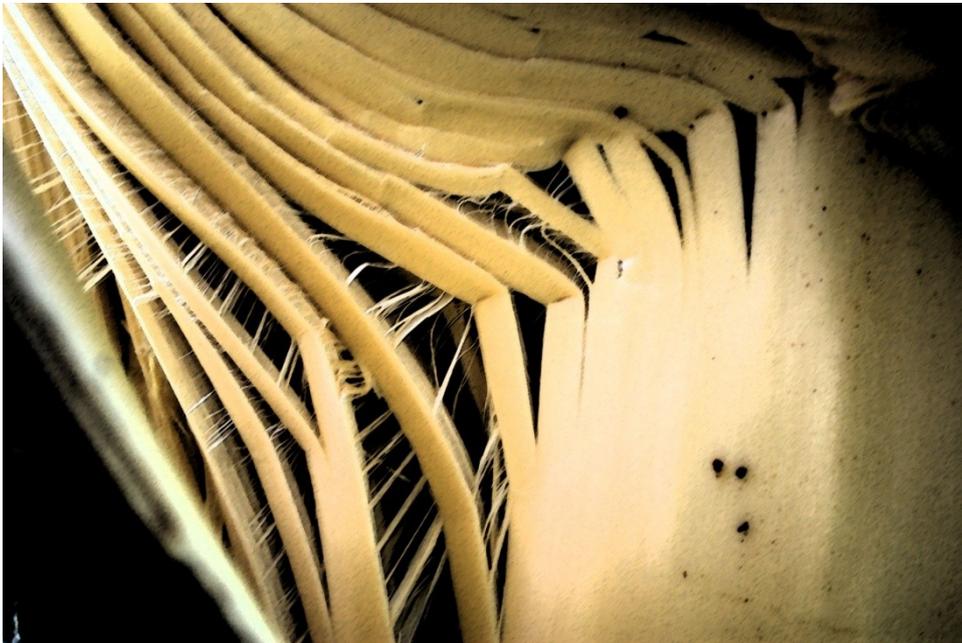


Überprüfung des Stammversagens hohler
Baumstämme anhand von Versuchen und
Messungen im Bereich der Stammbiegung und
Faserstauchung



Überprüfung des Stammversagens hohler
Baumstämme anhand von Versuchen und
Messungen im Bereich der Stammbiegung und
Faserstauchung

Examination of the stem failure of hollow trunks based
on experiments and measurements in the field of stem-
bending and fibre-compression

Masterarbeit

Roman Novak, BSc

Matrikel Nr.: 0841298

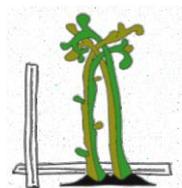
Betreuung

O. Univ. Prof. Dr. Florin Florineth

Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau

Department für Bautechnik und Naturgefahren

Universität für Bodenkultur Wien



Wien, November 2014



Aus Gründen der Lesbarkeit wird auf gendergerechte Schreibweise verzichtet.

Inhalt

Danksagung	8
Kurzfassung und Abstract	9
1. Problemstellung und Zielsetzung	10
1.1 Die Gefahr von brechenden Bäumen	10
1.2 Der Baum als Lebensraum	10
1.3 Gesetzeslage und aktuelle Normen	11
1.3.1 Österreichische Gesetzeslage	11
1.3.2 Österreichische Normen	13
1.3.3 Weitere Richtlinien und Leitfäden	13
2. Baumstatik	15
2.1 Material und Form	15
2.1.1 Der Holzaufbau	15
2.1.2 Verkernung	16
2.1.3 Holzeigenschaften	17
2.1.3.1 Zug-, Druck- und Schubbelastungen	17
2.1.4 Biegespannung	18
2.1.5 Elastizität	19
2.1.6 Elastizitätsmodul	19
2.1.7 Elastizitätsgrenze	19
2.1.8 Holzdichte	20
2.1.9 Torsion	20
2.2 Einwirkende Lasten	21
2.2.1 Vertikal wirkende Lasten	21
2.2.2 Horizontal wirkende Lasten	22
2.2.2.1 Windlastanalyse	22
2.2.2.2 Dynamische Effekte	26
2.2.2.3 Schlankheitsgrad	26
3. Stand des Wissens und Theorien des Bruchversagens	27
3.1 Bruchgefährdende Faktoren	27

3.2 Ursache von Baumhöhlen	27
3.3 Der Prozess des Versagens	30
4. Untersuchungsgebiet	33
5. Die untersuchten Bäume	34
5.1 Allgemeines zur Kanadische Holz-Pappel (<i>Populus x canadensis</i>)	34
5.2 Materialeigenschaften der Kanadischen Holz-Pappel (<i>Populus x canadensis</i>)	34
6. Untersuchungsmethodik	35
3.1 Die Schalltomographie oder mechanische Impuls-Tomographie	35
6.1.1 Funktion und Wirkungsweise	35
6.1.2 Aufbau und Ablauf	35
6.1.3 Resultat	35
6.2 Der statische Zugversuch	36
6.2.1 Eine zerstörungsfreie Methode	36
6.2.2 Ablauf und Aufbau	37
6.2.3 Messung der Bruchsicherheit	37
6.2.4 Messung der Standsicherheit	39
6.2.5 Auswertung der Bruchsicherheit	39
6.2.6 Auswertung der Standsicherheit	40
6.2.7 Einfluss der Witterung auf Zugversuche	40
6.2.8 Einfluss von Bodeneigenschaften auf Zugversuche	41
6.2.9 Einfluss baumspezifischer Eigenschaften auf Zugversuche	41
6.3 Der Zugversuch als wissenschaftliche Untersuchung	41
7. Auswertung der Ergebnisse	43
7.1 Schalltomographie	43
7.2 Zugversuche	43
7.2.1 Theoretische Grundlagen	43
7.2.2 Primärversagen	44
7.2.3 Entwurzelung	45
7.2.4 Exogene Einflüsse	46
7.2.5 Andere Schadsymptome	46
8. Ergebnisse	47
8.1 Versuchsreihe 1-8	47

8.1.1	Baum 1 (<i>Populus x canadensis</i> - Nr. 1731)	47
8.1.2	Baum 2 (<i>Populus x canadensis</i> - Nr. 1735)	51
8.1.3	Baum 3 (<i>Populus x canadensis</i> - Nr. 1736)	55
8.1.4	Baum 4 (<i>Populus x canadensis</i> - Nr. 1738)	59
8.1.5	Baum 5 (<i>Populus x canadensis</i> - Nr. 1737)	63
8.1.6	Baum 6 (<i>Populus x canadensis</i> - Nr. 1732)	67
8.1.7	Baum 7 (<i>Populus x canadensis</i> - Nr. 1740)	73
8.1.8	Baum 8 (<i>Populus x canadensis</i> - Nr. 1786)	77
8.2	Versuchsreihe 9-21	80
8.2.1	Baum 9 (<i>Populus x canadensis</i>)	80
8.2.2	Baum 10 (<i>Populus x canadensis</i>)	81
8.2.3	Baum 11 (<i>Populus x canadensis</i>)	82
8.2.4	Baum 12 (<i>Populus x canadensis</i>)	83
8.2.5	Baum 13 (<i>Populus x canadensis</i>)	84
8.2.6	Baum 14 (<i>Populus x canadensis</i>)	84
8.2.7	Baum 15 (<i>Populus x canadensis</i>)	85
8.2.8	Baum 16 (<i>Populus x canadensis</i>)	86
8.2.9	Baum 17 (<i>Populus x canadensis</i>)	87
8.2.10	Baum 18 (<i>Populus x canadensis</i>)	87
8.2.11	Baum 19 (<i>Populus x canadensis</i>)	88
8.2.12	Baum 20 (<i>Populus x canadensis</i>)	89
8.2.13	Baum 21 (<i>Populus x canadensis</i>)	89
8.3	Versuchsreihe 22-24	91
8.3.1	Baum 22 (<i>Ulmus glabra</i>)	91
8.3.2	Baum 23 (<i>Fraxinus excelsior</i>)	92
8.3.3	Baum 24 (<i>Acer pseudoplatanus</i>)	93
9.	Vergleich der Ergebnisse aller 24 Versuchsbäume in Bezug Seilzugkraft zu	
	Stammbiegung	95
9.1	Versuchsreihe 1-8	95
9.2	Versuchsreihe 9-21	98
9.3	Versuchsreihe 22-24	99
10.	Interpretation der Ergebnisse und Diskussion	100

10.1	Primärversagen	100
10.2	Sekundärversagen	101
10.3	Ovalisierung des Stammquerschnittes	102
10.4	Materialeigenschaften	103
10.5	Schlussfolgerung	104
11.	Ausblick und Vorschläge für die Praxis	105
11.1	Allgemeine Erkenntnisse	105
11.2	Erkenntnisse für die Baumkontrolle	105
12.	Literaturverzeichnis	106
13.	Anhang	112
13.1	Ergebnistabelle und Rohdaten	112

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen nachfolgend angeführten Personen und Institutionen für die Unterstützung bedanken, denn ohne sie wäre diese Masterarbeit nie möglich gewesen:

Dem Sachverständigenbüro PROSENZ, Rainer Prosenz, für die Idee, die Finanzierung und Betreuung dieser Masterarbeit.

Meinem Betreuer Florin Florineth für die Anregungen, die Verfügungstellung von Arbeitskräften und die Möglichkeit diese Masterarbeit zu schreiben.

Andreas Detter für die fachliche Beratung und Begleitung bei der Masterarbeit, sowie für die Auswertungsmatrix.

Den Österreichischen Bundesforsten für die Hilfe bei den Durchführung und Finanzierung der Versuchsreihen Tulln Aubad 2012, sowie Spital a. d. Drau 2013.

Der Stadtgemeinde Tulln an der Donau für die Versuchsbäume und anschließende Aufarbeitung der gestürzten und gefällten Bäume.

Meiner Kollegin und guten Freundin Alina Schönhofer für ihr unermüdliches Korrekturlesen dieser Masterarbeit und der Hilfe bei den Zugversuchen.

Meinen Freunden und Kollegen für die tatkräftige Hilfe am Greifzug bei den Versuchen.

Meinen Eltern für die Unterstützung im Studium und im Leben.

Kurzfassung

In der bestehenden Literatur kursieren verschiedene Annahmen und Theorien bezüglich des Bruchverhaltens und der Bruchursache hohler Baumstämme. Viele beruhen auf theoretischen Berechnungen oder auf Beobachtungen von bereits gebrochenen Baumstämmen. Die Meinungen über die eigentliche Versagensursache hohler Baumstämme aus dem Werkstoff „lebendes Holz“ gehen jedoch auseinander. Deshalb wurden in dieser Masterarbeit 21 hohle Kanadische Holz-Pappeln (*Populus x canadensis*), sowie drei weitere Bäume (Bergulme, Gemeine Esche, Bergahorn), mit Hilfe von Zugversuchen untersucht. Dabei wurden die Stammbiegung sowie die Faserdehnung an der Druckseite gemessen und ein Zusammenhang gesucht. Es war das Ziel, die Bäume bis zum Versagen zu belasten. Dabei wurde auch auf andere Schadsymptome wie Risse geachtet und diese auf Film und Foto festgehalten. Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass die Ursache für das erste Versagen, die Faserstauchung im Druckbereich ist. Alle anderen gemessenen und beobachteten Versagensursachen traten nicht auf oder fanden erst danach statt.

Abstract

Nowadays there exist many different theories about stem failure. Many of them are based on calculations or observations of already broken tree stems. With the method of the pulling-test 21 hollow Hybrid-black poplars, also known as Carolina- or Canadian poplar (*Populus x canadensis*) and three other trees of another species (wych elm, european ash, sycamore maple) were investigated in this Master-Thesis. Therefore, the trunk bending and the fibre strain of the pressure-side were measured. Furthermore another focus was to keep an eye on other symptoms of damage, like cracks.

The results suggest that the cause of the first failure is fibre compression on the pressure side of the trunk. All the other causes of failure did not occur or happened after the fibre compression.

1. Problemstellung und Zielsetzung

1.1 Die Gefahr von brechenden Bäumen

Immer wieder kommt es zu schweren Unfällen durch entwurzelnde oder brechende Bäume, bei denen große Sach- oder Personenschäden entstehen. Besonders im urbanen Bereich können diese Bäume eine große Gefahr darstellen, da sich hier viele Akteure und Gebäude auf kleinstem Raum befinden.

Das Ziel der Verantwortlichen sollte es nun sein, so viele ungefährliche Bäume wie möglich stehen zu lassen und nur die gefährlichen zu entfernen oder Maßnahmen einzuleiten, um deren Gefahr zu reduzieren. Um das zu erreichen, muss ein Maximum an uns bekannten Faktoren und Parametern in eine Gefahren- und Risikoabschätzung einfließen. Dazu ist es unter anderem auch notwendig, den Prozess des Baumbruches vollständig zu erforschen.

In dieser Arbeit werden Versuche zum Bruchversagen von hohlen Baumstämmen durchgeführt und analysiert um herauszufinden, woran der Baum bei Biegebelastung primär versagt. Die Ergebnisse werden anschließend mit den bestehenden Theorien in der Literatur verglichen.

1.2 Der Baum als Lebensraum

Das Brechen von alten oder geschwächten Bäumen ist ein natürlicher Vorgang. Aber gerade ein greiser, degenerierter oder schadhafter Baum ist aus ökologischer Sichtweise ein sehr wertvoller, der für eine Vielzahl von Lebewesen die Lebensgrundlage bietet (WESSOLLY, ERB, 1998). Totholz entsteht durch natürliche oder anthropogen hervorgerufene Ereignisse, wie zum Beispiel Windwurf, Parasitenbefall oder mechanische Schädigungen, die dafür sorgen, dass sich die Menge und Qualität des Totholzes ständig ändert (LACHAT et al., 2014). Je mehr Totholz vorhanden ist, desto mehr Totholzorganismen kommen vor (LACHAT et al., 2014). Die Vielfalt an Lebewesen entsteht durch unterschiedliche Faktoren. Die wichtigsten sind Baumart, Ausrichtung des Totholzes (horizontal/vertikal), die Dimension, die Exposition, sowie das Mikroklima und der Zersetzungsgrad (LACHAT et al., 2014) (GÜRLICH, 2009) (WESSOLLY, ERB, 1998). Baumveteranen spielen für viele gefährdete Tiere und Organismen eine wichtige Rolle (WESSOLLY, ERB, 1998). Diese Habitate sind vor allem in der Stadt wesentlich, da praktisch alle an alte Bäume gebundenen Tierarten zu den am stärksten gefährdeten

gehören (GÜRLICH, 2009). So ist es in der Stadt besonders wichtig, diese Bäume zu erhalten und nicht leichtfertig herzugeben. Vermeintliche Schadsymptome und Sicherheitsrisiken sind für die Bewohner der Bäume besonders wichtig. Blitzrinnen, Zwieselgabeln, Totastlöcher und Höhlungen bilden für eine Vielzahl von Tieren einen Lebensraum (GÜRLICH, 2009). Besonders die Hohlräume eines lebenden Baumes mit seinen intakten Saftströmen und seinem gegenüber der Außenwelt abgeschirmtem Temperatur- und Wasserhaushalt sind besonders erhaltenswert. Diese stellen eine wichtige Lebensgrundlage für Insekten, wie zum Beispiel einigen Käfer- und Wildbienenarten, die ausschließlich diese Aushöhlungen brauchen um zu überleben, aber auch für Vögel und für andere Wirbeltiere dar (GÜRLICH, 2009) (WESTRICH, 1991). Der Umstand, dass die vermeintlich gefährlichsten Bäume den wichtigsten Beitrag für die Biodiversität darstellen, fordert die Baumkontrolleure besonders. Der Erhalt von Baumveteranen ist meist aufwendig und teuer und nur durch hohe Kompetenz sicherzustellen. Durch die Wegesicherungspflicht werden Bäume häufig leichtfertig gerodet und somit Lebensräume zerstört (GÜRLICH, 2009).

Durch gute Kenntnisse der Bäume und ihres Bruchverhaltens können Baumveteranen oft bereits durch eine kompetente, eingehende, optische Kontrolle ausreichend als sicher eingestuft werden. Eingehende Untersuchungen, wie der Zugversuch oder die Schalltomographie können das Risiko weiter reduzieren und helfen sicherzustellen, dass das Maximum an nicht bruchgefährdeten Bäumen erhalten bleibt. Sie sind aber nur in Ausnahmefällen erforderlich.

Erforderliche Sicherungsmaßnahmen können auch lebensraumschonend gewählt werden, sodass ein toter Baumstamm mit ein paar Metern Höhe einige Jahre lang stehen bleiben und als Habitat dienen kann (BARBALAT, MULHAUSER, 2012). Auch optisch können solche abgestorbenen Hölzer attraktiv erscheinen.

1.3 Gesetzeslage und Aktuelle Normen

1.3.1 Österreichische Gesetzeslage

Es gibt viele verschiedene Definitionen, was als Baum bezeichnet wird, jedoch gibt es in Österreich keine, die an das Gesetz gebunden ist (HERBST et al., 2013).

In der Botanik werden Bäume als mehrjährige, holzige Samenpflanzen, die einen dominierenden Spross aufweisen und über sekundäres Dickenwachstum an Umfang zunehmen, definiert (HERBST et al., 2013).

In Österreich haftet man für Bäume in gleicher Weise wie für Gebäude: siehe § 1319 ABGB (HERBST et al., 2013). Als Baumbesitzer ist jemand zu bezeichnen, der die tatsächliche Verfügungsgewalt über den Baum hat oder der Eigentümer, Mieter oder Pächter einer Liegenschaft, der die Halterpflicht vertraglich oder konkludent, also stillschweigend, durch z.B. Durchführung von Pflegemaßnahmen, übernommen hat (HERBST et al., 2013). Der Baumbesitzer hat, da er am besten die resultierende Gefahr abschätzen und somit erkennen kann, Sorge zu tragen, dass von seinem Baum keine offensichtliche Gefährdung ausgeht (HERBST et al., 2013). Er hat deshalb im Falle eines Schadens den Nachweis zu erbringen, dass er alle zur Abwendung der Gefahr erforderliche Sorgfalt aufgewendet hat (HERBST et al., 2013). Falls dieser einen Mangel wie große Risse, etc. sehen und vermeiden hätte können, hat er nicht nach der erforderlichen Sorgfalt gehandelt.

Der Besitzer muss im Fall eines Schadens durch umstürzende Bäume seine Unschuld beweisen, dies wird Beweislastumkehr genannt (HERBST et al., 2013). Eine Dokumentation der Sorgfalt ist im Schadensfall jedenfalls hilfreich. Weitere augenscheinliche Gefahren können zum Beispiel großes Totholz über einem Weg sein, das entfernt werden muss. Eine Beratung oder Maßnahmen durch einen Fachmann können Abhilfe schaffen und die erforderliche Sorgfalt erfüllen.

In Wien und Graz gibt es Baumschutzgesetze, die den Erhalt und die Bestandssicherung innerstädtischer Bäume regeln. In Salzburg gibt es eine Baumschutzverordnung, die die gleichen Ziele verfolgt. Eigentumsverhältnisse und Verpflichtungen des Eigentümers ändern sich jedoch nicht, nur die Auflagen für eventuelle Maßnahmen wie Schnitt und Fällung sind reglementiert und müssen gemeldet werden (HERBST et al., 2013).

Nachbarschaftsrechtlich gesehen sind Immissionen nur dann zulässig, wenn sie nicht das nach den örtlich Verhältnissen gewöhnliche Maß überschreiten und auch nicht die ortsübliche Benutzung eines Grundstückes wesentlich beeinträchtigen (HERBST et al., 2013). Dieses im § 364 (2) ABGB verankerte Gesetz bietet der Judikatur einen gewaltigen Spielraum, wodurch sie teilweise die Funktion des Gesetzgebers

übernehmen muss. Diese Einzelfallgerechtigkeit erschwert eine systematische Fortentwicklung.

(KERSCHNER, 2008)

1.3.2 Österreichische Normen

Normen und Regelwerke spiegeln den Stand der Technik und Wissenschaft wieder. Sie haben keine rechtliche Verbindlichkeit, gelten jedoch bei Gerichten als Maßstab (HERBST et al., 2013). Die Einhaltung von Normen ist also durchaus sinnvoll, solange sie nicht als falsifiziert gelten. Weiters sind Normen für Laien ein guter Anhaltspunkt, ob nach dem neuesten Stand der Technik gearbeitet wird. Normen sollten wertfrei von Experten ohne wirtschaftliche Interessen erstellt werden.

Die ÖNORM L 1122 dient als Leitfaden, der bei der Begutachtung und Pflege der Bäume helfen soll. Sie reglementiert die Kontrollintervalle, sowie die Ausführung von Maßnahmen. Falls durch eine Verkehrssicherheitskontrolle nicht abschätzbare Risiken eines Baumes festgestellt werden sind nach der ÖNORM L1122 eingehende Untersuchungen durchzuführen. Hier werden einige Untersuchungsmethoden wie die Schalltomographie und der Zugversuch erwähnt, jedoch wird nicht näher darauf eingegangen, wie sie durchgeführt werden sollen. Lediglich eine ausführliche Dokumentation ist erwünscht.

In der ÖNORM L 1121 wird der Schutz von Gehölzen und Vegetationsflächen bei Baumaßnahmen beschrieben. Hier werden Maßnahmen und Empfehlungen an Baustellen vorgeschlagen.

Die ÖNORM L 1125 befasst sich mit der Erstellung und den Anforderungen an einen Baumkataster.

1.3.3 Weitere Richtlinien und Leitfäden

Es gibt desweiteren eine Vielzahl von Richtlinien, Anleitungen und Empfehlungen, die von Institutionen oder Forschungsgesellschaften entwickelt worden sind. Eine der wichtigsten Verfasser und Antreiber solcher Richtlinien ist die Forschungsgesellschaft für Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau (FLL), die in Deutschland tätig ist. Die Baumkontrollrichtlinien (FLL, 2010) geben gute Anhaltspunkte für Regelkontrollen der Bäume. Die ÖNORM L 1122 stimmt an vielen Stellen mit ihr überein.

Die Richtlinien für eingehende Untersuchungen zur Überprüfung der Verkehrssicherheit von Bäumen (2013) beschreiben die über die Baumkontrolle hinausgehenden Untersuchungen, die in Zweifelsfällen durchgeführt werden müssen. Maßnahmen und baumgerechte Pflege werden in der ZTV-Baumpflege – Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Baumpflege (2006) beschrieben und erläutert.

2. Baumstatik

„Statik ist die Lehre vom Gleichgewicht der festen Körper unter dem Einfluss von äußeren Kräften“ (SINN, 2003, 83).

Ein Baum ist eine Konstruktion, die den physikalischen Gesetzen unterworfen ist. Es ist somit notwendig, statische Eigenschaften und Regeln an den Bäumen anzuwenden, um zu verstehen, wo welche Kräfte auf sie wirken. Durch das ständig vom jungen bis zum greisen Baum ausgedehnte Höhenwachstum ist der Baum gezwungen, auch sein Dickenwachstum laufend zu

vergrößern um den verschiedenen Kräften entgegenzuwirken. Er kann so besser den Umweltbedingungen standhalten, Angreifer abwehren und Schäden kompensieren. Die drei bestimmenden Faktoren der Statik sind Last, Form und Material.

(WESSOLLY, ERB, 1998)

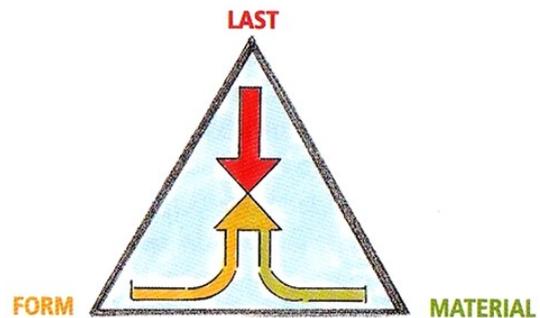


Abbildung 1: Die drei bestimmenden Faktoren der Statik (WESSOLLY, ERB, 1998). Eine genaue statische Berechnung und Abschätzung kann nur mit Hilfe dieser Faktoren durchgeführt werden.

2.1 Material und Form

2.1.1 Der Holzaufbau

Eine entscheidende und wichtige Rolle bei der Holzbildung spielt das Kambium, das für das sekundäre Dickenwachstum verantwortlich ist. Als Holz werden alle Zellelemente bei Gymnospermen und bei den Dikotylen der Angiospermen genannt, die vom geschlossenen Kambiumring während des sekundären Dickenwachstums nach innen abgegeben werden (RAVEN et al., 2000). Nach außen abgegebene Elemente des Kambiums bezeichnet man als sekundäres Phloem oder Bast (RAVEN et al., 2000). Holz besteht aus einer Zusammensetzung verschiedener Zellen mit Wänden aus Zellulose und Lignin (SHIGO, 1994). Während sich im Splintholz neben toten auch lebende Zellen befinden, findet man im Kernholz nur tote (SHIGO, 1994).

Das Splintholz besteht aus lebenden und toten Zellen, wobei hier der Großteil der Zellen lebend, der Großteil des Volumens jedoch tot ist. Um Verwirrungen zu vermeiden, wird

das Splintholz einfacherweise als physiologisch aktiv bezeichnet. Die Aufgaben des Splintholzes sind der Transport von Stoffen, die Speicherung von Energiereserven in den Parenchymzellen, die mechanische Stützfunktion und Abwehraufgaben, die durch chemische Substanzen die Ausbreitung von Krankheitserregern verhindern. Die Breite des Splintholzes ist Indikator für die Energiespeicherkapazität. Physiologisch haben verschiedene Baumarten unterschiedlichen Dicken von Splintholz mit transportfähigem Gewebe. So haben die Gattungen *Robinia*, *Ulmus* und *Aesculus* nur sehr dünne Bänder der jüngsten Jahrringe, während die Gattungen *Acer*, *Betula* und *Fraxinus* sehr breite Splintholzbereiche haben.

(SHIGO, 1994)

2.1.2 Verkernung

Es gibt mehrere Arten der Verkernung mit unterschiedlichem Verlauf. So findet bei sogenannten Splintholzbaumarten wie dem Ahorn (*Acer sp.*) eine Verkernung erst sehr spät oder manchmal auch gar nicht statt. Einige Baumarten, wie Eichen (*Quercus sp.*) bilden eine obligatorische Verkernung, die durch ihre phenolartigen Substanzen eine Imprägnierung der Zellwände verursachen und somit einen guten Schutz gegenüber holzerstörenden Pilzen bilden.

(WESSOLLY, ERB, 1998)

Sogenannte Reifholzbäume haben einen unverfärbten, schutzstofflosen Kern, der gegenüber holzersetzenden Pilzen schlechter gerüstet ist (WESSOLLY, ERB, 1998). Hierzu zählt unter anderem die Buche (*Fagus sp.*).

Manche Baumarten bilden einen sogenannten Falschkern, der durch das Eindringen von Mikroorganismen verursacht wird. Diese Verfärbung hat keine erhöhte Widerstandskraft gegen holzersetzende Pilze und kann leicht abgebaut werden.

(WESSOLLY, ERB, 1998)

Einige Baumarten, wie die Pappel (*Populus sp.*) oder die Weide (*Salix sp.*), bilden einen sogenannten Nasskern, der sich durch eine dunkel gefärbte, sehr feuchte Zone im Stamminneren auszeichnet (BUTIN, 2009). Anaerobe Bakterien, die weder die Holzstruktur noch die Holzqualität beeinflussen, sind hier vermehrt vorzufinden (BUTIN, 2009). Durch den hohen Feuchtigkeitsgehalt haben die Bäume eine erhöhte Resistenz gegenüber Parasiten (BUTIN, 2009).

Das Kernholz besteht aus toten Zellen samt Einlagerungen und kann nach SHIGO (1994) als Mittelpunkt der statischen Masse mit Stützfunktion beschrieben werden, somit hat auch das physiologisch inaktive Holz eine statische Funktion (SHIGO 1994). Inwieweit diese Funktion statisch wichtig ist, ist jedoch fraglich, da nach WESSOLLY und ERB (1998) sowie nach SINN (2003) die äußeren Bereiche eines Stammes statisch am wichtigsten sind. Offen ist die Frage, wie weit sich diese statische Unterstützung in den verschiedenen Fäulnis- und Abbaustufen auswirkt. Es wäre für Interpretationen von Restwandstärken ebenfalls äußerst wichtig zu klären, ob nur das Splintholz als Restwand oder auch Teile des eventuell von Pilzen zersetzten Kernholzes hinzugezählt werden.

2.1.3 Holzeigenschaften

Die sogenannte „Holzfestigkeit“ ist durch eine Reihe von Parametern, wie unter anderem durch Zug - und Druckfestigkeit, Elastizität, Dichte, sowie Torsionsfestigkeit gekennzeichnet (SINN, 2003).

2.1.4 Zug-, Druck- und Schubbelastungen

Die Windkräfte wirken auf den senkrechten Baum als waagerechte Kraft und erzeugen eine Hebelwirkung, also ein Biegemoment (M), wodurch es zu Biegebelastungen kommt. Auf der windzugewandten Seite werden die Fasern gezogen, während sie auf der windabgewandten Seite gestaucht werden, es kommt zu positiven oder negativen Dehnungen (ϵ). Die Längszugfestigkeit, gemessen in kN/cm^2 , beträgt in Faserrichtung des astfreien und gerade-faserigen Holzes mehr als doppelt so viel als die Längsdruckfestigkeit (SINN, 2003) (WESSOLLY, ERB, 1998) (MATTHECK, 2006 a). Im Bereich des Überganges von Zug- zu Druckspannung (0-Linie) liegt die Ebene der maximalen Schubspannung (SINN, 2003). Im Falle von zu großer Schubspannung kann es zu einem sogenannten Delaminationsversagen kommen, bei dem die Klebung zwischen den Fasern versagt (WESSOLLY, ERB, 1998). Hierbei haben Holzstrahlen wohl neben ihrer physiologischen

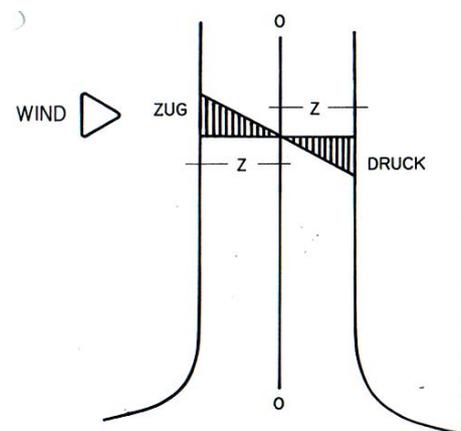


Abbildung 2: Die Belastung im Stamm durch Zug-, Druck- und Schubspannung bei einem Windereignis (SINN, 2003).

Bedeutung auch eine mechanische (BURGERT, 2000). Bei schubbeanspruchten Bäumen konnte eine vermehrte Bildung von Holzstrahlen festgestellt werden (BURGERT, 2000).

2.1.5 Biegespannung

Die Biegespannung (σ) wird als Quotient aus dem Biegemoment (M) und dem Widerstandsmoment (W) errechnet und in Pascal (Pa) angegeben.

$$\sigma = M / W$$

Das Biegemoment (M) beschreibt die Kraft, die auf einen Träger bzw. Stamm einwirkt. Sie wird aus der Länge des Trägers (L) mal der einwirkenden Kraft (F) berechnet und in kN/m angegeben.

$$M = L \times F$$

Das Widerstandsmoment (W) ist ein Maß für die Biegesteifigkeit eines Trägers, also eines Stammes, das vom Durchmesser (D) des Stammes bestimmt wird. Es wird in m^3 angegeben.

$$\text{Widerstandsmoment } (W) \text{ massiver Stämme} = \pi \times (D^3 : 32)$$

(SINN, 2003, 128)

Im Falle eines Hohlrohres wird zusätzlich der Innendurchmesser (d) benötigt.

$$\text{Widerstandsmoment } W \text{ eines Kreisringes} = \pi \times (D^4 - d^4) : (32 \times D)$$

(SINN, 2003, 128)

Die Berechnung gilt für annähernd runde ideale Stämme mit kreisrunden Ausfaltungen. Anhand der Formel ist klar, dass der Stammaußendurchmesser die entscheidende Rolle (D^3) bei der Bruchsicherheit spielt. Ein doppelter Durchmesser hat also die 8-fache

Bruchsicherheit, wodurch noch einmal die Wichtigkeit des Stammdurchmessers verdeutlicht wird (SINN, 2003) (FLORINETH, 2012).

2.1.6 Elastizität

Die Elastizität beschreibt die Fähigkeit eines Materials, nach einer bestimmten Belastung ohne bleibende Verformung in die Ausgangslage zurückzukehren. Durch weitere Belastungen bis zum Überschreiten der Elastizitätsgrenze kommt es zu einer bleibenden Verformung, die sich bis zum Erreichen der Bruchgrenze vergrößert.

2.1.7 Elastizitätsmodul

Als Elastizitätsmodul oder auch E-Modul (E) wird der Quotient aus der Spannung (σ) und Dehnung (ϵ) bezeichnet.

$$E = \sigma / \epsilon$$

Spannung und Dehnung stehen bis zum Erreichen der Elastizitätsgrenze im gleichen Verhältnis, daher verläuft der Graph im Spannungs-/Dehnungsdiagramm als Gerade. Die Proportionalität zwischen Spannung und Dehnung wird als HOOKE'sches Gesetz bezeichnet. Der Elastizitätsmodul kann je nach Baumart und dessen Holzbeschaffenheiten schwanken (SINN, 2003) (PFISTERER, SPATZ, 2012). SINN (2003) beschreibt, dass der Holzfeuchtegehalt den Elastizitätsmodul beeinflussen kann, jedoch wird nicht weiter darauf eingegangen.

2.1.8 Elastizitätsgrenze

„Die Elastizitätsgrenze ist der Punkt, an dem die Bewegungsfähigkeit übertrieben wird und ein erstes, primäres Versagen eintritt“ (WESSOLLY, ERB, 1998, 124).

Sie zeigt, um wie viel das Holz gedehnt werden kann, bis es zu versagen beginnt (WESSOLLY, ERB, 1998). Um die Elastizitätsgrenze zu ermitteln wird die jeweilige Längsdruckfestigkeit des lebenden, grünen Holzes genommen und durch seinen Elastizitätsmodul dividiert (SINN, 2003). Die Längsdruckfestigkeit kann

aus dem Stuttgarter Festigkeitskatalog nach WESSOLLY und ERB entnommen werden.

WESSOLLY und ERB (1998) beschreiben Bäume, die große Belastungen aushalten und bei einer Überschreitung der Elastizitätsgrenze sehr schnell zum Sekundärversagen übergehen. Andere Baumarten halten nur geringen Belastungen stand, es bedarf aber längerer und intensiverer Dehnung bis zum Sekundärversagen.

In der Technik ist es üblich, Werkstoffe nur bis zum Primärversagen zu dimensionieren, da meist nur der Primärversagenspunkt bekannt ist (PROSENZ, 2010). Der Verlauf zwischen Primärversagen und Sekundärversagen ist meist unbekannt und auch oft variabel (PROSENZ, 2010).

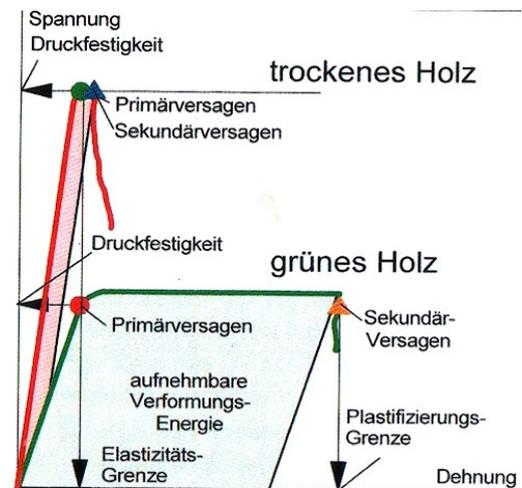


Abbildung 3: Vergleich des Primär- und Sekundärversagens von grünem und trockenem Holz (WESSOLLY, ERB, 1998).

Das Sekundärversagen beginnt bei trockenem Holz (totes Holz) kurz nach dem Primärversagen, während bei grünem Holz (lebendes Holz) noch eine weitere Dehnung nötig ist, um das Sekundärversagen und somit den endgültigen Bruch zu erreichen.

2.1.9 Holzdichte

Die Holzdichte ist der Quotient aus der Masse eines Körpers und seinem Volumen. Nach PFISTERER und SPATZ (2012) sind mechanische Größen wie Elastizität und Bruchfestigkeit auch beim Werkstoff Holz von ihrer jeweiligen Dichte abhängig.

2.1.10 Torsion

Die Drehbelastung wird Torsion genannt. Sie entsteht bei Bäumen durch eine einseitige Belastung und kann entweder durch asymmetrische Kronenformen oder durch seitliche Windbelastungen, wie z.B. nach Freischneiden eines Verbandes entstehen. Hohle Baumstämme mit einer Öffnung können leichter brechen, da sie leichter zu verdrehen sind (WESSOLLY, ERB, 1998).

2.2 Einwirkende Lasten

2.2.1 Vertikal wirkende Lasten

Ein Baum muss verschiedene Arten und Intensitäten von Last tragen und bewältigen. Das Eigengewicht ist eine andauernde, ständig einwirkende, vertikale Last und setzt sich aus der Masse des Holzes und des Blattwerks zusammen. Um das Gewicht möglichst exakt ermitteln zu können, muss das Stammvolumen des Baumes nach oben vermindert werden, da sich der Stamm nach oben verjüngt (WESSOLLY, ERB, 1998). Durch das Miteinbeziehen der Blattmasse und der Feinäste ergibt sich die Formel zur Berechnung des Volumens, aus dem das Eigengewicht ermittelt wird:

$$\text{Volumen} = \text{Stammquerschnitt} \times \text{Höhe} \times 0,6 \text{ bis } 0,8$$

(WESSOLLY, ERB, 1998, 58)

Das Eigengewicht berechnet sich aus dem Volumen und dem spezifischen Gewicht von Stammholz, Zweigen und Blattmasse. Das Gewicht von grünem Holz kann mit ca. 1 Tonne pro Kubikmeter angenommen werden (WESSOLLY, ERB, 1998). Hier gibt es von Baumart zu Baumart Unterschiede, die miteinbezogen werden müssen. So hat zum Beispiel die Platane (*Platanus acerifolia*) ein spezifisches Gewicht von 1,1 t/m³, die Weißtanne (*Abies alba*) aber nur 0,55 t/m³ (WESSOLLY, ERB, 1998). Die spezifischen Gewichte der verschiedenen Baumarten können u.a. im Stuttgarter Festigkeitskatalog nachgeschlagen werden (WESSOLLY, ERB, 1998).

$$\text{Gewicht} = \text{Spezifisches Gewicht} \times \text{Volumen}$$

(WESSOLLY, ERB, 1998, 58).

Durch die Schräglage von schief gewachsenen Bäumen wirkt ein dauerndes Moment, das zu den Wind-, Schnee- oder sonstigen Lasten hinzukommt (WESSOLLY, ERB, 1998). Weitere vertikale Belastungen können Früchte, Tiere oder witterungsbedingter Schnee, Regen und Eis sein (WESSOLLY, ERB, 1998).

Auch für das Zerstörungspotential im Falle eines Bruches oder Kippens spielt das Eigengewicht eine Rolle, da hier die Lageenergie, die sich durch das Gewicht multipliziert

mit der Höhe des Schwerpunktes über dem Boden ergibt, entscheidend ist (WESSOLLY, ERB, 1998).

2.2.2 Horizontal wirkende Lasten durch den Wind

Wind ist die Folge von Luftdruckdifferenzen, die durch unterschiedliche Sonnenerwärmung der Erdoberfläche entstehen (SINN, 2003). Er ist eine zufallsabhängige Erscheinung, die durch Faktoren wie Jahreszeiten, Erddrehung und Gestaltung der Erdoberfläche beeinflusst wird (SINN, 2003).

Die Windgeschwindigkeit, die neben anderen Faktoren der wesentlichste Einflussfaktor für die Windlastabschätzung ist, wird in BEAUFORT angegeben. Im Zuge einer Windlastanalyse werden die Einflussfaktoren berücksichtigt und somit die tatsächlich einwirkende Windlast ermittelt.

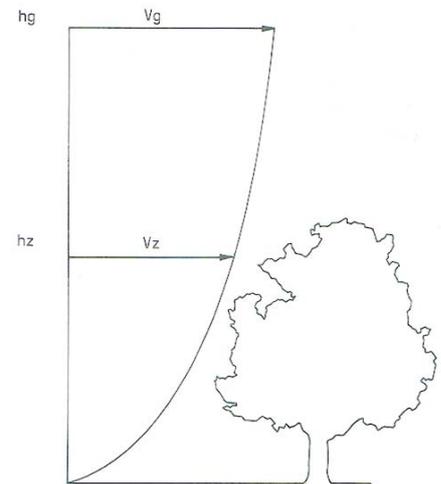


Abbildung 2:
Geschwindigkeitsverlauf des Windes (SINN, 2003).
 h_z : Messhöhe
 h_g : Höhe des Gradientenwindes
 V_z : Windgeschwindigkeit die auf die Krone einwirkt
 V_g : Gradientenwindgeschwindigkeit

2.2.2.1 Windlastanalyse

Die Windlastanalyse wird nach dem Eurocode 1: Einwirken auf Tragwerke: Teil 1-4 durchgeführt. Der Eurocode ist in Österreich als nationale Norm unter der ÖNORM B1991-1-4 bekannt. Da sich Bäume aber im Detail von Bauwerken unterscheiden, musste diese Norm an die speziellen Eigenschaften der Bäume angepasst werden.

Ermittlung der Bemessungswindgeschwindigkeit

Die Basiswindgeschwindigkeit (V_{ref}) ist die Ausgangswindgeschwindigkeit für die Lastabschätzung. Sie wird dem Anhang „A“ der ÖNORM B1991-1-4 entnommen, in dem die Basiswindgeschwindigkeiten von ca. 200 Messstellen in Österreich angegeben sind. Die Messstelle, die dem Baum am nächsten ist, ist auszuwählen.

Sie wird durch Messungen in 10 m Höhe (h_{ref}) fern von Hindernissen ermittelt und die über einen Zeitraum von 10 Minuten gemessenen Werte gemittelt (ÖNORM B1991-1-4). Windböen können diese Basiswindgeschwindigkeit deutlich überschreiten, so wie es Phasen deutlich geringerer Windgeschwindigkeit geben kann. Als

Basiswindgeschwindigkeit wird ein Windereignis mit einer 2 % Wahrscheinlichkeit gewählt. Das entspricht einem Ereignis, das alle 50 Jahre zu erwarten ist (ÖNORM B1991-1-4).

Verteilung des Windes über die Höhe

Die Windgeschwindigkeit ist über die Höhe ungleich verteilt. In unmittelbarer Bodennähe ist die Geschwindigkeit fast 0 und nimmt mit zunehmender Höhe rasch zu. Die als Gradientenwind bezeichnete ungestörte Windströmung ist über dem Meer in einer Höhe ab ca. 300 m zu finden, während sie in einer bebauten Stadt erst ab einer Höhe von 500 – 600 m zu finden ist (SINN, 2003). In den untersten 30 m findet die größte Veränderung statt und ist so groß, dass sie in einer normgerechten Analyse berücksichtigt werden muss (SINN, 2003).

Einfluss der Topographie



Abbildung 3: Zeichnung der Geländetopographie und der Böigkeit (PROSENZ, 2010).

Die Geländetopographie hat einen wichtigen Einfluss auf den Wind. So erhöht sich die Windgeschwindigkeit im Bereich eines Hügels deutlich, während sie in geschützten Tallagen abnimmt (SINN, 2003). Kleine Hindernisse, wie Buschreihen, einzelne Bäume oder Häuser verursachen kleine Böen und bremsen den Wind nur gering. Größere Hindernisse, wie Hochhäuser in Städten, erzeugen große Böen und bremsen den Wind stärker. Insgesamt sinkt in Städten die Windbelastung, da der Effekt des gebremsten Windes den Effekt der stärkeren Böigkeit übersteigt (PROSENZ, 2010). Nach der DIN

1055-4:2005 werden vier Geländekategorien unterschieden, die als Exponent α in der Windlastanalyse berücksichtigt werden:

- Offene See: Eine mindestens 5 km freie, glatte, flache Fläche.
- Landschaft: Gelände mit einzelnen Gebäuden oder Bäumen.
- Vorstadt: Vorstädte, Industrie- oder Gewerbeflächen, Wälder.
- Stadt: Stadtgebiete mit mindestens 15% bebauter Fläche, deren Gebäude im Durchschnitt 15m Höhe haben.

Der Exponent kann Werte auf Offener See, $\alpha=0,16$ bis zu einer Stadt nach WESSOLLY und ERB (1998) $\alpha=0,28$ oder nach SINN (2003) sogar $\alpha=0,4$ annehmen. Da die Bäume in Städten in der Regel nicht über die Gebäude herausragen, ist es erforderlich die kleinräumigen Windeinflüsse zwischen den Gebäuden zu berücksichtigen. Dies erfolgt durch Expositions- und Nachbarschaftsfaktor, die in der ÖNORM B1991-1-4 nicht vorkommen (DETTNER, RUST, 2013).

Der Expositionsfaktor (f_N):

Der Expositionsfaktor beschreibt, welcher Teil der Windlast den Baum wirklich erreicht. Wird er voll angeblasen ist der Faktor 1, steht er teilweise geschützt, nimmt der Faktor linear ab (ARBOSTAT Software, argus electronics GmbH).

Berechnung der Bemessungswindgeschwindigkeit (V_z):

Die an den Baum und dessen Standort angepasste Bemessungswindgeschwindigkeit für eine spezielle Höhe (h_z) errechnet sich:

$$V_z = f_N \times V_{ref} \times (h_z/h_{ref})^\alpha$$

Bemessungswindgeschwindigkeit V_z :

f_N = Expositionsfaktor

V_{ref} = Basiswindgeschwindigkeit

h_{ref} = Referenzhöhe

h_z = Spezielle Höhe

α = Exponent

Der Nachbarschaftsfaktor (f_E):

Durch Düsen- oder Tunneleffekte kann die Windgeschwindigkeit zusätzlich erhöht werden, was durch den Nachbarschaftsfaktor berücksichtigt wird (DETTNER, RUST, 2013). Findet keine Beschleunigung statt, ist der Faktor 1. Liegen windbeschleunigende Faktoren vor, so steigt dieser. Da es schwierig ist, diesen Wert korrekt abzuschätzen, werden folgende Werte vorgeschlagen: Faktor 1 (Freie See), 1,075 (Landschaft), 1,2 (Vorstadt) und 1,3 (Stadt) (ARBOSTAT Software, argus electronics GmbH)

C_W -Luft-/Windwiderstandsbeiwert

Der C_W -Wert beschreibt das Maß der aerodynamischen Güte eines vom Wind umströmten Körpers (WESSOLLY, ERB, 1998). Er ist in normgerechten Windlastanalysen ein konstanter Faktor und wird auch Strömungskoeffizient genannt. Bei Bäumen wird die Krone aber beträchtlich kleiner, wenn sich der Wipfel und Seitenäste im Wind verbiegen (SINN, 2003). Gleichzeitig sinkt auch der C_W -Wert, wenn sich Zweige und Blätter aerodynamisch ausrichten (WESSOLLY, ERB, 1998). Zur Lösung dieser Probleme wurde der C_W -Wert - anders als in der Norm - als Windstärkenabhängig definiert und auch die Veränderung der Kronenfläche in den C_W -Wert integriert (WESSOLLY, ERB, 1998). Somit kann die Ausgangsfläche des Baumes in die Formel eingesetzt werden. Messungen haben gezeigt, dass sich die Kronenfläche und der C_W -Wert nur bis Windstärke 9 verändern und dann konstant bleiben (WESSOLLY, ERB, 1998). Somit wird in der Regel der C_W -Wert, der bei Windstärke 9 und der verkleinerten Krone zutrifft, gewählt.

Baumarten, wie die Birke (*Betula pendula*) können einen sehr niedrigen C_W -Wert von 0,1 haben, während Baumarten, wie die Rosskastanie (*Aesculus hippocastanum*) hohe C_W -Werte bis zu 0.35 haben können (WESSOLLY, ERB, 1998).

Um die tatsächlich auf den Baum einwirkende Kraft (F_Z) in der jeweiligen Höhe zu ermitteln, muss die halbe Dichte der Luftmasse (ρ), mit dem C_W -Wert, der Bemessungswindgeschwindigkeit zum Quadrat (v_Z) und der Baumstirnfläche (A) multipliziert werden:

$$F_Z = f_E \times \rho / 2 \times C_W \times A \times v_Z^2$$

Schlussendlich werden alle einwirkende Kräfte (F_z) aufsummiert, wodurch sich die gesamte Windlast des Baumes ermitteln lässt. Daraus wird die Belastung als Moment am Stammfuß errechnet.

2.2.2.2 Dynamischer Effekt

Weitere wichtige Faktoren, die beachtet werden müssen, sind dynamische Effekte. Diese entsteht durch das Schwingen des Baumes in den einzelnen Windböen (DETTNER, RUST, 2013). Diese Effekte sind abhängig von Faktoren, wie Nachgiebigkeit der Boden-Wurzel-Matrix, Schlankheit der Bäume, Länge der Objekte, Holzart und Rhythmus der Windböen (SINN, 2003). Diesem Effekt wirkt die natürliche Dämpfung der Bäume entgegen, da die Äste des Baumes zeitlich und räumlich gegeneinander Schwingen und somit Energie abbauen (JAMES, 2013).

2.2.2.3 Schlankheitsgrad

In der Literatur gibt es unterschiedliche Thesen bezüglich der Möglichkeit, durch ein simples Verhältnis von Baumhöhe (h) zu Stammdurchmesser (D) die Bruchgrenze zu definieren. Außerdem existieren verschiedene Meinungen, ob und wie der Schlankheitsgrad von Bäumen Einfluss auf das Bruchverhalten hat. So beschreiben unter anderem SIEWNIAK und KUSCHE (2009), dass das Verhältnis von Baumhöhe (h) zum Stammdurchmesser (D) nicht über eine Mindestgrenze hinausgehen darf, um als bruchsicher zu gelten. Ebenso beschreibt MATTHECK (2007), dass ab einem kritischen Verhältnis von Baumhöhe (h) zu Stammdurchmesser (D) die Versagensrate stark zunimmt. Nach JILLICH et. al (2013) hat der Schlankheitsgrad auf ein Bruchversagen allerdings nur wenig Einfluss, da die Holzeigenschaften schlanker und gedrungener Bäume anders sind und diese vermutlich festeres Holz ausbilden. Zusätzlich haben schlanke Bäume meist kleinere Kronen als gedrungene (JILLICH et al., 2013).

Obwohl die Schwingungswilligkeit durch einen hohen Schlankheitsgrad erhöht wird, spielt das bei Stadtbäumen keine so große Rolle (JILLICH et al., 2013).

Nichtsdestotrotz kann nach SINN (2003) durch ungünstige Böen die Schwingungsamplitude so groß werden, dass die Belastungsgrenze des Baumes überschritten wird und es so zu einem sogenannten Resonanzversagen kommt.

3. Stand des Wissens und Theorien des Bruchversagens

In der Literatur und auch in der Praxis existieren mehrere Theorien bezüglich der Ursachen eines Stammbruches. Es gibt hier unterschiedliche Ansätze und Meinungen, die in diesem Kapitel behandelt werden.

Beim Prozess des Versagens muss auf den Unterschied zwischen Primärversagen und dem Sekundärversagen, also dem Erstversagen und dem endgültigen Kollaps geachtet werden. Während des Bruches werden häufig Risse, Zerbretterungen bzw. Aufspaltungen und weitere Symptome gesehen. Diese müssen jedoch nicht das Primärversagen darstellen, da es auch Symptome des Sekundärversagens sein können. Erst durch Messungen im μm -Bereich kann die Ursache des Versagens herausgefunden werden. Diese können Erkenntnisse liefern und Verformungen zeigen, die deutlich vor den mit dem menschlichen Auge sichtbaren Symptomen auftreten. In der Materialkunde wird das erste messbare Versagen durch Überschreiten der Elastizitätsgrenze angezeigt. Erst durch genaue Analyse von Messdaten kann das Primärversagen, das eventuell mit freiem Auge gar nicht sichtbar ist, vom Sekundärversagen unterschieden werden.

3.1 Bruchgefährdende Faktoren

Die Ursache für statische Probleme ist oft ein Holzabbau, der meistens durch Parasiten verursacht wird. Dabei handelt es sich häufig um holzersetzende Pilze, die den Baum stark aushöhlen und Stammteile zum Absterben bringen (BUTIN, 2011). Holzabbauende Pilze können so viel statische Reserven des Stammes reduzieren, dass es zu Bruchereignissen kommen kann. Solange ein Baum vital und nicht geschädigt ist, reicht in der Regel sein jährlicher Dickenzuwachs um bruch sicher zu bleiben (REINARTZ, SCHLAG, 1989). Erst wenn die Energiereserven des Baumes zur Neige gehen, steigt die Bruchgefahr.

3.2 Ursachen von Baumhöhlungen

Die Höhlung eines Baumes ist nach SHIGO (1994) ein komplexer Vorgang, der von der unterschiedlichen Abschottungsfähigkeit eines Baumes abhängt. Wird ein Baum von einem parasitären Erreger befallen, versucht er diesen durch Überwallung und dem damit verbundenen Entzug des Sauerstoffes zum Stagnieren zu bringen (SHIGO, 1994).

Voraussetzung für den Befall ist eine Verletzung des Holzes, die vom Wurzelbereich bis in die Krone stattfinden kann. Von der Eintrittspforte breitet sich das Pathogen aus.

Das von DUJESIEFKEN und LIESE (2008) beschriebene CODIT-Modell nach SHIGO (1991) (*Compartmentalization of Damage in Trees*) stellt die Abschottungsfähigkeiten und Wundreaktion von Bäumen gegenüber eindringenden Schadorganismen oder Luft da. Es werden vier Barrierewände beschrieben, die unterschiedliche Abschottungskräfte haben (SHIGO, 1991) (DUJESIEFKEN, LIESE, 2008).

Durch eine Verletzung sterben als Folge von Lufteintritt alle lebenden Parenchymzellen ab und die Wasserfäden der Gefäße und Tracheiden reißen (WESSOLLY, ERB, 1998). Es entsteht ein Versorgungsschatten und der Transport von Wasser und Nährstoffen wird umgeleitet. Als nächster Schritt breitet sich der Schaden in axialer und radialer Richtung zum Holzinernen aus (WESSOLLY, ERB, 1998). Diese Ausbreitungen radial in das Holzinne und axial nach oben und unten hängen mit den schlechten Barrierewänden Eins und Zwei zusammen (SHIGO, 1994). Weiters gibt es in axialer Richtung viele Gefäßstränge und in radialer Richtung zum Holzinernen viele Holzstrahlen, die Verbindungen darstellen, durch die sich parasitäre Bewohner leicht ausbreiten können (WESSOLLY, ERB, 1998). Der Laubbaum reagiert auf das axiale Vordringen der Mikroorganismen mit einer Verschließung der Hoftüpfel, während der Nadelbaum Harzkanäle bildet (BUTIN, 2011). Durch eingelagerte Gerbstoffe ist der Baum auch gegen ein Vordringen radial in das Holzinne geschützt (BUTIN, 2011).

Gelingt es jedoch holzersetzen Pilzen und Bakterien nach einer bestimmten Zeit tiefer einzudringen, dann produziert der Baum verstärkt pilzwidrige Stoffe, was später als Verfärbung erkennbar ist (BUTIN, 2011). In tangentialer Richtung, also entlang der Jahrringe, wo es nur wenige Verbindungen gibt, schreitet die Schadensausbreitung langsamer voran (WESSOLLY, ERB, 1998).

Der tangentialen Ausdehnung entgegnet die radial verlaufende als Barrierewand Drei bezeichnete Schutzzone durch die Bildung vermehrt reaktionsfähiger, lebender Parenchymzellen, die im Falle eines Angriffes durch Parasiten fäulnishemmende Stoffe bilden (WESSOLLY, ERB, 1998).

Die letzte Schutzzone wird nach SHIGO (1994) Barrierewand Vier genannt und ist die am besten gerüstete Abwehrzone, die vom Baum gezielt nach einer Verletzung produziert

wird. Sie verläuft tangential und ist die Grenze zwischen Verwundung und dem nach der Verletzung gebildeten Holz (SHIGO, 1994).

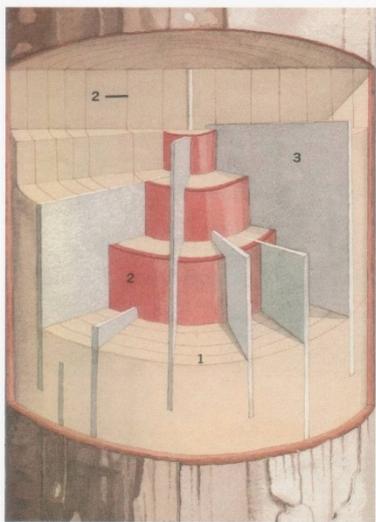


Abbildung 6, (DUJESIEFKEN, LIESE, 2008): Barrierewände nach SHIGO und Marx (1977) mit unterschiedlicher Abwehrkraft.

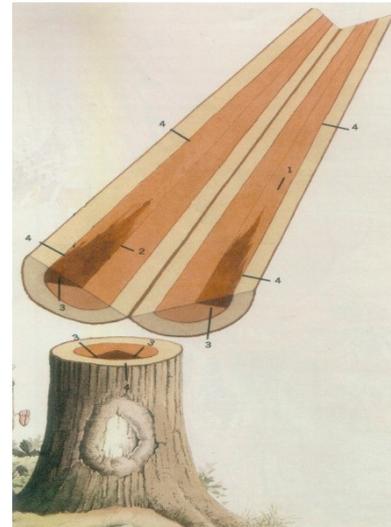


Abbildung 7, (DUJESIEFKEN, LIESE, 2008) nach SHIGO und Marx (1977): Die Ausbreitung des Schadens im Baumstamm.

Bezüglich der Abschottungsfähigkeit gibt es große Unterschiede zwischen den Baumarten. So sind Weiden (*Salix sp.*) sowie Pappeln (*Populus sp.*) schlechte Abschotter, während Buchen (*Fagus sp.*) und Eichen (*Quercus sp.*) als gute Kompartimentierer gelten (WESSOLLY, ERB, 1998). Die guten Abschotter versuchen mittels chemischer Prozesse das Vordringen des Pilzes zu unterbinden, was unter anderem durch das phenolhaltige Kernholz gelingen kann (WESSOLLY, ERB, 1998). Das energieaufwändig produzierte Holz, das besser gegen Angreifer gewappnet ist, ist für Bäume mit langer Lebensdauer von Vorteil (LARJAVAARA, MULLER-LANDAU, 2010).

Einige Baumarten wie die Weiden (*Salix sp.*) oder die Pappeln (*Populus sp.*) versuchen möglichst schnell ihren Stammdurchmesser zu vergrößern und bilden große neue Jahrringe, die statisch sehr wirksam sind (WESSOLLY, ERB, 1998). Sichtbar ist dies durch eine starke Verdickung an Faul- oder Hohlstellen (WESSOLLY, ERB, 1998). Diese Strategie beruht auf der Tatsache, dass der Stammdurchmesser für die Statik sehr wichtig ist. Daher wird mit demselben Energieaufwand weniger dichtes, dafür mengenmäßig mehr Holz gebildet (LARJAVAARA, MULLER-LANDAU, 2010). Das Holz ist weniger stabil, verbraucht jedoch auch nicht viel Energie für die Instandhaltung, was für Baumarten mit kurzer Lebensdauer vorteilhaft ist (LARJAVAARA, MULLER-LANDAU, 2010).

Vitale Bäume können Krankheitserreger besser bekämpfen, wohingegen sich bei Bäumen mit einer schlechten Vitalität parasitäre Erreger besser ausbreiten können

(WESSOLLY, ERB, 1998) (BUTIN, 2011). Vorsichtig sollte man jedoch bei der Beziehung zwischen der Vitalität bzw. Biologie und der Statik sein. Vitale Bäume können große statische Probleme haben, während schütter aussehende, nicht vitale Bäume überhaupt kein statischen Schwierigkeiten haben können (WESSOLLY, ERB, 1998).

3.3 Der Prozess des Versagens

Wenn Wind an einem Baum angreift, wird Last eingeleitet und der Baum biegt sich. Die windzugewandte Seite des Stammes wird gedehnt, während die windabgewandte Seite gestaucht wird, wodurch Druck- und Zugspannungen entstehen. Die zwischen Dehnung und Stauchung liegende Übergangszone wird als Spannungs-Nulllinie bezeichnet und weist die maximale Scherkraft auf (SINN, 2003). Von hier aus nehmen die Kräfte der positiven und negativen Dehnung nach außen hin zu und sind am Rand am größten (SINN, 2003). Bei einer üblichen Windlast bewegt sich der Stamm elastisch und es kommt zu keiner irreversiblen Schädigung (WESSOLLY, ERB, 1998).

Ein hohler Baumstamm, der ein dünnwandiges Rohr darstellt, versagt nach MATTHECK (2006 a) durch die hohe Kompression, die an der Druckseite ein sogenanntes Strukturversagen hervorruft. Dieses als Schalenbeulen bezeichnete Versagen findet schnell und überraschend statt (MATTHECK, 2006 a). Eine dünne Wandstärke ist nach MATTHECK (2006 a) Ursache für diesen Ablauf, jedoch wird nicht genauer erläutert, wie dünn diese ist.

Ein dickwandiges Rohr hingegen kündigt nach MATTHECK (2006 a) bzw. MATTHECK et al. (2006 b) die Einleitung des Versagens durch eine Querschnittsverflachung an. Mit zunehmender Krümmung des Stammes erzeugen die aus Zug und Druck resultierenden Kräfte, die eine querschnittsverflachende Wirkung haben, eine Ovalisierung des Stammes (MATTHECK, 2006 a). Die Ovalisierung bedingt eine schnell anwachsende Stammbiegung, ohne dass das Biegemoment signifikant ansteigt (MATTHECK, 2006 a).

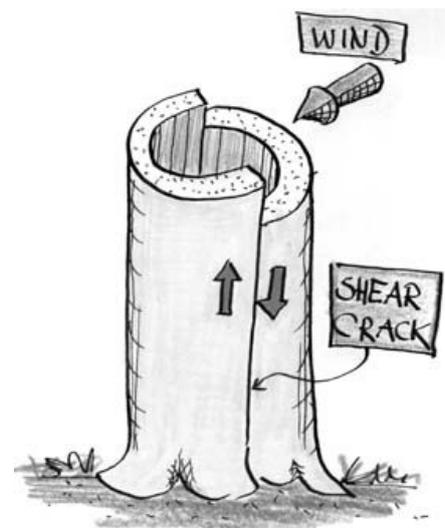


Abbildung 8: Nach MATTHECK et al. (2006 b) versagt der hohle Baum schlussendlich an einem Schubriss.

Nach MATTHECK et al. (2006 b) versagt der Baum schließlich durch einen sogenannten Schubriss.

Nach DENGLER (2014) neigen besonders dünnwandige Baumstämme zur Ovalisierung, wobei sich Tangentialzugspannungen mit Schubspannung am Rande der stärksten Krümmung überlagern und schließlich Risse gebildet werden, die letztendlich zum Versagen führen.

Demgegenüber versagt nach WESSOLLY und ERB (1998) sowie DETTER et al. (2013) ein vollholziger sowie ein hohler Baumstamm durch Faserstauchen an der windabgewandten Druckseite des Baumes.

Durch eine Überbeanspruchung der Fasern wird die Elastizitätsgrenze überschritten und es kommt zu einer irreversiblen Verformung (WESSOLLY, ERB, 1998). Die Druckfasern beginnen sich zu stauchen und begeben sich nach der Entlastung nicht mehr in ihre Ausgangsposition (WESSOLLY, ERB, 1998). Bei der Elastizitätsgrenze tritt das Primärversagen im Stamm auf und die Fasern sind plastisch verformt (DETTTER et al., 2013)

Die Materialeigenschaften sind nun verändert, es kann nicht mehr von intaktem Holz gesprochen werden, das genauso wie unbeschädigtes auf Belastung reagiert. Anders wie bei totem Holz, zum Beispiel Bauholz, muss das lebende Holz deutlich höher belastet werden um endgültig zu brechen und somit sekundär zu versagen (DETTTER et al., 2013). Der Bereich zwischen Primärversagen und Sekundärversagen ist von Baumart zu Baumart verschieden und kann unterschiedlich viel Last aufnehmen (WESSOLLY, ERB, 1998).

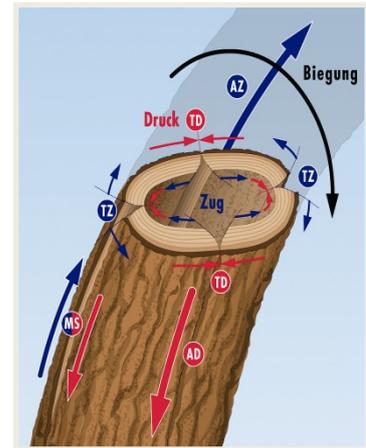


Abbildung 9: DENGLER (2014) beschreibt hier die Spannungsverhältnisse im hohlen Baumstamm, die zum Versagen führen.

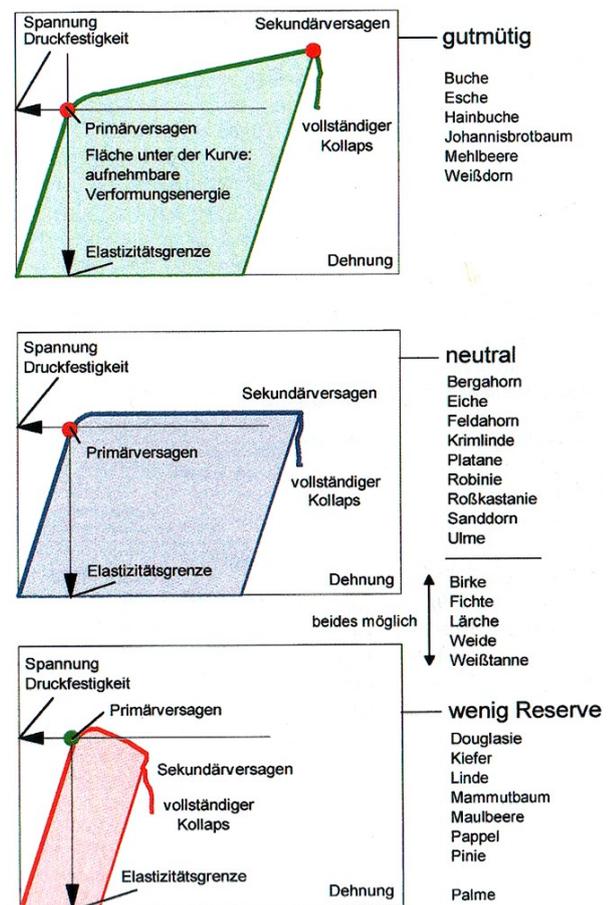


Abbildung 10: WESSOLLY und ERB (1998) beschreiben die verschiedenen Holzarten. Gutmütige Baumarten benötigen noch weitere Energie um nach dem Primärversagen schlussendlich zum Sekundärversagen überzugehen, während Bäume mit wenigen Reserven unmittelbar nach dem Primärversagen endgültig zum Sekundärversagen übergehen.

Schließlich verformt sich der hohle Baum zunehmend und wird immer ovaler bis sich durch die hohen Spannungen senkrecht zur Last seitliche Längsrisse bilden, die das Sekundärversagen darstellen (WESSOLLY, ERB, 1998).

Eine Bruchsicherheit kann nach SINN (2003) aus der minimalen Holzfestigkeit durch die maximale Spannung ermittelt werden. Der Wert der Holzfestigkeit entspricht der Druckfestigkeit längs zur Faser (WESSOLLY, ERB, 1998) (SINN, 2003). Diese Angaben sind im Stuttgarter Festigkeitskatalog nach WESSOLLY und ERB (1998) zu finden.

$$\text{Bruchsicherheit} = \text{Holzfestigkeit (kN/cm}^2\text{)} : \text{Spannung } \sigma$$

Wenn als Bruchsicherheit 1 herauskommt, kann der Baum seiner Belastung gerade noch standhalten. Sie steigt oder sinkt von 1 linear (SINN, 2003).

4. Untersuchungsgebiet

Das Versuchsgelände befindet sich am Ostende des Aubades Tulln in der Stadt Tulln an der Donau, im Bundesland Niederösterreich. Es liegt auf 177m Seehöhe über der Adria, an der Donau.

Die Basiswindgeschwindigkeit vb_{10} beträgt 26,3 m/s und der Basiswindgeschwindigkeitsdruck qb_{10} 0,43 kN/m² (ÖNORM B1991-1-4, 2011).



Abbildung 11: Ostende des Aubades Tulln, Auszug aus GOOGLEEARTH, August, 2014

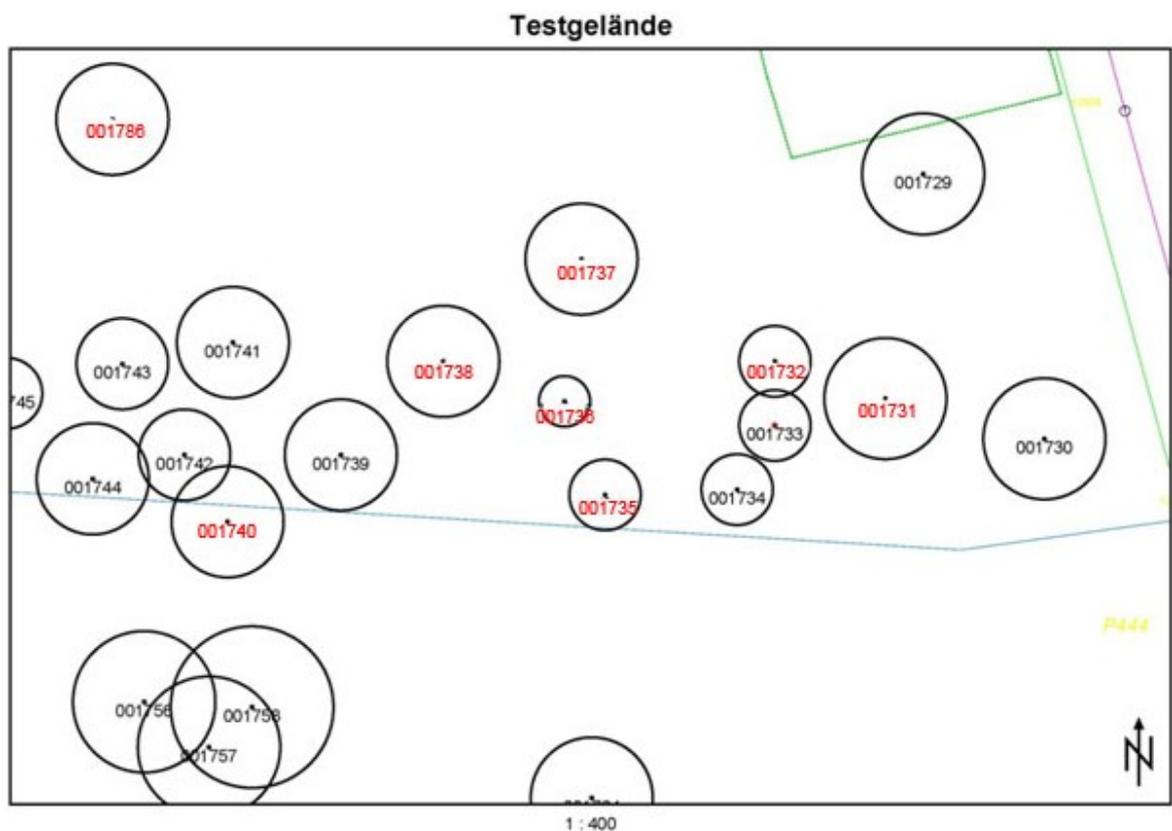


Abbildung 12: Übersichtskarte der in rot markierten getesteten Bäume. Auszug aus dem Baumkatasterplan des Aubades Tulln.

5. Die untersuchten Bäume der Versuchsreihen

Für die Versuche der *Versuchsreihe 1-8* und *9-21* wurden im Juni 2014 und im Oktober 2012, 21 Kanadische Holz-Pappeln (*Populus x canadensis*) untersucht. Die Gemeinde Tulln hat die Bäume im Aubad Tulln zur Verfügung gestellt, da sie keine ausreichenden Sicherheitsreserven aufwiesen.

Für die *Versuchsreihe 22-24* wurden im Juni 2013 eine Bergulme (*Ulmus glabra*), eine Gemeine Esche (*Fraxinus excelsior*) und ein Bergahorn (*Acer pseudoplatanus*) von der Gemeinde Spittal an der Drau zur Verfügung gestellt.

5.1 Allgemeines zur Kanadischen Holz-Pappel (*Populus x canadensis*)

Die Kanadische Holz-Pappel (*Populus x canadensis*) oder auch Bastard-Schwarz-Pappel genannt ist ein Hybrid aus der europäischen Schwarz-Pappel (*Populus nigra*) und der amerikanischen Schwarz-Pappel (*Populus deltoides*). Diese schnellwüchsige Kreuzung wurde in der Vergangenheit häufig zur Papier- und Zellstoffgewinnung genutzt (MAYER, SÖHL, 2009). Durch ihr rasches Wachstum haben viele Kanadische Holz-Pappeln (*Populus x canadensis*) nur eine geringe Lebenserwartung von 60-80 Jahren. Sie bilden häufig einen Falschkern aus, der zu einem Nasskern werden kann, der allein allerdings noch kein statisches Problem darstellt. Durch das Eindringen von Parasiten kann jedoch eine Fäule entstehen, die die Bruchsicherheit herabsetzen kann.

(DUJESIEFKEN, 2005)

5.2 Materialeigenschaften der Kanadischen Holz-Pappel (*Populus x canadensis*)

Die Werte des Stuttgarter Festigkeitskatalogs nach WESSOLLY und ERB (1998) gelten momentan als Referenzwert für Zugversuche. Es gibt jedoch noch weitere Untersuchungen der Materialkennwerte, die etwas abweichen, worauf am Ende der Masterarbeit genauer eingegangen wird.

Die Druckfestigkeit in Faserrichtung des lebenden Holzes der Hybrid-Pappeln, also auch der Kanadische Holz-Pappel (*Populus x canadensis*), beträgt 20 MPa (Megapascal) und der Elastizitätsmodul, also das Maß für die Kraft, die für eine Verformung notwendig ist, 6,050 MPa. Die Grenzdehnung liegt bei 0.33 % und die Rohdichte bei 0.88 g/cm³. (WESSOLLY, ERB, 1998)

6. Untersuchungsmethodik

6.1 Schalltomographie oder mechanische Impuls-Tomographie

Die als Schalltomographie bekannte eingehende Untersuchung ist eine Methode, um Schadstellen und Höhlungen in einer Ebene des Baumes zu ermitteln. Die Schalltomographie wurde für diese Masterarbeit verwendet, um geeignete Bäume mit ausreichend großen Höhlungen zu finden.

6.1.1 Funktion und Wirkungsweise

Schalltomographen nutzen die unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten innerhalb eines Stammes um Schäden oder Höhlungen zu entdecken (RUST et al, 2004). Die Geschwindigkeiten des Schalls hängen von der Rohdichte und dem Elastizitätsmodul ab (RUST et al., 2002). Intaktes Holz leitet den Schall schneller als zersetztes, Luft leitet den Schall noch langsamer (RINN, 2002). Wegen der verschiedenen Zersetzungsstufen hat der Schall unterschiedliche Laufzeiten und weil die bei Holz sogar innerhalb eines Stammes sehr verschieden sind, arbeitet das Programm mit relativen Schallgeschwindigkeiten. Es kalibriert sich somit bei jeder Messung selbst. (RUST et al., 2002)

6.1.2 Aufbau und Ablauf

Nägel werden in das Splintholz eingeschlagen, an deren Köpfen magnetische Erschütterungssensoren angebracht werden (RUST et al., 2002) (RINN, 2004). Anschließend werden die Stammgeometrie und die Sensorpositionen exakt erfasst (RINN, 2004). Dann wird mit einem Hammer auf einen Sensor geklopft (Impulsgeber) und die Zeit, die die ausgehenden Impulse bis zu den anderen Empfängern brauchen, gemessen (RINN, 2004). Jeder Sensor wird einmal zum Impulsgeber. Die einzelnen Laufzeiten ergeben ein Netz, aus dem das Programm ein Bild bzw. Tomogramm errechnet, das dann interpretiert werden muss.

6.1.3 Resultat

Höhlungen und Schäden, die von außen nicht ersichtlich sind, können so sichtbar gemacht und die Bruchsicherheit besser eingeschätzt werden. Da keine Barrierewände durchbrochen werden, gilt die Schalltomographie als zerstörungsfreie Methode (RUST et

al., 2002). Baumdurchmesser unter 30 cm sollten nicht unterschritten werden (RUST et al., 2002). Die Schalltomographie ist aber nur eine punktuelle Aufnahme in einer Messebene und liefert kein ganzheitliches Bild (RINN, 2004). Um sicher zu gehen, dass die Versuchsbäume eine ausreichende Höhlung aufweisen, wurden sie vorab durch Schalltomographien untersucht. Es wurde der PICUS Schalltomograph der Firma Argus electronic GmbH, Rostock, verwendet.

6.2 Der statische Zugversuch

Zugversuche werden in vielen Bereichen als Materialtest eingesetzt, wobei häufig die Materialkennwerte durch das Zerreißen der Probe erhoben werden. Anders als die zerstörenden Zugversuche gilt dieser Versuch in der Baumdiagnostik als zerstörungsfreie Untersuchungsmethode, die seit vielen Jahren in der biomechanischen Forschung angewandt wird (DETTTER, RUST 2013). Er wurde von Lothar WESSOLLY und Günter SINN in den 1980er-Jahren entwickelt und wird seither zunehmend angewendet (DETTTER et al., 2014). Zurzeit gibt es einige unterschiedliche Verfahren, die alle auf der Entwicklung von WESSOLLY und SINN aufbauen.

Bei der Prüfung zur Stand- und Bruchsicherheit von Straßenbäumen bietet der statische Zugversuch eine weitestgehend zerstörungsfreie Methode. Schadhafte Gefahrenbäume können so erkannt und Maßnahmen zum möglichen Erhalt der Bäume eingeleitet werden. Im Gegensatz zu allen anderen gängigen Untersuchungsmethoden ermöglicht der Zugversuch bezüglich Bruch- und Standsicherheiten eindeutige Aussagen (RUST, 2008). Es ist auch die einzige Methode die alle drei Faktoren der Statik, Material, Form und Last berücksichtigt.

6.2.1 Eine zerstörungsfreie Methode

Der Zugversuch ist eine zerstörungsfreie Untersuchung, um Bäume auf ihre Verkehrssicherheit eingehend zu prüfen (RUST, 2008) (WESSOLLY, ERB, 1998) (DETTTER, RUST, 2013). Einzig die Nägel, die nur einige Millimeter ins Splintholz geschlagen werden, bilden kleine Verletzungen, diese werden im Normalfall schnell und ohne weitere Folgen abgeschottet.

6.2.2 Ablauf und Aufbau

Im Rahmen einer meist optischen Baumkontrolle werden die Bäume selektiert, bei denen die Stand- und Bruchsicherheit zweifelhaft ist. Die mit einem Zugseil imitierte Windlast wird mit Hilfe einer Handwinde (Greifzug) aufgebaut und mit einem Forcemeter gemessen (BRUDI, WASSERNAER, 2002) (RUST, 2008). Dabei muss der Horizontalwinkel des Zugseiles gemessen und die Zugkraft in eine vertikale und horizontale Komponente zerlegt werden. Für die Messung ist nur die Horizontalkomponente wichtig.

6.2.3 Messung der Bruchsicherheit

Mit einem Elastometer wird im prognostizierten Versagensbereich die Faserdehnung gemessen (DETTTER et al., 2014). Dieses sendet ca. vier Messungen pro Sekunde über Funk an die Basisstation, die an einen Computer angeschlossen ist und die Daten aufzeichnet. Die Elastometer messen einen Bereich von 20 cm, zwischen zwei Nägeln, die in das Splintholz eingebracht werden. Ausschlaggebend ist die Randfaser, also jene Faser mit der größten Belastung (DETTTER et al., 2014). Meist kommen vier Elastometer zum Einsatz, die im μm Bereich messen. Um eine Überbelastung und ein damit verbundenes Versagen der Fasern zu vermeiden, muss unterhalb der für die Baumart typischen Grenze der Druckbelastung gemessen werden (DETTTER et al., 2014). Diese kann man unter anderem im Stuttgarter Festigkeitskatalog (1998) von Lothar WESSOLLY finden.

Die mittels Elastometer gemessene Faserverformung wird bis zu dem jeweiligen Richtwert für die Proportionalitätsgrenze extrapoliert, um die Belastbarkeit des Stammes zu eruieren. Die Genauigkeit der Extrapolation hängt von der Anzahl der Messwerte sowie der Annäherung an die Proportionalitätsgrenze ab. Es sollen mehr als 50 Messwerten erhoben oder mindestens ein Drittel der Proportionalitätsgrenze erreicht werden (DETTTER, RUST, 2013).



Abbildung 43: Elastometer am Stamm montiert, *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.



Abbildung 14, 15: Forcemeter während eines Zugversuches zwischen zwei Seilen montiert, Aubad Tulln, Juni 2014.

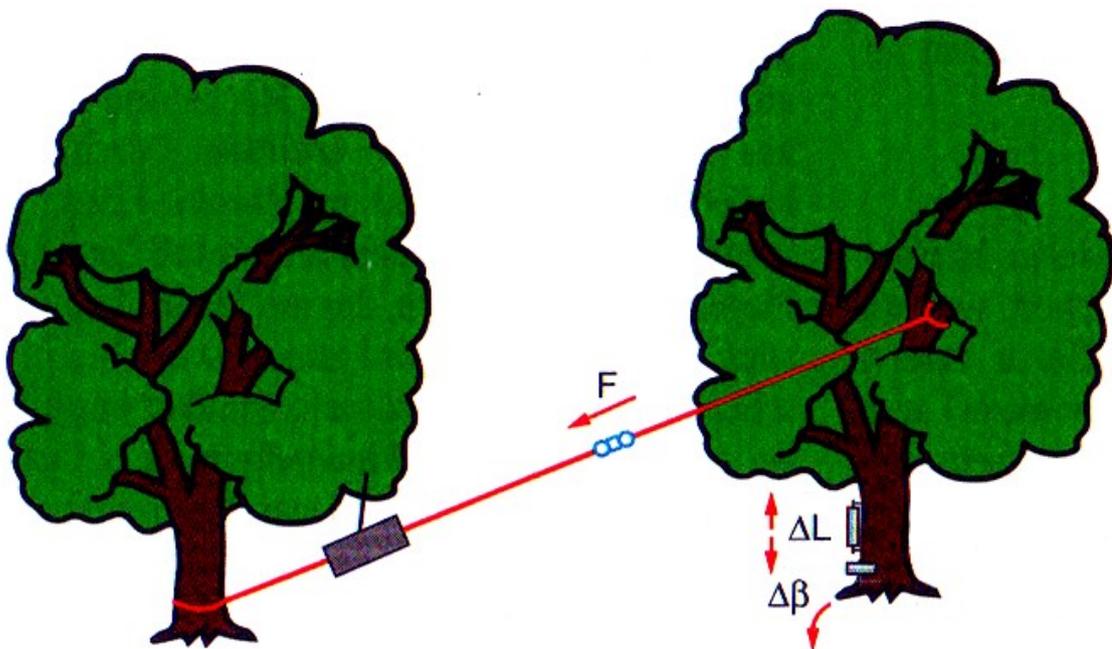


Abbildung 16: Aufbau eines Zugversuches (Eigenbearbeitung nach DETTER, RUST, 2013).

F = Zugkraft gemessen durch ein Forcemeter.

$\Delta\beta$ = Neigungsmessung durch ein Inclinometer.

ΔL = Messung der Faserdehnung durch ein Elastometer.

6.2.4 Messung der Standsicherheit

Neben der Ermittlung der Bruchsicherheit kann mit dem Zugversuch auch die Standsicherheit ermittelt werden (RUST, 2008).

Die Neigung der Wurzelplatte wird mit einem Inclinometer gemessen, das möglichst tief am Übergang von Erde zu Wurzelanlauf anzubringen ist, um nicht auch die Stammbiegung zu messen. Dazu wird eine Halterung mit zwei dünnen Stiften in das Holz eingeschlagen, auf das das Inclinometer montiert wird. Die Geräte messen die Neigung in zwei Richtungen - 90° zueinander - was bedeutet, dass eine der beiden Ebenen genau in Zugrichtung ausgerichtet sein muss. Auch sie senden ihre Neigungsdaten ca. viermal pro Sekunde an die Basisstation, die mit einem Computer verbunden ist. Neigungswinkel von maximal 0,25° geben Aufschluss über die Verankerungskraft der Bäume, da bis zu diesem Winkel die Verformung voll reversibel ist und keine dauerhaften Schäden am Wurzelsystem verursacht werden (DETTNER, RUST, 2013).



Abbildung 67: Die Basisstation bekommt die Messdaten der Geräte über Funk und überträgt sie zu einem Computer der sie aufzeichnet, Aubad Tulln, Juni 2014.



Abbildung 58: Die Ausrichtung des Inclinometers in Zugrichtung, *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

6.2.5 Auswertung der Bruchsicherheit

Mit Hilfe einer Auswertungssoftware (z.B. ARBOSTAT) kann die Faserdehnung bei der bekannten Zuglast auf die Belastung bei voller Windlast an diesem Standort hochgerechnet werden (RUST, 2008). Da die Grenzdehnung der Druckfasern bekannt ist (z.B. Stuttgarter Festigkeitskatalog (1998)), kann ermittelt werden, ob der Baum dieser Last standhält. Dabei geht der Zugversuch von Faserstauchung als Primärversagen im Stamm auch bei starker Höhlung aus (WESSOLLY, ERB, 1998) (SINN, 2003) (DETTNER, RUST, 2013). Nicht alle Wissenschaftler schließen sich dieser Meinung an, weshalb es Gegenstand dieser Masterarbeit ist, Antworten auf diese Frage zu finden.

6.2.6 Auswertung der Standsicherheit

Nach WESSOLLY und ERB (1998) läuft der Kippvorgang der Bäume sehr ähnlich ab, wie in der „Verallgemeinerte Kippkurve“ dargestellt. Sie besagt, dass alle Bäume bei rund $0,25^\circ$ Wurzelplattenneigung 40% der Kipplast und bei rund $2,5^\circ$ 100 % der Kipplast erreicht haben (SINN, WESSOLLY, 1989). Ab $2,5^\circ$ Neigung kippt der Baum, ohne dass die Zuglast weiter erhöht werden kann (SINN, WESSOLLY, 1989). So wird die Neigung von maximal $0,25^\circ$ auf $2,5^\circ$ hochgerechnet, anschließend die für die Neigung erforderliche Windlast extrapoliert und diese anschließend mit der für die Windstärke 12 geschätzten Windlast verglichen (RUST, 2008).

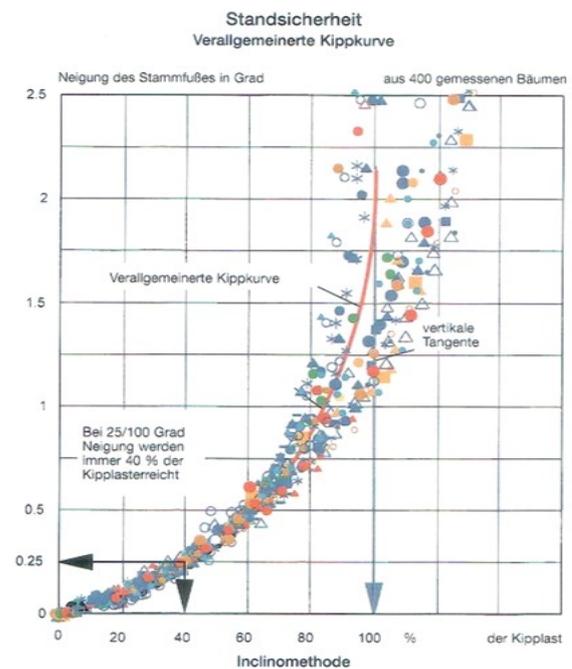


Abbildung 19: „Verallgemeinerte Kippkurve“ nach WESSOLLY und ERB (1998).

6.2.7 Einfluss der Witterung auf Zugversuche

Da Zugversuche zur Einschätzung der Bruch- und Standsicherheit zu allen Jahreszeiten und Witterungen durchgeführt werden, stellt sich die Frage, ob diese Witterungen Einflüsse auf die Ergebnisse haben. RUST et al. (2013) haben festgestellt, dass sowohl die Bodenfeuchte, als auch die Temperatur Einfluss auf die Wurzelballenneigung, sowie die Steifigkeit des Stammes haben. Im Falle von feuchten oder nassen Böden ist die Standsicherheit vermindert, während durch Frost die Bruch- und Standsicherheit erhöht wird (RUST et al., 2013). Daher sollten Zugversuche in langanhaltenden Frostperioden, wie auch bei überdurchschnittlicher Bodenfeuchte vermieden werden (RUST et al., 2013).

6.2.8 Einfluss von Bodeneigenschaften auf Zugversuche

Der Einfluss der Bodenart wurde bisher noch nicht umfangreich dokumentiert und erforscht. Da aber von einem „lastgesteuerten Wachstum“ der Bäume ausgegangen wird, ist auch anzunehmen, dass sich die Verankerung des Baumes an den jeweiligen Scherwiderstand des Substrates anpasst.

6.2.9 Einfluss baumspezifischer Eigenschaften auf Zugversuche

Die unterschiedlichen Baumarten haben verschiedene Holzeigenschaften und Richtwerte (DETTTER, RUST, 2013). Diese können unter anderem aus dem Stuttgarter Festigkeitskatalog nach WESSOLLY und ERB (1998) entnommen werden. Weiters ist auch das Alter der Bäume entscheidend, da die Fasern junger Bäume eine geringere Druckfestigkeit aufweisen und eine höhere kritische Stauchung haben, was möglicherweise mit dem niedrigen Elastizitätsmodul des jungen Holzes zusammenhängt (DETTTER, RUST, 2013). Innerhalb der gleichen Baumart treten ebenfalls Streuungen auf, die auf die suboptimale Prüfung in Labors zurückzuführen ist (DETTTER, RUST, 2013). Auch im Bereich der Wurzelballenneigung von $0,25^\circ$ gibt es Unterschiede zwischen den Baumarten, wie derzeit in einigen Untersuchungen gezeigt wird (DETTTER, RUST, 2013).

6.3 Der Zugversuch als wissenschaftliche Untersuchung

In dieser Masterarbeit wird die Methode des Zugversuches etwas abgeändert angewandt, um neue Erkenntnisse über die Primärversagensursache von hohlen Baumstämmen zu erlangen. Es wird eine ähnliche Untersuchungsmethode wie bei der Feldstudie von DETTTER et al. (2014) verwendet. Die Bäume werden dazu so stark wie möglich belastet, um ein Primärversagen der Stammbiegung zu erreichen, oder wenn möglich den Baum sogar zu brechen. Die Materialien, wie Seile und Winde, müssen in diesem Fall höhere Belastungen als bei einem normalen Zugversuch aushalten, da mit höheren Lasten gearbeitet wird. Es wurden Messgeräte aus der Serie des TreeQinetic-Systems der Firma argus electronics GmbH, Rostock, verwendet. Inclinometer wurden am Stammfuß und in einer Höhe von 6 m montiert (DETTTER et al., 2014). Durch das Subtrahieren der Messungen des unteren Inclinometers vom oberen kann die Stammbiegung im Bereich von null bis sechs Metern gemessen werden (DETTTER et al., 2014). Das Ergebnis ist somit die reine Stammbiegung, die für die Versuche benötigt

wird, um das Primärversagen im Stamm festzustellen. Zeitgleich wird die Faserdehnung an der Druckseite des Stammes mit vier Elastometern gemessen, die in 50 cm Abständen montiert sind. Elastometer messen die Veränderung (Streckung oder Stauchung) des Abstandes zwischen zwei 20 cm weit entfernten Punkten. Der Messgerätemittelpunkt ist in den Stammhöhen 50 cm, 100 cm, 150 cm und 200 cm an der Randfaser der Druckseite montiert. Somit wird die Faserveränderung von insgesamt nur 80 cm gemessen. Auf den Höhen der Elastometer werden auch die Stammumfänge mittels Maßband bzw. Kluppe gemessen.



Abbildung 20: Mit einer Handseilwinde wurde teilweise bis zum Baumbruch gezogen, Aubad Tulln, Juni 2014.



Abbildung 21: Die benötigte Zugkraft war relativ hoch (bis zu 52 kN). Dementsprechend musste viel Kraft aufgewendet werden, Aubad Tulln, Juni 2014.

Zwischen zwei Seilen wird ein Forcemeter befestigt, das die Zugkraft in kN misst. Die Messgeräte senden drei bis fünf Messungen pro Sekunde per Funk zur Basisstation. Diese ist an einem Computer angeschlossen, der mithilfe des Programmes TreeQinetic die Messdaten aufzeichnet. Die Instrumente wurden so lange wie möglich am Baum belassen, um möglichst viele Daten, eventuell auch von Symptomen, wie Rissen im Stamm, zu bekommen. Um ein Beschädigen der Geräte zu vermeiden, müssen diese jedoch rechtzeitig vor einem möglichen Fall des Baumes abmontiert werden. Da sie nach dem Abnehmen manchmal nicht abgeschaltet wurden und weiter gesendet haben, mussten die Messdaten vor der Auswertung noch kontrolliert werden. Die nach dem Abbau sämtlicher Apparaturen aufgezeichneten Messdaten müssen entfernt werden, um eine Verfälschung der Auswertung zu vermeiden. Die Baumhöhe wird mittels Baumhöhenmessgerätes der Serie Vertex IV-GS der Firma Haglöf gemessen, das die Entfernung des Standortes vom Baum und den Winkel zur Baumkrone misst, wodurch die Höhe ermittelt werden kann. Die Lastrichtung wurde mithilfe eines Kompasses und der Seilwinkel mit einem Winkelmessgerät ermittelt.

7. Auswertung der Ergebnisse

Die Resultate der Messungen müssen für jeden Baum einzeln analysiert werden, da Bäume natürliche Konstruktionen mit unterschiedlichen Reaktionen sind. Nur so kann auf Eigenheiten des Baumes und der Messung eingegangen werden.

7.1 Schalltomographien

Ein Programm errechnet aus allen gemessenen Laufzeiten ein Bild des Stammquerschnittes, in dem die unterschiedlichen Bereiche farblich visualisiert werden. Die in blau dargestellten, langsamsten Schalllaufzeiten zeigen massive Faulstellen oder Höhlungen an. Die schnellsten Laufzeiten sind dunkelbraun dargestellt. Die Schallgeschwindigkeiten h können selbst im intakten Holz der gleichen Baumart sehr unterschiedlich sein, weshalb nur die relativen Laufzeiten miteinander verglichen werden können (RUST et al., 2004). Alle Geschwindigkeiten pro Messung werden zwischen die schnellste und langsamste gereiht, die dann zusammen ein repräsentatives Bild des tatsächlichen Stammquerschnittes ergeben. Ein zusätzliches Problem ist, dass der Impuls radial zu den Jahrringen langsamer läuft, als tangential zu ihnen (RINN, 2004). Daher werden, falls in der Mitte keine Fäule vorhanden ist, die Bereiche zwischen den Messpunkten als geschädigt dargestellt, obwohl hier gesundes Holz vorhanden ist. Liegt ein Schaden im Stamminneren vor, so sinkt dort die Laufzeit so stark, dass sich diese zwischen den Messpunkten nur so wenig verkürzen, dass sie als intakt dargestellt werden.

7.2 Zugversuche

Anhand von Graphiken können die bei den einzelnen Messreihen erhaltenen Rohdaten verbildlicht und somit die Abläufe und Erkenntnisse besser verstanden und interpretiert werden. Die Skalierung der Diagramme ist unterschiedlich damit Prozesse deutlicher erkannt werden können. Ein Vergleich der einzelnen Bäume untereinander folgt in Punkt 9.

7.2.1 Theoretische Grundlagen

Durch den Greifzug wird Kraft (F), gemessen in kN, in das Seil eingeleitet und ein Biegemoment (M), sowie ein Widerstandsmoment (W) verursacht. Gleichzeitig steigen

damit die Biegung des Stammes, die durch Inclinomater in Grad ° gemessen wird, und die Faserdehnung, die durch Elastometer in µm gemessen wird. Dadurch verändern sich die Quotienten, also die Spannung (σ) und die Dehnung (ϵ) aus dem Elastizitätsmodul (E), was in Graphiken als Steigung der Messpunkte ersichtlich ist. Sobald sich die Dehnung (ϵ) nicht mehr proportional zur Spannung (σ) verhält, folgen diese nicht mehr der idealisierten Gerade nach dem HOOKE'schen Gesetz und es kommt zu einer plastischen Verformung, bei der die Elastizitätsgrenze überschritten wird, zum Primärversagen.

Es können sich aber noch andere Parameter ändern und eine Krümmung der Graphen hervorrufen, deshalb ist es bei der Analyse der Grafiken wichtig zu klären, ob sich tatsächlich die Dehnung (ϵ) unproportional verhält. So kann sich auch die geometrische Form des Stammquerschnitts (z.B. durch Ovalisierung oder Rissbildung) ändern und damit das Widerstandsmoment (W) beeinflussen und somit eine Krümmung in den Diagrammen verursachen.

Auch eine Veränderung des Hebelarms (L) kann das Biegemoment (M) beeinflussen und somit eine Krümmung der Graphen hervorrufen. Durch die Biegung des Stammes verkürzt sich der Hebelarm der Lasteinleitung, allerdings nur in einem vernachlässigbaren Ausmaß.

Um einerseits besser verständliche und vorstellbare Abläufe in den Graphiken zu zeigen, wird nicht der Elastizitätsmodul (E) sondern der beeinflussende Faktor, nämlich die Kraft (F) in kN berechnet und im Verhältnis zur absoluten Faserdehnung in µm bzw. zur absoluten Stammbiegung in Grad ° dargestellt. Andererseits lässt sich dadurch der Zusammenhang zwischen Faserdehnung und Stammbiegung darstellen.

7.2.2 Primärversagen

Der Punkt des Primärversagens ist in den Diagrammen nicht an einem Wert festzumachen. Das hat einerseits damit zu tun, dass es sich um ein lebendes Material handelt und andererseits, dass äußere Einflüsse, wie Seilwindebewegungen, eine große Streuung verursachen. Diese können die Linearität des Graphen beeinflussen. Deshalb wurde eine Abweichung von zwei Prozent der idealisierten, linearen Gerade bestimmt,

anhand derer das Primärversagen festgemacht werden kann (DETTTER, persönliche Mitteilung).

Um den Bereich des Primärversagens besser eruieren zu können, wurde in den Graphiken eine geschätzte Gerade durch die Messpunkte der Stammbiegung gelegt. Diese ist nicht gemittelt und wurde nicht berechnet, da sie einzig eine optische Unterstützung bei der Analyse und Interpretation der Graphen bieten soll. Wichtig für die Versuche ist nicht die Eingrenzung des Primärversagens auf einen exakten Punkt, sondern es dient der Unterscheidung zu anderen Versagensarten sowie dem Erkennen von Zusammenhängen zwischen Stammbiegung und Faserstauchen.

Sobald eines der Elastometer das Überschreiten der Elastizitätsgrenze anzeigt, dürfen die Aufzeichnungen der anderen bezüglich der Elastizitätsgrenze nicht mehr verwendet werden, da das Material und dessen Eigenschaften sich schon verändert haben (DETTTER, persönliche Mitteilung).

Die Stammbiegung wird auf einer Länge von sechs Metern gemessen und die Faserstauchung auf 4 x 20 cm. Es ist also denkbar, dass in der Stammbiegung ein Faserstauchen registriert wird, das außerhalb des Messbereiches der vier Elastometer stattgefunden hat. Somit wird ein Versagen der Stammbiegung angezeigt, aber im Bereich der Elastometermessungen gar nicht oder nur leicht. So war das Primärversagen bei den Werten der Stammbiegung manchmal deutlicher sichtbar als bei denen der Elastometer.

7.2.3 Entwurzelung

Viele Bäume haben während der Zugbelastung auch begonnen zu entwurzeln. Bis zu rund 2,5° Wurzelballenneigung kann die Zugkraft weiter erhöht werden, danach geht die gesamte Zugkraft in die weitere Wurzelballenneigung. Die Stammbiegung bleibt einige Zeit lang konstant, und nimmt dann wieder ab, was man im Diagramm durch einen charakteristischen

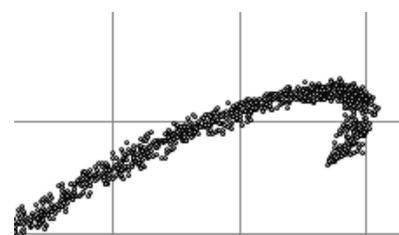


Abbildung 22: Typischer Haken nach dem Primärversagen was auf eine Entwurzelung hindeutet, *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, September 2012.

Hacken erkennen kann. Die Kraft, Stammbiegung und auch die Faserstauchung sinken wieder. Da für unsere Versuche keine interessanten Werte mehr zu erwarten waren, wurden sie an dieser Stelle meistens abgebrochen.

Wenn einzelne Wurzeln nach und nach reißen, erhöht sich die Zugkraft bis zum Abriss und fällt danach wieder ab, dies ist in den Graphiken als Zick-Zack Haken zu sehen.

7.2.4 Exogene Einflüsse

Der Verlauf der Diagramme kann Unregelmäßigkeiten zeigen, die nicht vom Material her rühren, sondern durch äußere Einflüsse, z.B. bei der manuellen Lasterhöhung verursacht wurden. Sobald durch eine Pause die weitere Zuglaststeigerung unterbrochen wird, ist die Dehnung der Zugseile merkbar und die Belastung geht zurück. Das ist in der Graphik als Abweichung erkennbar.

Außerdem ist es vorgekommen, dass der Bediener des Greifzuges beim Schwenken der Hebelstange genau in der Eigenfrequenz des Baumes die Last eingeleitet hat und es so zu einer Resonanzanregung gekommen ist. Auch dieses rhythmische Schwingen ist in den Graphiken erkennbar.

Es kam auch vor, dass der Haltegurt des Greifzuges gerutscht und die Zugkraft kurz abgefallen ist.

7.2.5 Andere Schadsymptome

Risse können die Form des Stammes und damit das Widerstandsmoment (W) verändern. Kommt es zu Rissen im Stamm, zeigt sich das meist durch einen Sprung in den Datenreihen. Die Stammbiegung nimmt plötzlich stärker zu, während die Faserdehnung uneinheitlich reagiert. Bei einigen Elastometermessungen entspannen sich die Fasern und andere werden plötzlich mehr komprimiert, während wieder andere vom Riss unberührt bleiben. Zu unterscheiden sind auch plötzlich auftretende Risse, die meist auch von einem lauten Knacken begleitet wurden oder sich langsam vergrößernde Risse, die sich mehr durch ein Knistern bemerkbar machen und nur kleine Sprünge bei den Messdaten zeigen.

Einige Risse sind erst aufgetreten, als die Messgeräte bereits abmontiert waren und versucht wurde, den Stamm zu brechen. Dabei konnte nicht riskiert werden, dass der Baum mit den befestigten Messgeräten bricht und sie dabei beschädigt.

8. Ergebnisse

8.1 Versuchsreihe 1-8

8.1.1 Baum 1 (*Populus x canadensis* – Nr. 1731)



Abbildung 23: Die Krone des Baumes von Süden fotografiert, Baum 1: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.



Abbildung 24: Anordnung der Geräte am Baum in 50 cm Abständen, Baum 1: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

Baum- und Versuchsdaten:

Lastrichtung	Stammdurchmesser in 1m Höhe in cm	Rindendicke in cm	Baumhöhe in m	Seilangriffs- punkt in m	Seilwinkel in Grad °
Südwest	61,8	4	28	17,3	19,9

Stammdurchmesser parallel (||) und normal (⊥) zur Zugrichtung in der Höhe der Elastometer:

	Höhe in cm	∅ in cm	∅ ⊥ in cm
Elastometer 1 (Blau)	50	77	64
Elastometer 2 (Gelb)	100	61	58
Elastometer 3 (Rot)	150	60	57
Elastometer 4 (Grün)	200	59	56

Schalltomographie

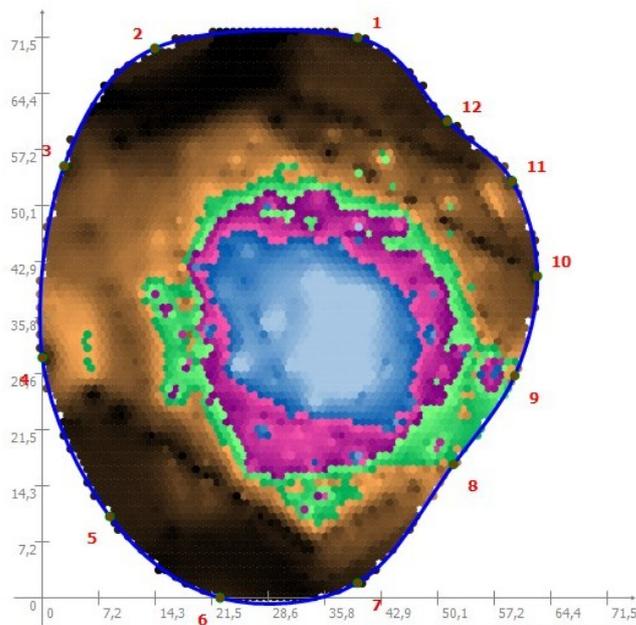


Abbildung 25: Schalltomographie des Baumes 1 der Versuchsreihe 1-8. Die X- und Y –Achse des Diagrammes sind in cm angegeben, *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.



Abbildung 26: Schnitt des Baumstammes in 50 cm Höhe. Das deutlich verfärbte Holz rund um die Höhlung wird in der Schalltomographie als intakt dargestellt, Baum 1: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

In der linken oberen Abbildung ist deutlich zu erkennen, dass in der Mitte des Stammes langsamere Laufzeiten als am Rand gemessen wurden, da der Impuls um die Höhlung herumlaufen muss und somit einen längeren Weg hat. Im Vergleich mit dem realen Schnittbild des Baumstammes, das oben rechts zu sehen ist, ist eine hohe Genauigkeit des Tomogramms zu erkennen. Die verschiedenen Zersetzungsgrade sind sehr genau dargestellt, trotzdem kann nur schwer eine Aussage über deren statische Wirksamkeit gemacht werden.

Zugversuch

Wie in der Abbildung 27 zu sehen, wird im Bereich von ca. 15 kN – 18 kN, bei ca. 2,5° - 3° Stammbiegung die Linearität verlassen und der Stamm verformt sich plastisch. Bei dieser Last hat der Stamm primär versagt, wobei man aus dem Diagramm nicht ablesen kann, wo innerhalb der sechs Meter der Stamm versagt hat und was die Ursache war. Mit Fortdauer des Versuches wurde der Baum zunehmend entwurzelt und wie in der „verallgemeinerten Kippkurve“ beschrieben eine Maximalkraft erreicht, hier rund 24 kN, die nicht überschritten werden kann. Danach sinkt die Kraft, die für weiteres Kippen erforderlich ist, bis der Baum durch das Eigengewicht von selbst stürzt. Da dieser Verlauf für diese Arbeit nicht relevant war, wurde der Versuch schließlich abgebrochen.

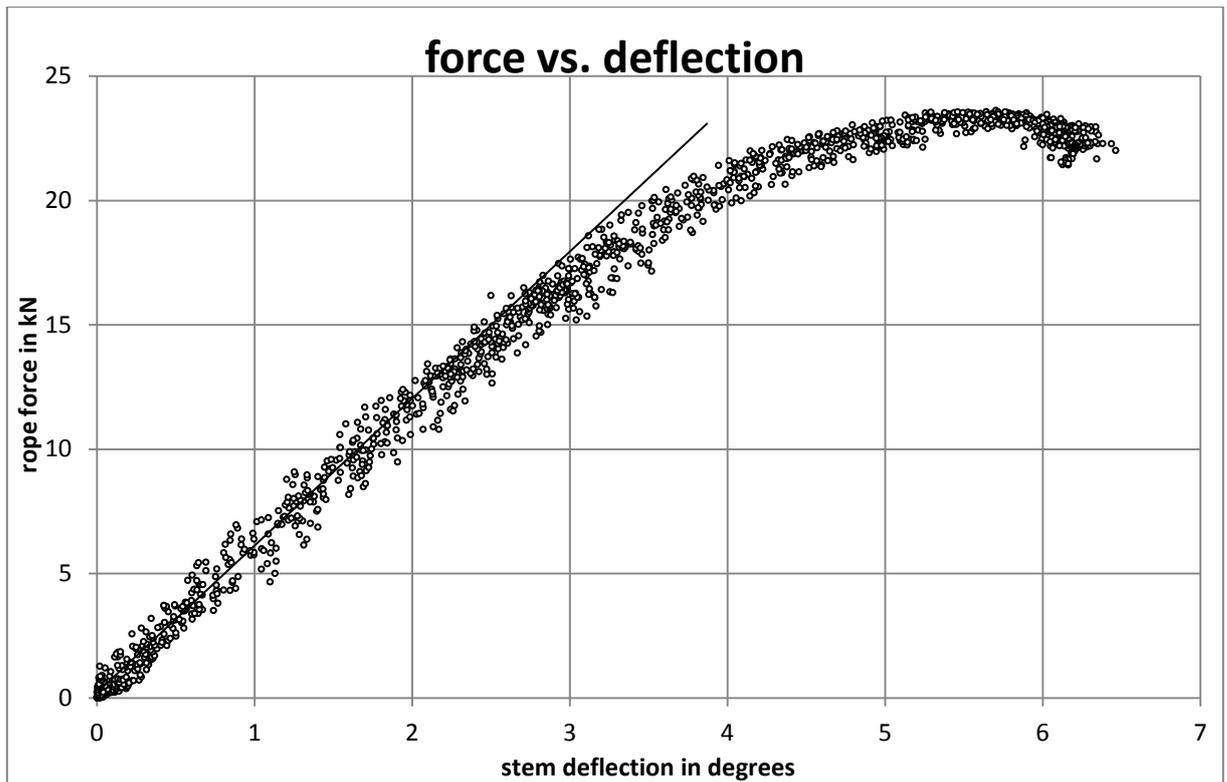


Abbildung 27: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und Stammbiegung in Grad °, Baum 1: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

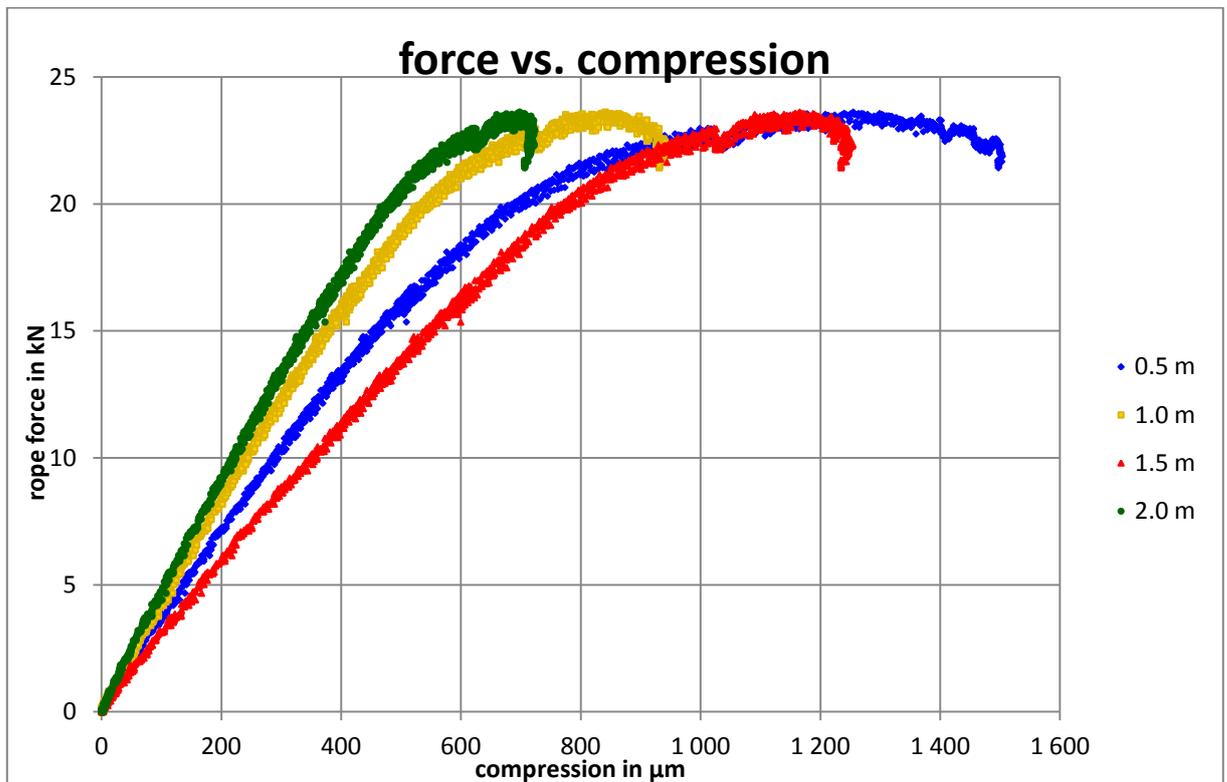


Abbildung 28: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und Faserkompression in μm , Baum 1: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

Die Messdaten des blauen Elastometers zeigen ein Primärversagen im Bereich von ca. 15 kN, während die anderen Daten der Elastometer erst bei 17 kN – 19 kN eine Krümmung bilden.

Die Krümmungen, die zeitgleich bei etwa 23 kN auftauchen, zeigen ein Anhalten der Zugkraft, die durch eine Zugpause des Greifzugbedieners hervorgerufen wurde.

Die Haken am Ende des Graphen zeigen das langsame Entwurzeln des Baumes, bei dem einzelne Wurzeln abreißen. Dabei wird bis zum Abriss immer wieder neue Zugkraft aufgebaut, die beim endgültigen Reißen wieder fällt. Auch die Faserstauchung geht leicht zurück, da bei sinkender Beanspruchung auch die Fasern entlastet werden. In den Rohdaten der Messreihen ist das deutlich sichtbar, jedoch im Graphen schwerer zu erkennen. Bei vollständiger Entlastung kehren die Werte nicht mehr in ihre alte Ausgangsposition zurück, da ein Primärversagen eingetreten ist.

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Der Zusammenhang zwischen dem Primärversagen der Stammbiegung und dem Primärversagen der Faserkompression ist deutlich anhand der Graphiken zu sehen. Beide finden bei gleicher Last zur gleichen Zeit statt.

Es gibt keinen Hinweis auf einen Riss oder eine Ovalisierung des Querschnittes. Das Primärversagen Faserstauchen ist, ohne mit freiem Auge erkennbaren Anzeichen, eingetreten.

Beobachtungen und Anmerkungen

In südlicher Richtung - also in Zugrichtung - befindet sich ein vermutlich verdichteter Boden. Dieser Umstand hat wahrscheinlich Einfluss auf die Verankerungskraft der Wurzeln in diesem Bereich, da einige davon abgestorben sein könnten. Auch das ständig steigende und sinkende Grundwasser im Aubereich könnte diese zum Absterben gebracht haben.

Während des Zugversuches waren immer mehr Risse im Boden zu sehen und auch Bruchgeräusche der Wurzeln zu vernehmen. Anhand der schnell steigenden Neigungswerte der Wurzelplatte war abzusehen, dass der Baum im weiteren Verlauf ein Standversagen und kein vollständiges bzw. sichtbares Bruchversagen erleiden würde. Wie in der „verallgemeinerten Kippkurve“ nach WESSOLLY und ERB (1998) beschrieben, ließ sich die Zugkraft des Seiles nicht mehr erhöhen. Eine weitere Zugbelastung hätte ein Kippen des Baumes bewirkt, was für den Versuch jedoch unerwünscht gewesen wäre.



Abbildung 29: Während des Zugversuches waren neben dem rasch steigenden Neigungswinkel des unteren Inclinometers auch deutlich Risse und Geräusche im Boden – auf der Zugabgewandten - zu vernehmen, Baum 1: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.



Abbildung 30: Schnitte des Baumstammes in der Höhe von 1.50 m und 2 m zeigen einen deutlich schwächeren Zeretzungsgrad des Holzes, Baum 1: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

8.1.2 Baum 2 (*Populus x canadensis* - Nr. 1735)



Abbildung 31: Der vierte Baum von links wird gerade für den Zugversuch vorbereitet, *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.



Abbildung 32: Anordnung der Geräte am Baum in 50 cm Abständen. Eine angelehnte Leiter zur Befestigung des Inclinometers in 6 m Höhe, *Populus x canadensis*. Aubad Tulln. Juni 2014.

Baum- und Versuchsdaten:

Lastrichtung	Stammdurchmesser in 1m Höhe in cm	Rindendicke in cm	Baumhöhe in m	Seilangriffs- punkt in m	Seilwinkel in Grad °
Südwest	75,1	4	30,5	13,4	20,3

Stammdurchmesser parallel (II) und normal (_I_) zur Zugrichtung in den Höhen der Elastometer:

	Höhe in cm	Ø II in cm	Ø _I_ in cm
Elastometer 1 (Blau)	50	85	85
Elastometer 2 (Gelb)	100	75	73
Elastometer 3 (Rot)	150	68	68
Elastometer 4 (Grün)	200	63	66

Schalltomographie

In der rechts gezeigten Abbildung ist zu erkennen, dass eine große Höhlung in der Mitte des Stammes vorhanden ist, die in hell- und dunkelblau dargestellt ist. Hier sind die langsamsten Laufzeiten gemessen worden. Schnelle Laufzeiten wurden im Randbereich gemessen, die dem Tomogramm nach intaktes, lebendes Splintholz darstellen. Da es wenig Zwischenbereiche zwischen blau und braun gibt, ist bei diesem Baum anscheinend eine scharfe Grenze zwischen Höhlung und intaktem Holz vorhanden.

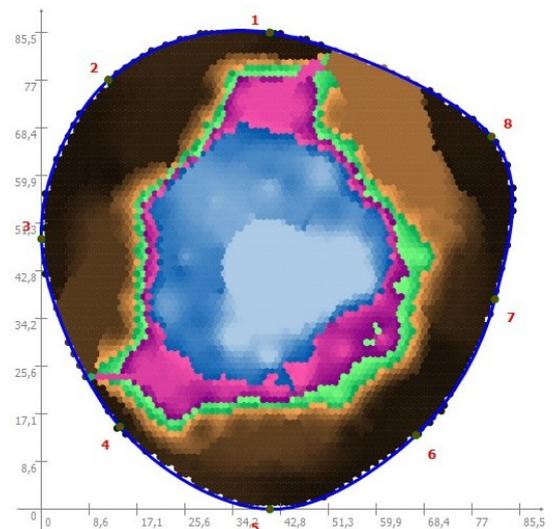


Abbildung 33: Schalltomographie des Baumes 2 der Versuchsreihe 1-8. Die X- und Y -Achse des Diagrammes sind in cm angegeben, *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

Zugversuch

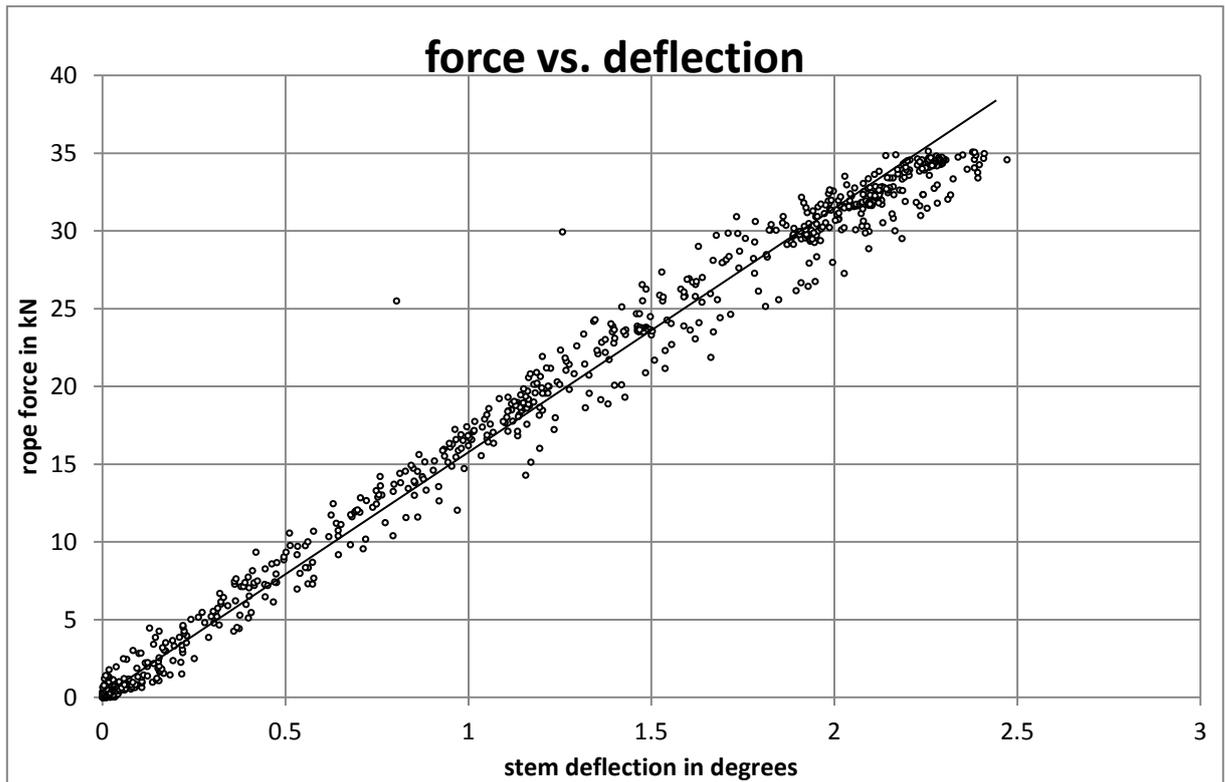


Abbildung 34: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und Stammbiegung in Grad °, Baum 2: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

In der oben gezeigten Graphik ist ein linearer Anstieg der Messpunkte bis ungefähr 30 kN zu sehen. Danach kann man eine leichte Krümmung zwischen 30 kN und 35 kN erkennen, die aber zu wenig ausgeprägt ist, um eindeutig ein Primärversagen feststellen zu können. 35 kN ist die Maximalkraft, die mit dem Greifzug bei diesem Baum aufgebracht werden konnte, weshalb der Versuch abgebrochen wurde.

Erwähnenswert ist die größere Dichte der Punktwolke zwischen 30 kN und 35 kN, worauf bei der Analyse der Faserstauchung eingegangen wird. Die beiden Ausreißer sind vermutlich auf Fehler in der Datenübertragung zurückzuführen.

Das nachfolgende Diagramm (Abb. 35) zeigt einen sehr linearen Verlauf mit einer leichten Krümmung bei rund 33 kN Zugkraft. Das könnte das Primärversagen passend zu der Krümmung der Stammbiegung sein. Es ist aber nicht ausgeprägt genug, um eine eindeutige Aussage zu tätigen.

Auffallend ist die Unterbrechung der Datenreihe des roten Elastometers zwischen 30 kN und 33 kN. Bei genauer Betrachtung gibt es auch in den anderen Graphen ähnliche Erscheinungen, sowie eine passende Verdichtung der Punktwolke zu erkennen. Dabei handelt es sich um ein Verrutschen des Gurtes am Ankerpunkt, das während des Versuches protokolliert wurde. Dadurch ist die Distanz im Zugseil kürzer geworden und die Zugkraft

geringer. Anhand der Rohdaten im Anhang kann man das bei den Messpunkten 802-803 sehr gut erkennen, weil dort die Zugkraft um 2 kN abgefallen ist.

Anschließend konnte die Last wieder erhöht werden und der lineare Verlauf setzt sich fort. Wäre ein Riss für diese Unterbrechung verantwortlich gewesen, würden nicht alle Messgeräte an den Randfasern das gleiche Ergebnis liefern.

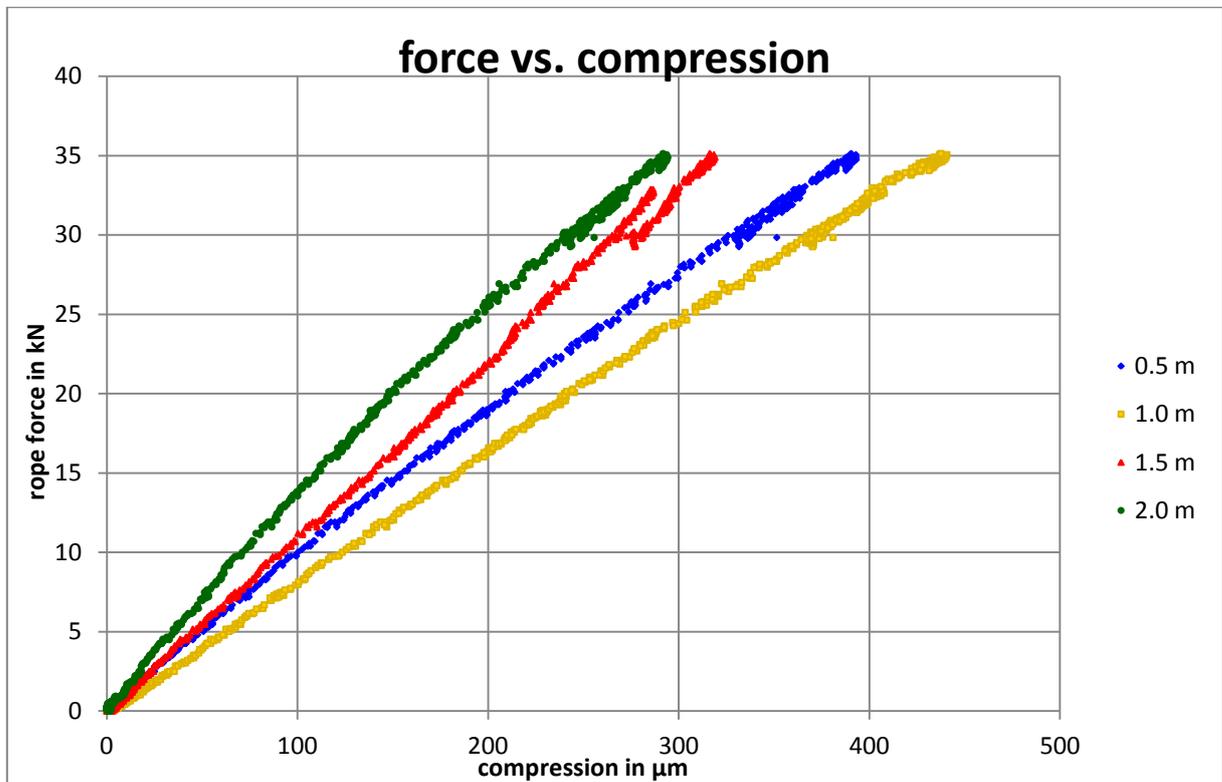


Abbildung 35: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und Faserkompression in µm, Baum 2: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die Graphiken zeigen lineare Verläufe, obwohl die Krümmungen ab 30 kN – 33 kN auf den Beginn des Primärversagens hinweisen könnten. Da aber nicht mehr Kraft eingeleitet werden konnte, kann kein eindeutiges Primärversagen festgestellt werden. Die Unterbrechung bei rund 33 kN wurde durch ein Rutschen des Gurtes am Ankerpunkt des Zugseiles verursacht. Da im Baumstamm kein Versagen verursacht wurde und die Nachkalkulationen die Stand- und Bruchsicherheit belegen, wurde er vorerst stehen gelassen.

8.1.3 Baum 3 (*Populus x canadensis* – Nr. 1736)



Abbildung 36: Die Krone des Baumes aus der Nähe fotografiert, Baum 3: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.



Abbildung 37: Anordnung der Geräte am Baum in 50 cm Abständen, Baum 3: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

Baum- und Versuchsdaten:

Lastrichtung	Stammdurchmesser in 1m Höhe in cm	Rindendicke in cm	Baumhöhe in m	Seilangriffs- punkt in m	Seilwinkel in Grad °
Nord	60,8	4	31,6	13,1	10,9

Stammdurchmesser parallel (||) und normal (⊥) zur Zugrichtung in den Höhen der Elastometer:

	Höhe in cm	∅ in cm	∅ ⊥ in cm
Elastometer 1 (Blau)	50	63	68
Elastometer 2 (Gelb)	100	57	60
Elastometer 3 (Rot)	150	51	59
Elastometer 4 (Grün)	200	47	55

Schalltomographie

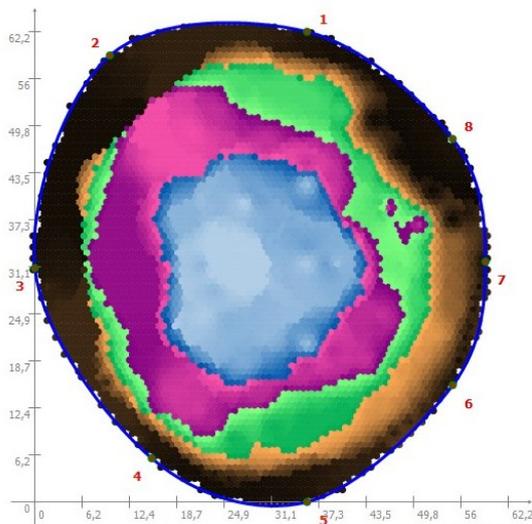


Abbildung 38: Schalltomographie des Baumes 3 der Versuchsreihe 1-8, in 50 cm Höhe. Die X- und Y – Achse des Diagrammes sind in cm angegeben, *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.



Abbildung 39: Schnitt des Baumstammes in der Höhe von 50 cm. Es ist eine sehr große Übereinstimmung mit dem Bild der Schalltomographie zu sehen, Baum 3: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

Sowohl die Tomographie als auch die Fotografie zeigen sehr unterschiedliche Restwandstärken zwischen zwei und zehn Zentimetern. Für Bruchsicherheitsanalysen, die sich ausschließlich auf Restwandstärken stützen, welche nur durch Punktanalysen erlangt wurden, sind das beträchtliche Unterschiede und zeigen somit das Limit dieser Methoden auf. Die Schalltomographie zeigt, wie im realen Schnittbild zu sehen ist, ein sehr genaues Abbild des Hohlungsgrades sowie der verschiedenen Zersetzungsstadien.

Zugversuch

Bei ungefähr 11 kN ist eine Krümmung des Graphen (Abb. 40) zu erkennen, die das Einleiten des Primärversagens darstellt. Bei gleicher Zugkraft biegt sich der Baumstamm um ungefähr einen Grad.

Die Anhäufung vieler Datenpunkte am Anfang der Steigung ist dadurch entstanden, dass die Messgeräte etwas zu früh eingeschaltet wurden, wodurch sich in einer relativ langen Zeitspanne, verglichen dazu, wenig verändert hat.

Der teilweise unruhige Verlauf der Elastometermessungen (Abb. 41) ist auf die recht heftige Bedienung an der Handseilwinde zurückzuführen. Der Knick bei ungefähr 6 kN wurde durch ein Anhalten der Zugkraft verursacht. Wie am Anfang des Kapitels beschrieben gibt das Seil etwas nach und die Zugkraft muss anschließend wieder erhöht werden. Warum jedoch die Faserstauchung in der Zugpause zunimmt kann nicht geklärt werden.

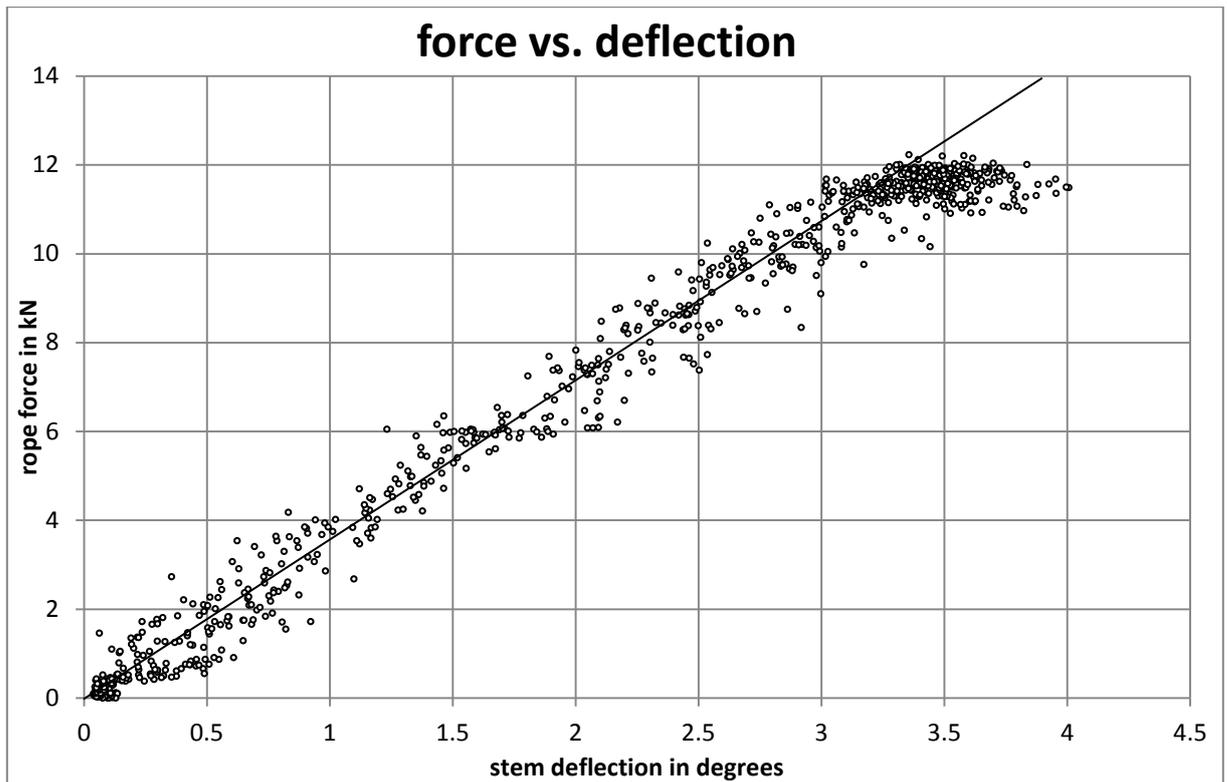


Abbildung 40: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und Stammneigung in Grad °, Baum 3: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

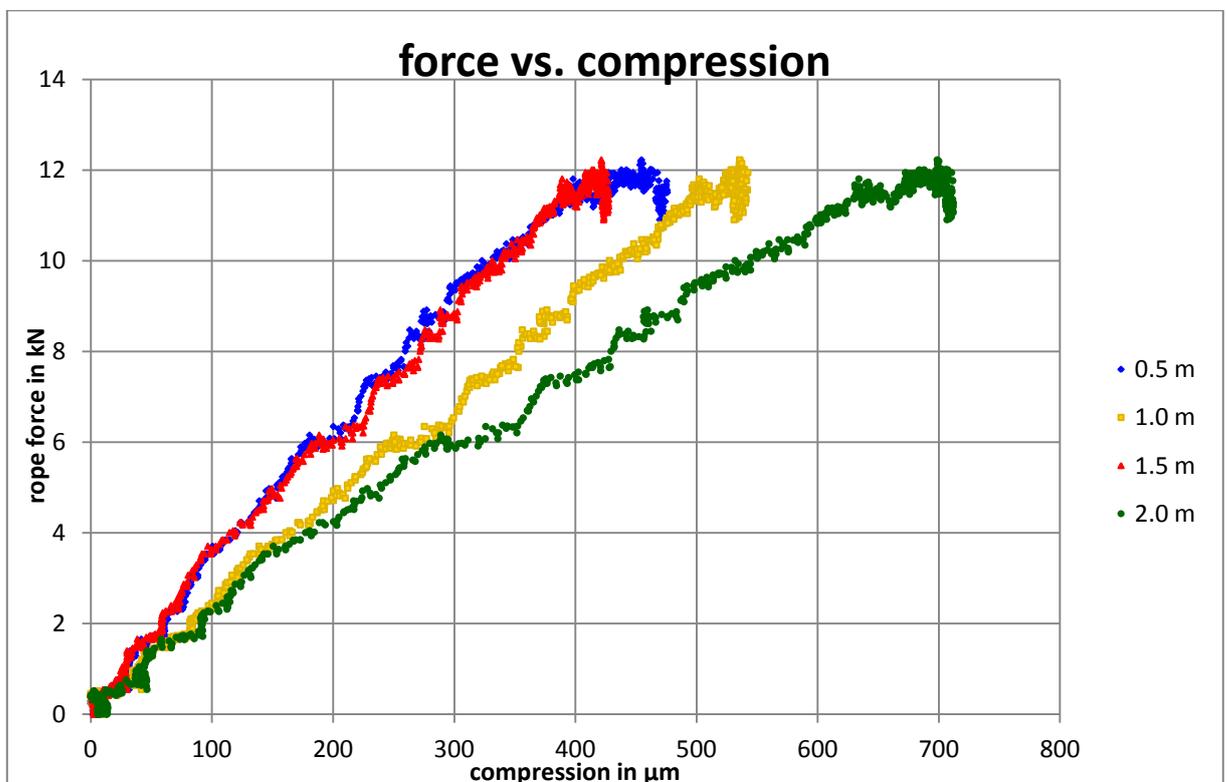


Abbildung 41: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und Faserkompression in μm , Baum 3: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

Anhand der Datentabelle kann festgestellt werden, dass der Haken bei ca. 6 kN bei allen vier Elastometern gleichzeitig auftritt und nicht ruckartig erscheint. Das heißt, dass das

Abfallen der Messdaten nicht plötzlich geschieht und es daher unwahrscheinlich ist, dass es sich um einen Riss handelt. Weiters tritt diese Krümmung bei allen vier Elastometern in der gleichen Form auf, was auf einen äußeren Einfluss hindeutet. Danach ist wieder der lineare Verlauf zu erkennen.

Bei ca. 11 kN ist der Beginn der Krümmung anhand der Daten des blauen und grünen Elastometers festzustellen und ab 12 kN zeigen die Werte des blauen Elastometers eine deutliche Krümmung. Das obere Ende der Graphen zeigt das typische Verhalten beim Entwurzeln.

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Vergleicht man die Abbildungen, so ist anhand beider Messungen ein leichtes Abkommen der Linearität schon bei 11 kN zu sehen, die bei 12 kN deutlicher wird. Spätestens hier ist das Primärversagen eingetreten. Eine Korrelation der beiden Graphiken ist eindeutig.

Beobachtungen und Anmerkungen

Risse und Bruchgeräusche waren während des Zugversuches deutlich zu vernehmen. Da immer mehr Risse am trockenen Boden zu erkennen waren und auch die Messdaten auf ein Standversagen deuteten, konnte der Baum nicht bis zum Brechen belastet werden.



Abbildung 42: Risse im Boden während des Zugversuches lassen eine Entwurzelung vermuten, Baum 3: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.



Abbildung 43, 44: Schnitte des Baumstammes in unterschiedlichen Höhen. Ein hoher Zersetzungsgrad sowie eine starke Höhlung sind zu erkennen, Baum 3: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

8.1.4 Baum 4 (*Populus x canadensis* – Nr. 1738)



Abbildung 45: Der Baum 4 nahe der Autos von Süden fotografiert, *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.



Abbildung 46: Anordnung der Geräte am breit auslaufenden Baumstamm in 50 cm Abständen, Baum 4: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

Baum- und Versuchsdaten:

Lastrichtung	Stammdurchmesser in 1m Höhe in cm	Rindendicke in cm	Baumhöhe in m	Seilangriffs- punkt in m	Seilwinkel in Grad °
Nordost	88,5	4	29,8	11,3	8,6

Stammdurchmesser parallel (||) und normal (⊥) zur Zugrichtung in den Höhen der Elastometer:

	Höhe in cm	∅ in cm	∅ ⊥ in cm
Elastometer 1 (Blau)	50	97	99
Elastometer 2 (Gelb)	100	79	81
Elastometer 3 (Rot)	150	74	74
Elastometer 4 (Grün)	200	68	73

Schalltomographie

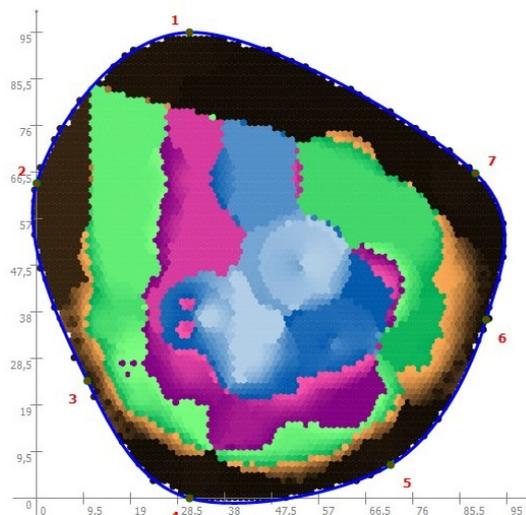


Abbildung 47: Schalltomographie des Baumes 4 der Versuchsreihe 1-8. Die X- und Y –Achse des Diagrammes sind in cm angegeben, *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.



Abbildung 48: Schnitt des Baumstammes in der Höhe von 50 cm. Eine recht gleichmäßige Zersetzung ist zu erkennen, Baum 4: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

Bei der Betrachtung der Schalltomographie ist auffällig, dass zwischen Messpunkt eins und zwei eine gerade, gleichmäßige Abgrenzung vorhanden ist, die spitz zusammenläuft. Dies und die nicht übereinstimmenden Außenkonturen des Baumstammes deuten darauf hin, dass zu wenige Messpunkte gesetzt worden sind. Auch die Höhlung ist, wie am realen Schnittbild zu sehen, etwas größer als in der Tomographie abgebildet.

Abgesehen davon, sieht man beim Vergleich der Tomografie mit der Fotografie eine recht hohe Übereinstimmung.

Zugversuch

In der Graphik der Stammbiegung (Abb. 49) ist von Anfang an eine leichte Krümmung des gesamten Stammabschnittes zu beobachten, die im Bereich von ca. 15 kN – 17 kN in eine etwas stärkere übergeht und im Verlauf weiter zunimmt. Die Abweichung der Liniarität zeigt ein Primärversagen, jedoch lässt sich nicht genau sagen, wo es beginnt.

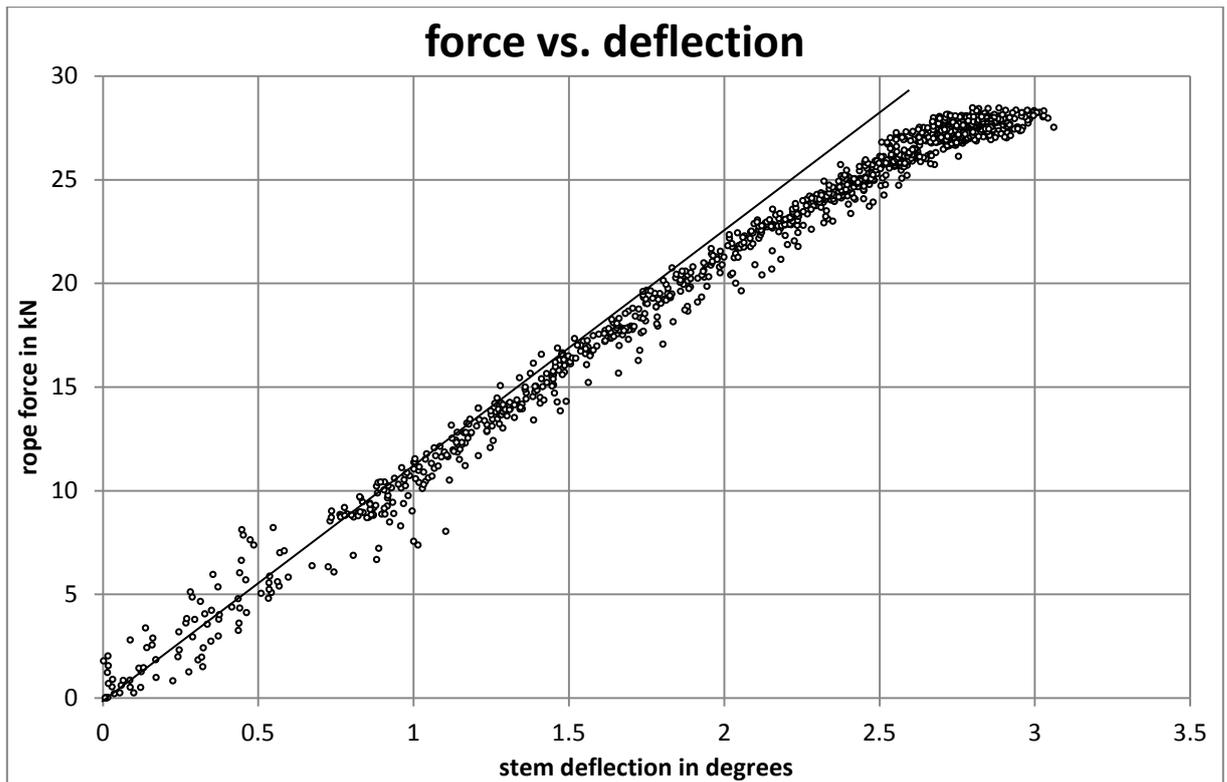


Abbildung 49: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und Stammbiegung in Grad °, Baum 4: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

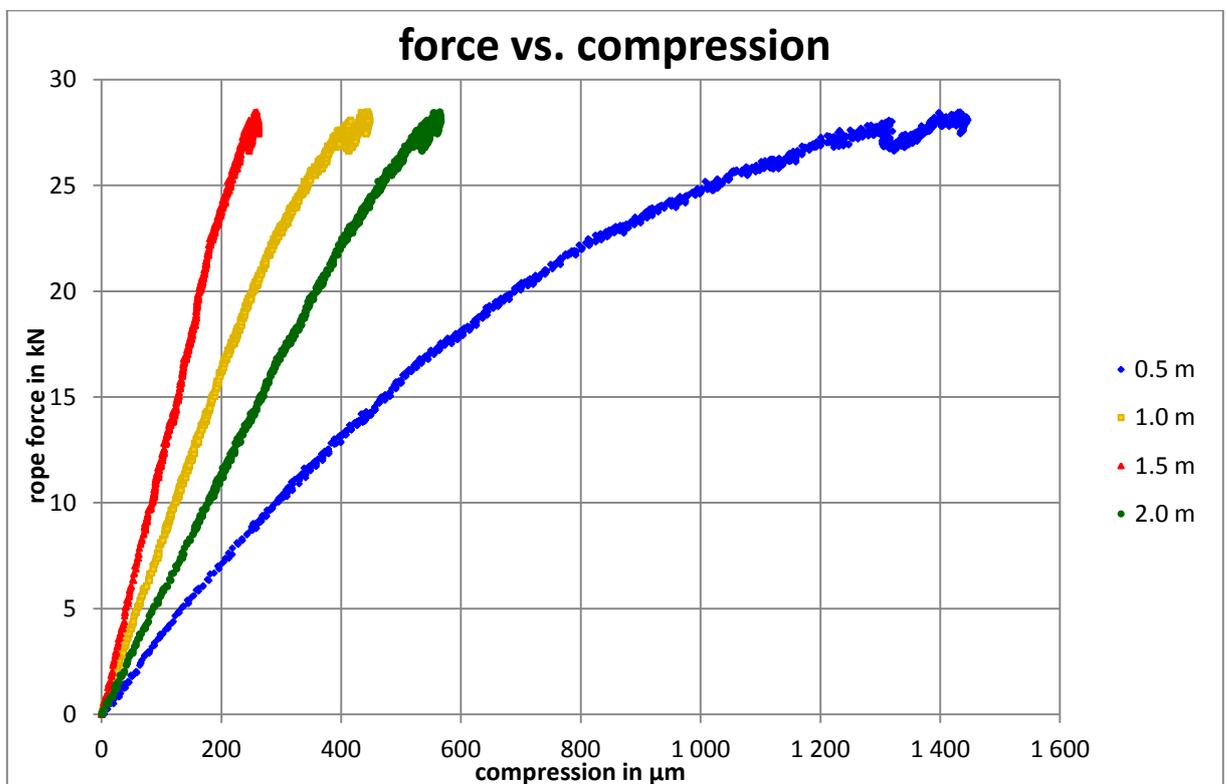


Abbildung 50: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und Faserkompression in μm, *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

Die Messdaten des blauen Elastometers (Abb. 50) zeigen ebenfalls einen durchgehend leicht gebogenen Verlauf an, bei dem hier eindeutig, wie bei der Stammbiegung, ein Primärversagen vorliegt, für das die Fasern in 50 cm Höhe verantwortlich sind. Ab 20 kN -

23 kN Zuglast haben auch die anderen gemessenen Randfasern die Elastizitätsgrenze überschritten.

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Ein Vergleich zwischen den Diagrammen lässt einen Zusammenhang zwischen den Kurvenverläufen des blauen Elastometers und der Stammbiegung erkennen. Beide zeigen schon sehr früh eine Krümmung, die bei ca. 15 kN bis 17 kN zunimmt. Das Elastometer zeigt das Primärversagen deutlicher an, da nur 20 cm gemessen werden. Bei der Stammbiegung werden sechs Meter gemessen, weshalb das Versagen von wenigen Zentimetern nicht so deutlich ins Gewicht fällt. Ab einer Last von ungefähr 20 kN bis 23 kN versagen die Druckfasern großräumig, was über die Stammbiegung deutlicher angezeigt wird. Anhand der gemessenen Daten ist klar ersichtlich, dass die Ursache für das primäre Stammversagen durch Faserstauchung im Druckbereich verursacht wurde.

Beobachtungen und Anmerkungen

Aufgrund von Rissen im Boden und dem Ausschlag des unteren Inklinometers musste auch bei Baum Nummer 4 von einer Entwurzelung als endgültiges Versagen ausgegangen werden.



Abbildung 51: Kleine Risse waren auch bei Baum 4 während des Zugversuches zu sehen, *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.



Abbildung 52, 53: Bei der Fällung konnte man früh erkennen, dass der Baum sehr hohl war, Baum 4: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

8.1.5 Baum 5 (*Populus x canadensis* – Nr. 1737)



Abbildung 54: Der Baum 5, während des Seileinbaus von Norden fotografiert, *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.



Abbildung 55: Anordnung der Geräte am Baum in 50 cm Abständen. Teile der Borke wurden entfernt um die Geräte besser anbringen zu können, Baum 5: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

Baum- und Versuchsdaten:

Lastrichtung	Stammdurchmesser in 1m Höhe in cm	Rindendicke in cm	Baumhöhe in m	Seilangriffs- punkt in m	Seilwinkel in Grad °
Nordost	84,4	4	31,3	15,1	13,1

Stammdurchmesser parallel (||) und normal (⊥) zur Zugrichtung in den Höhen der Elastometer:

	Höhe in cm	∅ in cm	∅ ⊥ in cm
Elastometer 1 (Blau)	50	86	96
Elastometer 2 (Gelb)	100	75	88
Elastometer 3 (Rot)	150	75	77
Elastometer 4 (Grün)	200	64	70

Schalltomographie

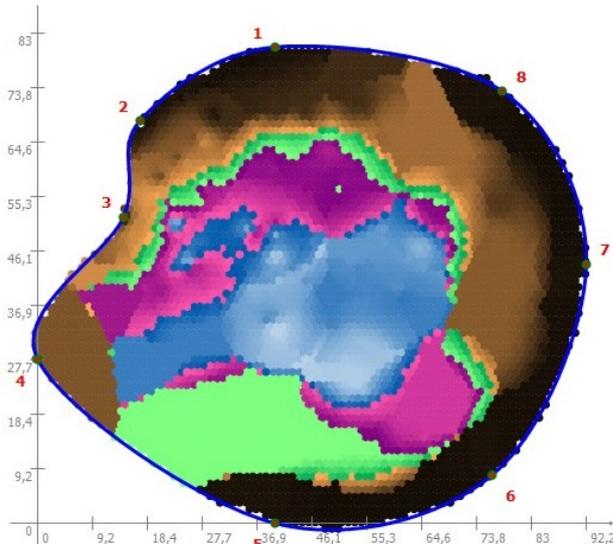


Abbildung 56: Schalltomographie des Baumes 5 der Versuchsreihe 1-8. Die X- und Y-Achse des Diagrammes sind in cm angegeben, Baum 5: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.



Abbildung 57: Schnitt des Baumstammes in der Höhe von 50 cm., Baum 5: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

In der Schalltomographie ist in blauer Farbe die langsamste Laufzeit zu erkennen, die eine Hohlstelle darstellt. Zwischen den Punkten 4 und 5 wird eine grün gefärbte, langsamere Laufzeit dargestellt, die als Schaden interpretiert werden kann. Im Vergleich mit dem realen Schnittbild erkennt man jedoch, dass die Restwand anders verläuft und hier keine Schadstelle vorhanden ist.

Zugversuch

Die Abbildung 58 zeigt einen sehr linearen Verlauf der Messpunkte bis zum Bereich von 17 kN – 20 kN. Danach beginnt sich eine leichte Kurve zu bilden, ob dies aber wirklich als Primärversagen gewertet werden kann, lässt sich anhand der Messdaten und Graphiken nur schwer feststellen.

Der lineare Verlauf der Werte der Elastometer (Abb. 59) wird bei ungefähr 15 kN durch einen gleichzeitig auftretenden Knick unterbrochen, der auch anhand der Rohdaten als exogener, also äußerer, Einfluss erkannt werden kann. Dieser wurde entweder durch Verrutschen des Gurtes, eine Zugpause oder eine andere Einwirkung auf den Seilzugmechanismus verursacht. Der weitere Verlauf der Graphen ist wieder linear, aber mit einer anderen Steigung, dessen Ursache jedoch vorerst nicht geklärt werden kann. Am Ende dieser Messwerte sieht man eine Krümmung die die Entwurzelung des Baumes zeigt. Es kann keine Seilzugkraft mehr aufgebaut werden und die Wurzeln geben reihenweise nach. Auch die Faserkompression nimmt ab, da sich der Stamm durch die immer stärker werdende Entwurzelung wieder gerade richten kann.

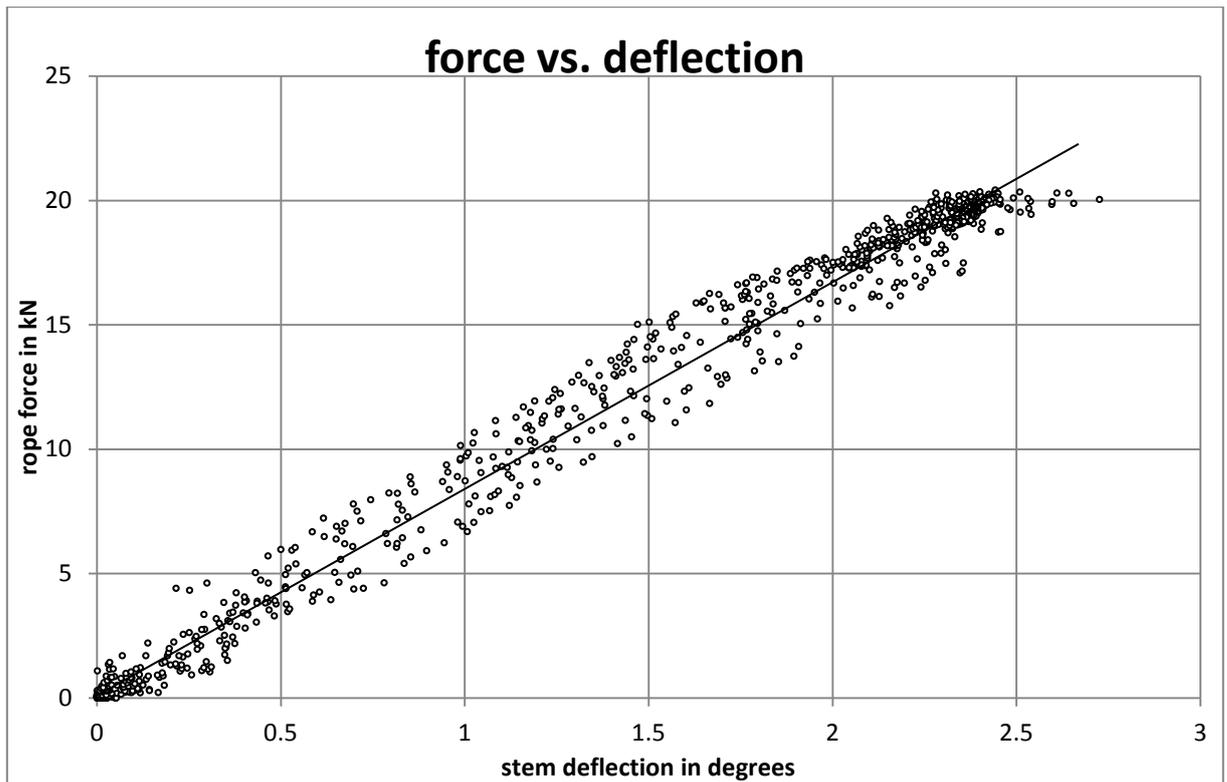


Abbildung 58: Gegenüberstellung von Seilzugkraft in kN und Stammbiegung in Grad °, Baum 5: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

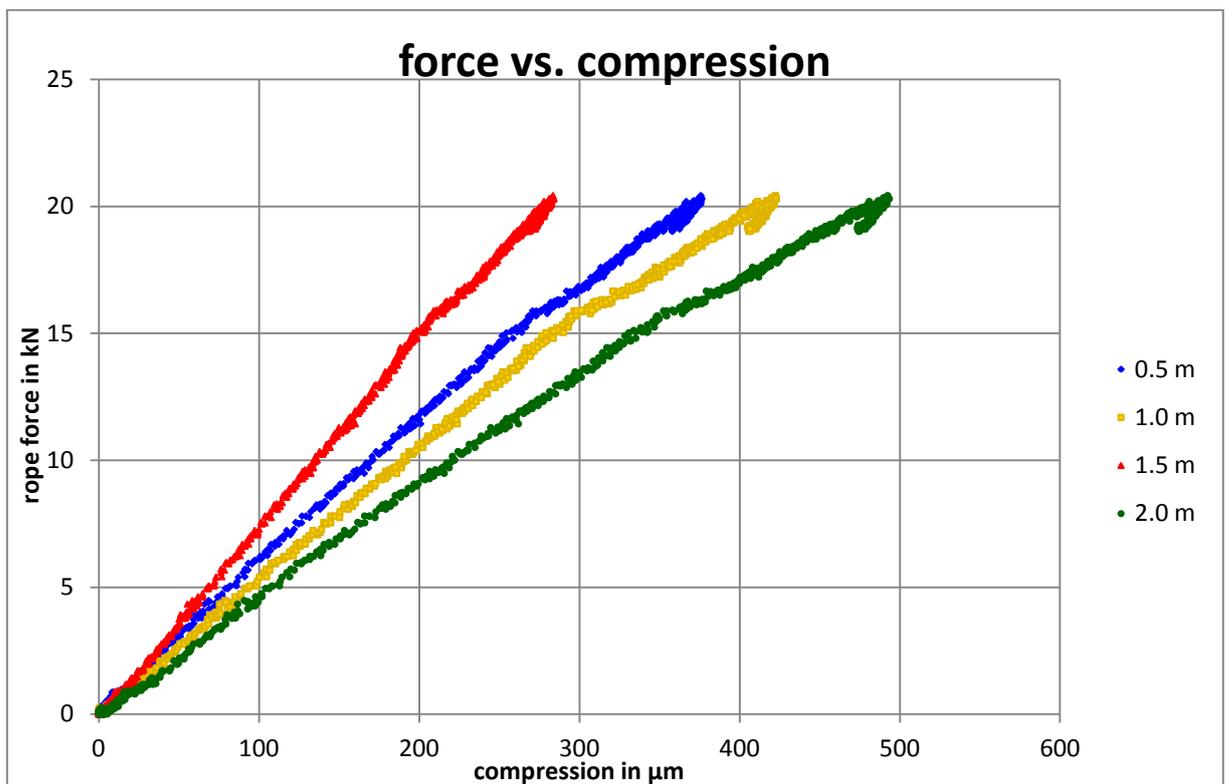


Abbildung 59: Gegenüberstellung von Seilzugkraft in kN und Faserkompression in μm , Baum 5: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Der Zusammenhang zwischen den beiden Graphiken ist gut ersichtlich, da sogar der Knick bei ca. 15 kN - 16 kN in beiden Abbildungen zu sehen ist. Anhand der Betrachtung der Diagramme kann weder in der Stammbiegung noch in der Faserstauchung auf ein eindeutiges Primärversagen geschlossen werden.

Beobachtungen und Anmerkungen

Der Weg, der sich südlich des Baumes auf er zugabgewandten Seite befand, war hier einige Meter vom Stammfuß entfernt. Nichtsdestotroz wies der Baum eine verminderte Standsicherheit auf. Das aubedingte Hochwasser hatte vermutlich ebenfalls Einfluss auf die Wurzeln und könnte einige zum Absterben gebracht haben. Die Verankerung im Boden war nicht ausreichend und die Wahrscheinlichkeit einer durch Wind verursachten Entwurzelung ist sehr hoch.

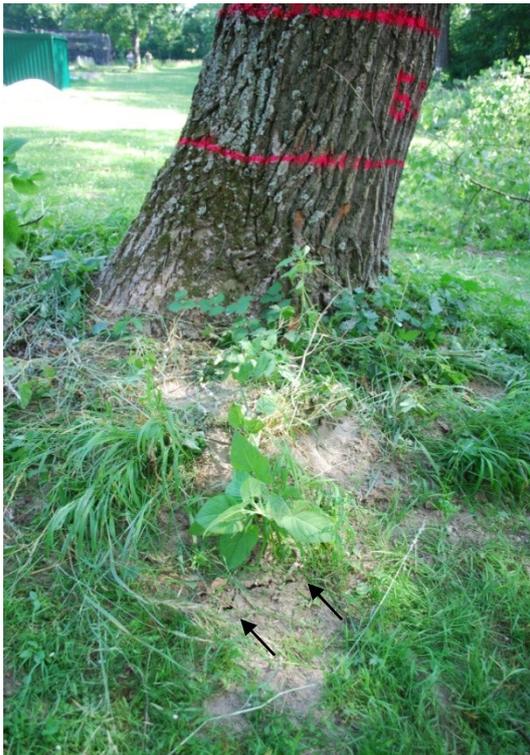


Abbildung 60: Auch bei Baum 5 bildeten sich Risse während des Versuches, *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.



Abbildung 61: Schon zu Beginn der Fällung des Baumes konnte man eine Höhlung sehen, Baum 5: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

8.1.6 Baum 6 (*Populus x canadensis* – Nr. 1732)



Abbildung 62: Der Baum 6 während des Aufbaues von Osten fotografiert, *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.



Abbildung 63: Anordnung der Geräte am Baum in 50 cm Abständen. Mit einer Leiter wurde das obere Inclinometer in 6 m Höhe angebracht, Baum 6: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

Baum- und Versuchsdaten:

Lastrichtung	Stammdurchmesser in 1m Höhe in cm	Rindendicke in cm	Baumhöhe in m	Seilangriffs- punkt in m	Seilwinkel in Grad °
Osten	52	4	29,1	6,2	16,9

Stammdurchmesser parallel (II) und normal (_I_) zur Zugrichtung in den Höhen der Elastometer:

	Höhe in cm	Ø II in cm	Ø _I_ in cm
Elastometer 1 (Blau)	50	52	52
Elastometer 2 (Gelb)	100	48	48
Elastometer 3 (Rot)	150	42	43
Elastometer 4 (Grün)	200	41	41

Schalltomographie

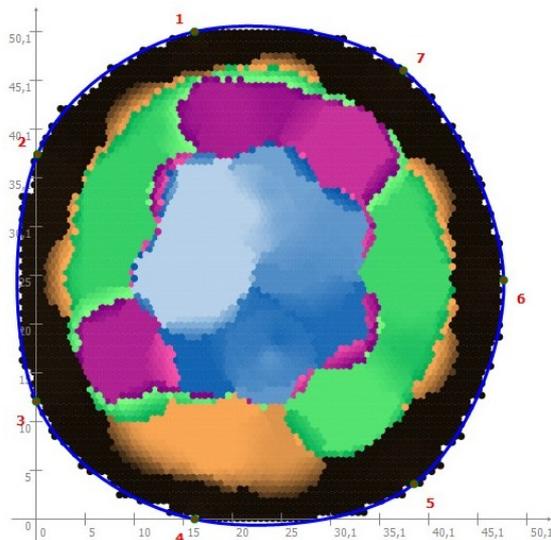


Abbildung 64: Schalltomographie des Baumes 6 der Versuchsreihe 1-8. Die X und Y –Achse des Diagrammes sind in cm angegeben, *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.



Abbildung 65: Schnitt des Baumstammes in der Höhe von 50 cm. Der hohe Zersetzungsgrad des Holzes rund um die Höhlung konnte in der Schalltomographie nur erahnt werden, Baum 6: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

Sowohl die Schalltomographie als auch das reale

Schnittbild zeigen eine recht homogene Zersetzung. Die dünne Restwandstärke sowie viele unterschiedliche Zersetzungsstadien sind ebenfalls am Schnittbild und der Tomographie zu sehen. Der Stamm ist jedoch ohne Borke und durch den Bruch etwas beschädigt.

Zugversuch

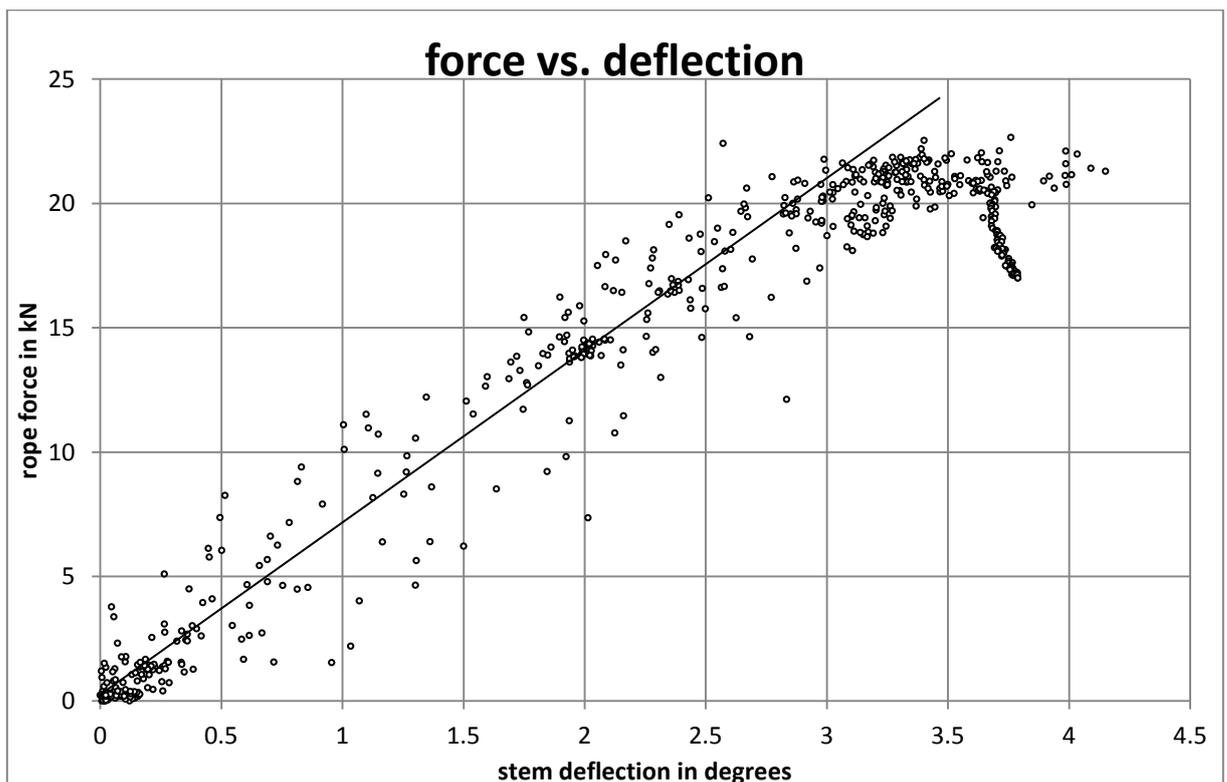


Abbildung 66: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und Stammbiegung in Grad °, Baum 6: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

Bei ungefähr 14 kN ist in der oben abgebildeten Graphik eine Punktehufung zu sehen. Durch die Versuchsdokumentation und anhand der Datentabelle kann festgestellt werden, dass diese durch ein Anhalten der Zugbelastung, also eine Pause des Bedieners am Greifzug, verursacht wurde. Es könnte auch als Rissbildung interpretiert werden, da jedoch alle Messdaten relativ linear sind und bei den Messnummern 79 – 83 auch nicht ruckartig abfallen, kann davon ausgegangen werden, dass es sich hierbei um keinen Riss handelt. Anhand der Abbildung 67 kann erkannt werden, dass die Kraft langsam und wenig abnimmt, was ebenfalls eindeutig auf eine Pause des Bedieners des Greifzuges deutet, und nicht typisch für eine Rissbildung ist.

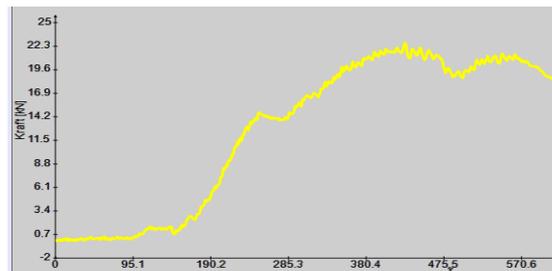


Abbildung 67: Auszug aus dem Programm ARBOSTAT (argus electronics GmbH): Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Zeit x, Baum 6: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

Weiters ist in der ersten Graphik (Abb. 66) gut zu erkennen, dass bis zu ca. 20 kN ein linearer Verlauf gegeben ist. Danach beginnt eine Krümmung des Graphen bei 3° Stammbiegung und ein Primärversagen tritt ein. Bei ca. 3.7° ist ein Knick ersichtlich, der durch einen Riss normal zur Druckseite des Stammes verursacht worden ist.

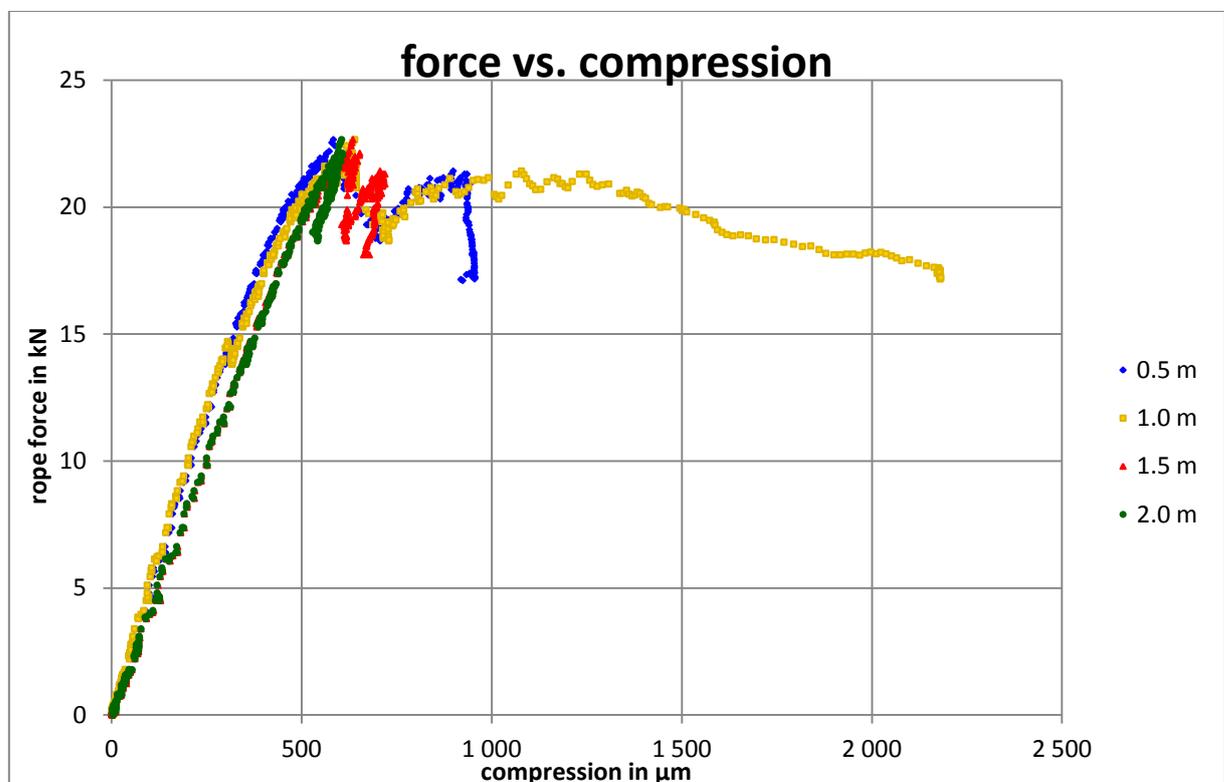


Abbildung 68.: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und Faserkompression in μm , Baum 6: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

In der Abbildung 68 ist ein linearer Verlauf bis zum Bereich von ca. 20 kN zu sehen. Danach zeigen die Elastometerwerte eine beginnende Krümmung an. Nach dem HOOKE'schen Gesetz wird dadurch das Primärversagen des Materials beschrieben. Der weitere Verlauf ist geprägt durch ständige Auf- und Abwärtsbewegungen. Diese werden durch entstehende Risse verursacht, denn es findet keine Entwurzelung statt. Es wird immer wieder Zugkraft aufgebaut, die sich durch einen Riss, der sich relativ langsam bildet, entladen wird. Die Datenreihe des roten Elastometers auf 1.5 m Höhe zeigt den ersten großen Riss am deutlichsten. Im Bereich des gelben Elastometers auf 1m Höhe ist eine extreme Faserkompression zu erkennen, denn genau an dieser Stelle hat der Baumstamm zu Knicken begonnen. Durch diese sichtbare Deformation konnte die Spannung bei den höher und tiefer liegenden Elastometern abgebaut werden, die Messwerte der Faserkompression gehen teilweise zurück.

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Bei diesem Baum konnte ein vollständiger Stammbruch erreicht werden. Wahrscheinlich war er besser verwurzelt als die anderen Bäume, da seine Zug- und Druckwurzeln außerhalb des Weges und einer damit verbundenen Bodenverdichtung wuchsen. Dieser Baum hatte auch mit rund 4 cm eine sehr geringe Restwand (ca. 83 % Höhlung). Dennoch konnte klar gezeigt werden, dass das Primärversagen der Stammbiegung bei ca. 20 kN Seilzugkraft und 3° Stammbiegung mit dem Primärversagen Faserstauchen exakt korreliert. Im weiteren Verlauf des Versuches konnte die Zugkraft nur mehr gering auf rund 22 kN erhöht werden. Anders als bei den anderen verlagerte sich diese Energie nicht in das Kippen der Wurzelplatte, sondern in eine weitere Verformung des Stammes. Bei 22 kN Zugkraft und ca. 3,7° Stammbiegung kam es zu den ersten Rissen im untersten Stammbereich normal zur Zugrichtung. Es kann sich somit um Schubrisse handeln. Der weitere Verlauf ist geprägt vom Aufbau der Last, die sich dann in weiteren Rissen entlädt, aber nie wieder die Maximalkraft erreicht.

Um die Messgeräte beim endgültigen Versagen nicht zu gefährden, mussten sie abmontiert werden. Knapp danach brach der Baum in 1 m Höhe. Die Reihenfolge der Versagensmechanismen war wie folgt: zuerst Primärversagen Faserstauchen bei 20 kN, danach Risse als Sekundärversagen bei 22 kN. Eine Ovalsierung wurde währenddessen nicht bemerkt und ist auch auf den Fotos nicht erkennbar.

Beobachtungen und Anmerkungen

Wie schon bei Bäumen aus früheren Versuchsreihen konnte wieder beobachtet werden, dass die Bruchstelle am oberen Ende der vom Stock aufsteigenden Fäule, im Bereich der geringsten Restwand, liegt.



Abbildung 69: Auch bei Baum 6 bildeten sich seitlich Risse während des Versuches, welche jedoch erst nach dem gemessenen Primärversagen sichtbar wurden, *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.



Abbildung 70: Durch die verschiedenen Kräfte die auf das schon geschädigte Holz einwirken, bildeten sich immer mehr Risse und andere Symptome, Baum 6: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.



Abbildung 71: Nach dem Riss war ein Knicken der Rinde im Druckbereich zu sehen und hören, Baum 6: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

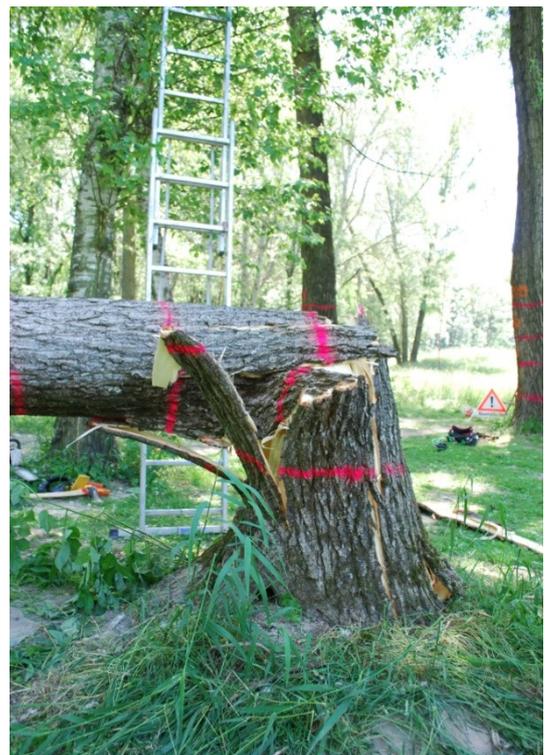


Abbildung 72: Der Baum ist schlussendlich in der Höhe von ca. 1 m endgültig gebrochen, Baum 6: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.



Abbildung 73: Risse, Faltungen und sonstige Symptome, die eine Folge des Versagens sind, kann man unter der Rinde deutlich sehen, Baum 6: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.



Abbildung 74: Verschiedenste Symptome wurden erst durch den Prozess des Fallens und die damit verbundenen Kräfte verursacht, Baum 6: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.



Abbildung 76, 77: Risse und Auffaltungen sind unter der Borke gut ersichtlich, Baum 6: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.



Abbildung 78: Nach dem Zersägen des Baumstammes in einzelnen Abschnitte richtete sich der untere Teil des Baumstammes wieder auf, Baum 6: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

8.1.7 Baum 7 (*Populus x canadensis* – Nr. 1740)



Abbildung 79: Der Baum 7, mittig vor den Autos vom Süden fotografiert, *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.



Abbildung 80,81: Anordnung der Geräte am Baum in 50 cm Abständen. Markierungen helfen auf Fotos und Videos, die Abstände zu erkennen, Baum 7: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

Baum- und Versuchsdaten:

Lastrichtung	Stammdurchmesser in 1m Höhe in cm	Rindendicke in cm	Baumhöhe in m	Seilangriffs- punkt in m	Seilwinkel in Grad °
Südosten	69	4	35,1	9,6	18,1

Stammdurchmesser parallel (||) und normal (⊥) zur Zugrichtung in den Höhen der Elastometer:

	Höhe in cm	∅ in cm	∅ ⊥ in cm
Elastometer 1 (Blau)	50	77	81
Elastometer 2 (Gelb)	100	67	71
Elastometer 3 (Rot)	150	66	67
Elastometer 4 (Grün)	200	62	66

Schalltomographie

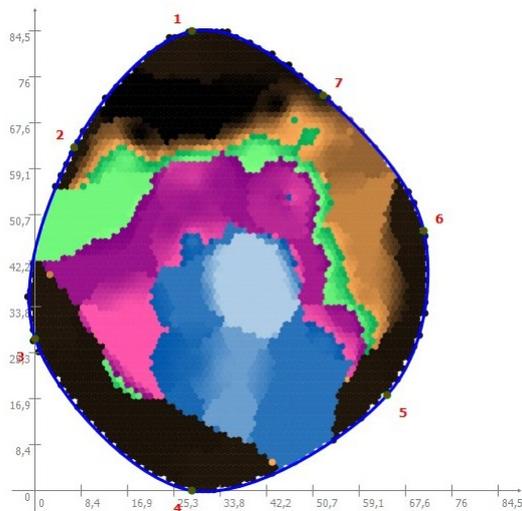


Abbildung 82: Schalltomographie des Baumes 7 der Versuchsreihe 1-8 . Die X- und Y -Achse des Diagrammes sind in cm angegeben, *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.



Abbildung 83: Schnitt des Baumstammes in der Höhe von 50 cm. Eine regelmäßige Höhlung ist zu erkennen, Baum 7: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

Die Übereinstimmung der Tomografie mit dem tatsächlichen Zustand ist mangelhaft. Das könnte damit zu tun haben, dass die Sensorabstände recht groß gewählt wurden, wodurch sich eine zu geringe Genauigkeit ergibt.

Zugversuch

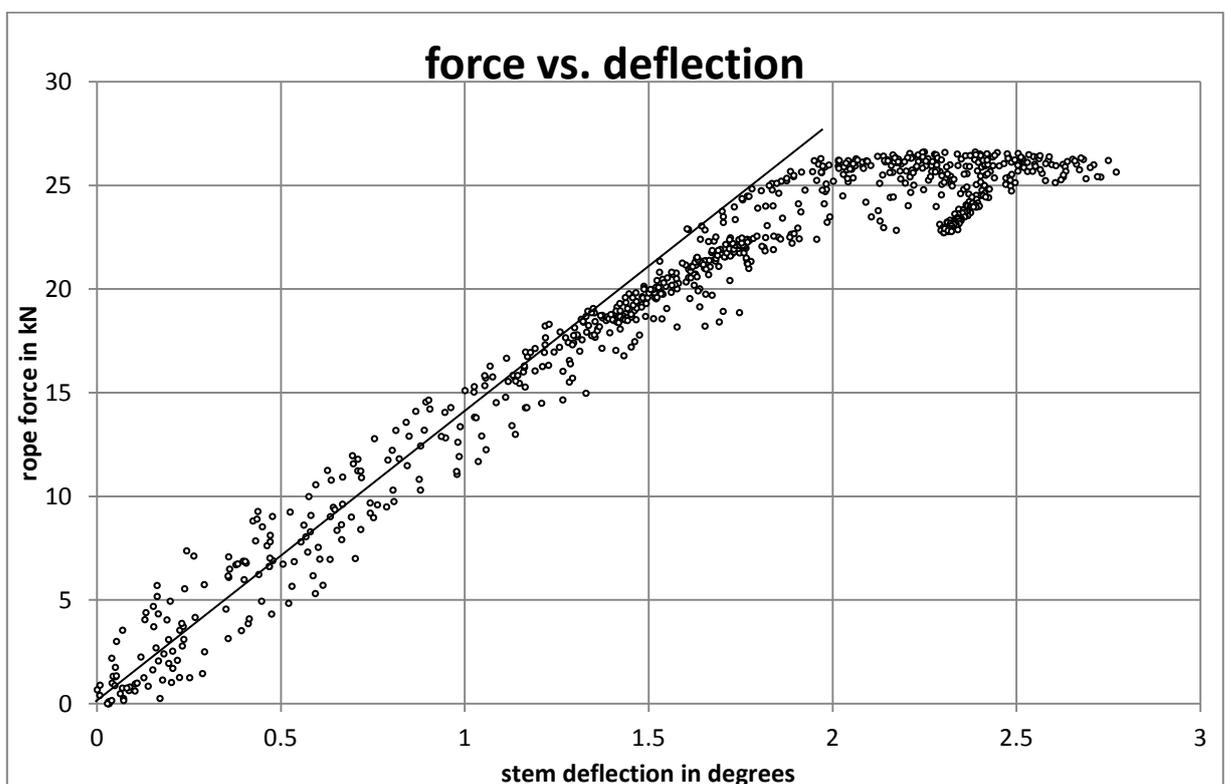


Abbildung 84: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und Stammbiegung in Grad °, Baum 7: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

Bis knapp über 15 kN zeigt sich ein linearer Verlauf der Datenreihe der Stammbiegung (Abb. 85). Danach wird die Linearität gestört, die Ursache ist aber anhand dieser Graphik nicht eindeutig zu klären. Ab 25 kN krümmt sich der Graph ohne Zweifel und ein Primärversagen hat stattgefunden.

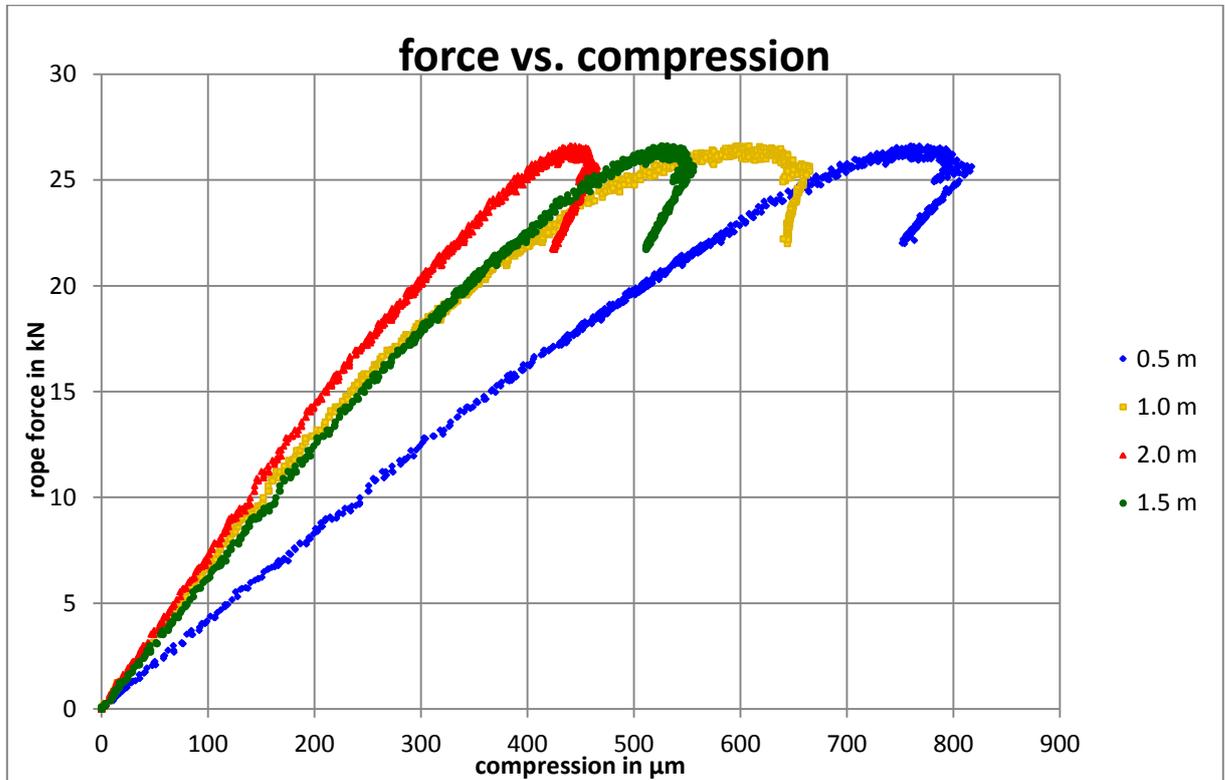


Abbildung 85: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und Faserkompression in μm , Baum 7: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

Der Graph des gelben Elastometers zeigt ab ca. 15 kN ein erstes Abkommen der Linearität an, was bei ca. 25 kN stärker wird. Das Primärversagen ist eingetreten und der elastische Bereich wurde verlassen. Die anderen drei Datenreihen beginnen ebenfalls mit einer stärkeren Krümmung bei ca. 22 kN bis 25 kN. In weiterer Folge ist ein typisches Kurvenverhalten beim entwurzeln zu beobachten.

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Der Zusammenhang der Ergebnisse ist sehr deutlich. Sowohl die Messung der Stammbiegung als auch die der Randfaserdehnung zeigen ein Primärversagen. Anhand der erhobenen Daten ist die Ursache des Primärversagens in der Stammbiegung Faserstauchung im Druckbereich

Beobachtungen und Anmerkungen

Auch bei Baum Nummer 7 konnte man während des Zugversuches an den Messdaten erkennen, dass er zwar ein Primärversagen im Stamm haben könnte, jedoch nicht komplett brechen würde. Das Primärversagen wurde erreicht, der Baum hatte aber eine so schwache Verankerung im Boden, dass er recht einfach umgezogen werden konnte. Auffallend war, dass das gesamte Wurzelsystem vollständig verfault war. Der Baum war ausschließlich über sekundär gebildetet Wurzel verankert, wofür es aber keine mit dem Auge erkennbare Symptome gab.



Abbildung 86: Der Baum beginnt zu entwurzeln, Baum 7: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.



Abbildung 87: Der Baum beginnt langsam zu kippen, jedoch erfordert es weiterhin einen hohen Kraftaufwand um ihn komplett zu entwurzeln, Baum 7: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.



Abbildung 88: Nun fällt der Baum von allein. Die letzten Wurzeln sind abgerissen, Baum 7: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.



Abbildung 89: Baum 7 kurz vor dem Aufprall am Boden, *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.



Abbildung 90: Nur sekundär gebildete Wurzeln verankerten den großen Baum im Boden, Baum 7: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.



Abbildung 91: Die Fäule an den Schnittstellen von 1 m, 1.5 m und 2 m, Baum 7: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

8.1.8 Baum 8 (*Populus x canadensis* – Nr. 1686)



Abbildung 92: Die Krone des Baumes von Süden fotografiert. Eine Leiter ist zum Seileinbau und Anbringen des Inclinometers angelehnt, Baum 8: *Populus x canadensis*. Aubad Tulln. Juni 2014.



Abbildung 93: Anordnung der Geräte am Baum in 50 cm Abständen, Baum 8: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

Baum- und Versuchsdaten:

Lastrichtung	Stammdurchmesser in 1m Höhe in cm	Rindendicke in cm	Baumhöhe in m	Seilangriffs- punkt in m	Seilwinkel in Grad °
Südosten	93,2	4	37,4	12,9	18,6

Stammdurchmesser parallel (II) und normal (_I_) zur Zugrichtung in den Höhen der Elastometer:

	Höhe in cm	Ø II in cm	Ø _I_ in cm
Elastometer 1 (Blau)	50	100	101
Elastometer 2 (Gelb)	100	87	85
Elastometer 3 (Rot)	150	76	77
Elastometer 4 (Grün)	200	78	82

Schalltomographie

Die Schalltomographie des Baumes Nummer 8 zeigt relativ viele dunkelbraune Zonen, die als Restwand zu interpretieren sind. Die blauen Bereiche stellen eine Höhlung dar, während die anderen Farben die verschiedenen Zersetzungsstadien des Holzes wiedergeben. Da der Baum nicht gefällt wurde, gibt es kein Vergleichsbild des tatsächlichen Stammquerschnittes.

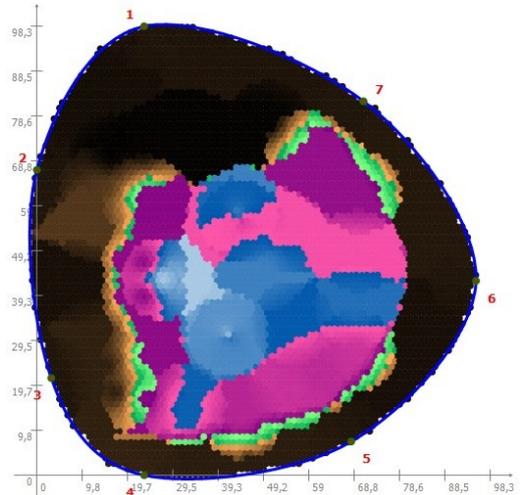


Abbildung 94: Schalltomographie des Baumes 8 der Versuchsreihe 1-8. Die X- und Y -Achse des Diagrammes sind in cm angegeben, *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

Zugersuch

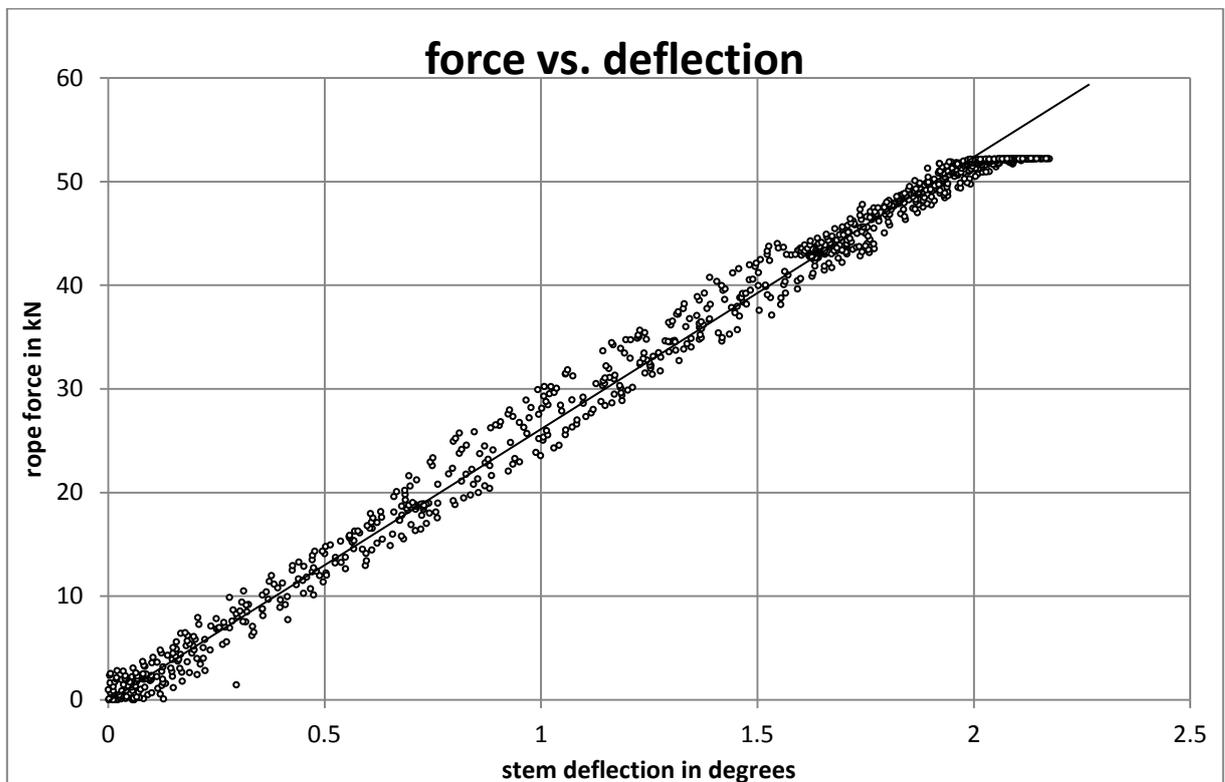


Abbildung 95: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN auf der y-Achse und die Stammbiegung in Grad ° auf der x-Achse verglichen, Baum 8: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

Die obere Graphik (Abb. 95) zeigt einen linearen Verlauf der Messdaten. Die Abflachung am Ende der Geraden zeigt das Ende des Messbereiches des Forcemeter an. Es ist kein Versagen erkennbar.

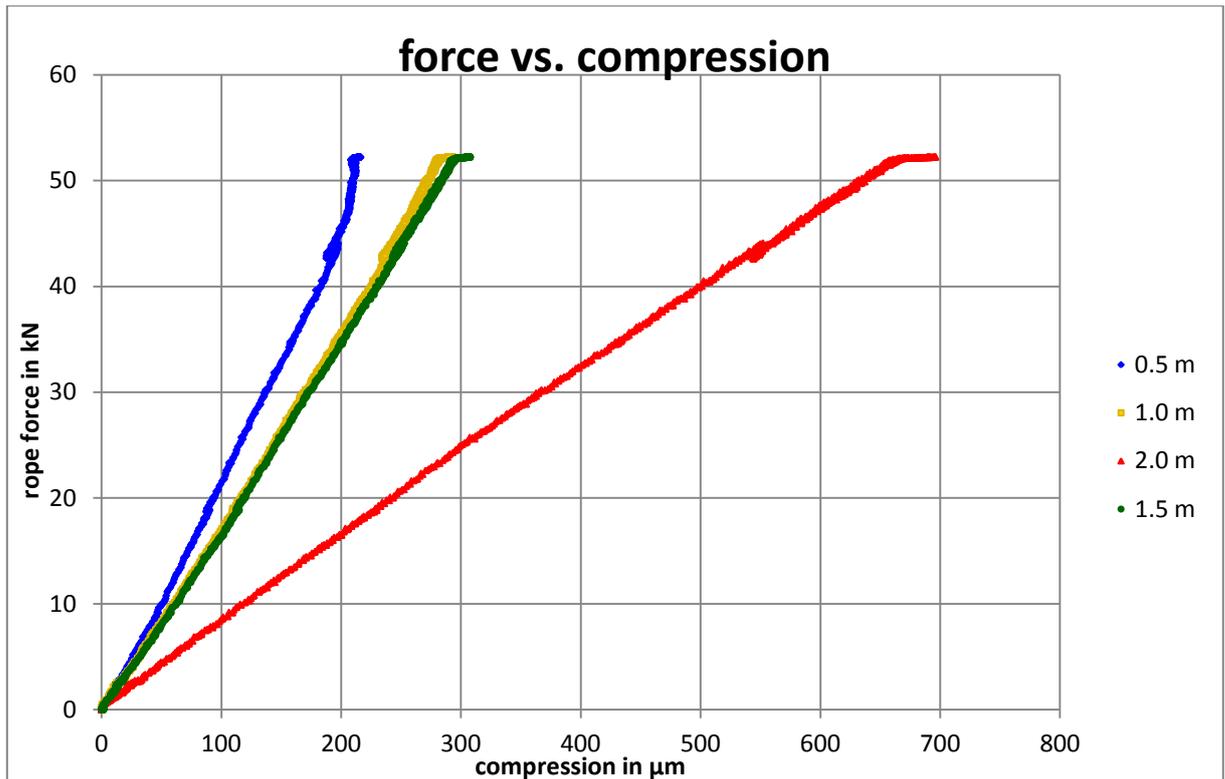


Abbildung 96: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und Faserkompression in μm , Baum 8: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

Wie auch schon in der vorherigen Graphik, sieht man in diesem Diagramm einen linearen Verlauf der Messdaten bis 52 kN Zuglast. Es wurde auch im Bereich der Druckfasern kein Primärversagen festgestellt. Bei ca. 43 kN gab es eine Pause des Greifzugbedieners, was in der Graphik als Punkteansammlung zu sehen ist.

Zusammenfassung und Fazit

Weder in der Graphik der Stammbiegung noch bei den Elastometermessungen ist ein Versagen zu erkennen, da der Baum dafür zu wenig belastet wurde.

Beobachtungen und Anmerkungen

Die Grenzen der verwendeten Geräte wurden erreicht, weshalb nicht weitergezogen werden konnte.

8.2 Versuchsreihe 9-21

Das Sachverständigenbüro PROSENZ und die Österreichischen Bundesforste (ÖBF) haben im Jahr 2012 Versuche, bezüglich des Bruchverhaltens an hohlen Baumstämmen an einigen Bäumen durchgeführt. Da ich an den Versuchen teilweise beteiligt war, wurden mir die Messdaten zu Verfügung gestellt, die ich nun in meiner Masterarbeit verwenden kann. Untersucht wurden ebenfalls Kanadische Holz-Pappeln (*Populus x canadensis*) im Aubad Tulln, wodurch sowohl Baumart als auch Standort ident sind. Die Kraftmessung der Versuche wurde teilweise mit einer Umlenkrolle und zwei Forcemetern, die anschließend addiert wurden durchgeführt. Einige Bäume wurden durch eine Auflast in Form einer Baggerschaufel und Baumstämmen beschwert, um eine Kippen zu vermeiden. Da sich aber kein Einfluss bemerkbar machte, wurde später darauf verzichtet.

8.2.1 Baum 9 (*Populus x canadensis*)

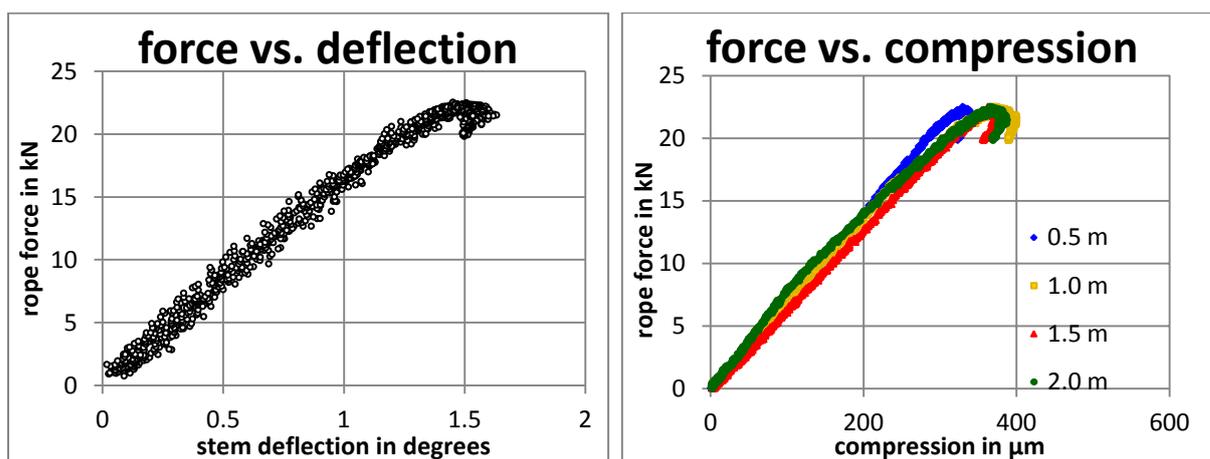


Abbildung 97, 98: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad ° bzw. der Faserkompression in µm, Baum 9: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, September 2012.

In den oben abgebildeten Graphiken ist zu erkennen, dass die Messdaten der Stammbiegung die Linearität ab ca. 21 kN verlassen. Ebenso ist im Diagramm der Faserstauchung auf der rechten Seite zu sehen, dass die Werte des gelben und grünen Elastometers den linearen Verlauf im Bereich von 20 kN – 21 kN verlassen. Eine kleine Verdickung ist bei ca. 7 kN in beiden Abbildungen zu erkennen, da hier eine Zugpause stattfand.

Der Zusammenhang zwischen dem Primärversagen der Stammbiegung und dem der Faserkompression ist deutlich anhand der Graphiken zu sehen. Beide finden bei selber Last zur selben Zeit statt.

8.2.2 Baum 10 (*Populus x canadensis*)

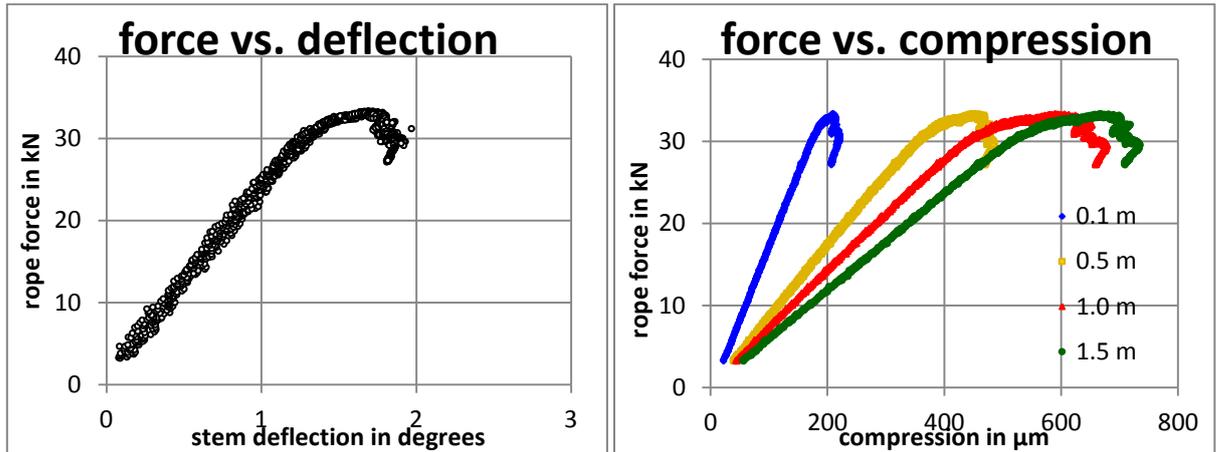


Abbildung 99, 100: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad ° bzw. der Faserkompression in μm , Baum 10: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, September 2012.

Die erste Auffälligkeit der oberen Diagramme ist, dass sie nicht bei 0 beginnen. Die Messgeräte wurden etwas zu spät eingeschaltet, weshalb schon eine gewisse Zugkraft aufgebaut war.

Ein Primärversagen der Stammbiegung ist bei ca. 30 kN zu erkennen, da hier die Krümmung der Kurve beginnt. Die Werte des gelben, roten und grünen Elastometers fangen an sich auch bei ca. 30 kN zu krümmen und zeigen das Primärversagen an. Die Messwerte des blauen Elastometers bleiben lange linear und beginnen erst bei 32 kN eine Krümmung auszubilden. Die Ursache für das Primärversagen im Stamm ist nach diesen Ergebnissen die Faserstauchung im Druckbereich.

Betrachtet man den unverzerrten Originalauszug aus der Excel-Auswertung, ist beim blauen Elastometer deutlich nach dem Primärversagen ein kleiner Abstand in der Datenreihe zu erkennen. Die anderen drei Elastometerwerte zeigen zum selben

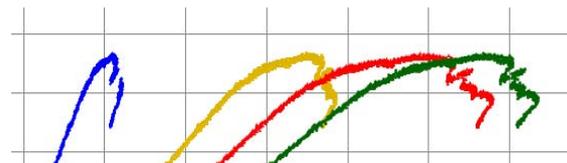


Abbildung 101: Ein vergrößerter Auszug aus der originalen Excel-Datei. Die Messdaten sind hier nicht komprimiert und somit besser sichtbar, *Populus x canadensis*, Wien, September 2012.

Zeitpunkt einen starken Ausschlag an. Wenn man einen Blick in die Messdatentabelle macht, kann festgestellt werden, dass es sich hierbei um einen Riss im Stamm oder im Wurzelbereich handelt, da bei den Messstellen 1384 - 1385 ein Sprung der Daten der Elastometer und des Forcemeters vorhanden ist. Auch ein kleiner Spalt im Bereich des unteren Inclinometers ist zu sehen, weshalb nicht eindeutig geklärt werden kann, ob es sich um einen Riss im Stamm oder einen Wurzelabriss, also Sekundärversagen, handelt.

8.2.3 Baum 11 (*Populus x canadensis*)

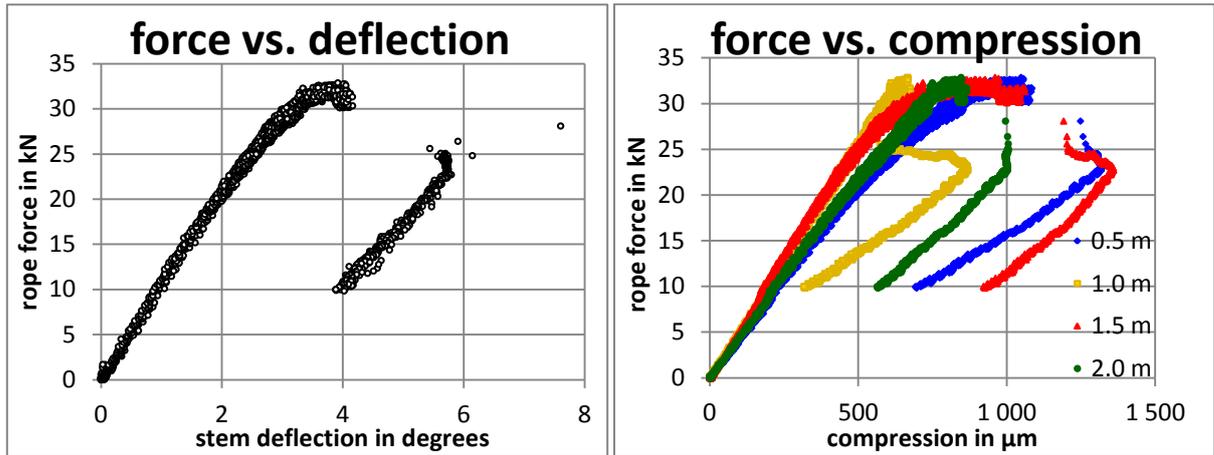


Abbildung 102, 103: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad ° bzw. der Faserkompression in μm , Baum 11: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, September 2012.

Das Diagramm der Stammbiegung zeigt eine Krümmung der Messdatenreihe im Bereich von 25 kN – 27 kN. In der Graphik der Elastometerwerte sieht man, dass sowohl die Daten des roten als auch des blauen Elastometers im Bereich von ca. 25 kN – 27 kN beginnen sich zu krümmen. Die Daten des grünen Elastometers fangen, wenn überhaupt, erst später an eine Kurve zu bilden, während die Daten des gelben Elastometers linear bleiben. Bei ca. 30 kN biegen sich sowohl die Graphen der Elastometerwerte als auch der der Stammbiegung deutlich mehr. Die Abweichung der Linearität der Elastometerwerte spiegelt sich im Graphen der Stammbiegung wieder. Anhand der Messdaten ist somit die Ursache für das Primärversagen im Stamm die Faserstauchung im Druckbereich des Stammes. Der Sprung in den Graphen deutlich nach dem Primärversagen zeigt einen Riss an.

Nr:	Zeit (s)	F (kN)	E (0.5m)	E (1m)	E (1.5m)	E (2m)	$I_u(^{\circ}x)$	$I_u(^{\circ}y)$	$I_o(^{\circ}x)$	$I_o(^{\circ}y)$
1570	48426.5156	31.69	-1084.6	-674.5	-1060.1	-865.3	0.162	3.892	-7.895	1.355
1571	48426.7656	31.32	-1082.7	-675	-1061.6	-865.7	0.171	3.888	-7.934	1.378
1572	48427.0156	28.09	-1248.4	-544	-1191.6	-995.9	0.155	2.815	-9.931	3.169
1573	48427.2656	26.4	-1257	-549	-1202.7	-1003	-0.244	3.176	-8.19	3.945
1574	48427.5156	25.6	-1265.6	-573.5	-1203	-1005.3	-0.255	4.079	-8.697	3.892

Abbildung 104: Auszug aus der Datentabelle des Baumes 11. Messnummer (Nr.), Zeit (s), Kraft F (kN) Elastometerwerte (E) in unterschiedlichen Höhen (0.5, 1, 1.5, 2 m), Inclinometerwerte des unteren Messgerätes (I_u) in X- und Y- Richtung in °, sowie des Oberen (I_o) sind in der Tabelle ersichtlich, *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, September 2012.

Dieser Riss entstand plötzlich mit einem lauten Knall an der Zugseite, also auf der Rückseite der Seilzugrichtung und führte zu einer Erhöhung der Stammbiegung um 1,5° innerhalb von einer halben Sekunde. Außerdem verursachte er eine andere Lastverteilung im Baumstamm, auf die die Faserdehnungen unterschiedlich reagierten. Während sich die

Fasern in 1 m Höhe entspannten, wurden die anderen stärker komprimiert. In dem Auszug der Datentabelle ist eine sprunghafte Veränderung fast aller Messwerte zu beobachten.

Da die Inclinometerwerte des unteren Messgerätes nur kurz von 3.888° auf 2.815° abfallen und danach wieder auf 3.176° steigen, während die Elastometerwerte nach dem Anstieg konstant bleiben, ist ein Wurzelabriss unwahrscheinlich und die Ursache für diese sprunghafte Veränderung ein Riss.



Abbildung 105: Rissbildung an der Zugseite des Baumstammes, Baum 11: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, September 2012.

8.2.4 Baum 12 (*Populus x canadensis*)

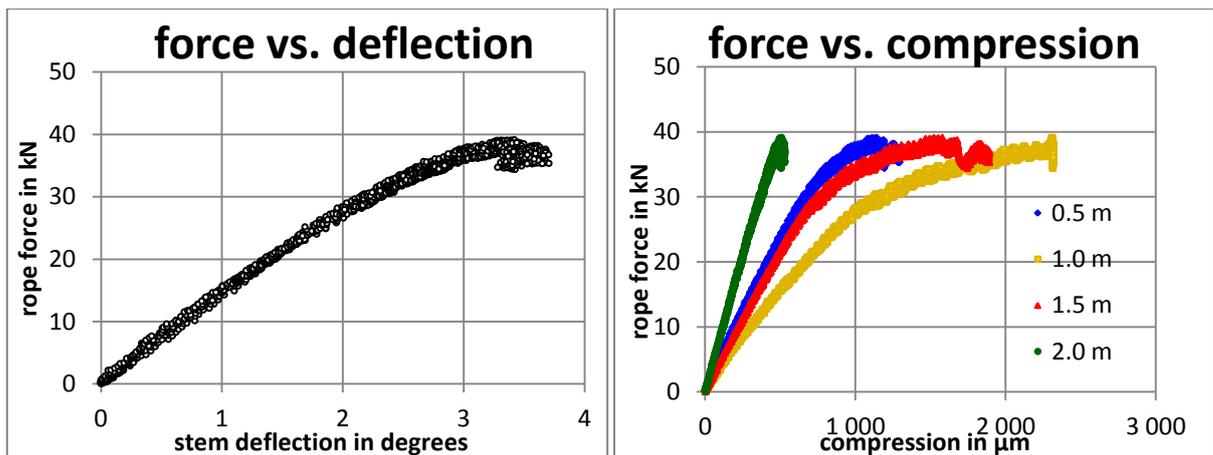


Abbildung 106, 107: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad ° bzw. der Faserkompression in μm, Baum D: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, September 2012.

In der oberen linken Abbildung, die die Stammbiegung zeigt, ist der Beginn einer Krümmung bei ca. 27 kN - 29 kN zu erkennen. Im Diagramm der Faserstauchung ist auch eine Abweichung des linearen Verlaufes der Messreihe des blauen, gelben und roten Elastometers bei ca. 27 kN – 29 kN zu erkennen. Die Datenreihe des grünen Elastometers bleibt linear. Da ein Zusammenhang deutlich zu erkennen ist und auch die Krümmungen von drei Elastometerwerten zeitgleich mit denen der Stammbiegung einher gehen, kann von einem Faserstauchen als Ursache für das Primärversagen ausgegangen werden. Die Daten am Ende der Messreihe zeigen den typischen Verlauf des Standversagens mit Wurzelabrissen.

8.2.5 Baum 13 (*Populus x canadensis*)

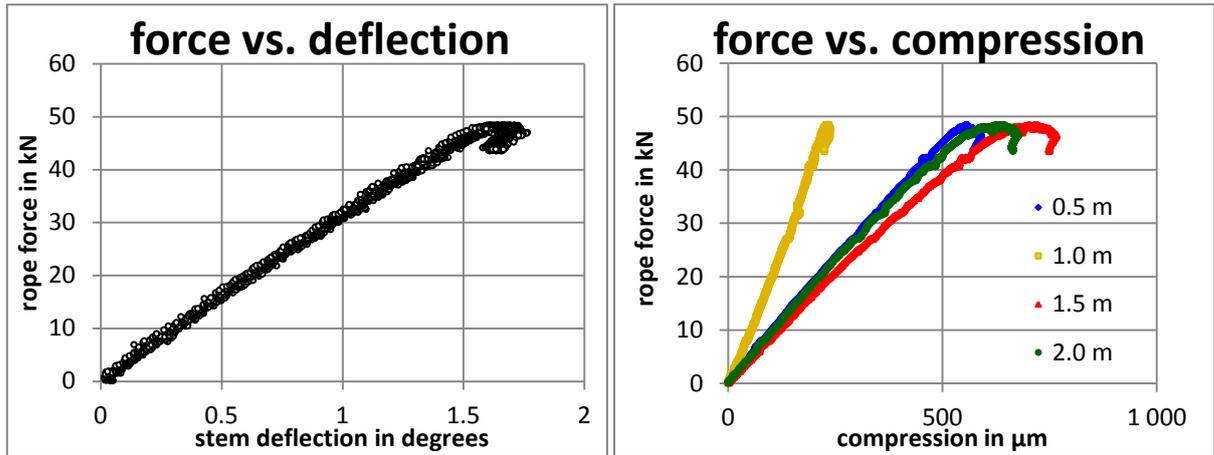


Abbildung 108, 109: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad ° bzw. der Faserkompression in μm , Baum 13: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, September 2012.

In der Graphik der Stammbiegung ist ein Abweichen der Linearität bei ca. 45 kN – 47 kN zu sehen. Vergleicht man dies mit der der Faserstauchung erkennt man, dass die Werte des roten und des grünen Elastometers ebenfalls in diesem Lastbereich das erste Mal zu krümmen beginnen und ab ca. 48 kN die Belastung deutlich zunimmt. Die Messreihe des blauen Elastometers bleibt bis ca. 48 kN linear und beginnt erst dann eine Krümmung zu bilden. Die Daten des gelben Elastometers bleiben bis zur Entwurzelung des Baumes im linearen Bereich. Anhand der Messungen ist zu sehen, dass ein Zusammenhang des Primärversagens in der Stammbiegung, vom Primärversagen in der Druckfaser gegeben ist. Das Primärversagen in der Stammbiegung ist durch Faserstauchen im Druckbereich verursacht worden.

8.2.6 Baum 14 (*Populus x canadensis*)

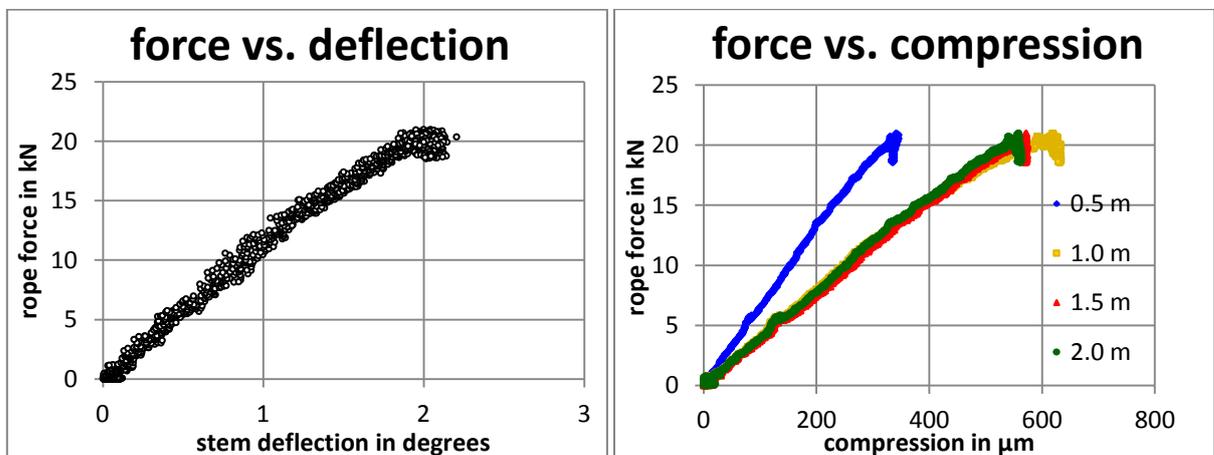


Abbildung 110, 111: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad ° bzw. der Faserkompression in μm , Baum 14: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, September 2012.

Das linke Bild (Abb. 110) des Baums F zeigt eine Abweichung der Linearität bei ca. 17 kN – 19 kN der Datenreihe der Stammbiegung. Messwerte des gelben, grünen und roten Elastometers machen ebenfalls im Bereich von ca. 17 kN – 19 kN einen leichten Knick, nur die des blauen Elastometers bleiben linear. Das Verlassen der Linearität der Messwerte ist somit zeitgleich in der Stammbiegung und an der Randfaser des Druckbereiches des Baumstammes zu erkennen. Anhand dieser Untersuchungen ist das Primärversagen im Stamm durch Faserstauchung im Druckbereich verursacht worden.

Die starke Krümmung am Ende der Messdatenreihen in der Stammbiegung und in der Faserstauchung zeigt die Entwurzelung des Baumes.

8.2.7 Baum 15 (*Populus x canadensis*)

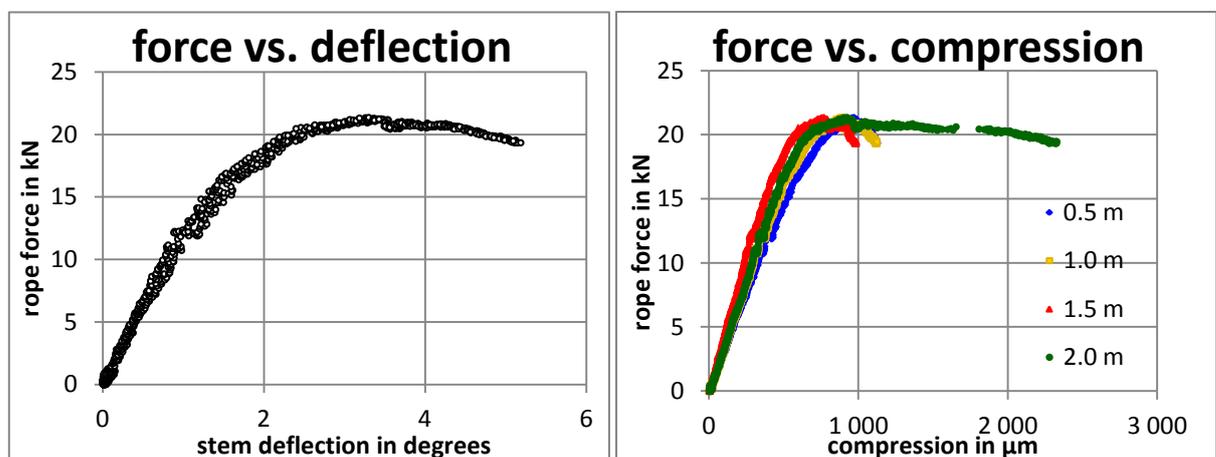


Abbildung 112, 113: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad ° bzw. der Faserkompression in μm , Baum 15: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, September 2012.

Das linke Diagramm zeigt, dass die Linearität bei ca. 15 kN verlassen wird und der Baum sich danach nicht mehr im elastischen Bereich befindet. Im rechten ist bei genauer Betrachtung ebenfalls zu sehen, dass schon bei ca. 15 kN die Messdaten aller vier Elastometer die Linearität verlassen und eine leichte Krümmung entsteht. Bei ungefähr 20 kN beginnen schließlich alle Werte eine noch stärkere Kurve zu bilden. Ein Zusammenhang zwischen Versagen in der Stammbiegung und in der Faserstauchung der Druckfasern ist somit gegeben. Die Ursache für das Primärversagen im Stamm ist, anhand der gesammelten Daten, Faserstauchung im Druckbereich des Stammes.

Der Haken in der Mitte des Messdatenverlaufes zeigt ein Verrutschen des Verankerungsgurtes des Greifzuges an. Dadurch ist eine Schwingung entstanden, weshalb die Messpunkte einen unruhigen Verlauf haben.

Am Ende des Verlaufes sieht man, dass die Faserkompression des grünen Elastometers auf 2 m Höhe stark ansteigt. Der Baum ist auf dieser Höhe gebrochen. Der Sprung am Ende des grünen Graphen zeigt einen Riss, der sich durch die einwirkenden Kräfte auf das geschädigte Holz, gebildet hat.

8.2.8 Baum 16 (*Populus x canadensis*)

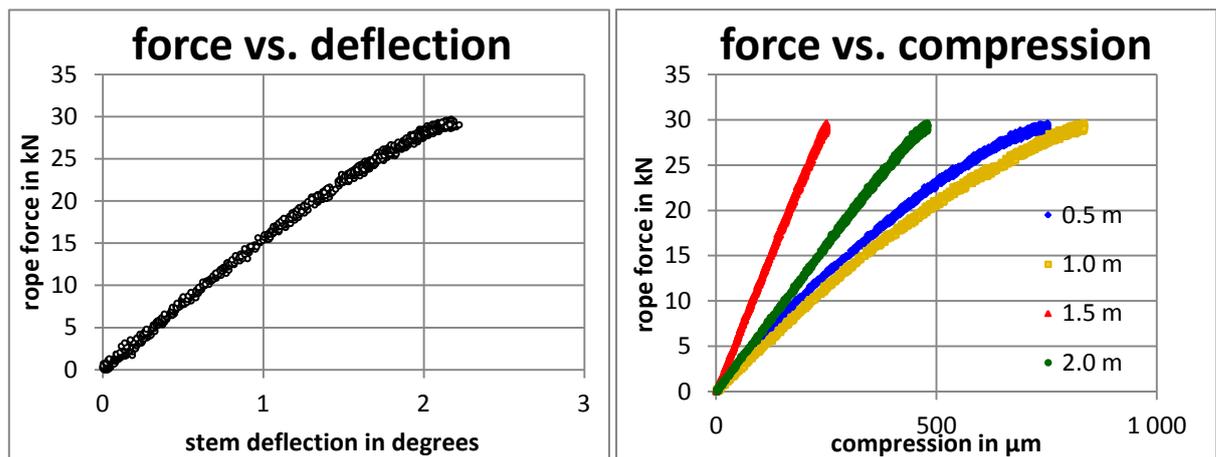


Abbildung 114, 115: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad ° bzw. der Faserkompression in µm, Baum 16: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Oktober 2012.

In der linken Abbildung ist zu sehen, dass der lineare Verlauf der Stammbiegung im Bereich von ca. 20 kN verlassen wird. Der Stamm bewegt sich danach nicht mehr im elastischen Bereich und hat somit primär versagt. Im rechten Diagramm sieht man, dass die Messdaten unterschiedlich verlaufen. Die Daten des blauen, gelben und grünen Elastometers bilden bei ca. 20 kN eine Krümmung, während die des roten Elastometers linear bleiben. Ein Zusammenhang zwischen Primärversagen in der Stammneigung und Primärversagen der Druckfasern ist gegeben. Die unterschiedlichen Datenverläufe der Elastometerwerte spiegeln sich in denen der Stammbiegung wieder. Aufgrund dessen kann angenommen werden, dass die Ursache für das Primärversagen im Stamm Faserstauchen im Druckbereich der Randfaser.

8.2.9 Baum 17 (*Populus x canadensis*)

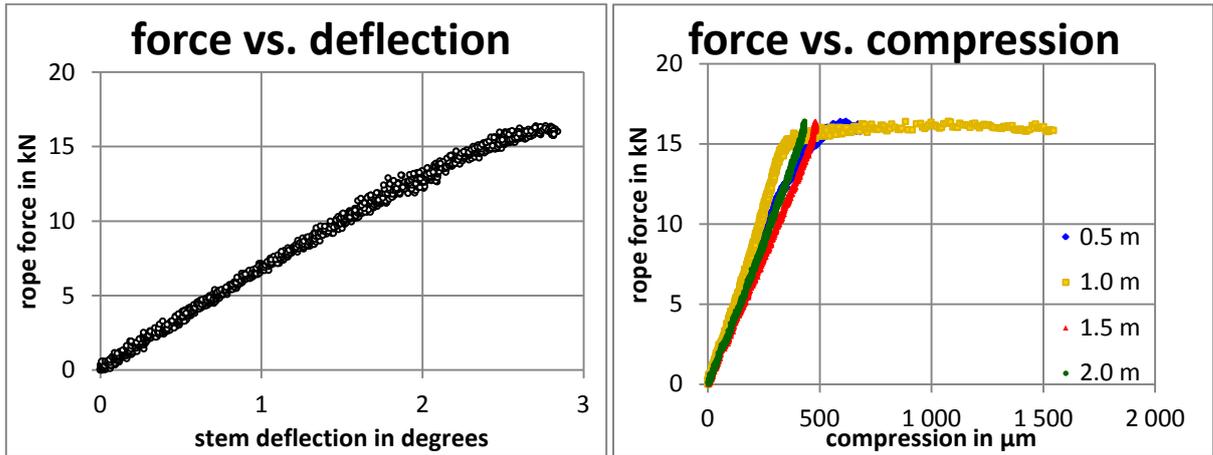


Abbildung 116, 117: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad ° bzw. der Faserkompression in μm, Baum 17: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Oktober 2012.

Die linke Graphik des Baumes 17 zeigt, dass die Stammbiegung bei ungefähr 13 kN – 14 kN die Linearität verlässt und somit nach dem HOOKE'schen Gesetz versagt. In der rechten Abbildung ist zu sehen, dass lediglich die Daten des blauen Elastometers bei ca. 13 kN diesen Bereich verlassen. Die Messdaten des gelben Elastometers verlassen den linearen Verlauf bei etwa 14 kN. An dieser Stelle bilden sich kurz danach ein Knick und im weiteren Verlauf ein Riss, nur ein wenig vor der Demontage der Messgeräte, die aus Sicherheitsgründen abgenommen wurden. Der Riss bildete sich auf der Zugseite wie bei Baum 11. Das Primärversagen im Bereich des blauen Elastometers und dessen in der Stammbiegung korrelieren. Die Messdatenreihen des roten und des gelben Elastometers zeigen einen durchgängigen, linearen Verlauf.

8.2.10 Baum 18 (*Populus x canadensis*)

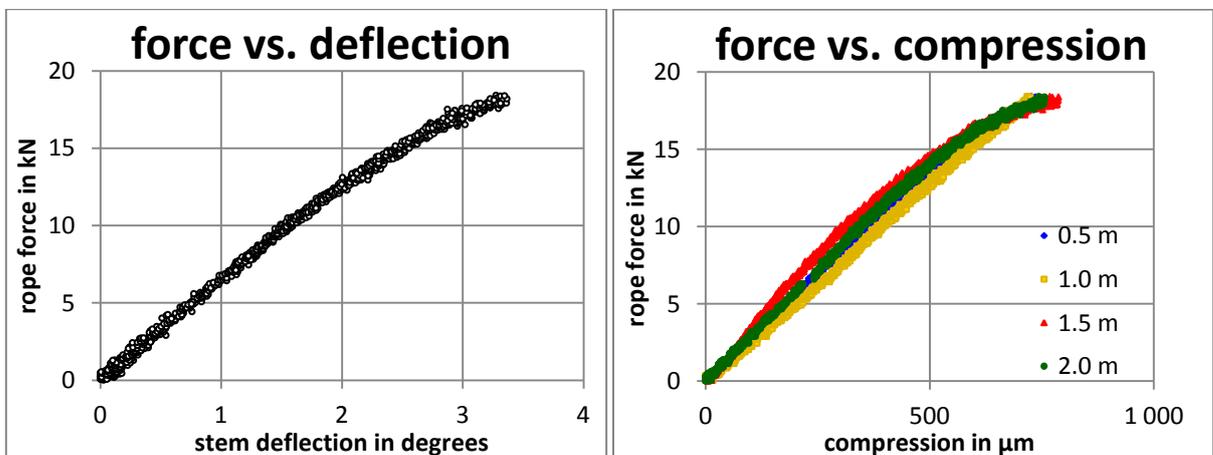


Abbildung 118, 119: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad ° bzw. der Faserkompression in μm, Baum 18: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Oktober 2012.

Anhand der linken Graphik des Baums 18 ist zu erkennen, dass die Messdaten der Stammbiegung die Linearität bei ungefähr 12 kN – 14 kN verlassen. Die Daten des blauen und roten Elastometers überschreiten die Elastizitätsgrenze ebenfalls ungefähr zwischen 12 kN und 14 kN, wie in der rechten Graphik zu sehen ist. Die Daten des grünen Elastometers entfernen sich von der Linearität bei ca. 15 kN, während die Messreihe des gelben Elastometers linear bleibt. Ein Zusammenhang ist anhand der beiden Diagramme zu bemerken. Die Elastometerwerte zeigen das Primärversagen bei derselben Belastung wie in der Stammbiegung. Die Ursache für das Versagen im Stamm ist somit auf die Faserstauchen im Druckbereich des Stammes zurückzuführen.

8.2.11 Baum 19 (*Populus x canadensis*)

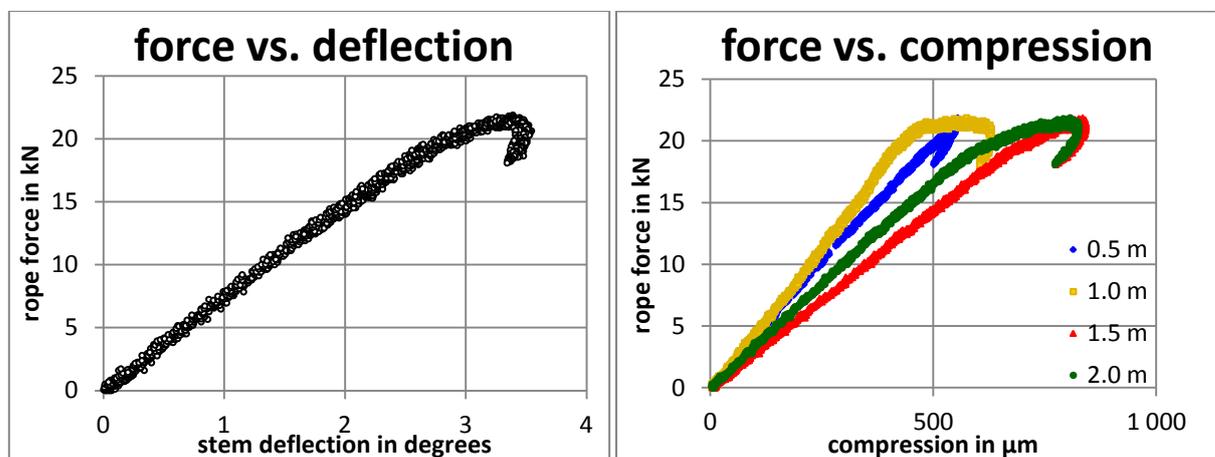


Abbildung 120, 121: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad ° bzw. der Faserkompression in µm, Baum 19: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Oktober 2012.

In der Abbildung 120 ist zu sehen, dass die Stammbiegung die Linearität bei ca. 17 kN – 19 kN verlässt, hier die Elastizitätsgrenze überschreitet und das Primärversagen markiert. Die Daten des roten und grünen Elastometers passieren diese ebenfalls bei ungefähr 17 kN, wie in der rechten Graphik zu erkennen ist. Ob die Werte des blauen Elastometers tatsächlich ein Primärversagen darstellen, ist nur schwer ersichtlich. Die Daten des gelben Elastometers bleiben lange linear bis sich schließlich bei ca. 19 kN eine Kurve bildet. Eine Verbindung ist trotzdem deutlich gegeben. Das Primärversagen der Stammbiegung ist zeitgleich mit dem der Randfasern im Druckbereich und die Ursache für das Primärversagen im Stamm somit Faserstauchung.

8.2.12 Baum 20 (*Populus x canadensis*)

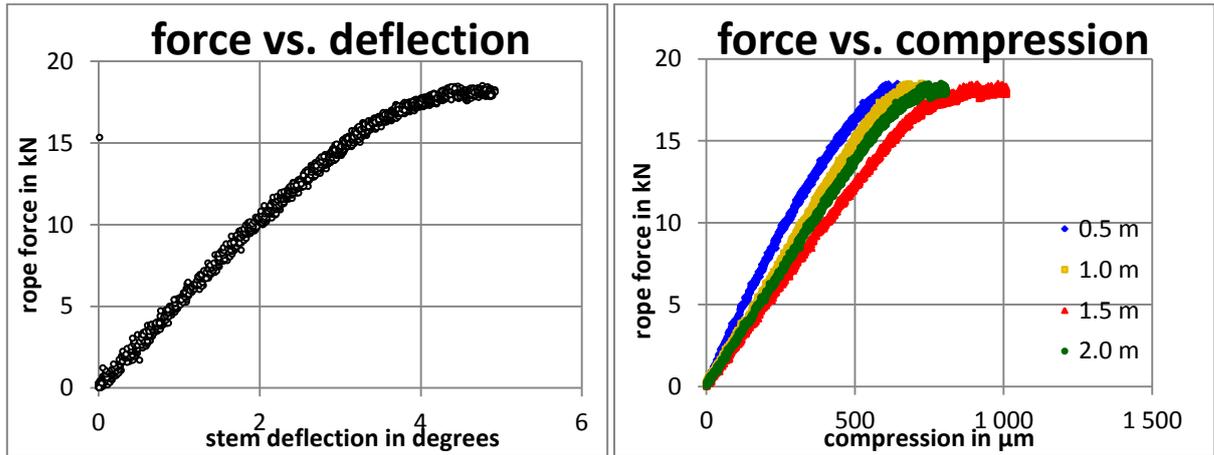


Abbildung 122, 123: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad ° bzw. der Faserkompression in μm , Baum 20: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Oktober 2012.

Im linken Diagramm des Baumes L ist zu sehen, dass bis ca. 15 kN eine Linearität gegeben ist. Danach wird die Elastizitätsgrenze überschritten und das Material hat nach HOOKE'schen Gesetz versagt. Demgegenüber zeigt das rechte Diagramm, dass alle Daten der Elastometer ebenfalls bei ungefähr 15 kN – 16 kN diesen Bereich verlassen. Die Abweichungen der Linearität spiegeln sich somit in der ersten Graphik wieder. Die Ursache für das Primärversagen im Stamm, ist anhand dieser Daten, die Faserstauchung im Druckbereich.

8.2.13 Baum 21 (*Populus x canadensis*)

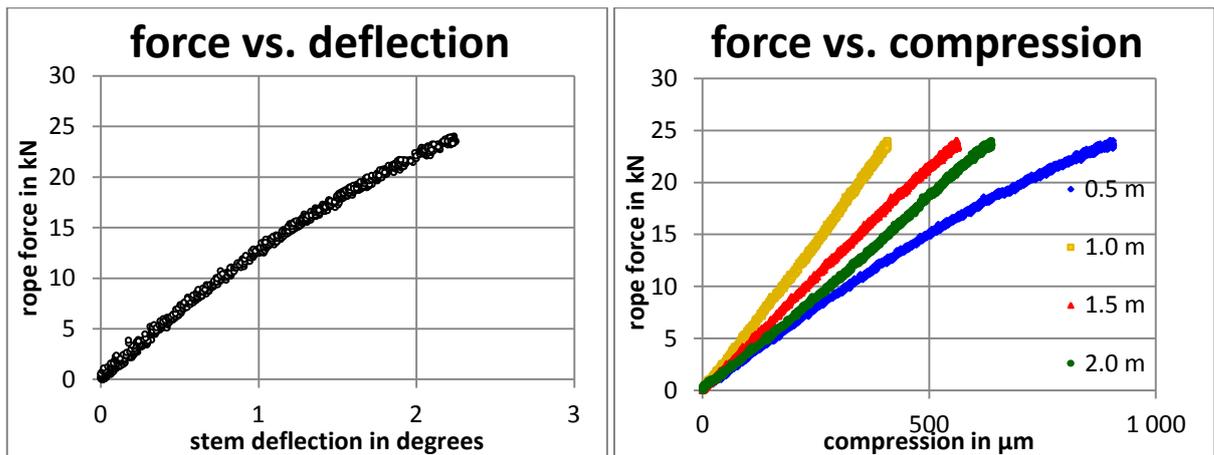


Abbildung 124, 125: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad ° bzw. der Faserkompression in μm , Baum 21: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Oktober 2012.

Abbildung 124 zeigt, dass die Werte des Baumes M vermutlich nie einen komplett linearen Verlauf hatten. Trotzdem ist ungefähr bei 15 kN eine etwas stärkere Krümmung als davor zu erkennen. In der rechten Graphik ist zu sehen, dass die Daten des blauen Elastometers

ebenfalls bei ca. 15 kN die Linearität verlassen. Die Werte des roten und grünen Elastometers beginnen sich erst später leicht zu krümmen, die des gelben Elastometers bleiben linear.

Da am Messpunkt des blauen Elastometers in ca. 1 m Höhe das Primärversagen zeitgleich mit der Stammbiegung angezeigt wird, ist das Primärversagen im Stamm durch Faserstauchung im Druckbereich verursacht worden.

8.3 Versuchsreihe 22-24

In einer weiteren Zusammenarbeit der Österreichischen Bundesforste (ÖBF) und dem Sachverständigenbüro PROSENZ wurden im Juni 2013 noch 3 andere Bäume, die uns zur Verfügung standen, gezogen und zwar eine Bergulme (*Ulmus glabra*), Esche (*Fraxinus excelsior*) und ein Bergahorn (*Acer pseudoplatanus*). Dabei wurden hier nur drei Elastometern ausgewertet, da eines sichtlich falsche Messungen ergab. Dies wurde auch von der Firma argus electronics GesmbH bestätigt.

8.3.1 Baum 22 (*Ulmus glabra*)

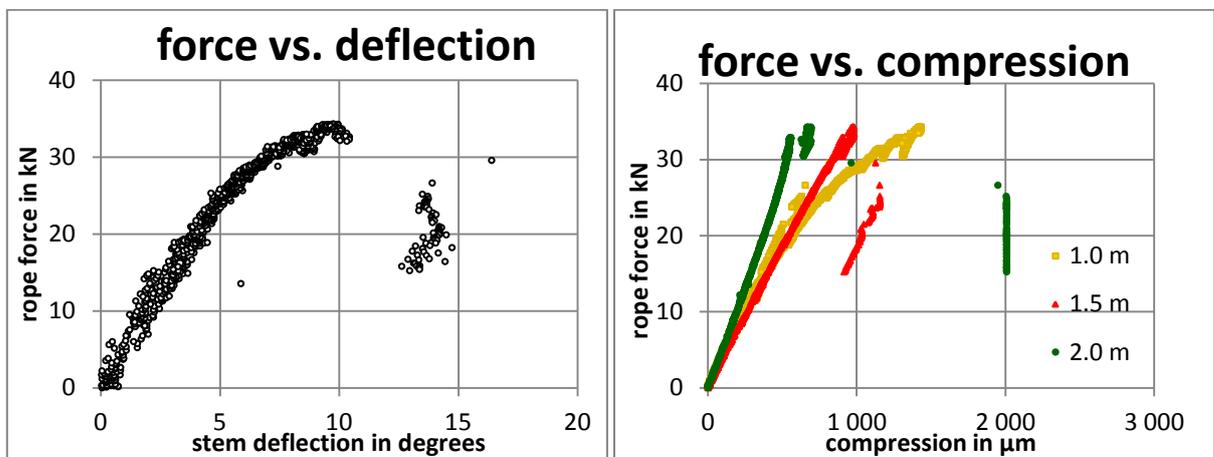


Abbildung 126, 127: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad ° bzw. der Faserkompression in μm , Baum 22: *Ulmus glabra*, Spittal an der Drau, Juni 2013.

In der Graphik links oben ist ein Primärversagen bei ca. 20 kN zu sehen. Die Messdaten beginnen hier nicht mehr linear zu steigen, sondern krümmen sich und haben somit die Elastizitätsgrenze überschritten. Im fortgeschrittenen Teil der Messung entsteht ein Abstand, welcher einen Riss in der Zugseite des Baumes darstellt. Dieser spiegelt sich auch in den Messdaten der Elastometer (Abb. 127) wider. Während die Messdaten des roten und grünen Elastometers nach dem Riss zunehmen, sinkt die des gelben Elastometers auf ca. 700 μm in den alten Verlauf. Während bei denen des grünen und des roten Elastometers kein Primärversagen zu erkennen ist, versagt an der Messstelle des gelben Elastometers die Faser in 1 m Höhe bei ca. 20 kN.

Die Messung der Faserstauchung spiegelt sich in der Stammbiegung. Ein Primärversagen findet zeitgleich in der Faserstauchung und in der Stammbiegung statt.

Nr:	Zeit (s)	F (kN)	E (0.5m)	E (1m)	E (1.5m)	E (2m)	I _u (°x)	I _u (°y)	I _o (°x)	I _o (°y)
1622	41865.7344	32.05	-2632.8	-1314.7	-950	-644	-0.576	1.641	-0.098	-12.064
1623	41865.9844	32.14	-2629	-1304.8	-937.1	-634.8	-0.563	1.649	0.229	-11.776
1624	41866.2344	29.56	-2348.1	-818.2	-1127	-963.2	-0.504	1.893	-0.689	-18.344
1625	41866.4844	26.62	-2265.7	-654.7	-1154.6	-1949.6	-1.051	2.875	6.028	-15.86
1626	41866.7188	25.16	-2244.5	-629.4	-1155.9	-2005.2	-1.177	2.83	8.028	-14.484
1627	41866.9688	24.89	-2233.1	-616.7	-1156	-2008.2	-1.209	2.882	8.49	-14.548

Abbildung 128: Auszug aus der Datentabelle des Baumes 22. Messnummer (Nr.), Zeit (s), Kraft F (kN) Elastometerwerte (E) in unterschiedlichen Höhen (0.5, 1, 1.5, 2), Inclinometerwerte des unteren Messgerätes (I_u) in X- und Y- Richtung in ° sowie des Oberen (I_o) sind in der Tabelle ersichtlich, Baum I: *Ulmus glabra*, Spittal an der Drau, Juni 2013.

Der Riss, welcher anhand der Stammbiegung und auch der Elastometerwerte gut zu erkennen ist, kann anhand der Rohdaten (Abb. 128) innerhalb einer halben Sekunde, also nach ungefähr 100 Messungen, erkannt werden. Die Spannungsverhältnisse im Stamm werden nachher neu verteilt, wodurch es dazu kommt, dass die Elastometerwerte unterschiedlich verlaufen. So sind die Messdaten des gelben Elastometers im Bereich von 700 µm sehr weit zurückgefallen, während andere wie die des roten oder grünen sogar etwas gestiegen sind und erst später leicht fallen.

Der Baum wurde ausgewählt, da er eine massive Stockfäule hatte und demnach gut geeignet war für den Test, welche Versagensart als Erstes auftreten würde.

8.3.2 Baum 23 (*Fraxinus excelsior*)

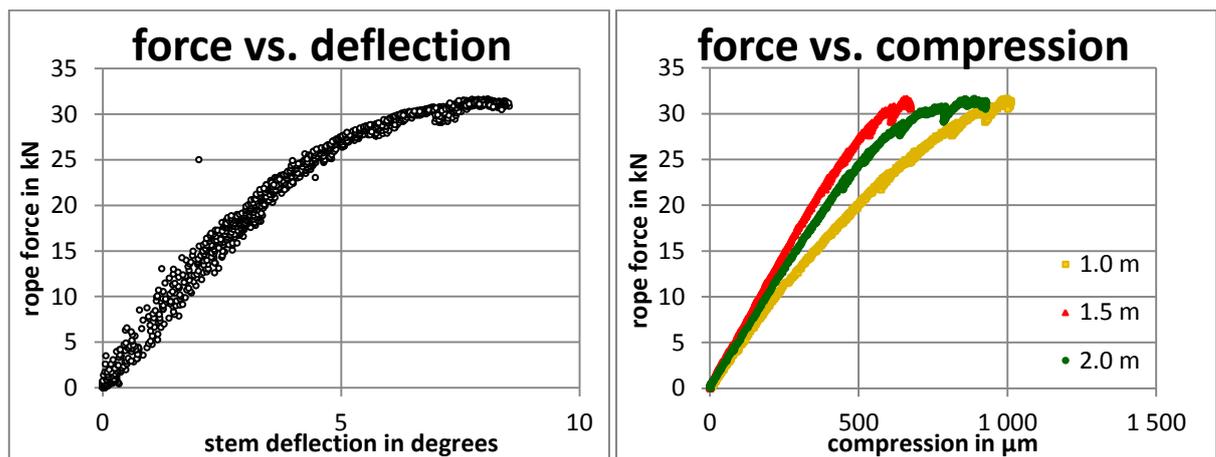


Abbildung 129, 130: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad ° bzw. der Faserkompression in µm, Baum 23: *Fraxinus excelsior*, Spittal an der Drau, Juni 2013.

Anhand der Graphik links oben ist zu erkennen, dass in der Stammbiegung ein Primärversagen im Bereich von ca. 17 kN – 20 kN stattgefunden hat. Im Diagramm der Elastometerwerte rechts oben ist ein Primärversagen der Messdaten des gelben auch bei ca. 17 kN zu erkennen. Die Werte des roten und grünen Elastometers zeigen erst später

bei ca. 20 kN das Primärversagen. Die Krümmungen der Elastometerwerte spiegeln sich in der der Stammbiegung wieder. Anhand der Messungen ist das Primärversagen im Stamm somit durch Faserstauchung im Druckbereich verursacht worden.

Weiters sind bei ca. 22 kN kleine Krümmungen mit einem Kraftabfall zu erkennen. Betrachtet man die Messdaten, so ist dies als Rissymptom zu deklarieren. Bei den Messpunkten 942 - 944 ist ein sprunghafter Abfall der Kraft, sowie ein kleiner Sprung der Faserstauchung zu erkennen, was auf einen Riss im Stamm oder auf ein Wurzelabreißen schließen lässt.

Da jedoch die Messdaten des unteren Inclinometers keine großen Sprünge zeigen, ist ein Wurzelabriss unwahrscheinlich. Dieselben Erkenntnisse kann man beim der zweiten Krümmung mit Lastabfall bei ca. 25 kN feststellen. Beim Messpunkt 1094 ist ein sprunghafter Einbruch der Kraft und der Faserstauchung zu erkennen, während sich die Werte des unteren Inclinometers nicht auffallend verändern.

Die anderen Zacken weiter oben sind schwer zu interpretieren. Sie können Wurzelabriss, Stammrisse oder eine Zugpause darstellen.

8.3.3 Baum 24 (*Acer pseudoplatanus*)

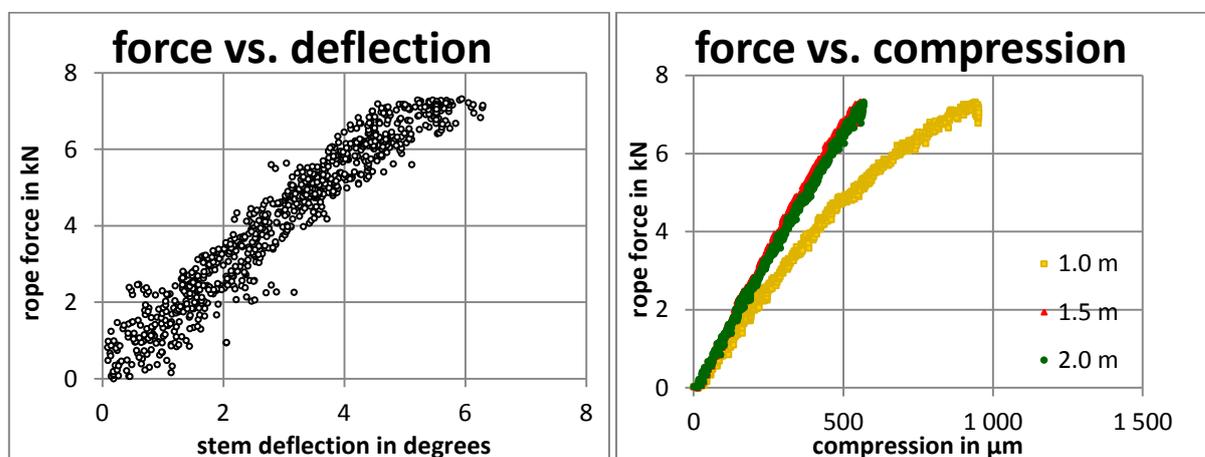


Abbildung 131, 132: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad ° bzw. der Faserkompression in μm , Baum 24: *Acer pseudoplatanus*, Spittal an der Drau, Juni 2013.

Im Diagramm der Stammbiegung oben links lässt sich kein eindeutiges Primärversagen feststellen. Die Krümmung am Ende der Datenreihe könnte der Ansatz hiervon sein, jedoch ist dies nicht eindeutig. Die Graphik der Faserstauchung auf der rechten Seite zeigt, dass die Werte des grünen und roten Elastometers recht ident linear ansteigen und somit kein Primärversagen zeigen. Die Messdaten des gelben Elastometers zeigen ein Primärversagen schon sehr früh an, anscheinend aber zu wenig, um sich in der Graphik der Stammbiegung

widerzuspiegeln. Im Verlauf der Messung wird das Primärversagen der Fasern in 1 m Höhe zunehmend deutlich.

Die Kurve am Ende der Messdaten des gelben Elastometers ist eine Pause der Lasteinleitung. Die Materialien haben nachgegeben, weshalb die Werte zurückgehen.

Dieser Baum wurde ausgewählt, da er eine sehr ovale Stammform hatte und daher sehr gut geeignet gewesen wäre, um Schubrisse nach MATTHECK (2006 a) bzw. MATTHECK et al. (2006 b) zu provozieren. Der Stamm war parallel zur Zugrichtung 42 cm und normal dazu 126 cm breit. Nach dem Abnehmen der Geräte wurde weitergezogen und es traten plötzlich klaffende Risse an den Seiten des Stammes auf.

9. Vergleich der Ergebnisse aller 24 Versuchsbäume in Bezug Seilzugkraft und Stammbiegung

Bei den Zugversuchen mussten unterschiedliche Kräfte aufgebracht werden, da die Baumstämme verschiedene Durchmesser und Höhlungsgrößen hatten. Auch die unterschiedlichen Kronengrößen und Standorte (Randbaum/Bestandsbaum) hatten vermutlich Einfluss auf die Festigkeit des produzierten Holzes, da sie einer unterschiedlichen Windlast ausgesetzt waren.

In diesem Kapitel wird die Stammbiegung in Grad ° in Bezug zur Seilzugkraft in kN mit derselben Skalierung verglichen, um zu zeigen, welche unterschiedlichen Kräfte benötigt wurden.

9.1 Versuchsreihe 1-8

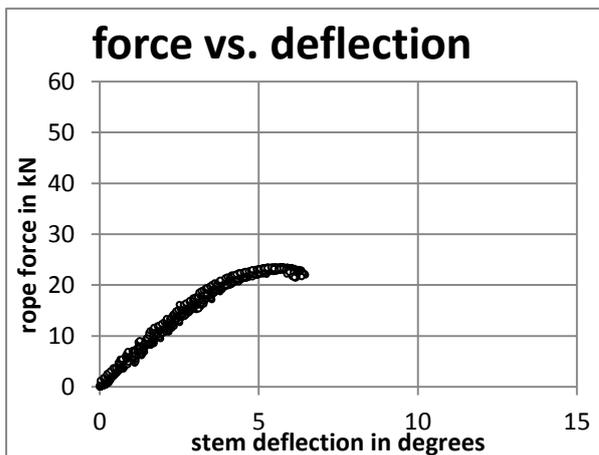


Abbildung 133: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad, Baum 1: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

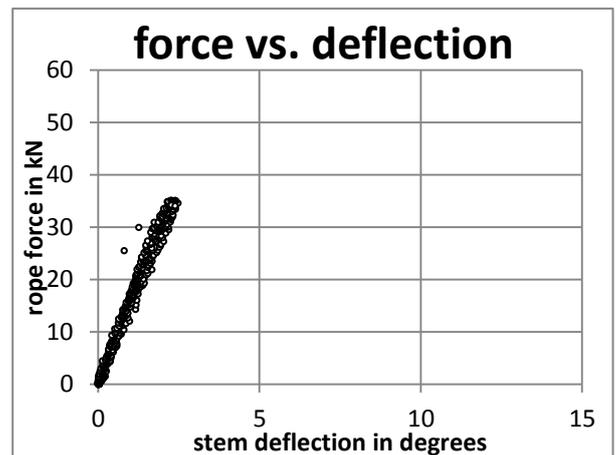


Abbildung 134: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad, Baum 2: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

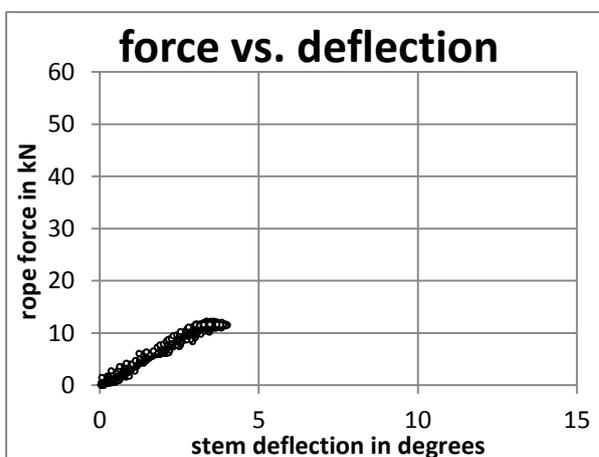


Abbildung 135: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad, Baum 3: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

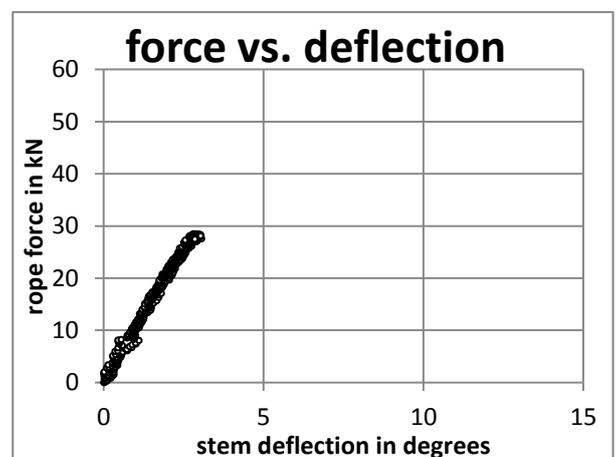


Abbildung 136: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad, Baum 1: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

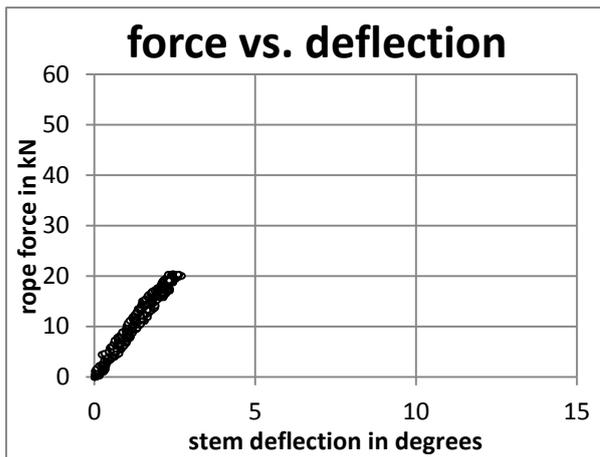


Abbildung 137: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad, Baum 5: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

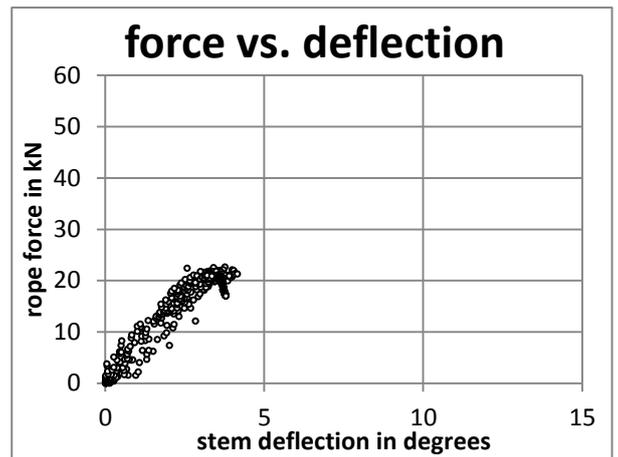


Abbildung 138: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad, Baum 6: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

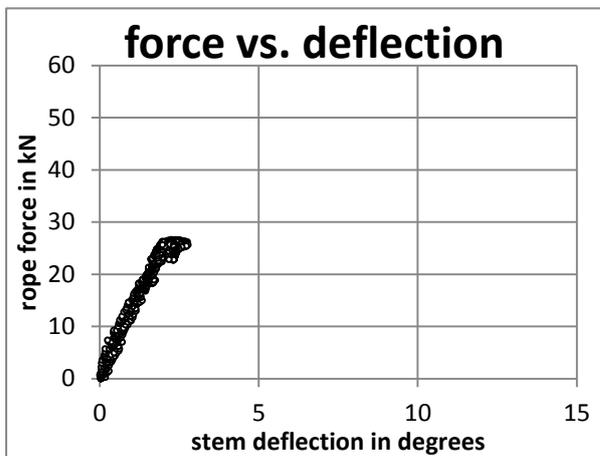


Abbildung 139: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad, Baum 7: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

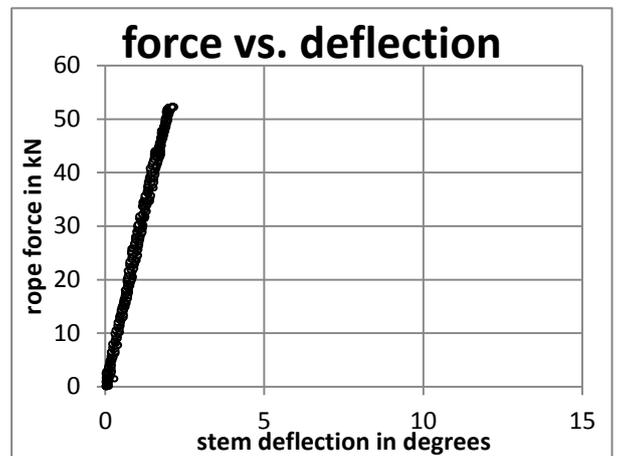


Abbildung 140: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad, Baum 8: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Juni 2014.

9.2 Versuchsreihe 9-21

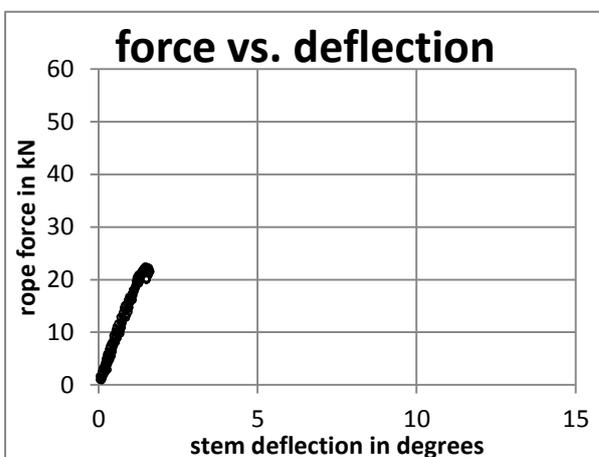


Abbildung 141: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad, Baum 9: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, September 2012.

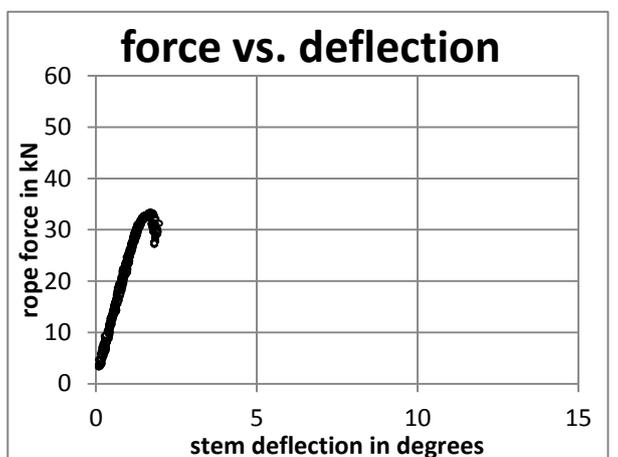


Abbildung 142: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad, Baum 10: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, September 2012.



Abbildung 143: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad, Baum 11: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, September 2012.

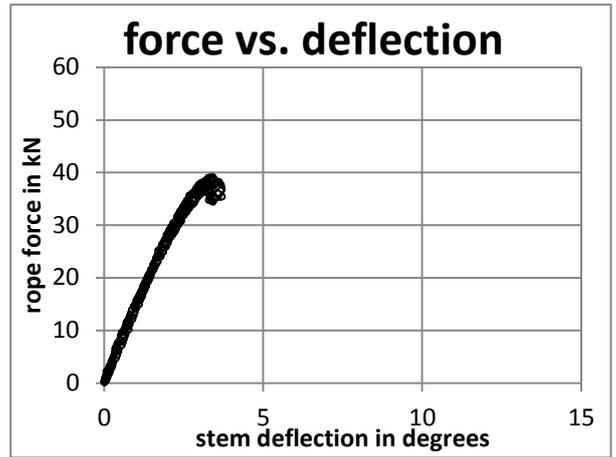


Abbildung 144: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad, Baum 12: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, September 2012.

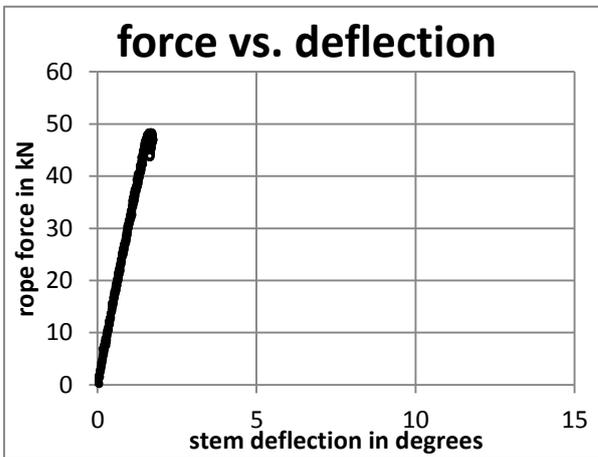


Abbildung 145: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad, Baum 13: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, September 2012.

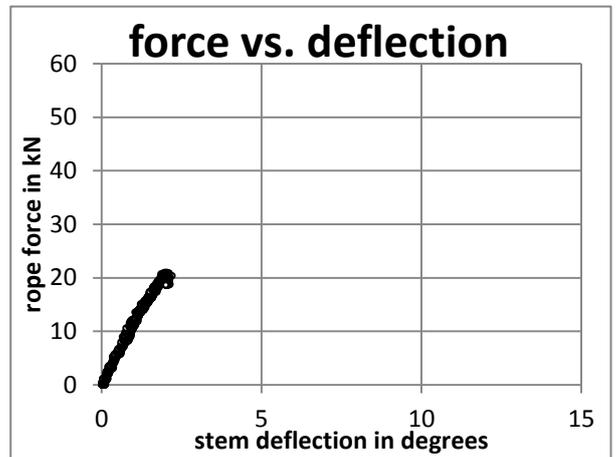


Abbildung 146: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad, Baum 14: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, September 2012.

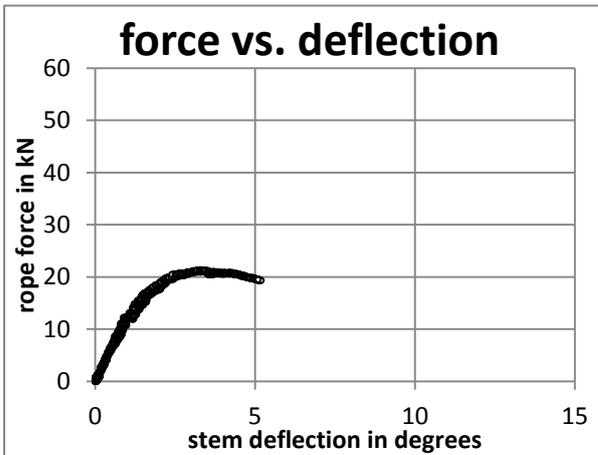


Abbildung 147: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad, Baum 15: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, September 2012.

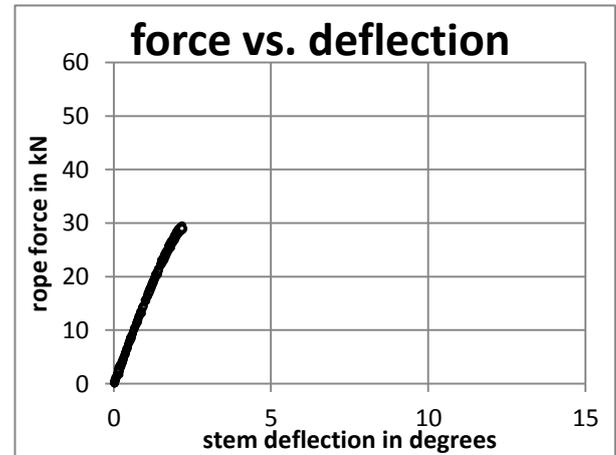


Abbildung 148: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad, Baum 16: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, September 2012.

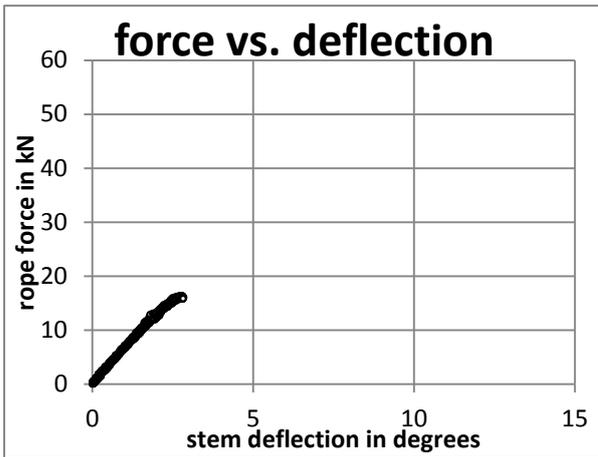


Abbildung 149: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad, Baum 17: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Oktober 2012.

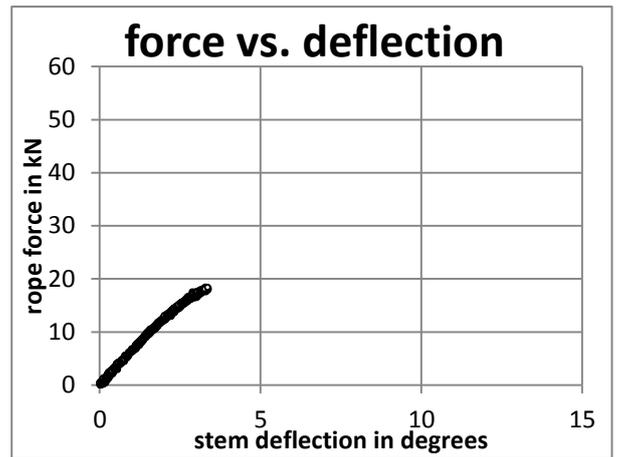


Abbildung 150: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad, Baum 18: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Oktober 2012.

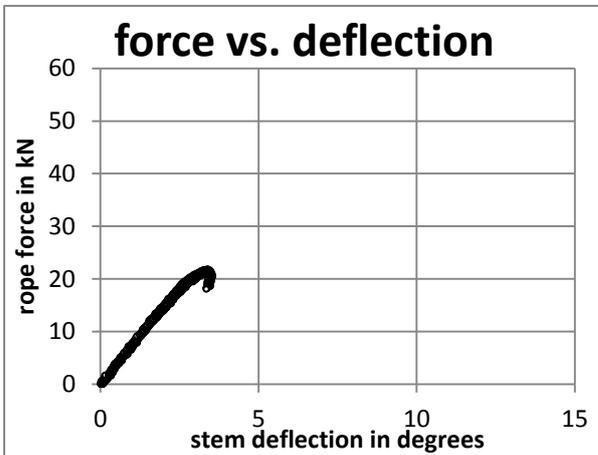


Abbildung 151: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad, Baum 19: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Oktober 2012.

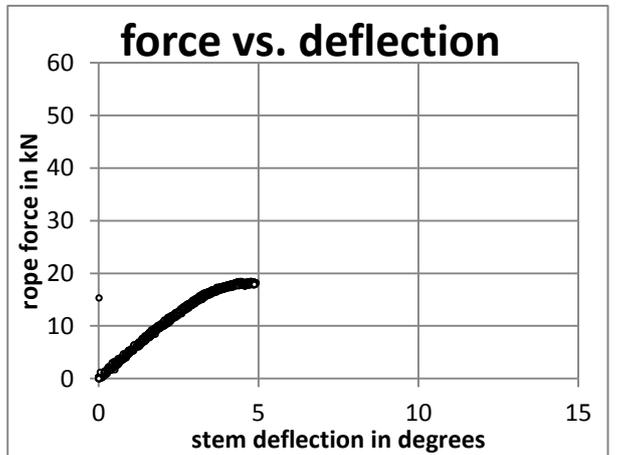


Abbildung 152: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad, Baum 20: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Oktober 2012.

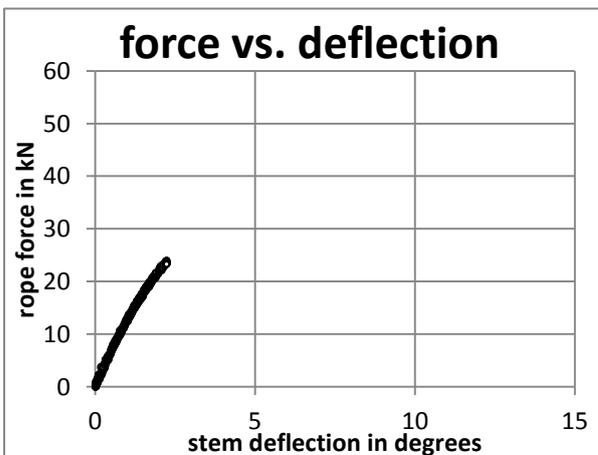


Abbildung 152: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad, Baum 21: *Populus x canadensis*, Aubad Tulln, Oktober 2012.

9.3 Versuchsreihe 22-24

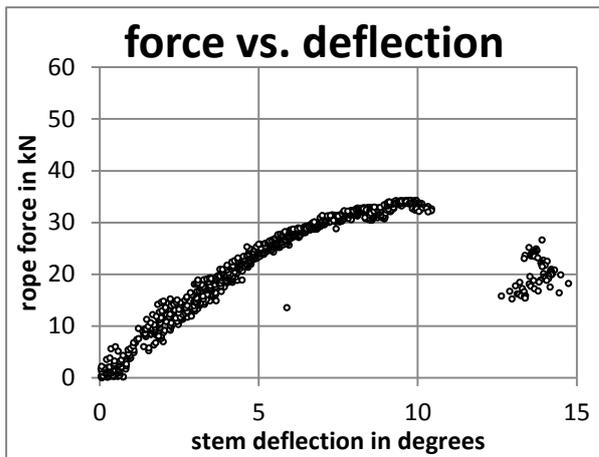


Abbildung 153: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad, Baum 22: *Ulmus glabra*, Aubad Tulln, Juni 2013.

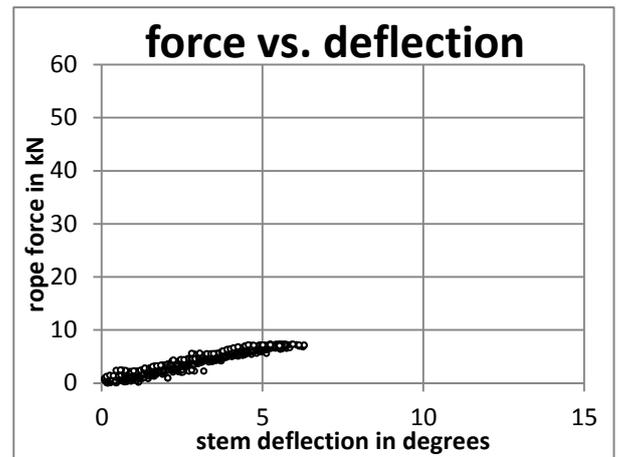


Abbildung 154: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad, Baum 23: *Fraxinus excelsior*, Aubad Tulln, Juni 2013.

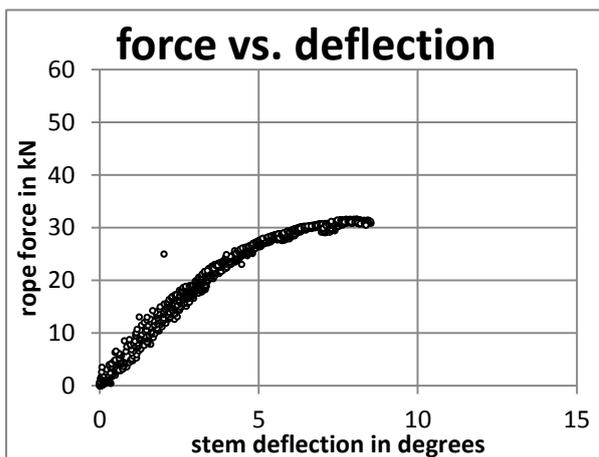


Abbildung 155: Gegenüberstellung der Seilzugkraft in kN und der Stammbiegung in Grad, Baum 24: *Acer pseudoplatanus*, Aubad Tulln, Juni 2013.

10. Interpretation der Ergebnisse und Diskussion

10.1 Primärversagen

Von den acht Kanadischen Holz-Pappeln der *Versuchsreihe 1-8* (im Aubad Tulln, Juni 2014) konnten fünf eindeutig bis zum Primärversagen der Stammbiegung belastet werden. Zwei Bäume blieben im elastischen Bereich und bei einem weiteren ist unklar, ob die Elastizitätsgrenze tatsächlich überschritten wurde.

Ebenfalls konnten bei den 13 Kanadischen Holz-Pappeln der *Versuchsreihe 9-22*, die gemeinsam mit dem Sachverständigenbüro PROSENZ und den Österreichischen Bundesforsten ebenso im Aubad Tulln im September 2012 gezogen wurden, alle bis zum Primärversagen der Stammbiegung belastet werden.

Somit war bei 18 - der insgesamt 21 – Kanadischen Holz-Pappeln (*Populus x canadensis*) der beiden *Versuchsreihen 1-8 und 9-21* ein Primärversagen der Stammbiegung vorhanden. Genau bei diesen 18 Bäumen konnte auch ein Versagen zeitgleich im Bereich der Faserstauchung an den Randfasern der Druckseite gemessen werden. Die Kurvenverläufe im Last-Dehnungsdiagramm der Stammbiegung und der Faserstauchung korrelierten immer.

Somit kann davon ausgegangen werden, dass bei den 18 untersuchten Kanadischen Holz-Pappeln (*Populus x canadensis*) das Primärversagen bei Biegebeanspruchung Faserstauchen der Randfasern war. Weiters wurde diese Erkenntnis durch zwei weitere Bäume anderer Baumart der *Versuchsreihe 22-24*, bestätigt, obwohl diese für andere Versagensarten nach bestehender Literatur geeignet gewesen wären. Es wurde bei insgesamt 20 Bäumen das Primärversagen der Stammbiegung zur selben Zeit und Last wie das der Faserstauchung gemessen.

Die Ergebnisse der Messdaten entsprechen der Theorie, dass das Primärversagen am Baumstamm, auch bei hohlen Baumstämmen, durch Faserstauchung im Druckbereich verursacht wird (WESSOLLY, ERB, 1998) (DETTNER, RUST, 2013) (SINN, 2003).

Die Ergebnisse widersprechen der Theorie, dass ein hohler Baumstamm durch einen Schubriss (MATTHECK et al. 2006 b) oder durch die hohe Kompression, die an der Druckseite ein Strukturversagen hervorruft, primär versagt (MATTHECK, 2006 a). Ebenso widersprechen die Ergebnisse der Theorie, dass ein hohler Baumstamm durch einen Tangentialschubriss primär versagt (DENGLER 2014).

10.2 Sekundärversagen

Dennoch konnten einige der von MATTHECK (2006 a) bzw. MATTHECK et al. (2006 b) oder DENGLE (2014) beschriebenen Symptome beobachtet werden, denn bei fünf Bäumen traten Sekundärversagen in Form von Rissen im Stamm auf.

Bei den meisten Bäumen kam es jedoch zu einem Standversagen, das eine weitere Einleitung von Zugkräften unmöglich machte. Diese Versuche wurden dann abgebrochen, da ein entwurzelter Baum einen deutlich höheren Aufwand bei der Wiederherstellung der Grünfläche bedeutete. Zwei Bäume wurden dennoch vollständig entwurzelt um einen Einblick in das Wurzelsystem zu erhalten.

Bei drei Bäumen (Baum 11, Baum 17, Baum 22) wurden vertikale Risse auf der Biege-Zugseite gemessen und gesehen. Es wird vermutet, dass die Wurzelplatte den Stamm nicht gleichförmig verankert, sondern ein Teil der zugbelasteten Verankerung nachgibt. Dabei werden starke Schubspannungen in die Biege-Zugseite des Stammes eingeleitet. Solche Risse traten nicht nur 2010 bei Vorversuchen zu den Untersuchungen von 2012 auf, sondern auch bei anderen Kollegen im Rahmen von Routinearbeiten (PROSENZ, persönliche Mitteilung).

Drei Baumstämme (Baum 6, Baum 15, Baum 17) bei denen sich kurz vor dem Bruch noch Risse entwickelten, sind vollständig gebrochen.

Dabei wurden bei Baum 6 (*Populus x canadensis*), Risse normal zur Zugrichtung beobachtet, die Schubrisse nach MATTHECK et al. (2006 b) dargestellt haben könnten.

Der Baum 15 (*Populus x canadensis*) sank druckseitig zusammen. Bei einem Knick von ca. 30°, als die Fasern bereits deutlich verkürzt und die Borke bereits großflächig abgeplatzt war, kam es zu einer Ovalisierung, die den dynamischen Prozess des Brechens einleitete. Zeitgleich entstanden seitlich in der Bruchhöhe Risse, die Tangentialzugrisse gewesen sein könnten. Die Messgeräte waren in dem hier beschriebenen Ablauf aus Sicherheitsgründen nicht mehr montiert und der Baumstamm knickte schlussendlich „zerbretternd“ ab.

10.3 Ovalisierung des Stammquerschnittes

Die Frage, wie weit sich Ovalisierungen des Querschnittes an dem Primärversagen beteiligen und Einfluss haben, wird zurzeit breit diskutiert und daher auch in dieser Masterarbeit kurz thematisiert.

Zu Ovalisierungsprozessen kann es im Zuge des Biegeversages kommen, da die resultierenden Druckkräfte beim gebogenen Stamm eine stammwärts gerichtete resultierende Kraft erzeugen. Gleiches gilt für die Zugseite des Stammes. Für ovalisierende Kräfte ist somit eine Stammbiegung Voraussetzung, denn nur unter Biegung treten stammwärts gerichtete resultierende Kräfte auf.

Theoretisch biegt sich ein Stamm, sobald eine Last in der Krone angreift. Eine geringe Biegung verursacht verschwindend kleine resultierende Kräfte. Das Primärversagen der 20 Baumstämme, die in dieser Masterarbeit ausgewertet wurden, ergaben, dass ein Faserstauchen bei einer Stammbiegung der untersten 6 m von $1,4^\circ$ bis maximal $4,5^\circ$ stattgefunden hat. 9 dieser Stämme versagten primär bei einem Biegewinkel $\leq 2^\circ$, acht Stämme $\leq 3^\circ$ und drei Stämme über 3° .

Bei keinem der untersuchten Bäume wurde beim Primärversagen eine Ovalisierung beobachtet oder konnte im Nachhinein anhand von Fotos analysiert werden.

Bei den drei vollständig gebrochenen Bäumen konnte nur bei Baum 15 eine Ovalisierung anhand der Fotos erkannt werden. Diese fand bei einem Stammknick von rund 30° statt, bei dem die druckseitigen Fasern bereits rund 6 cm verkürzt und das Primärversagen schon lange vorher eingetreten war. Diese Ovalisierung leitete den dynamischen Prozess des endgültigen Brechens ein.

Die anderen zwei Bäume brachen bei Stammbiegungen von rund 20° aber ohne erkennbare Ovalisierung. Demnach können Ovalisierungen im Zuge des Sekundärversagens bei Biegewinkel über 20° vorkommen. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass sie bei Biegewinkeln von $1,5^\circ$ bis $4,5^\circ$, bei denen die Primärversagen stattgefunden haben, keine Rolle spielen.

10.4 Materialeigenschaften

Für den Zugversuch als eingehende Untersuchung werden Referenzmaterialwerte benötigt, die momentan dem Stuttgarter Festigkeitskatalog nach WESSOLLY und ERB (1998) entnommen werden. Diese werden dann mit den gemessenen, hochgerechneten Daten verglichen. Es gibt allerdings von verschiedenen Autoren Referenzmaterialwerte, die differieren. So hat die Kanadische Holz-Pappel (*Populus x canadensis*) nach LAVERS (1983) andere Materialeigenschaften als die von WESSOLLY und ERB (1998) allgemein beschriebene Hybrid-Pappel (*Populus hy.*). Auch bei exakt gleichen Baumarten können Unterschiede zwischen den verschiedenen Autoren festgestellt werden (WESSOLLY, ERB, 1998) (LAVERS, 1983) (JESSOME, 1977) (GÖTZ, 2000) (WOOD HANDBOOK, 2010).

	Baumart	Druckfestigkeit in Faserrichtung (MPa)	Elastizitätsmodul (MPa)	Rohdichte (g/cm ³)	Elastizitätsgrenze (%)
WESSOLLY, ERB (1998)	Hybrid Pappel (<i>Populus hy.</i>)	20	6050	0.88	0.33
LAVERS (1983)	Kanadische Holz-Pappel (<i>Populus x canadensis</i>)	19.3	6800	0.529	0.28

Tabelle 132: Unterschiedlichen Materialeigenschaften der Autoren LAVERS (1983) und WESSOLLY und ERB (1998).

So ist zum Beispiel der Stuttgarter Festigkeitskatalog weder wissenschaftlich veröffentlicht worden, noch wurden Einzelheiten über Art und Weise der Berechnung preisgegeben (RUST, 2008). Es stehen aber nur Werte aus diesem Festigkeitskatalog zur Verfügung, da die anderen Autoren die Endfestigkeiten und nicht die Elastizitätsgrenzen gemessen haben (DETTNER, et al. 2014).

Nach PFISTERER und SPATZ (2012) lassen sich mechanische Holzeigenschaften häufig nicht ausreichend detailliert physikalisch beschreiben, da Holz von Bäumen in winterkalten Zonen aus konzentrischen Schichten aus Früh- und Spätholz aufgebaut ist. Auch die Festigkeitswerte einer Baumart hängen häufig von der individuellen Jahrringbreiten ab, die durch Faktoren wie Klima oder Alter beeinflusst werden (DETTNER, RUST, 2013) (PFISTERER, SPATZ, 2012). So weisen junge Fasern geringere Druckfestigkeiten aber eine höhere kritische Stauchung auf, was vermutlich mit dem niedrigeren Elastizitätsmodul

zusammenhängt (DETTNER, RUST, 2013). Es konnte bei Versuchen eine gewisse Streubreite innerhalb einer Baumart derselben Altersgruppe festgestellt werden (DETTNER, RUST, 2013). Dadurch ist nach PFISTERER und SPATZ (2012) das lebende Holz ein inhomogener Werkstoff, der eine erhebliche Schwankungsbreite der physikalischen Messwerte aufweist. So zeigt sich auch bei den Untersuchungen für diese Masterarbeit, dass der Wert der Elastizitätsgrenze der Hybrid-Pappeln nach dem Stuttgarter Festigkeitskatalog von 0.33 %, das entspricht in den Diagrammen ungefähr 600 μm , nicht immer gestimmt hat. Der Wert von LAVERS (1983) liegt mit 0.28 % für Kanadische Holz-Pappeln (*Populus x canadensis*) etwas näher an dem Durchschnitt der Elastizitätsgrenzen der Versuchsbäume, der 0.26% beträgt. Hierfür kann es mehrere Gründe geben. So wurde der Punkt des Primärversagens nur gemessen und nicht exakt berechnet, was eine gewisse Schwankungsbreite zur Folge hat. Außerdem kann es an den veränderten Holzeigenschaften des nachträglich gebildeten Reaktionsholzes, das zur statischen Verbesserung dient, liegen (PFISTERER, SPATZ, 2012). Um möglichst schnell zu reagieren, kann es sein, dass der Baum bei gleichem Energieaufwand zwar weniger dichtes, dafür aber flächenmäßig mehr Holz produziert (LARJAVAARA, MULLER-LANDAU, 2010).

Nichtsdestotrotz haben sich die Werte des Stuttgarter Festigkeitskataloges nach WESSOLLY und ERB (1998) in den letzten Jahrzehnten bei der Anwendung für Zugversuche bewährt und scheinen nicht falsch zu sein.

Da alle bisherigen Untersuchungen als Laborversuche an kleinen Prüfkörpern durchgeführt worden sind, ist eine Untersuchung an ganzen Stämmen zur Ermittlung der artspezifischen Richtwerte besser geeignet, weil bei diesen weniger große Schwankungen beobachtet wurden (DETTNER, RUST, 2013) (BORK et al., 2012). Weitere Untersuchungen an ganzen Stämmen wären somit sinnvoll, um bestehende Materialkennwerte zu bestätigen und weiter zu ermitteln.

10.5 Schlussfolgerung

Die Ergebnisse der untersuchten Bäume dieser Masterarbeit zeigen, dass ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Versagen der Stammbiegung und der Druckfasern vorhanden ist. Der Verlauf der Messdaten der Stammbiegung deckt sich mit denen der Faserstauchung genau. Beide Versagen treten zeitgleich bei gleicher Last ein. Somit kann davon ausgegangen werden, dass Faserstauchen das Primärversagen der Stammbiegung verursacht hat.

Ebenso konnte durch Messungen festgestellt werden, dass Risse erst nach dem Primärversagen der Randfaser stattgefunden haben und somit ein Sekundärversagen sind.

11. Ausblick und Vorstellungen für die Praxis

11.1 Allgemeine Erkenntnisse

Es gibt Prozesse im Versagensablauf eines Baumstammes, die nur messbar und nicht mit freiem Auge zu erkennen sind. Durch das Verfahren des Zugversuches ist es möglich, diese Art von Versagen im μm – Bereich zu messen und so zu lernen, was im Moment des Stammversagens tatsächlich passiert. Da das Primärversagen bei biegebelasteten Stämmen durch nicht sichtbare Stauchungen unter der Rinde stattfindet, ist eine genaue Messung essentiell.

11.2 Erkenntnisse für die Baumkontrolle

Bäume folgen den gängigen physikalischen Gesetzen der Statik. Ohne Last gibt es kein Versagen, daher ist für jede Versagensprognose eine Lastprognose erforderlich. Der belastete Werkstoff muss mit seinem Material und seiner Form dieser Last widerstehen können. Somit ist bei der Frage nach der Bruchsicherheit eines Stammes immer Last, Material und Form zu berücksichtigen (WESSOLLY, ERB, 1998). Die Modelle, die nach SIA (*Statisch Integrierter Abschätzung*) entwickelt wurden und Hilfestellungen zur Abschätzung von erforderlichen Stammdurchmessern bieten, können angewandt werden, da sie auf der Annahme fußen, dass Faserstauchung das Primärversagen bei Stammbrüchen darstellt. Diese Annahme konnte in dieser Masterarbeit bestätigt werden.

12. Literaturverzeichnis

AUSTRIAN STANDARDS (Hrsg.) (2011): Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten (konsolidierte Fassung)

AUSTRIAN STANDARDS (Hrsg.) (2011): ÖNORM L 1121: Schutz von Gehölzen und Vegetationsflächen bei Baumaßnahmen.

AUSTRIAN STANDARDS (Hrsg.) (2011): ÖNORM L 1122: Baumkontrolle und Baumpflege.

AUSTRIAN STANDARDS (Hrsg.) (2011): ÖNORM L 1125: Anforderungen an einen Baumkataster.

BARBALAT, S.; MULHAUSER, B. (2012): Biodiversität in der Stadt. In: BUND SCHWEIZER LANDSCHAFTSARCHITEKTEN UND LANDSCHAFTSARCHITEKTINNEN (Hrsg.): Anthos. Ast + Fischer Ag, 41 - 45.

BORK, R.; DÜSTERDIEK, S.; DETTER, A.; RUST, S. (2012): Vergleich von Zugversuchen und Materialtests an Kleinproben. In: DUJESIEFKEN, D. (Hrsg.): Jahrbuch der Baumpflege 2012 16. Auflage. Braunschweig: Haymarket Media GmbH & Co. KG, 237 - 242.

BRUDI, E.; WASSERNAER, P. (2002): Trees and Statics: Non-Destructive Failure Analysis. In: SMILEY, E. T., CODER, K.: Tree structure and mechanics conference proceedings. Champaign, 53 - 69.

BURGERT, I. (2000): Die mechanische Bedeutung der Holzstrahlen im lebenden Baum. Diss., Hamburg

BUTIN, H. (2011): Krankheiten der Wald- und Parkbäume. Stuttgart: Eugen Ulmer KG.

DENGLER, R. (2014): Fachgerechte Untersuchung und statische Beurteilung stammfauter Bäume. Wien: Fachseminar am 24.4.2014

DETTNER, A.; RUST, S. (2013): Aktuelle Untersuchungsergebnisse zu Zugversuchen. In: DUJESIEFKEN D., Institut für Baumpflege (Hrsg.): Jahrbuch der Baumpflege 2013, 17. Auflage. Braunschweig: Haymarket Media GmbH & Co. KG, 87 - 100.

DETTNER, A.; RUST, S.; RUST, C.; MAYBAUM, G. (2014): Determining strength limits for standing tree stems from bending tests, Vol. 22618th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium

DUJESIEFKEN, D. (2005): BAUMKONTROLLE UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER BAUMART: Bildatlas der typischen Schadsymptome und Auffälligkeiten. Braunschweig: Haymarket Media GmbH & Co. Kg

DUJESIEFKEN, D.; LIESE, W. (2008): DAS CODIT-PRINZIP: Von den Bäumen lernen für eine fachgerechte Baumpflege. 2. Auflage 2012 Braunschweig: Haymarket Media GmbH & Co. Kg

EUROCODE 1: EN 1991-1-4:2005: Actions on Structures – Part 1-4: General actions, Wind actions

FLORINETH, F. (2012): PFLANZEN STATT BETON: Sicherer und Gestalten mit Pflanzen. Berlin-Hannover: Patzer Verlag.

Google Inc., (2014): GOOGLEEARTH, <https://www.google.at/maps/place/Aubad/@48.3328614,16.0826583,338m/data=!3m1!1e3!4m2!3m1!1s0x0:0x5f48892e0e0d5810> –
Zugriffsdatum: 26.10.2014

GORDON, J. E. (1991): The new science of strong materials. New York: Penguin Books

GRUBER, F. (2009): Aktuelles zu Versagens/ Sicherheitskriterien und zur Adaption von Bäumen. München: Martin Meidenbauer Verlagsbuchhandlung

GÖTZ, K. (2000): Die innere Optimierung der Bäume als Vorbild für technische Faserverbunde – eine lokale Approximation. Karlsruhe: Wissenschaftliche Berichte: Technik und Umwelt, Forschungszentrum Karlsruhe .

GÜRLICH, S. (2009): Die Bedeutung alter Bäume für den Naturschutz – Alt- und Totholz als Lebensraum für bedrohte Artengemeinschaften. In: DUJESIEFKEN D., Institut für Baumpflege (Hrsg.): Jahrbuch der Baumpflege 2009, 13. Auflage. Braunschweig: Haymarket Media Gmbh & Co. KG, 189 - 198.

HERBST, P.; KANDUTH, G.; SCHLAGER, G. (2013): DER BAUM IM NACHBARRECHT: Freude – Ärger – Risiko. 3. Auflage, Wien: NWV Verlag GmbH.

JAMES, K. (2013): Die Dynamik der Bäume im Wind. . In: DUJESIEFKEN D., Institut für Baumpflege (Hrsg.): Jahrbuch der Baumpflege 2013, 17. Auflage. Braunschweig: Haymarket Media Gmbh & Co. KG, 79 - 86.

JILLICH, S.; KÖHLER J.; RUST S.; RUST C.; DETTER A. (2013): Zum Zusammenhang zwischen Schlankheitsgrad und Bruchversagen. In: DUJESIEFKEN D., Institut für Baumpflege (Hrsg.): Jahrbuch der Baumpflege 2013, 17. Auflage. Braunschweig: Haymarket Media Gmbh & Co. KG, 267 - 271.

KERSCHNER, F. (2008): NACHBARSCHAFTSRECHT KOMPAKT: Praxis und Theorie anhand von Fällen. Wien: Linde Verlag Wien Ges.m.b.H.

LACHAT, T.; BRANG, P.; BOLLINGER, K.; BOLLMANN, K.; BRÄNDLI, U.; BÜTLER, R.; HERRMANN, S.; SCHNEIDER, O.; WERMELINGER, B. (2014): TOTHOLZ IM WALD: Entstehung, Bedeutung und Förderung. In: Eidg. FORSCHUNGSANSTALT WSL: Merkblatt für die Praxis. Birmesdorf: Eidg. Forschungsanstalt WSL

LARJAVAARA, M.; MULLER-LANDAU, H. (2010): Rethinking the value of high wood density. In: *Funktional Ecology*, 701-705

LAVERS, G. M. (1983): The strength properties of timber. 3rd, revised ed. London (Department. Environment. Build. Res. Establishment), 60 p.

MATTHECK, C. (2006 a): Design in der Natur. 4. Auflage, Berlin: Rombach Verlag KG

MATTHECK, C.; BETHGE, K.; TESARI, I. (2006 b): Shear effects on failure of hollow trees. In: *Trees*, 20: 329 - 333. Springer Verlag.

MATTHECK, C. (2007): Feldanleitung für Baumkontrollen mit Visual Tree Assessment. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH.

MATTHECK, C.; HÖTZEL, H. (1997): BAUMKONTROLLE MIT VTA: Fachliche Anleitung und rechtliche Absicherung. Freiburg im Breisgau: Rombach GmbH Druck- und Verlagshaus.

MAYER, J.; SÖHL, C. (2009): Welcher Baum ist das? 2. Auflage. Stuttgart: Franckh-Kosmos Verlags-GmbH & Co. KG

NIKLAS, K. J.; SPATZ, H-C. (2012): Plant physics. Chicago: University of Chicago Press.

NIKLAS, K. J.; SPATZ, H-C. (2013): Modes of failure in tubular plant organs. In: American Journal of Botany, 100(2): 332 – 336.

PFISTERER, A.; SPATZ, H-C. (2012): Beziehungen zwischen mechanischen Eigenschaften frischer Hölzer aus verschiedenen Klimazonen und deren Dichte. In: AFZ-Der Wald 8: 41 – 45.

PROSENZ, R. (2010): Schulungsunterlagen: Seminar zur FLL-Baumkontrolle. Bad Vöslau

RAVEN, P.; EVERT, P.; EICHHORN, S. (2000): Biologie der Pflanzen. 3. Auflage. Berlin - New York: Walter de Gruyter

REINARTZ, H.; & SCHLAG, M. (1989) - Pilzinfektionen und ihre Auswirkungen auf Jung- und Altbäume. – Tagungsband zum 12. Bad Godesberger Gehölzseminar

RINN, F. (2004): Holzanatomische Grundlagen der Schalltomographie an Bäumen. Neue Landschaft 7: 44 - 47. Berlin - Hannover: Patzer Verlag.

RUST, S. (2008): Geräte und Verfahren zur eingehenden Baumuntersuchung. In: ROLOFF, A. (Hrsg.): Baumpflege. Stuttgart: Ulmer.

RUST, S.; DETTER, A.; FUCHS, C.; SCHIRUTSCHKE, B. (2013): Einfluss der Witterung auf die Ergebnisse statischer Zugversuche. In: DUJESIEFKEN D., Institut für Baumpflege (Hrsg.): Jahrbuch der Baumpflege 2013, 17. Auflage. Braunschweig, Haymarket Media GmbH & Co. KG, 296-300.

RUST, S.; FRANZ, S.; MINKE, M.; SCHUMANN, I.; ROLOFF, A. (2002): Schalltomographien zur Erkennung von Fäulen und Höhlungen an stehenden Bäumen. In: STADT + GRÜN: Das Gartenamt 6: 50 - 52.

SIEWNIAK, M.; KUSCHE, D. (2009): Baumpflege heute. 5. Auflage. Berlin – Hannover: Patzer Verlag.

SHIGO, A. (1991): MODERNE BAUMPFLEGE: Grundlagen der Baumbiologie. Braunschweig: Thalacker Verlag

SHIGO, D; MARX, H.G. (1977): Compartmentalization of decay in trees. U.S. D.A. For. Serv. Agric. Bull No. 405, 74.

SINN, G. (2003): BAUMSTATIK: Stand- und Bruchsicherheit von Bäumen an Straßen, in Parks und der freien Landschaft. Braunschweig: Thalacker Medien

SINN, G.; WESSOLLY, L. (1989): A Contribution to the Proper Assessment of the Strength and Stability of Trees. In: Arboricultural Journal 13, 45-65.

STUTTGARTER FESTIGKEITSKATALOG(1998): In: WESSOLLY und ERB (1998): Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle. Berlin: Patzer Verlag

WOOD HANDBOOK: Wood as an engineering material (2010): Forest Products Laboratories, technical report, USDA, Madison, Wisc. USA.

WESSOLLY, L. (1991): Verfahren zur Bestimmung der Stand- und Bruchsicherheit von Bäumen. In: Holz als Roh- und Werkstoff 49. Berlin; Heidelberg: Springer, 99-104.

WESSOLLY, L.; ERB M. (1998): Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle. Berlin: Patzer Verlag

WESSOLLY, L.; ERB M. (2014): Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle. 2. Auflage. Berlin: Patzer Verlag

WESTRICH, P. (1991): Wildbienen als Bewohner von Totholz. In: NATURSCHUTZZENTRUM NRW (Hrsg.): NZ NRW Seminarberichte H. 10. Recklinghausen, Naturschutzzentrum NRW, 32 - 35.

§ 364 Allgemeines bürgerliches Gesetzbuch für die gesamten deutschen Erbländer der Oesterreichischen Monarchie – ABGB (idF. v. 26.10.2014) Bundesgesetzblatt 01.07.2004

§ 1319 Allgemeines bürgerliches Gesetzbuch für die gesamten deutschen Erbländer der Oesterreichischen Monarchie – ABGB (idF. v. 26.10.2014) Bundesgesetzblatt 01.02.2013

Verwendete Software: Microsoft Office, Adobe CS4, Arbostat, TreeQinetic, PICUS

13. Anhang

13.1 Ergebnistabelle und Rohdaten

Die Rohdaten befinden sich auf der CD beiliegend. Die Datentabelle mit den gesammelten Ergebnissen: (kN_{max} – maximale Zugkraft / $^{\circ}_{max}$ – maximale Stammbiegung / μm_{max} – maximale Faserdehnung / PV – Primärversagen / SV – Sekundärversagen):

	kN_{max}	μm_{max}	$^{\circ}_{max}$	PV _{stammbiegung}	PV _{Biau (0.5m)}	PV _{Gelb (1m)}	PV _{rot (1.5m)}	PV _{Grün (2m)}	SV (Zugkraft/Messpunkt)	Sichtbare Schadenssymptome	Rest wandstärke ϕ in %	Höhe cm
Baum 1	23.62	blau 1503,7	6,45	17-19kN/3°	17kN/600µm	19kN/500µm	18kN/700µm	19kN/450µm	-	-	16.2	50
Baum 2	35.13	gelb 440,7	2,46	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Baum 3	12.23	grün 712,1	11,5	-	-	-	-	-	-	-	15.6	50
Baum 4	28.47	blau 1443,7	3,05	15-17kN/1,5°	15-17kN/550µm	20-23kN/300µm	20-23kN/200µm	20-23kN/400µm	-	-	10.7	50
Baum 5	20.42	grün 493,2	2,73	11kN/3°	11kN/400µm	-	-	11kN/600µm	-	-	16.6	50
Baum 6	22.66	gelb 2180,2	4,14	20kN/3°	20kN/490µm	20kN/500µm	20kN/520µm	20kN/520µm	22.1kN/#448	Rissbildung/ Stammbruch	16.6	50
Baum 7	26.61	blau 817,3	2,76	17-20kN/1,4°	17-20kN/500µm	17-20kN/350µm	17-20kN/220µm	17-20kN/350µm	-	-	-	-
Baum 8	52.24	rot 696,4	2,16	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Baum 9	22.54	gelb 400,4	1,62	21kN/1,25°	-	20-21kN/300kN	-	21kN/450µm	-	-	13 - 18	20
Baum 10	33.38	grün 634,8	1,93	30kN/1,2°	-	30kN/350µm	30kN/410µm	30kN/550µm	-	-	17	20
Baum 11	32.87	rot 1359,5	5,79	25-27kN/2,5°	26kN/600µm	-	25kN/500µm	-	31.3kN/#1571	Rissbildung	14	20
Baum 12	39.14	gelb 2319	3,7	27-29kN/2°	27kN/600µm	27kN/900µm	28kN/700µm	-	-	-	7	10
Baum 13	48.47	rot 767,7	1,75	45-47kN/1,5°	48kN/400µm	-	45kN/600µm	45kN/550µm	-	-	14	20
Baum 14	21	gelb 633,7	2,14	17-19kN/1,6°	-	18kN/500µm	17-19kN/500µm	17-19kN/500µm	-	-	15	20
Baum 15	21.35	grün 2328	5,17	15kN/1,5°	15kN/600µm	15kN/500µm	15kN/500µm	15kN/500µm	20.62kN/#1449	Rissbildung/ Stammbruch	16/10	20/200
Baum 16	29.67	gelb 835,7	2,21	20kN/1,4°	20kN/450µm	20kN/500µm	-	20kN/300µm	-	-	5	30
Baum 17	16.41	gelb 1544,9	2,83	13-14kN/2,1°	13kN/400µm	14kN/300µm	-	-	ohne Messgeräte	Rissbildung/ Stammbruch	24/20	50/100
Baum 18	18.42	rot 787,2	3,35	12-14kN/2,1°	14kN/500µm	-	12kN/400µm	15kN/550µm	-	-	2	30
Baum 19	21.88	rot 842	3,53	17-19kN/2,6°	-	19kN/350µm	17kN/700µm	17kN/600µm	-	-	14	50
Baum 20	18.52	rot 1010,5	4,91	15kN/3°	15kN/490µm	15kN/600µm	16kN/600µm	16kN/550µm	-	-	10/12	20/30
Baum 21	24.05	blau 906,4	2,25	15kN/1,2°	15kN/500µm	-	-	-	-	-	9	20
Baum 22	34.26	grün 2008,5	14,8	20kN/4°	-	20kN/600µm	-	-	32.14kN/#1623	Rissbildung	-	-
Baum 23	31.66	gelb 1013	8,53	17-20kN/3°	-	17kN/450µm	20kN/450µm	20kN/400µm	-	-	-	-
Baum 24	7.32	gelb 942,4	6,29	7kN/4,5°	-	5kN/500µm	-	-	ohne Messgeräte	Rissbildung	-	-