anhang B abgebildet:

- **Modell mit Vorspannung, ohne Horizontalwurzeln.** Sowohl die Verformung als auch die Schrägstellung der Löcher war vergleichsweise hoch und erreichte das Maximum leicht rechts der tiefsten Wurzelballenstelle, in Belastungsrichtung des Stamms. Da in den Stamm kein reines Moment, sondern auch ein Querkraftanteil einfließt, ist das Verformungsbild asymmetrisch.
- **Modell mit Vorspannung, ohne Horizontalwurzeln, mit Staunässe.** Durch die simulierte Staunässe kann deutlich weniger Schub übertragen werden, die geringen Schrägstellungen zeigen eine vorwiegende Druckbelastung durch die Vorspannung an.
- **Modell mit Vorspannung, mit Horizontalwurzel auf der windzugewandten Seite.** Die Verformung ist in dieser Anordnung am höchsten. Eine starke Schrägstellung der Löcher zeigt ein Schubmaximum auf der windabgewandten Seite. Eine Kompression der Löcher im Bereich der Horizontalwurzel ist kaum auszumachen
- **Modell mit Vorspannung, mit Horizontalwurzel auf der windzugewandten Seite, mit Staunässe.** Wird die Schubübertragung vermindert, kommt die Horizontalwurzel voll zum Tragen: Bei geringer Schrägstellung der Löcher wandert das Verformungsmaximum auf die Horizontalwurzelseite, die Wurzel zieht den Wurzelballen in ihre Richtung und macht aus dem ansonsten zugbelasteten Bereich einen druckbelasteten.
- **Modell mit Vorspannung, mit beidseitiger Horizontalwurzel.** Zwei Horizontalwurzeln armieren die Scherfläche erheblich, bei gleicher Belastung sind die Verformungen wesentlich geringer als in Anordnung drei. Der Zügeffekt ist symmetrisch, wieder drückt die Querkraft am Stamm das Maximum auf die windabgewandte Seite.
- **Modell mit Vorspannung, mit beidseitiger Horizontalwurzel und Staunässe.** Die Schrägstellung der Löcher ist gering, die Verformung fast symmetrisch. Der sowieso schon durch die Verriegelung geringe Schubverformung wird durch die simulierte Staunässe weiter gemindert.

Eine Anordnung, in der auf der windabgewandten Seite die Horizontalwurzel eingelegt wurde, ist in Abbildung 5.4 zu sehen. Der eigentlich unerwartete Effekt: Die leeseitige Horizontalwurzel erzeugt keine Kompression oder zusätzlichen Schub, der für die Standfestigkeit wünschenswert wäre, sondern wirkt im Gegenteil als Kippscharnier, das

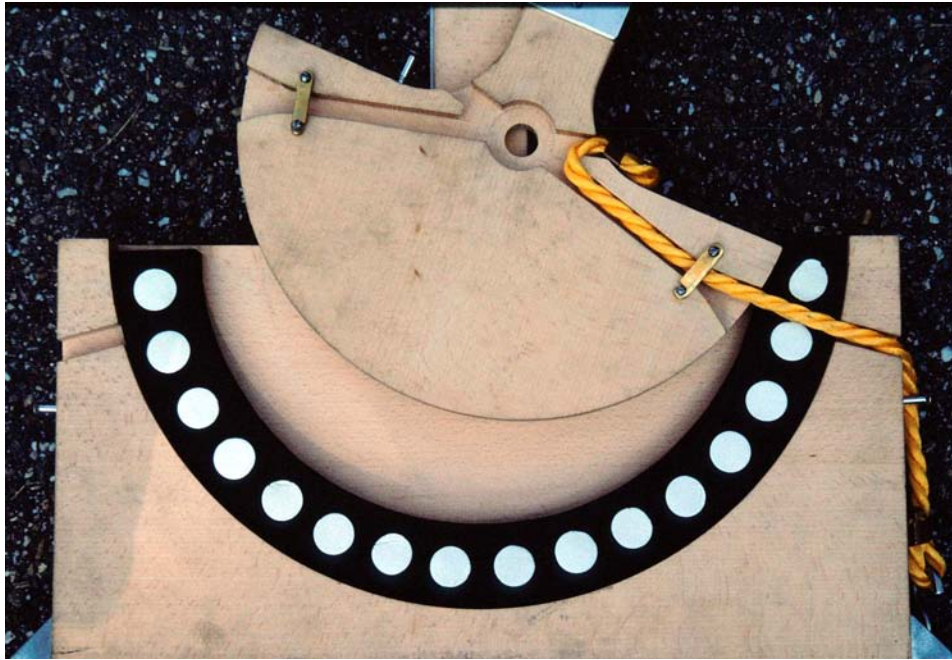


Abbildung 5.4.: Eine Horizontalwurzel auf der Leeseite des Baums hat einen negativen Effekt auf die Verankerung: Statt der Scherfestigkeit wird die kaum vorhandene Zugfestigkeit der Erde beansprucht.

den Baum seiner Hauptverankerungsmöglichkeit beraubt: Die Scherfestigkeit kann nicht mehr aktiviert werden, die Erde in der Scherfuge wird auf Zug beansprucht.

Die für den Baum maßgebliche Festigkeit ist, wie festgestellt wurde, die Scherfestigkeit τ_f . Im Feldversuch nachgewiesen wurde eine Kompression der Erde in der zur Biegerichtung des Stamms abgewandten Seite der Wurzelplatte, das Prinzip ist in Abbildung 5.5(B) zu sehen. Durch diese Kompression kann der Baum nach dem Mohr- Coulomb- schen Gesetz eine Erhöhung von τ_f erreichen und tut dies offenbar bevorzugt im Bereich des kritischen Wurzelplattenradius R_W . Die weiteren Effekte, die während den Feldversuchen beobachtet werden konnten, sind möglicherweise auf folgende Mechanismen zurückzuführen (Abbildung 5.5):

- Die verzweigten Endbereiche festigen das umliegende Erdreich bei Belastung über Querkompression und verhindern einen Pull- Out; der volle Abrisswiderstand der Wurzel könnte so aktiviert werden (A). In den Scherfestigkeitsdiagrammen 4.16 und 4.17 könnte dieser Effekt für den Anstieg am äusseren Rand der Messstrecke verantwortlich sein.
- Eine Verdichtung der Erde durch das Dickenwachstum nach (C) müsste sich am stärksten am Stammfuß niederschlagen, da hier die Zuwächse am höchsten sind. In der Tat werden wurde bei bei den Scherfestigkeitsmessungen der direkt am Stammfuß verzweigenden Buchen zwischen den Anläufen die Maximalwerte ermittelt.

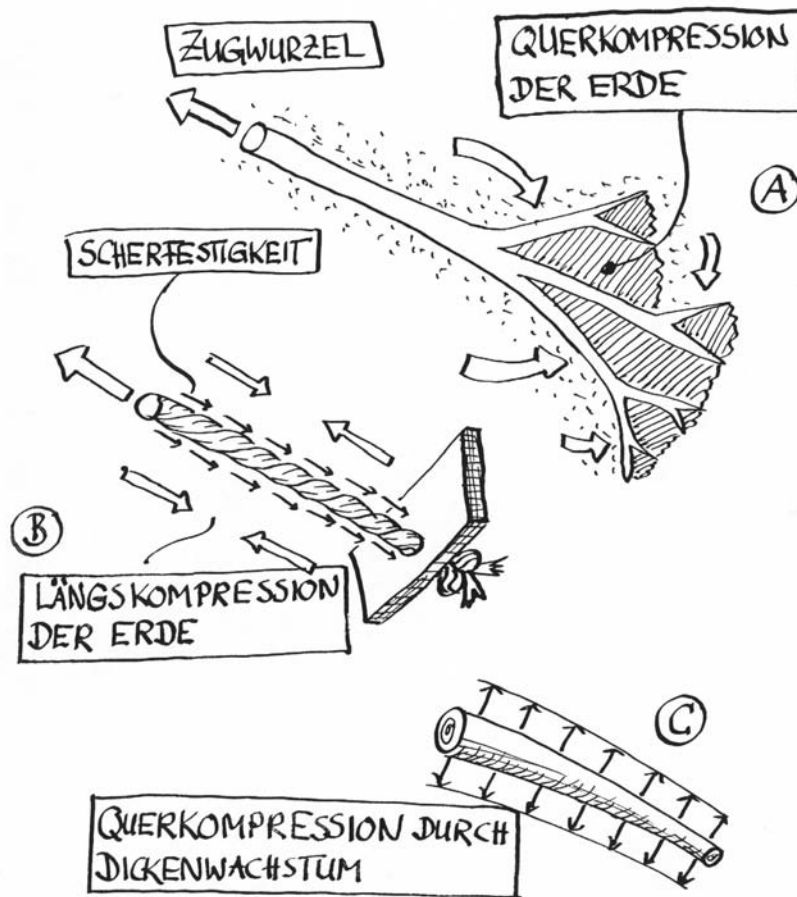


Abbildung 5.5.: Mechanismen zur lokalen Scherfestigkeitserhöhung der Erde (Zeichnung: C.Mattheck).

Offenbar werden aber nicht alle diese Optimierungsstrategien von allen Baumarten gleich stark genutzt, wie die völlig unterschiedlichen Versagensbilder von Tief- und Flachwurzeln dokumentieren.

Als Extreme seien deswegen hier die Modelle der bodenbetonten und der wurzelbetonten Verankerung zur Diskussion gestellt, wie sie in 5.6 zu sehen sind: Die bodenbetonte Verankerung nutzt hauptsächlich den Erdschub; zusätzlich findet eine Verriegelung über den Wurzelanteil statt, der über den kritischen Wurzelplattenradius hinausgeht. Die Buche ist der typische Vertreter dieses Verankerungstyps.

Die Fichte hingegen bedient sich der wurzelbetonten Verankerung, die die Belastung in wenige Starkwurzeln einträgt und in diesen Wurzelbalken die Belastung nach aussen transportiert. Mit zunehmender Entfernung vom Stamm wandelt sich die Biegewurzel in eine Zugwurzel, die hauptsächlich nach Überschreiten von R_W weit auffächert um das

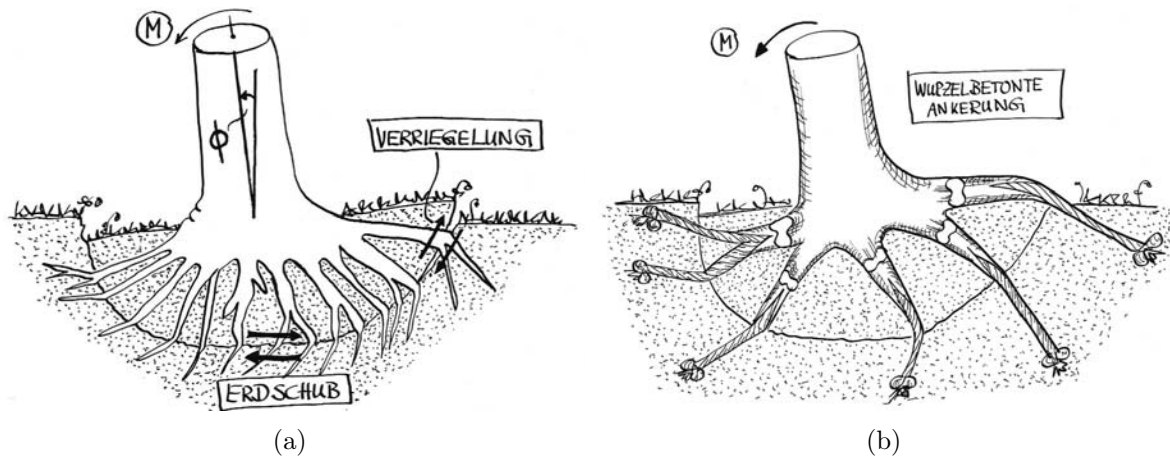


Abbildung 5.6.: Die zwei Hauptverankerungstypen einheimischer Baumarten: In (a) die bodenbetonte Verankerung über einen Schubwurzelball, (b) zeigt die wurzelbetonte Verankerung über eine anfänglich biegesteife Wurzel, die in eine Zugwurzel übergeht (Zeichnung: C.Mattheck).

eigentliche Gegenlager der Zugbelastung zu bilden.

Diese beiden vorgestellten Modelle sind die extremen Vertreter der zwei Verankerungskonzepte, eine Mischung von boden- und wurzelbetonter Ankerung kann sicher genauso beobachtet werden wie der Fall, dass ein typischerweise bodenbetont ankernder Vertreter eine flache Wurzelplatte ausbildet, wenn der Untergrund nichts anderes zulässt- die Natur handelt flexibel und passt sich den gegebenen Möglichkeiten an.

Vergleicht man mit diesen genialen Strategien heutige technische Verankerungen im Erdreich, liegen die biologischen Lösungen meilenweit vorne; für Fundamente und Gründungen verwendet der Mensch immer noch ein Vielfaches an Material und Raum, um standsichere Ergebnisse zu erzielen. Ob die in dieser Arbeit vorgestellten biologischen Mechanismen sinnvoll, das heisst auch rentabel, umsetzbar sind, scheint zum jetzigen Zeitpunkt eher fraglich zu sein. In die Erde „wachsende“ Fundamentteile mit lastgerechter Geometrie und Festigkeit sind heute auf jeden Fall noch Zukunftsmusik.

5. *Diskussion und Ausblick*

.

Literaturverzeichnis

- [1] <http://mitglied.lycos.de/WilfriedHeck/ellenst2.htm>
- [2] Bolkenius, D. (2001): *Zur Wurzel Ausbildung von Fichte und Weißtanne in gleichaltrigen und ungleichaltrigen Beständen*, Berichte Freiburger forstliche Forschung, Heft 35, Forstwissenschaftliche Fakultät der Universität Freiburg, forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden- Württemberg.
- [3] W.Agster, B.Ruck (2003): *The influence of aerodynamic properties of forest edges and stands on the pressure pattern within a forest*. In: B. Ruck, C. Kottmeier, C. Mattheck, C. Quine, G. Wilhelm: *Wind effect on trees*. Laboratory for Building- and Environmental Aerodynamics, Institute for Hydromechanics, University of Karlsruhe (Hrsg.), S.25-32.
- [4] H.J.Braun (1998): *Bau und Leben der Bäume*. 4. Auflage, Rombach Verlag, Freiburg im Breisgau.
- [5] F.H.Schweingruber (1990): *Anatomie der europäischen Hölzer*. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf (Hrsg.). Haupt, Bern · Stuttgart
- [6] C.Mattheck, K.Bethge (1996): *Hinweise zur Anwendung des Resistographen*. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH.
- [7] W.Albrecht (1995): *Untersuchung der Spannungssteuerung radialer Festigkeitsverteilung in Bäumen*. Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau, Universität Karlsruhe (TH).
- [8] K.Mägdefrau (1968): *Paläobiologie der Pflanzen*. 4. Auflage, o.V., Jena.
- [9] R.Wagenführ (1999): *Anatomie des Holzes*. 5. Auflage, DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co., Leinfelden- Echterdingen.
- [10] J.N.Köstler, E.Brückner, H.Bibelriether (1968: *Die Wurzeln der Waldbäume- Untersuchungen zur Morphologie der Waldbäume in Mitteleuropa*. Paul Parey Verlag, Hamburg.
- [11] G.Mitscherlich (1981): *Wald, Wachstum und Umwelt: Eine Einführung in die ökologischen Grundlagen des Waldwachstums*. 2.Auflage, J.D.Sauerländer´s Verlag, Frankfurt a.M.

- [12] K.Weber, C.Mattheck (2004): *Holzanatomie in Abhängigkeit des Wurzelplatten- Radius*. Beitrag zum 10.VTA Spezialseminar „Messen und Beurteilen am Baum, Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtzgemeinschaft.
- [13] M.C.Dobson, A.J.Moffat(o.J.): *The Potential for Woodland Establishment on Land-fill sites*. HMSO, London.
- [14] C.Mattheck (2002): *Mechanik am Baum*. Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtzgemeinschaft.
- [15] C.Mattheck (1997): *Design in der Natur*. 3. Auflage. Rombach, Freiburg im Breisgau.
- [16] B.Ruck (2004): *Windumströmung von Einzelbäumen und Waldbeständen*. Beitrag zum 10.VTA Spezialseminar „Messen und Beurteilen am Baum, Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtzgemeinschaft.
- [17] D.Gaffrey, O.Kniemeyer (2002): *The elasto-mechanical behaviour of Douglas fir, its sensitivity to tree-specific properties, wind and snow loads, and implications for stability - a simulation study*. Journal of Forest Science 48(2),S. 49-69.
- [18] C.Mattheck (1999): *Stupsi erklärt den Baum*.3., erweiterte Auflage. Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtzgemeinschaft.
- [19] N.R.Hugo (1990): *Challenging the biggest champ - General Sherman sequoia - National Register of Big Trees* . American Forest, Jan.-Feb.1990.
- [20] C.Mattheck, K.Bethge, I.Tesari, R.Kappel (2001):*Ein neues Versagenskriterium für nicht fäulegeschädigte, solitäre Bäume* Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtzgemeinschaft, wissenschaftliche Berichte, FZKA 6666.
- [21] H.Kramer, A.Akça (2001):*Leitfaden zur Waldmesslehre*. J.D.Sauerländer´s Verlag, Frankfurt a.M.
- [22] W.Beitz, K.H.Küttner (1987):*Taschenbuch für den Maschinenbau*. Springer-Verlag, Berlin · Göttingen · Heidelberg.
- [23] F.Kollmann (1982):*Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin · Göttingen · Heidelberg.
- [24] Kolymbas, D. (1998): *Geotechnik- Bodenmechanik und Grundbau*. Springer-Verlag, Berlin · Göttingen · Heidelberg.
- [25] Gudehus, G. (1981): *Bodenmechanik*. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- [26] R.Whitlow(2001): *Basic Soil Mechanics*. 4. Auflage. Pearson Education Ltd, Harlow.

- [27] DIN18196 (1988): *Erd- und Grundbau. Bodenklassifikationen für grundbauliche Zwecke*. Beuth Verlag, Berlin · Köln.
- [28] A.Caquot, C.Kérisel (1967): *Grundlagen der Bodenmechanik*. 3. Auflage. Springer Verlag, Berlin·Heidelberg·New York.
- [29] U.Smoltczyk(1990): *Grundbau Taschenbuch*. 4. Auflage. Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin.
- [30] Arbeitsausschuß „Ufereinfassungen“(1996): *Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Häfen und Wasserstraßen*. 9. Auflage. Verlag Ernst und Sohn.
- [31] M.Kiekbusch(1999):*Beziehung zwischen Konsistenzzahl und undrainierter Scherfestigkeit* Bautechnik 76, Heft 9. Verlag Ernst und Sohn.
- [32] W.Albrecht, C.Mattheck (1997): *Bestimmung von Holzkennwerten mit dem Fractometer III*. Seminarunterlagen zum 3. VTA-Spezialseminar: Messen und Beurteilen am Baum, 23.-24. April 1997, Karlsruhe.
- [33] C.C.N.Nielsen (1990):*Einflüsse von Pflanzabstand und Stammzahlhaltung auf Wurzelform, Wurzelbiomasse, Verankerung sowie die Biomasseverteilung im Hinblick auf die Sturmfestigkeit der Fichte*. Schriften aus der forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen forstlichen Versuchsanstalt, 100.
- [34] M.P.Coutts (1983):*Root Architecture and Tree Stability*. Plant and Soil, 71. Martinus Nijhoff.
- [35] S.Tobias (1991):*Bautechnisch nutzbare Verbundfestigkeit von Boden und Wurzel*. Diss 9483 Eidg. Techn. Hochschule Zürich.
- [36] A.R.Ennos (1994):*The Biomechanics of Root Anchorage*. Biomimetics, Vol.2, No.2, S.129-137.
- [37] K.Hähne (1991):*Der Einfluß von Gräser- und Gehölzwurzeln auf die Scherfestigkeit von Böden und damit auf die Standsicherheit von Hängen und Böschungen*. Fachbereich Landschaftsentwicklung. Berlin. Diss D83 Techn. Univ. Berlin.
- [38] L.J.Waldron (1977):*Shear Resistance of Root permeated homogenous and stratified Soil*. Soil Science Society of American Journal, Vol.41, S.84-88.
- [39] T.H.Wu (1995):*Slope Stabilization*. In: Slope Stabilization and Erosion Control: A Bioengineering Approach. E&FN Spon, London.
- [40] DIN4096 (1980): *Flügelsondierung*. Beuth Verlag, Berlin · Köln.
- [41] F.Dietrich (1995): *Wie der grüne Baum tangentielle Zugspannungen bewältigt*. Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau, Universität Karlsruhe (TH).

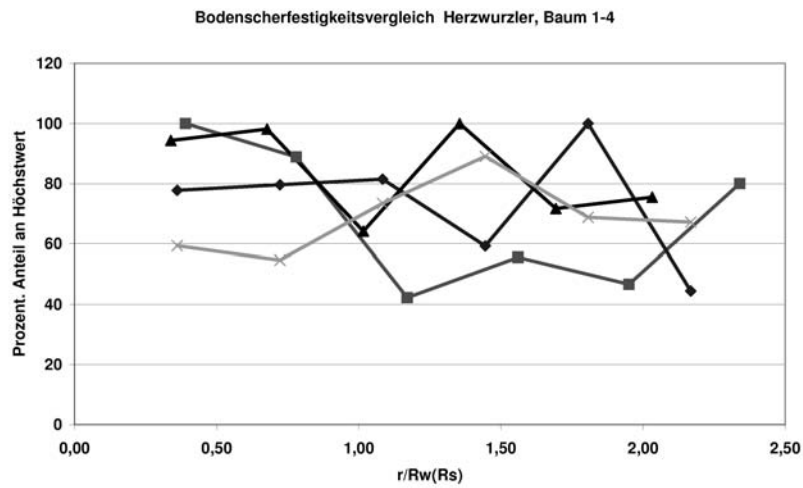
- [42] A.Zipse (1997): *Untersuchung zur lastgesteuerten Festigkeitsverteilung in Bäumen*. Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau, Universität Karlsruhe (TH).
- [43] G.Bruder (1998): *Finite-Elemente-Simulation und Festigkeitsanalysen von Wurzelverankerungen*. Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau, Universität Karlsruhe (TH).
- [44] C.Kolesinski (2002): *Materialkundliche Untersuchung entlang einer Baumwurzel innerhalb der mechanisch wirksamen Wurzelplatte*. Diplomarbeit am Institut für Mineralogie und Geochemie, Universität Karlsruhe (TH).
- [45] DIN 52186 (1978): *Prüfung von Holz: Biegeversuch*. Beuth Verlag, Berlin · Köln.
- [46] DIN 52188 (1979): *Prüfung von Holz: Bestimmung der Zugfestigkeit parallel zur Faser*. Beuth Verlag, Berlin · Köln.
- [47] J.v.Malek, W.Molitor, K.Peßler, H.Wawrick (1999): *Der Baumpfleger*. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart- Hohenheim.
- [48] C.Kolesinski, P.Müller (2004): *Die optimale Festigkeitsverteilung der Baumwurzeln*. Beitrag zum 10.VTA Spezialseminar „Messen und Beurteilen am Baum, Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtzgemeinschaft.
- [49] G.M.Lavers (1983): *The Strength Properties of Timber*. Building Research Establishment Report. Her Majesty's Stationery Office, London.
- [50] C.Mattheck (2003): *Warum alles kaputt geht. Form und Versagen in Natur und Technik*. Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtzgemeinschaft.

A. Verläufe der Bodenscherfestigkeiten aus Abschnitt 4.6

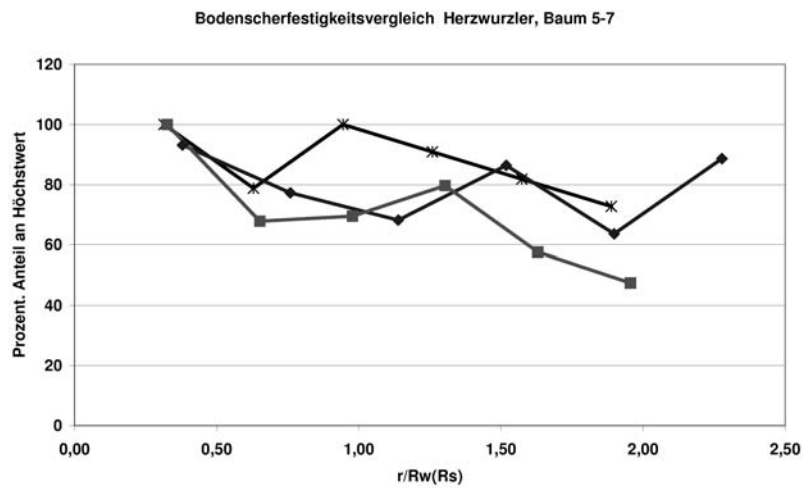
Im Vergleich zu den beiden Diagrammen in Abschnitt 4.6, in dem Bäume der gleichen Stammdurchmesserklasse aufgeführt wurden, sind hier die Einzelergebnisse aller untersuchten Bäume zu finden. Da das Scherfestigkeitsmaximum von der Lage des kritischen Wurzeltellerrandes R_W abhängt, unterscheiden sich die Verläufe der Meßdaten in einem weiten Bereich. Für eine bessere Vergleichbarkeit wurde deswegen folgende Darstellung gewählt:

- Zuerst erfolgte eine Ermittlung des zum Stammdurchmesser gehörenden R_W - Wertes, der als Mittelwert der Ober- und Unterkurve aus dem Windwurf- Diagramm (Abbildung 4.1) berechnet wurde.
- Der Abstand vom Stamm wurde anschließend auf diesen R_W - Wert normiert, $R_{Abstand} = \frac{r}{R_W(R_S)}$. Der Wert 1 auf der Abszisse gibt also den Bereich des kritischen Wurzeltellerradius für jede Messkurve an.

A. Verläufe der Bodenscherfestigkeiten aus Abschnitt 4.6



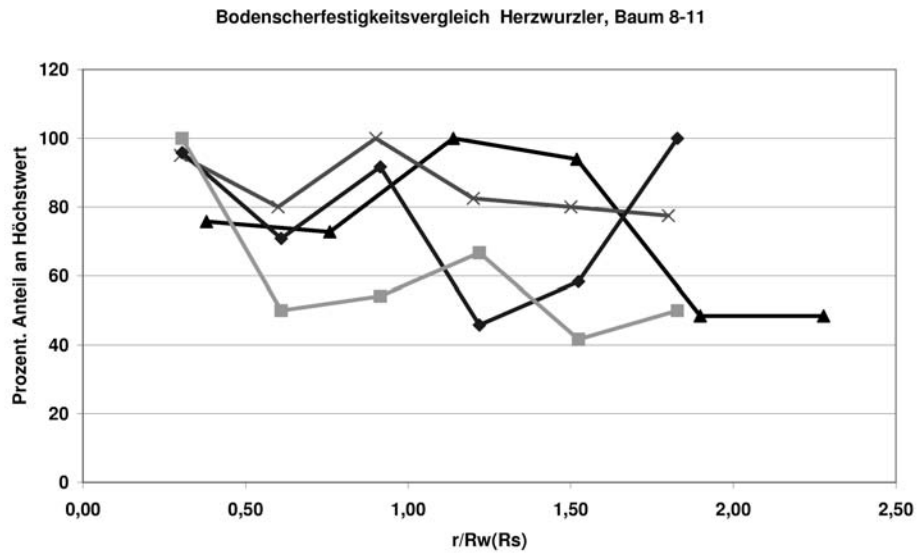
(a)



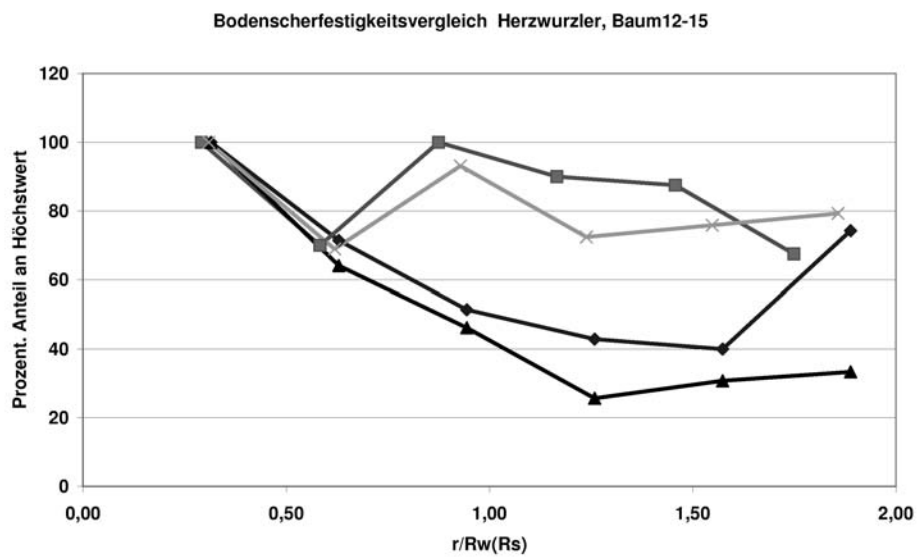
(b)

Abbildung A.1.: Bodenscherfestigkeitsverläufe der Versuche aus Abschnitt 4.6, Herzwurzler 1-4 (a) und 5-7 (b).

A. Verläufe der Bodenscherfestigkeiten aus Abschnitt 4.6



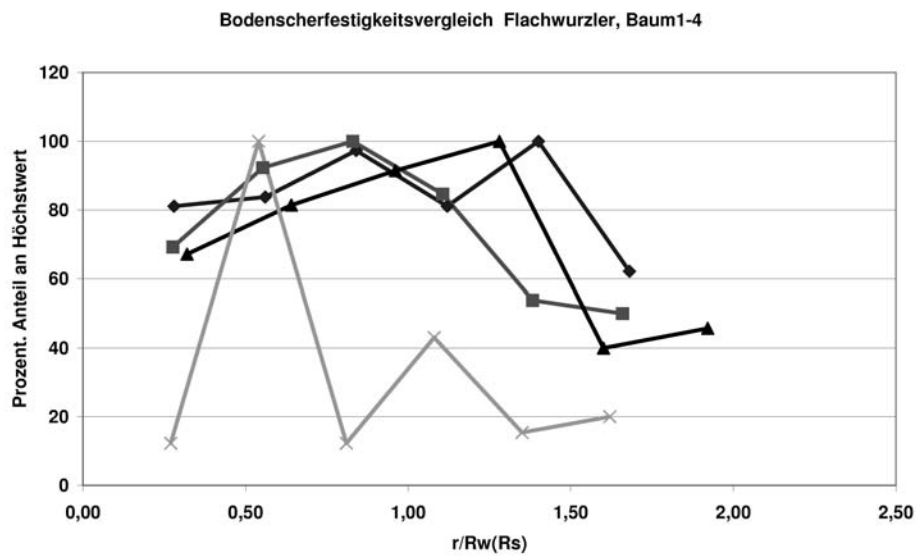
(a)



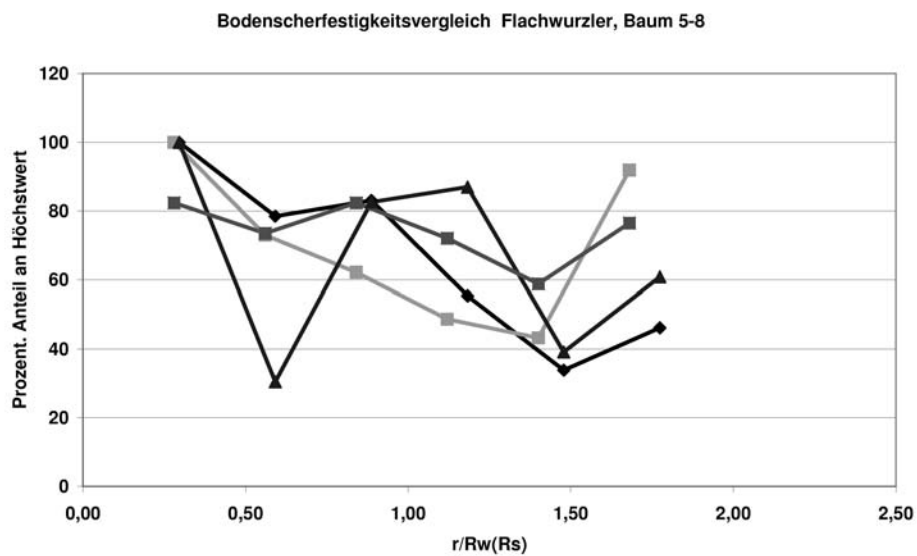
(b)

Abbildung A.2.: Bodenscherfestigkeitsverläufe der Versuche aus Abschnitt 4.6, Herzwurzler 8-11 (a) und 12-15 (b).

A. Verläufe der Bodenscherfestigkeiten aus Abschnitt 4.6



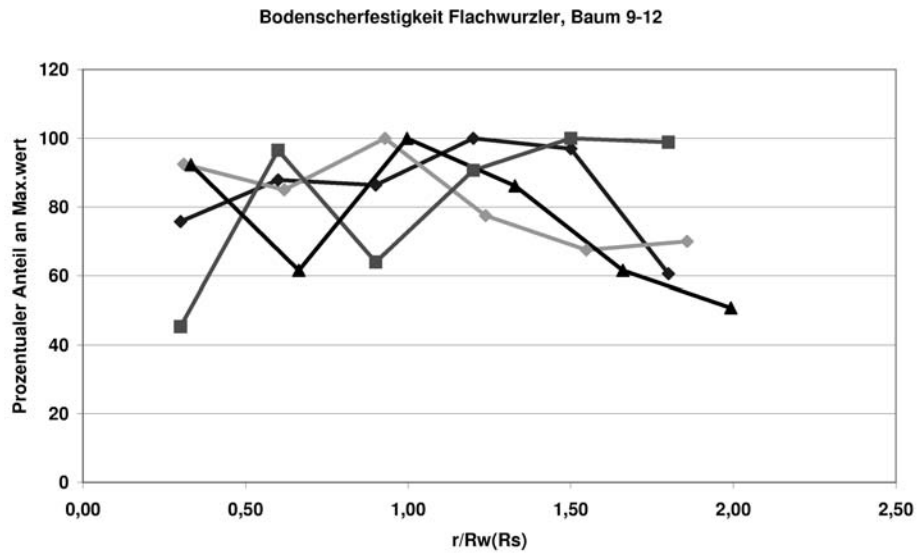
(a)



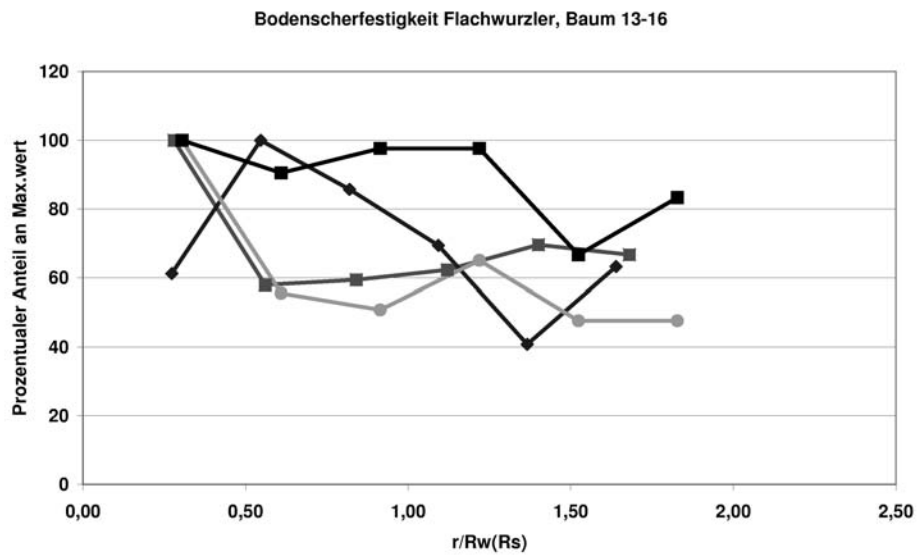
(b)

Abbildung A.3.: Bodenscherfestigkeitsverläufe der Versuche aus Abschnitt 4.6, Flachwurzler 1-4 (a) und 5-8 (b).

A. Verläufe der Bodenscherfestigkeiten aus Abschnitt 4.6



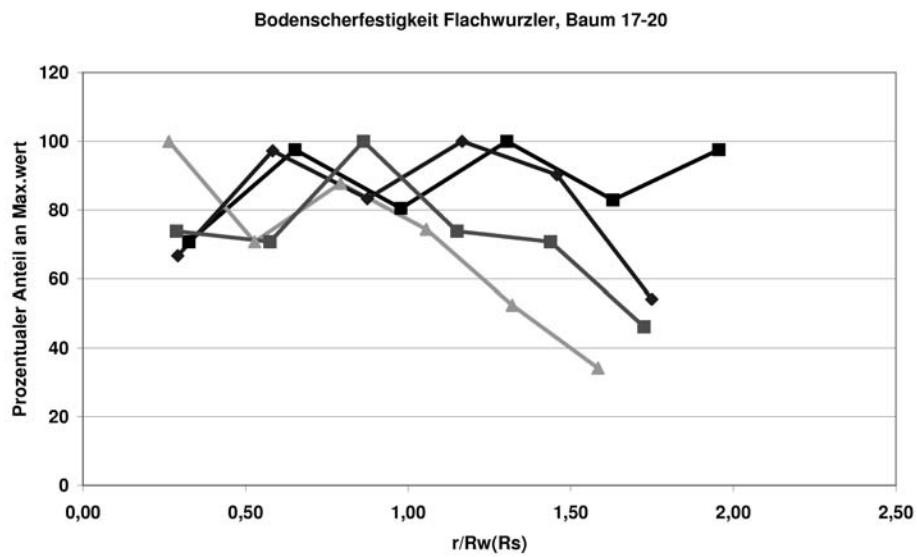
(a)



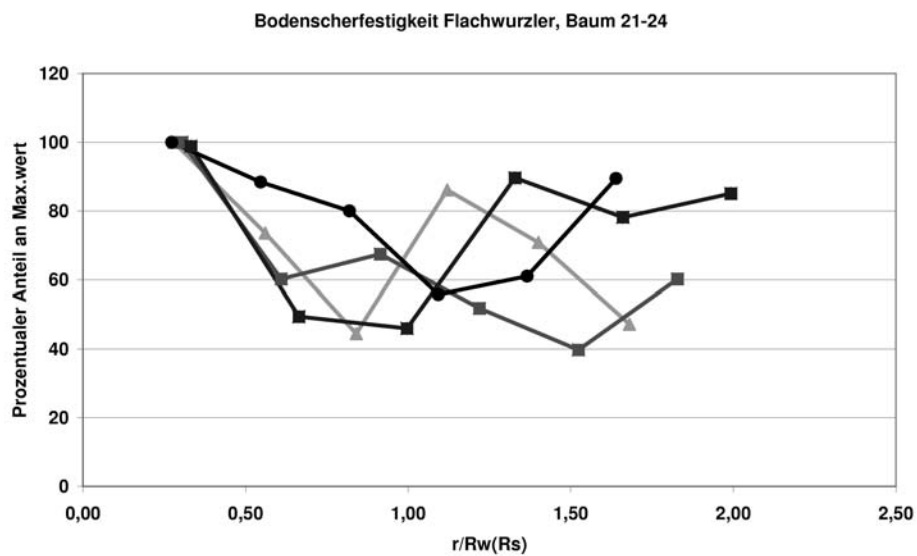
(b)

Abbildung A.4.: Bodenscherfestigkeitsverläufe der Versuche aus Abschnitt 4.6, Flachwurzler 9-12 (a) und 13-16 (b).

A. Verläufe der Bodenscherfestigkeiten aus Abschnitt 4.6



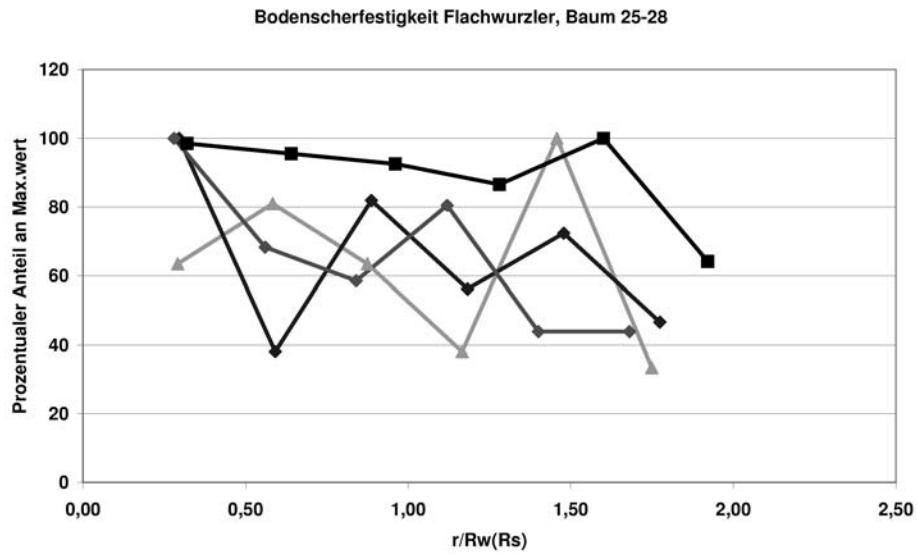
(a)



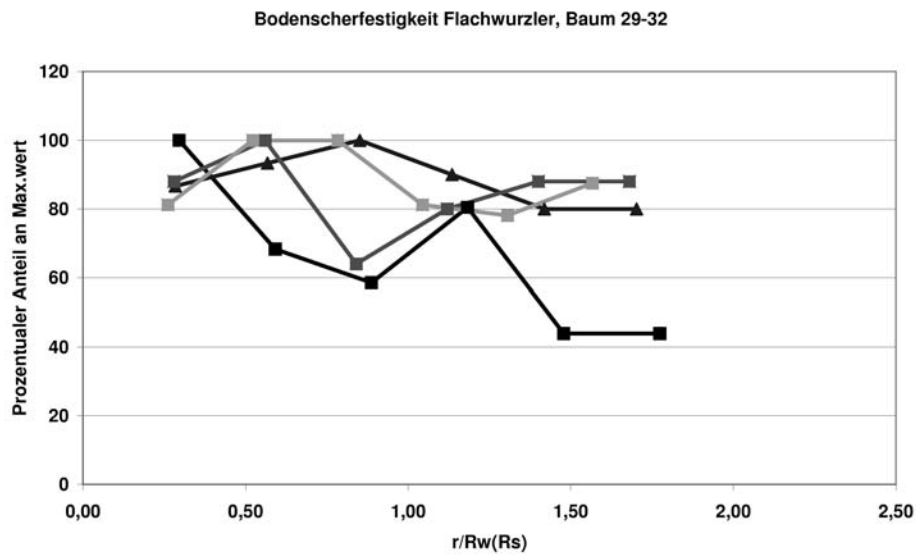
(b)

Abbildung A.5.: Bodenscherfestigkeitsverläufe der Versuche aus Abschnitt 4.6, Flachwurzler 17-20 (a) und 21-24 (b).

A. Verläufe der Bodenscherfestigkeiten aus Abschnitt 4.6



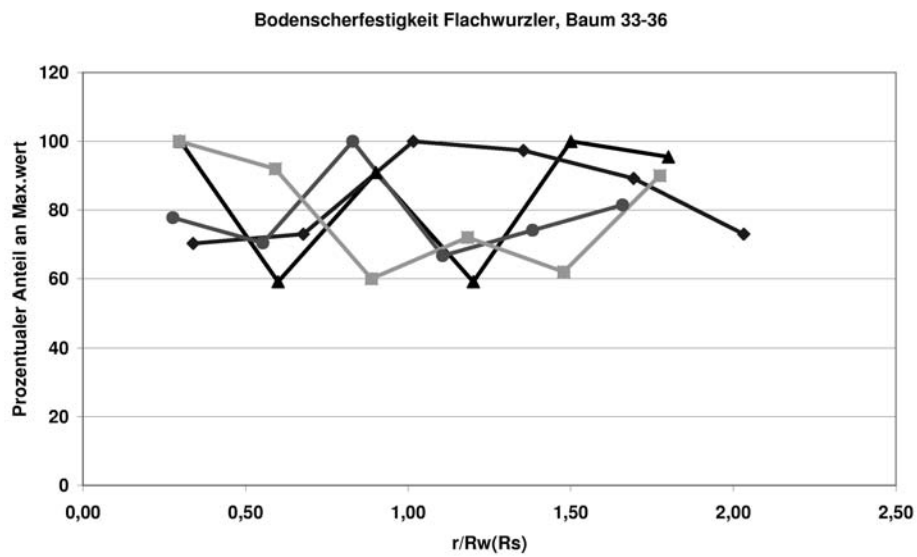
(a)



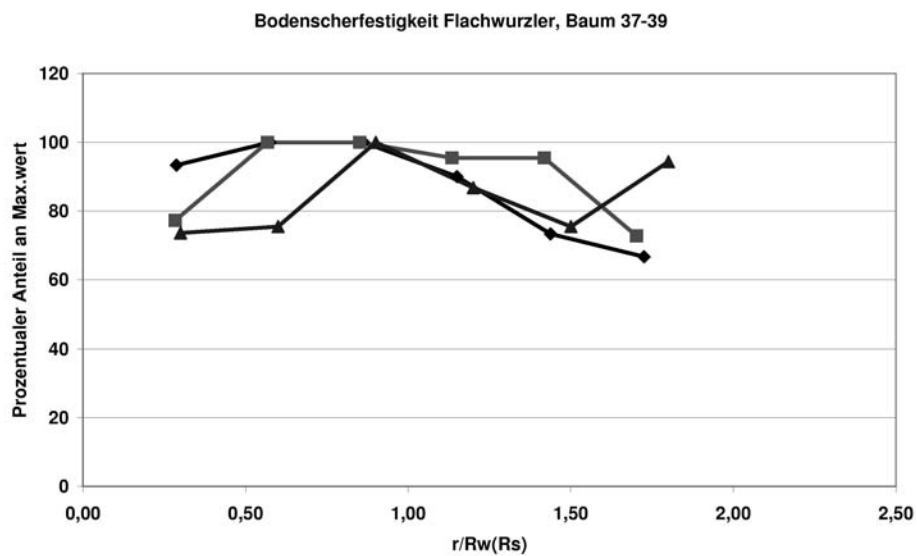
(b)

Abbildung A.6.: Bodenscherfestigkeitsverläufe der Versuche aus Abschnitt 4.6, Flachwurzler 25-28 (a) und 29-32 (b).

A. Verläufe der Bodenscherfestigkeiten aus Abschnitt 4.6



(a)



(b)

Abbildung A.7.: Bodenscherfestigkeitsverläufe der Versuche aus Abschnitt 4.6, Flachwurzler 33-36 (a) und 37-39 (b).

B. Verformungsbilder des Wurzelballenmodells

Nachfolgend sind die Verformungsbilder aus Kapitel 5 zu sehen. Die blauen Balken stellen das Verhältnis von langer zu kurzer Halbachse der elliptisch verformten Kreislöcher dar, das Verhältnis ist zudem als Zahlenwert angegeben. Die Schrägstellung der langen Halbachse wird mit dem grünen Balken angezeigt. Bei 90° hat die Halbachse ihre unbelastete Ausgangsstellung und steht tangential zur Scherfläche, mit zunehmendem Schub verkleinert sich der Winkel (die Achsen kippen im Uhrzeigersinn).

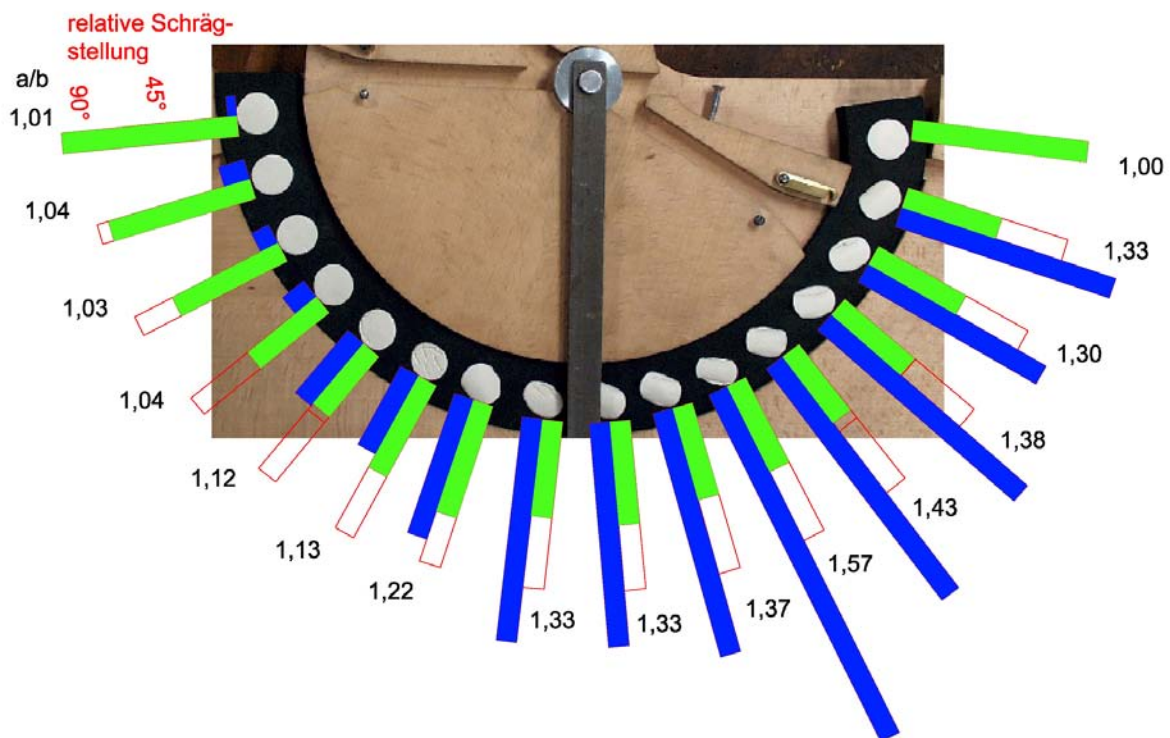


Abbildung B.1.: Wurzelballenmodell ohne Zugwurzel.

B. Verformungsbilder des Wurzelballenmodells

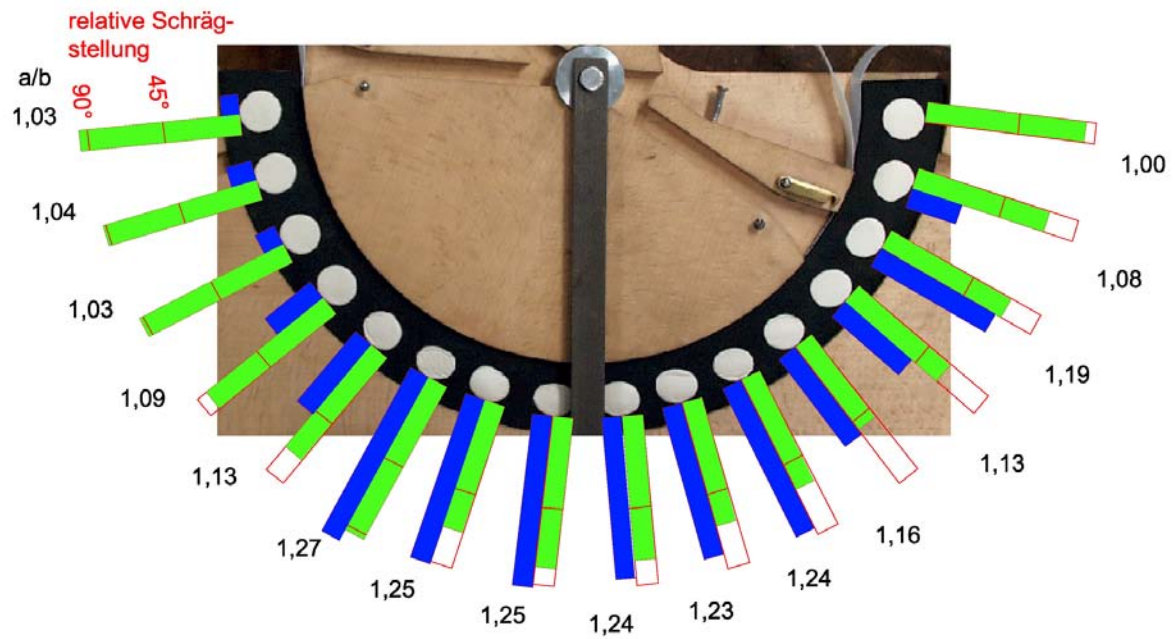


Abbildung B.2.: Wurzelballenmodell ohne Zugwurzel, mit simulierter Staunässe.

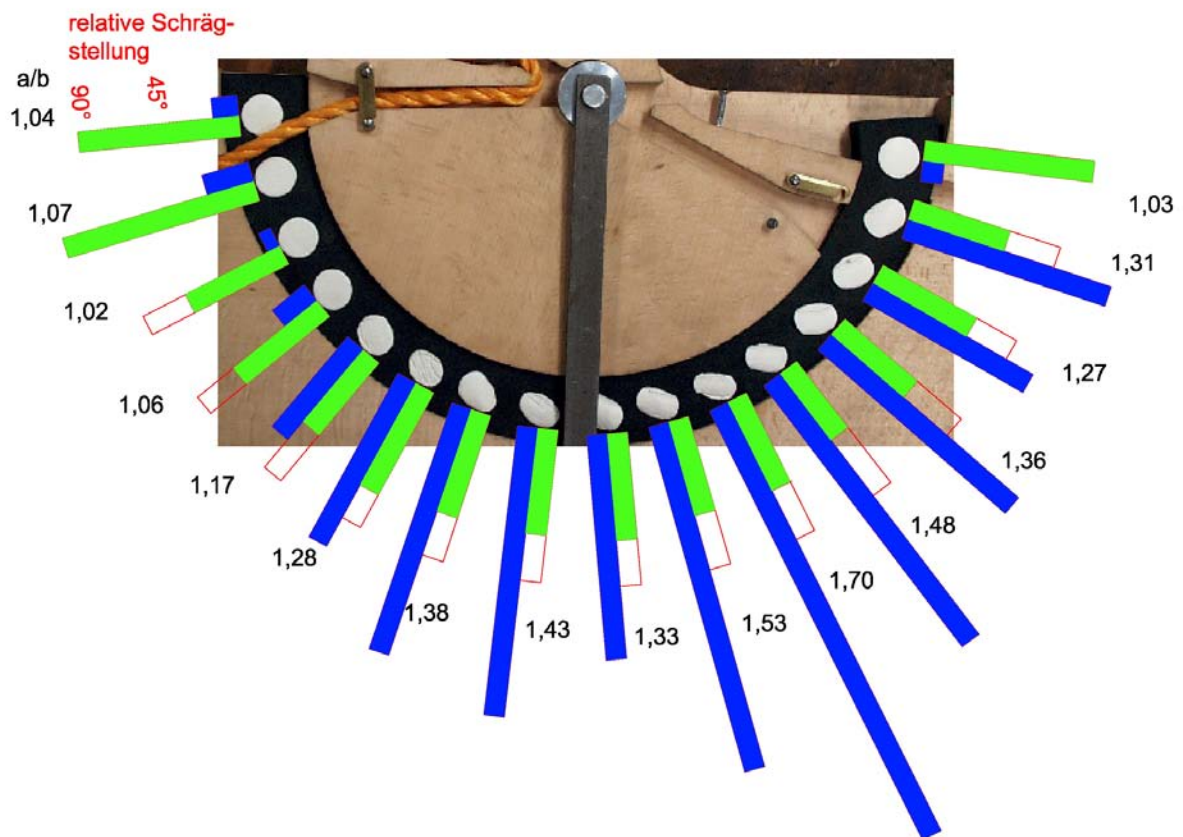


Abbildung B.3.: Wurzelballenmodell mit luvseitiger Zugwurzel.

B. Verformungsbilder des Wurzelballenmodells

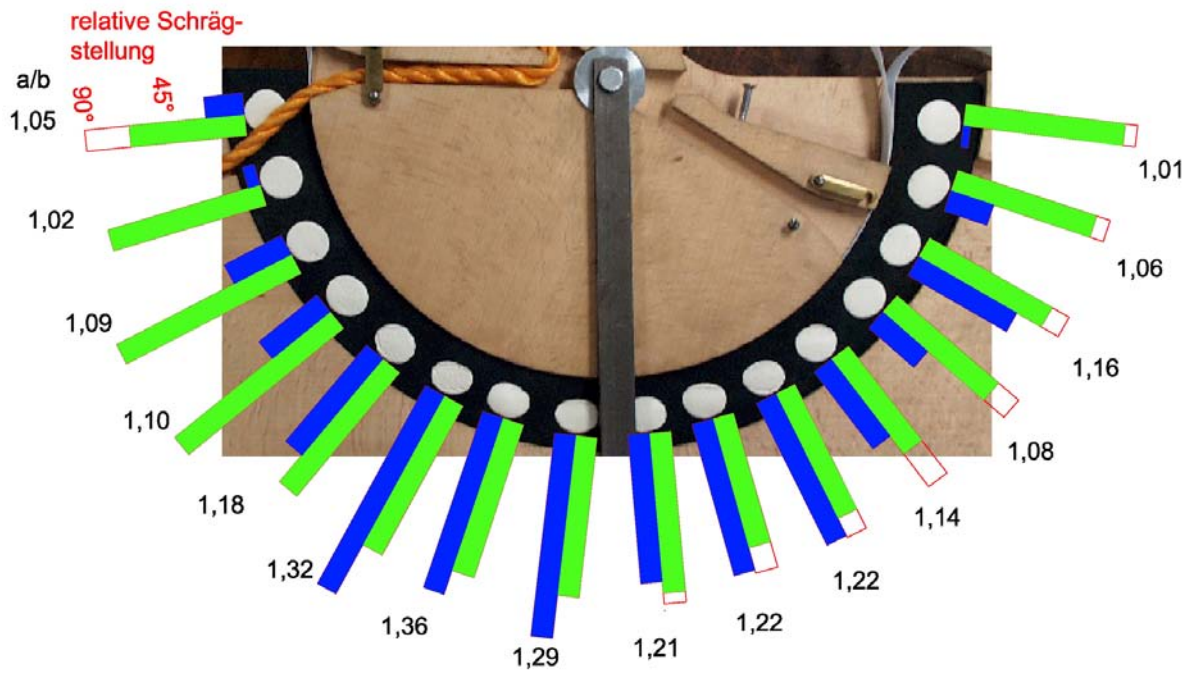


Abbildung B.4.: Wurzelballenmodell mit luvseitiger Zugwurzel und simulierter Staunässe.

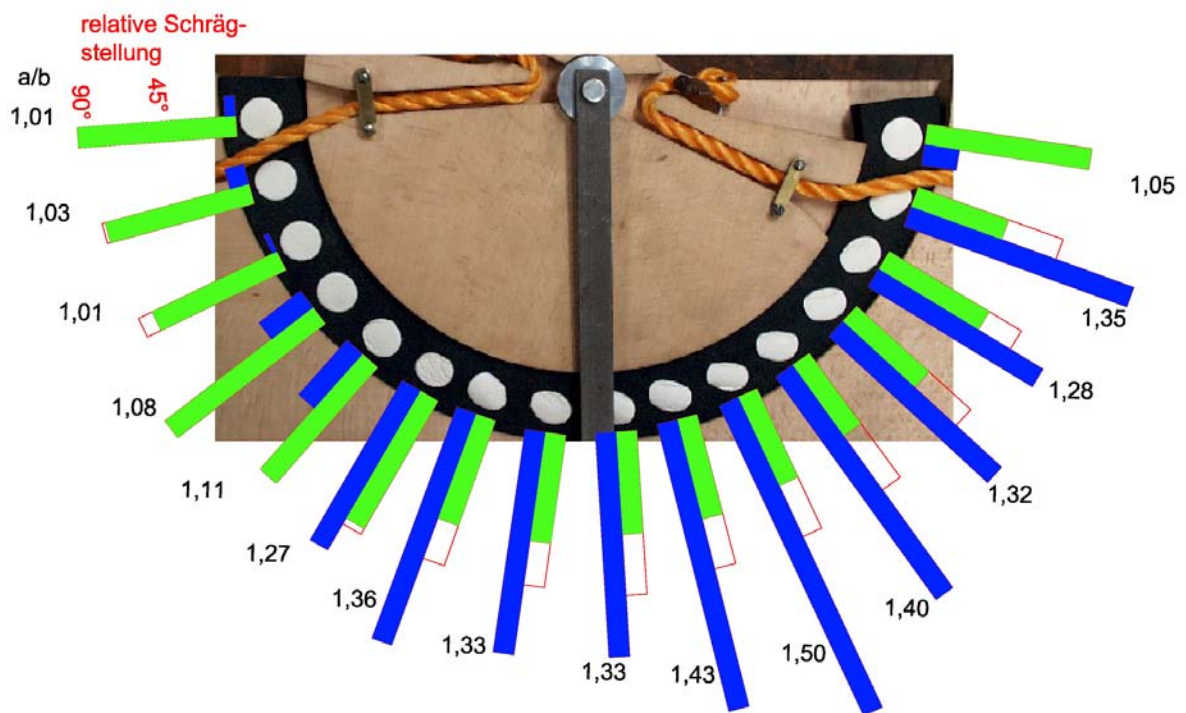


Abbildung B.5.: Wurzelballenmodell mit beidseitiger Zugwurzel.

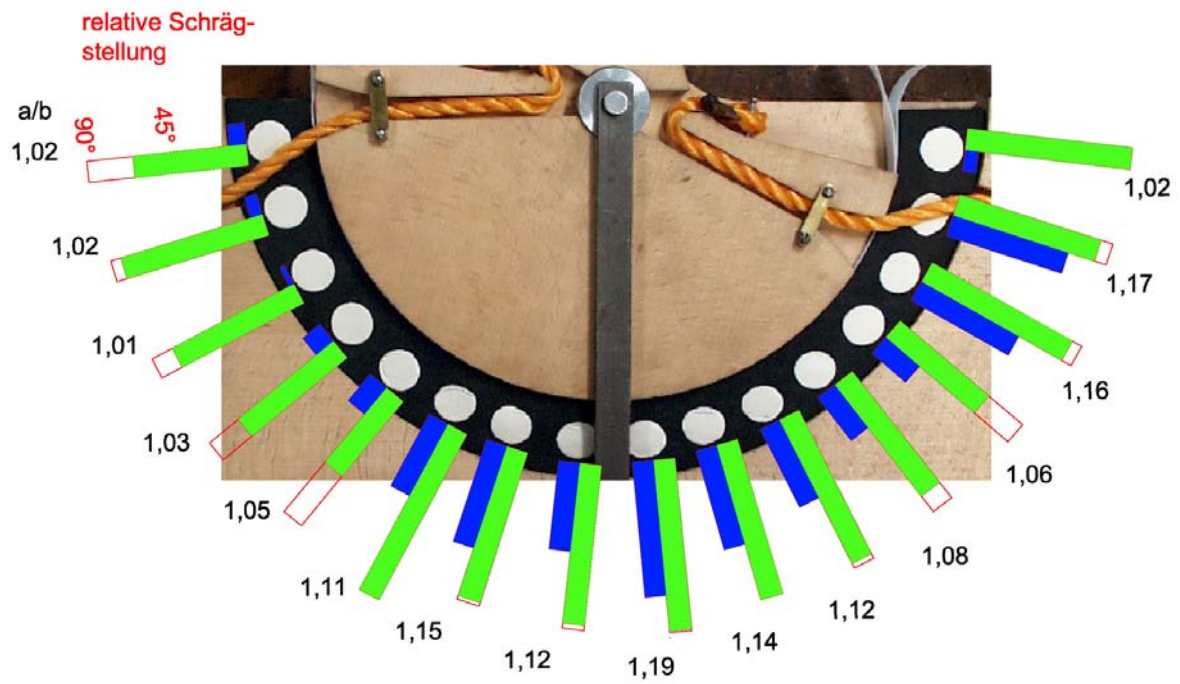


Abbildung B.6.: Wurzelballenmodell mit beidseitiger Zugwurzel und simulierter Staunässe.

C. Verläufe der Biege- und Zugfestigkeiten aus Abschnitt 3.7

In diesem Anhang sind die gemessenen Biege- und Zugfestigkeiten zum einen als Farbcodierung, zum anderen mit den konkreten Meßwerten dargestellt. Die Auftragung erfolgte in der Art und Weise, wie die Verzweigung der Wurzel stattfand: Die zentrale schwarze Linie stellt das Zentrum der Wurzel und der Abzweige dar.

In der Farbcodierung bedeuten dunkle Felder hohe Festigkeiten, helle Felder sind Proben mit relativ niedrigen Werten. Die Meßwerte sind in MPa angegeben. Die Nummern an den Abzweigen sind durchlaufende Nummerierungen.

Da bei der Buche nur relativ wenig Zugfestigkeitsmessungen durchgeführt werden konnten, erübrigte sich hierfür ein farbkodiertes Diagramm.

C. Verläufe der Biege- und Zugfestigkeiten aus Abschnitt 3.7

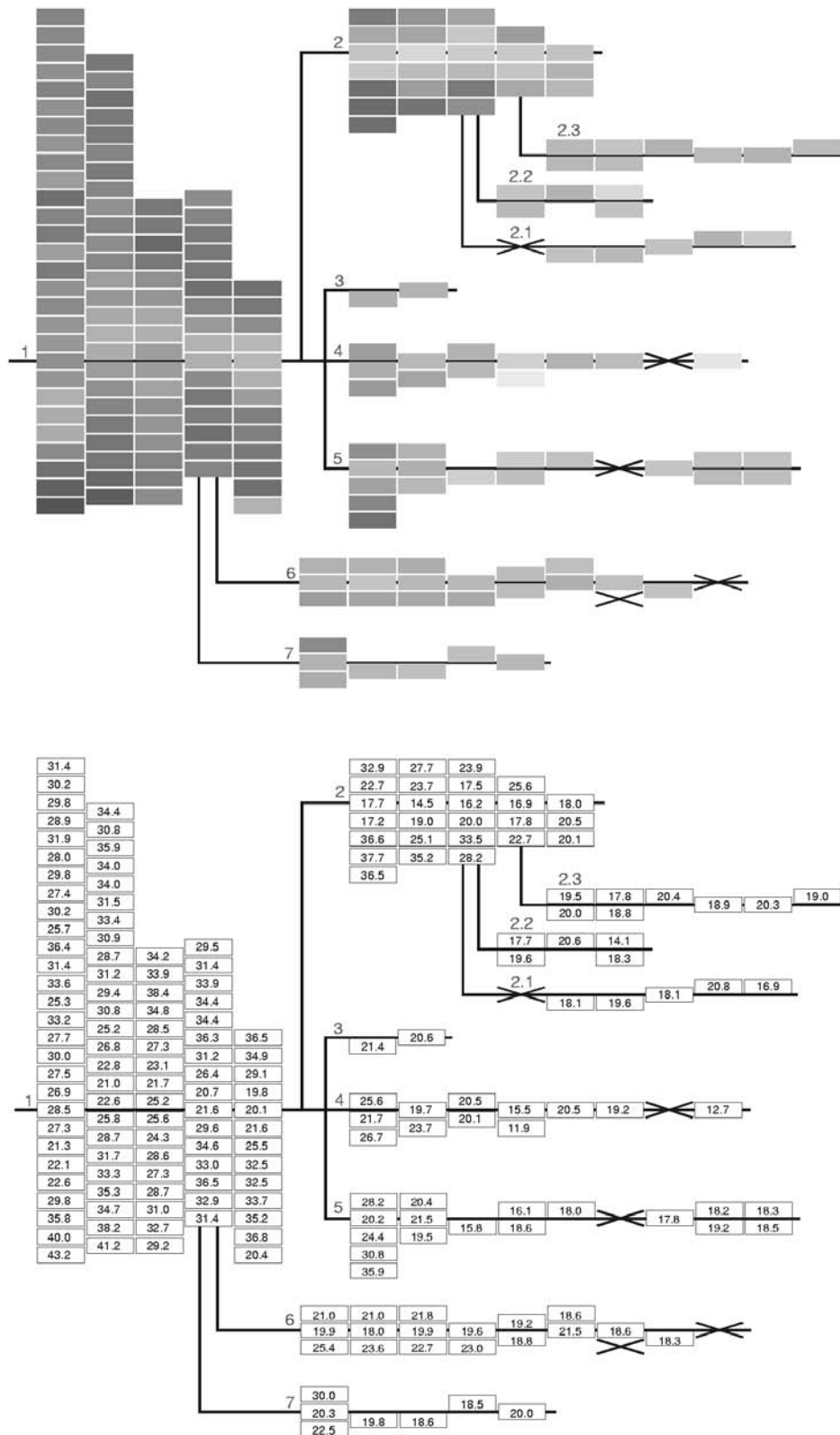


Abbildung C.1.: Die Biegefestigkeiten der untersuchten Fichte.

C. Verläufe der Biege- und Zugfestigkeiten aus Abschnitt 3.7

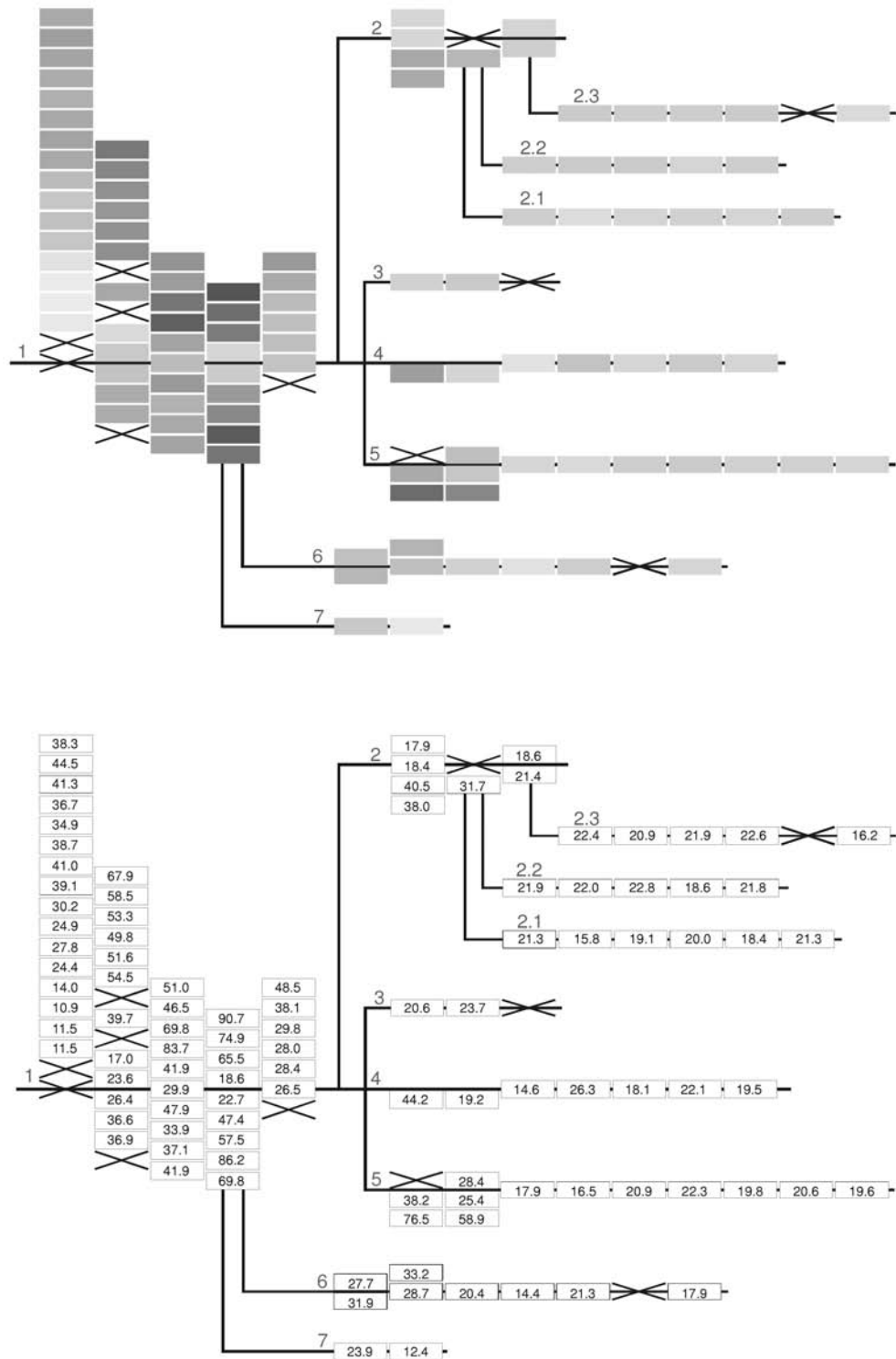


Abbildung C.2.: Die Zugfestigkeiten der untersuchten Fichte.

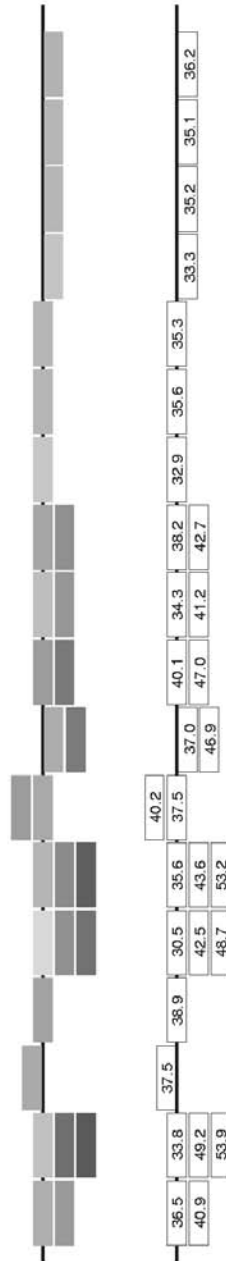


Abbildung C.3.: Die Biegefestigkeiten der untersuchten Buche.