

Simon Loske

Traglast und Verankerungstechnik für den Bau in und mit vitalen Bäumen



**Traglast und Verankerungstechnik
für den Bau in und mit vitalen Bäumen**

der Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dortmund
zur Verleihung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
vorgelegte Dissertation

Von
Simon Loske, M.Sc.

Dortmund, 04.11.2024

Kurzzusammenfassung

Der Bedarf für zivilisatorische Flächen hat und wird auch in Zukunft die Umnutzung von Wäldern, Wiesen und landwirtschaftlichen Flächen herbeiführen. Ein globales Nachhaltigkeitsziel ist daher die Reduktion des Flächenverbrauchs für zivilisatorische Zwecke. Eine Möglichkeit zur Umsetzung dieses Zieles ist die Anhebung von Baukörpern über den Boden, um dessen Funktion zu erhalten.

Innerhalb bewaldeter Gebiete könnte dies sogar ohne zusätzliche technische Stützen gelingen, indem vitale Bäume als stützende Struktur (Stamm) mit bereits vorliegender Gründung (Wurzelwerk) verwendet werden. Die Kombination von Bäumen und Bauelementen ist allerdings wenig etabliert und es liegen weder Regelwerke noch ein anerkannter Stand der Technik dafür vor.

Im Gegensatz zu technischen Tragelementen stellen Bäume einen Organismus mit autotrophem Stoffwechsel und Wachstumsprozessen dar. Daraus leiten sich Anforderungen zum Anschluss von technischen Elementen am Baum ab, welche in der vorliegenden Arbeit behandelt werden.

Weiterhin wird die Ableitung der Tragfähigkeit aus geometrischen und mechanischen Parametern benötigt, um den zumutbaren Umfang einer Bebauung abgrenzen zu können. Dafür wurden für diese Arbeit ganze Baumstämme einem Wald entnommen und unterschiedlichen mechanischen Prüfungen unterzogen. Hierbei wurde auf die Spezies der Rotbuche (*Fagus sylvatica*) fokussiert, welche in Europa einen wesentlichen und erhaltungswürdigen Anteil der Wälder darstellt.

Der Baustoff Holz zeigt in der getrockneten und technisch verarbeiteten Form wesentliche Unterschiede zum mechanischen Verhalten im vitalen und hierbei fasergesättigten Zustand. Aus dem Verständnis dieser Unterschiede werden deterministische Ansätze entwickelt, welche den Widerstand von Bäumen gegen mechanische Einwirkungen rechnerisch erfassbar machen.

Für die praktische Umsetzung der Bauwerke im Waldbestand werden unterschiedliche Bauweisen diskutiert. Als besonders geeignet stellt sich die Aufhängung von Baukörpern durch Stahlseile an geeigneten Tragbäumen dar.

Mögliche Varianten der Verankerung von Seilen am Baum werden besprochen, wobei das Dickenwachstum durch neue Holzschichten Berücksichtigung findet.

Die am Markt verfügbare Verankerungstechnik zwischen Seil und Baum ist in ihrer Tragfähigkeit schwerlich ausreichend, um typische Lasten aus professionellen Bauwerken übertragen zu können. Daher wird in der vorliegenden Arbeit ein Verankerungselement entwickelt, welches eingehend numerisch und experimentell untersucht wird.

Die erarbeiteten Erkenntnisse wurden zur Planung von drei kleineren Gebäuden angewandt und bestätigen diese. Diese Pionierprojekte werden ebenfalls besprochen und werfen einen Blick auf hierbei angestrebte Nachhaltigkeitsziele.

Abstract

The need for land for civilisation has led, and will continue to lead, to the conversion of forests, meadows and agricultural land. A global sustainability goal is therefore to reduce the amount of land needed for civilisation. One way to achieve this is to raise buildings above the ground to preserve its function.

In forested areas, this could even be achieved without additional engineering support by using living trees as the supporting structure (trunk) with an existing foundation (root system). However, the combination of trees and structural elements is not well established and there are no regulations or accepted state of the art.

Unlike structural elements, trees are organisms with autotrophic metabolism and growth processes. This results in requirements for the connection of technical elements to the tree, which are dealt with in this paper.

Furthermore, it is necessary to derive the load-bearing capacity from geometric and mechanical parameters in order to be able to limit the reasonable extent of a development. For this purpose, whole logs were taken from a forest and subjected to various mechanical tests. The focus was on the copper beech (*Fagus sylvatica*) species, which represents a significant proportion of Europe's forests and is worthy of conservation.

Wood as a construction material in its dried and technically processed form shows significant differences from its mechanical behaviour in its vital and fibre saturated state. From an understanding of these differences, deterministic approaches are developed to make the resistance of trees to mechanical loading calculable.

Different construction methods are discussed for the practical realisation of the structures in the forest stand. The suspension of structures by means of steel cables on suitable supporting trees is particularly suitable.

Possible ways of anchoring the cables to the tree are discussed, taking into account the increase in thickness due to new layers of wood.

The anchoring technology available on the market between the rope and the tree is hardly sufficient in its load-bearing capacity to transfer typical loads from professional constructions. Therefore, this thesis develops an anchoring element which is analysed in detail numerically and experimentally.

The results were applied to the design of three smaller buildings and confirmed. These pioneering projects are also discussed in the light of the sustainability objectives pursued.

Inhalt

Kurzzusammenfassung	3
Abstract	5
Kapitel 1: Einführung	1
1.1. Motivation und Arbeitshypothese	1
1.2. Einleitung und Geschichtliches	3
1.3. Stand der Forschung	11
1.4. Gliederung der Arbeit:	14
Kapitel 2: Grundlegendes zum Bau in und mit vitalen Bäumen	15
2.1. Eingrenzung auf Betrachtungen am Stamm	15
2.2. Aufbau der Holzmatrix	15
2.3. Wachstumstropismen: Wachstumsreaktionen auf externe Reize	18
Phototropismus (Licht)	18
Gravitropismus (Schwerkraft)	18
Hydrotropismus (Wasser)	18
Thigmotropismus (mechanische Einwirkung)	18
Chemotropismus (chemische Reize)	19
Transversaler Tropismus	19
2.4. Tragverhalten von Bäumen	20
2.5. Eigenschaften heimischer Gehölze in Hinblick auf Nutzbarkeit als Tragbaum	23
Eiche (<i>Quercus</i> spp.)	23
Rotbuche (<i>Fagus sylvatica</i>)	23
Fichte (<i>Picea abies</i>)	23
Kiefer (<i>Pinus sylvestris</i>)	23
Esche (<i>Fraxinus excelsior</i>)	23
Ahorn (<i>Acer</i> spp.)	24
Birke (<i>Betula pendula</i>)	24
Lärche (<i>Larix decidua</i>)	24
2.6. Prinzipien für Tragwerke in Kombination mit Bäumen	25
2.7. Nachhaltigkeitsaspekte für das Bauen in und mit vitalen Bäumen	28
Kapitel 3: Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Bäumen am Beispiel der Rotbuche	30
3.1. Mechanische Kennwerte getrockneter und grüner Hölzer	30
3.2. Der Stamm als Biegebalken	31

3.3. Prüfung an frisch geschlagenem Holz.....	33
3.4. Versuchskonzept	34
3.5. Biegeversuche	34
3.6. Auswahl der Versuchskörper	36
Fällen der Bäume und Umgang mit den Versuchskörpern.....	38
Versuchskörper	39
Versuchseinrichtung für Biegeversuche	42
3.7. Auswertung der Biegeversuche	45
3.8. Druckversuche.....	51
3.9. Auswertung der Druckversuche	53
3.10. Versuchsaufbau und Auswertung der Zugversuche.....	59
3.11. Spannungshypothese zur Ermittlung der Traglast bei Biegebeanspruchung	63
Parameteridentifikation der Zugfestigkeit durch Curve Fitting der Biegeversuche	64
Vereinfachtes Bemessungsmodell auf Basis der Spannungshypothese	66
Kapitel 4: Verankerung technischer Lasten am Baum	67
4.1. Notwendigkeit der Wachstumskompatibilität.....	67
4.2. Befestigungskategorien	68
Formschlüssige Kraftübertragung über die Oberfläche	70
Reibungsbasierte Kraftübertragung über die Oberfläche	71
Formschlüssige Kraftverbindung in die Holzmatrix	73
4.3. Baumschrauben für die Befestigung von Bauwerken an Bäumen.....	77
Stand der Technik für Baumschrauben	79
4.4. Tragfähigkeitsuntersuchung von Baumschrauben.....	83
Konzeptionierung der Versuchsreihe	83
Axiale Beanspruchung	85
Reine Querbeanspruchung	87
Kombinierte Beanspruchung	91
4.5. Entwicklung eines Koppel-elementes für zwei Baumschrauben	93
Ausgestaltung der biegefesten Kopplung.....	93
Statisches System zur Traglastanalyse	94
Explizite Auslegung des Anschlusselementes	95
Wahl des Lastangriffspunktes.....	97
Tragverhalten des Koppel-elementes	100

3D Simulation des Koppelementes	104
Realer Belastungsversuch.....	106
Verlängerung des Koppelementes	108
Kapitel 5: Gebaute Beispiele	110
5.1. Nachhaltigkeitsziele des Bauprojekts.....	110
5.2. Konstruktive Details und Bauablauf	111
5.3. Das Bauwerk Loop.....	113
5.4. Bezug zum Bemessungsmodell auf Basis der Spannungshypothese	115
5.5. Das Bauwerk Cube.....	116
5.6. Das Bauwerk Echo	118
Kapitel 6: Zusammenfassung und Ausblick.....	120
Literatur.....	123
Anhang	130
Kraft Verformungsdiagramme der Biegeversuche	130
Abbildungsverzeichnis.....	138
Tabellenverzeichnis.....	144

Kapitel 1: Einführung

1.1. Motivation und Arbeitshypothese

Weltweit wird die Dringlichkeit erkannt, den Ressourcenverbrauch zu reduzieren um das globale, ökologische Gleichgewicht zu erhalten und bereits vorliegende Störungen zu minimieren. Die menschliche Zivilisation, welche sich in der gebauten Umwelt präsentiert, hat im Zuge der Industrialisierung enorme Ressourcen verbraucht und Emissionen verursacht, was bis heute anhält.

Werner Sobek, Architekt und beratender Ingenieur, hat im Jahr 2020 siebzehn Thesen veröffentlicht, welche direkt und indirekt die Rolle des Bauwesens zu vorliegenden Problemen der Menschheit thematisieren und konkretisieren [1].

In These 1 werden u.a. Herausforderungen vor Augen geführt, welche durch den prognostizierten Bevölkerungszuwachs sowie die damit verbundenen Notwendigkeiten vorliegen. Zum Zeitpunkt der Niederschrift dieser Arbeit liegt ein Weltbevölkerungswachstum von ca. 280 000 Menschen pro Tag vor. Durch folgende Überlegungen sei die Tragweite dieser Zahl vor Augen geführt: Geht man davon aus, dass im Durchschnitt 2.8 Personen einen Haushalt bilden, werden weltweit ca. 100 000 zusätzliche Wohnungen pro Tag benötigt. Geht man von 5.6 Personen pro Haushalt aus, sind weltweit ca. 50 000 zusätzliche Wohnungen pro Tag notwendig.

Mit These 17 bezieht Sobek in [1] eine deutliche Haltung zum Stellenwert des globalen Ökosystems und ruft zum Umdenken in allen Bereichen des zivilisatorischen Lebens auf:

*Non deus neque hominus neque pecunia mensura sunt.
Nature – not god, not humankind, not money – must be the
measure of all things for us going forward. Keeping the
natural world intact is our primary task, because without
an intact natural world there is no basis for human life.
Our lives and our actions need to be measured by new cri-
teria and inspired by a new kind of emotional investment.
Alongside the absolute imperative of valuing all human
beings as equals we need to extend that same sense of
value and caring to the natural world, as a whole and in
its individual parts. “Business as usual” is simply no longer
an option.*

In diesem Sinne widmet sich die vorliegende Arbeit einer Hypothese, welche sich vor einigen Jahrzehnten oder gar einigen Jahrhunderten nur in einem anderen Kontext hätte motivieren lassen. Die Hypothese besagt, dass sich Tragwerke und Gebäude unter Beibehaltung bewaldeter Flächen realisieren lassen, wodurch sich Naturraum und Zivilisation zugleich ermöglichen. Die damit

verbundenen Hürden und Mühen - um aus traditioneller Sicht gegensätzliche Räume zu verbinden – sind aus dem Erhalt unseres Ökosystems hinreichend motiviert.

Weniger greifbare Aspekte zur Motivation, wie z.B. der emotionale Wunsch vieler Menschen, in einem Naturraum zu leben, werden in dieser Arbeit nicht behandelt. Auch Vorbehalte, ob und wie z.B. die Ver- und Entsorgung oder die Mobilität in einer Einheit aus Natur- und Zivilisationsraum funktioniert, werden im Rahmen dieser Arbeit nicht diskutiert.

Diese Arbeit konzentriert sich auf die physikalischen und technischen Aspekte, ob mit Hilfe von Bäumen sowie Seiltechnik das dauerhafte Anheben von baulichen Anlagen über den Boden möglich ist, so dass das Tragwerk sicher ist und der Wald in seiner ursprünglichen Funktion erhalten bleibt.

Diese Art der Kombination von Zivilisation und Naturraum findet bereits Anwendung in experimentellen Bauwerken, deren Analyse u.a. dazu dienen soll, die Arbeitshypothese zu beleuchten.

1.2. Einleitung und Geschichtliches

Aus dem Waldbericht der Bundesregierung 2021 [2] geht hervor, das 32 % der Fläche Deutschlands bewaldet ist und 2,6 Milliarden Tonnen Kohlenstoff in lebender Biomasse, Totholz und Boden bindet. Die jährliche Kohlenstoffspeicherwirkung des Waldes beläuft sich im o.g. Bericht auf 57 Millionen Tonnen CO₂ und die der stofflich genutzten Holzprodukte auf 4,2 Millionen Tonnen CO₂. Die Verwertung des Holzkörpers nach Aufzucht, Pflege und Ernte eines Baumes stellt die übliche Nutzung von Waldbäumen dar und findet in Deutschland unter der Vorgabe nachhaltiger Forstwirtschaft statt.

Die besondere Bedeutung der Forstwirtschaft zur Ausbildung des Begriffs der „Nachhaltigkeit“ begründet sich auf dem historischen Werk von Hans Carl von Carlowitz aus dem Jahr 1713 mit dem Titel „Sylvicultura oeconomica“ [3], was auch in den neuzeitlichen Ausführungen von Grober [4] untermauert wird.

Bäume werden allerdings seit tausenden von Jahren nicht nur zur Generierung von Brenn- und Bauholz nach deren Ernte genutzt, sondern auch als Nutzstruktur zur Verschattung während sie noch vital sind. Die Vitalität (lat. vitalis: Lebenskraft habend oder gebend) eines Baumes lässt sich nach Klug [5] dadurch beurteilen, wie gut dieser gedeiht (wächst) und wie gut er die Umgebung nutzt und sich dieser anpasst.

Die Fähigkeit zur Anpassung an veränderte Umweltbedingungen kann auch als Resilienz oder Adaption bezeichnet werden, je nachdem um welche Bedingung es sich handelt.

Exemplarisch sei die Schiefstellung von Bäumen durch das Abrutschen von Erdschichten genannt. Dieses Phänomen lässt sich in Hanglagen oder auch an Baumalleen beobachten, wenn neben der Allee ein Entwässerungsgraben verläuft und der Untergrund nachgibt. Ein vitaler Baum reagiert auf Schiefstellung mit sogenanntem Sichelwuchs um die erhöhten Biegebelastungen auf das Wurzelwerk und den Stamm zu verringern. Nadelbäume lagern hierfür auf der Biegedruckseite des Stamms zusätzliche Holzschichten an, während sich Laubbäume auf der Biegezugseite [6] verstärken. In beiden Fällen werden jedoch Eigenspannungen im Querschnitt aufgebaut, welche den Stamm aufrichten. Diese Tropismen zeigen an, dass sich Gehölze - wenn auch langsam - bewegen können und zudem an mechanische Einwirkungen adaptieren.

Die Fähigkeit vitaler Bäume, sich an veränderte mechanische Gegebenheiten anzupassen, ist für die vorliegende Arbeit zentral und zeigt, dass das Bauen in und mit vitalen Bäumen auch die stofflichen Vorgänge im Baum betrifft. Da Bäume autotroph sind und die Energie für Ihren Stoffwechsel aus Photosynthese gewinnen, ist deren Wachstum und mechanische Adaptivität eine CO₂-Senke. Bringt man dies z.B. in einer grauen Emissionsbilanz nach DIN EN 15978 in Ansatz, lässt sich das Bauen mit Bäumen zusätzlich motivieren [7].

Die Hauptbestandteile eines Baumes lassen sich in drei Hauptorgane einteilen: Wurzel, Stamm und Krone. Diese Bestandteile übernehmen aus Sicht der Tragwerksplanung folgende Funktionen:

- Die Wurzel stellt die Fundamentierung des Baumes dar
- Der Stamm ist ein eingespanntes Strukturelement (Kragarm)

- Die Krone entspricht einer Fassade bzw. einem Dach, welches Eigengewicht, Schnee- und Windlasten sammelt

Blickt man in die Geschichte der Menschheit zurück, findet man immer wieder Beispiele, wie z.B. das schattenspendende Dach belaubter Bäume genutzt wird, um vor Hitze zu schützen. Die Darstellung von Lauben ist durch Reliefs der Assyrer aus dem 7. Jahrhundert vor Christus in [8] dokumentiert. Auch der römische Architekt und Baumeister Vitruv beschreibt in seinen „Zehn Bücher über Architektur“ die Urhütte als einfache schützende Behausung aus Holz und Blattwerk [9].

Die wohl älteste Erwähnung eines Bauwerks in vitalen Bäumen im europäischen Raum findet sich in einem Text des römischen Geschichtsschreibers Plinius dem Älteren. Er erwähnt, dass Kaiser Caligula (12 n.Ch. bis 41. n.Chr.) einen Ort in einem Baum erbauen ließ, welcher Platz für 15 Gäste sowie einige Bedienstete bot [10].

Es wird angenommen, dass die historischen Erzählungen von Plinius eine Basis für das mit dem Aufkommen des Renaissance Zeitalters im Jahre 1499 erschienene Werk „Hypnerotomachia Poliphili“ von Francesco Colonna gewesen sind. Nach der Übersetzung in französische und englische Sprache beeinflusste und inspirierte dieses Werk seinerzeit den europäischen Adel [8]. Dies könnte der Grund sein, dass Cosimo I de' Medici (1519–1574), Herzog von Florenz, in seinem Park ein Baumhaus in einer Eiche errichten ließ, welches einen Speisesaal besaß [12]. Sein Sohn Frances ließ zudem eine Terrasse mit 8 Metern Durchmesser und einer Fläche von 25 Quadratmetern auf einem Baum errichten. Diese Terrasse beinhaltete einen Brunnen, welcher durch in Bäumen verlegten Wasserleitungen versorgt wurde [13].

Aus der Tudor Zeit (1485-1603) sind aus England und Wales Baumhäuser dokumentiert. Ein besonderes Beispiel ist das „Great lime tree house“ in Cobham Hall in der Grafschaft Kent, welches über 3 Stockwerke verfügte und auf dem mittleren, größten Stockwerk Platz für 50 Personen bot [14].

Aus Deutschland, Österreich und der Schweiz sind Podeste und Tanzböden in „Tanzlinden“ bis heute bekannt und existent. Die älteste noch vorhandene Tanzlinde befindet sich in Sachsenbrunn, vgl. Abb. 1 (links), und stammt etwa aus dem Jahr 1650 [15].

Ein weiteres, erwähnenswertes Bauwerk, Abb. 1 (rechts), in einer Linde befindet sich in Pitchford Hall, Shropshire. Der genaue Zeitpunkt der Erbauung ist unbekannt, aber der älteste Beleg - ein Grundriss des Gartens, welcher dieses Gebäude beinhaltet - stammt aus dem Jahr 1714. Der Baukörper besitzt auch Abstützungen bis zum Boden, so dass er nur teilweise vom Baum getragen wird [8].



Abbildung 1: Links: Tanzlinde Sachsenbrunn in Thüringen. Rechts: Rainer Lippert (gemeinfrei), rechts: Baumhaus Pitchford Hall in Shropshire. Colin Park (CC-BY-SA 2.0)

Nach der Veröffentlichung des Romans „Die Schweizer Familie Robinson“ durch Johann Rudolf Wyss im Jahr 1813, entstanden in Europa einige Bauwerke, welche den Begriff Baumhaus nahelegen. Der Roman handelt von einer in Neuguinea gestrandeten Familie, welche sich ein Haus in Bäumen errichtet, um vor Wildtieren geschützt zu sein. Ein bekanntes Beispiel eines in Folge dieser Erzählung entstandenen Gebäude ist „Parc Robinson“ Nahe Paris. Die Anlage aus mehreren miteinander verbundenen Baumhäusern wurde zur Darstellung ebenjener Erzählung errichtet und ist in Abb. 2 als Motiv einer Postkarte von 1900 gezeigt.



Abbildung 2: Parc Robinson, Postkarte 1900. unbekannter Autor, (offene Lizenz)

Die Inspiration zu einem Baumhaus in diesem Roman könnte durchaus den Grund haben, dass in West Papua (Neuguinea) sich bis heute das indigene Volk der Korowai durch den Bau von Baumhäusern vor Gefahren schützt, vgl. Abb. 3. Dieses Volk hatte bis 1987 keinen Kontakt zur entwickelten Außenwelt, sodass nur wenig über ihre Geschichte bekannt ist [16]. Die Korowai leben teilweise in Häusern, die sie in den Kronen von Bäumen errichten. Diese befinden sich üblicherweise in Höhen zwischen fünf und 17 Metern, reichen aber in Einzelfällen bis in 50 Meter Höhe [17]. Die Baumhäuser werden aus einfachen Naturmaterialien erbaut und haben eine Nutzungsdauer von etwa fünf Jahren. Sie weisen eine Grundfläche von etwa 30 Quadratmetern auf und beinhalten eine mit Lehm isolierte Feuerstelle, auf der Speisen zubereitet werden. Es wird davon ausgegangen, dass auch andere Völker der Südsee in der Vergangenheit in solchen Baumhäusern gelebt haben, diese Tradition aber im Rahmen des technischen Fortschrittes und durch den Kontakt zur Außenwelt schon lange abgelegt haben [8].



Abbildung 3: Baumhaus der Korowai. [iStock.com/ANDREYGUDKOV](https://www.istock.com/ANDREYGUDKOV)

Bis heute sind auch Brücken wie in Abb. 4 im nordostindischen Bundesstaat Meghalaya ein Beleg dafür, dass vitale Bäume für die Errichtung zivilisatorischer Strukturen von Menschen genutzt werden. Meghalays ist eine der niederschlagreichsten Regionen der Erde, in welcher das Land von tief eingeschnittenen, teilweise breiten Bachläufen und Flüssen durchzogen ist. Die indigene Bevölkerung baut dort mit vorhandenen Bäumen und mit der Verlegung von Luftwurzeln des Gummibaumes (*Ficus elastica*) Hängebrücken. Die Wurzeln werden so verflochten, dass sich Seile bilden und durch das Wachstum zunehmend stärker auf Zug belastbar sind. Der Bau einer solchen Brücke erstreckt sich dabei über mehrere Jahrzehnte, sodass mehrere Generationen von Menschen an dem Bau einer einzelnen Brücke beteiligt sind, bis diese ausreichend tragfähig wird [18]. Besonders tragfähige Exemplare dieser Brücken sind mit Steinen als Bodenbelag ausgelegt [19].



Abbildung 4: Wurzelbrücke in Lypmungshyrngan, Bundesstaat Meghalaya, Indien. Roman Korzh (CC BY-NC-ND 2.0 DEED)

Im Jahr 1914 erschien in den USA das Buch „The Practical Book of Garden Architecture“ von Phebe Westcott Humphreys, welches ein Kapitel über den Bau von „Krähennestern und Baumhäusern“ beinhaltet. „Krähennester“ meinen hier Aussichtsplattformen, die in einem Kontext mit Bäumen stehen und nur von Ast- und Laubwerk überdacht werden. Dieses Buch beinhaltet die ältesten dokumentierten Anleitungen für den Bau solcher Bauwerke. So sollen stabile Bodendielen in den Ästen der Bäume verankert und durch Stützen zum Boden hin abgestützt werden. Die Stützen sollen weiterhin durch Rankpflanzen, wie Blauregen umwachsen werden. Im Gegensatz zu den in den vorherigen Jahrhunderten erbauten Baumhäusern, die oftmals als dekorative Elemente in der Gartengestaltung genutzt wurden, empfiehlt Humphreys die Nutzung als Rückzugsort für künstlerische Betätigung in der Natur für Schriftsteller, Maler oder Komponisten [20]. Die im Buch dargestellten Beispiele erinnern an die im 20. Jahrhundert vermehrt auftauchenden laienhaft errichteten Baumhäuser, die oftmals als Spielumgebung für Kinder genutzt werden und den heutigen Typus des pädiatrischen Baumhauses bilden, vgl. Abb. 5.



Abbildung 5: Pädiatrisches Baumhaus als Spielumgebung für Kinder. Paddy Griffin (CC-BY-SA 2.0)

So sind Baumhäuser in Form von pädiatrischen Baumhäusern als Spielstätten für Kinder heute in Privatgärten, auf Waldspielplätzen oder Erlebniseinrichtungen zu finden. In [21] wird erläutert, weshalb solche Spielstätten ein positiver Beitrag zur Entwicklung von Kindern sein können. Hierbei steht die Förderung der Kreativität und des Vertrauens in die eigenen motorischen Fähigkeiten im Vordergrund.



Abbildung 6: Baumkronenpfad Nationalpark Hainich. Dietmar Rabich (CC-BY-SA 4.0)

Der Soziologe Gerhard Schulze prägte den Begriff der „Erlebnisgesellschaft“, der die Gesellschaft der Gegenwart durch eine innengeprägte Orientierung mit dem Streben nach eigenen besonderen Erlebnissen beschreibt [22]. Damit geht u.a. die Entwicklung von Konzepten für besondere Erlebnisse in der Natur einher, wie z.B. bauliche Anlagen zur Erkundung von Wäldern und Bäumen über Baumwipfelpfade oder Aussichtsplattformen, vgl. Abb. 6. Meist werden solche Anlagen mit rein technischen Elementen erstellt, es finden sich aber auch Kombinationen aus technischer Stützung und Hinzunahme von Tragbäumen [23].

Auch die Errichtung sogenannter Baumhaushotels ist ein Trend vor dem Hintergrund einer zunehmenden Erlebnisgesellschaft. Allein in Deutschland sind über 50 Anbieter mit insgesamt mehr als 200 Baumhäusern über Online-Buchungsportale zu finden. Die Spannweite reicht dabei von sehr spartanisch ausgestatteten Hütten bis hin zu luxuriösen Zimmern mit umfangreicher technischer Ausstattung.

Auch in vielen anderen Ländern lassen sich Baumhaushotels finden, vgl. Abb. 7. Dazu gehören z.B. Schweden, Thailand, Mexiko, Costa Rica, Südafrika, Sambia, Türkei, USA, etc. Damit ist diese Art der Nutzung von vitalen Bäumen auf allen Kontinenten der Erde vertreten [24]. Je nach Klimazone sind die Bauwerke an unterschiedlichen Bäumen befestigt und auch Gräser, wie z.B. Bambus, scheinen sich zu eignen.



Abbildung 7: Links: Baumhaus in Vietnam. [iStock.com/simongurney](https://www.iStock.com/simongurney) Rechts: Baumhaus in Mexiko. [iStock.com/AlexKane](https://www.iStock.com/AlexKane)

Die von Ferdinand Ludwig propagierte Baubotanik nutzt gesteuertes Wachstum von Pflanzen durch Kombination mit technischen Elementen. Es werden hierfür zunächst technische Fundamente und Tragelemente (z.B. Stahlstützen) errichtet, welche demontiert werden können, sobald die baubotanische Struktur hinreichend ausgebildet und mit der Konstruktion so verwachsen ist, dass sie alle Lasten übernehmen kann [25]. Ein Beispiel dafür ist der in Abb. 8 gezeigte baubotanische Steg in Kamen.



Abbildung 8: Baubotanischer Steg Kamen.

1.3. Stand der Forschung

Während Materialien wie Stein, Lehm, Holz, Stahl, Beton, etc. im Bauwesen etabliert sind und deren Verwendung durch technische Regelwerke einem anerkannten Sicherheitskonzept unterliegen [26], ist dies für den Baum aus verschiedenen Gründen bisher nicht der Fall. Obwohl Bäume das Material Holz generieren, liegt dieses im vitalen Baum mit so hoher Feuchtigkeit bis hin zur Wassersättigung vor, sodass hierfür der Eurocode 5 nicht anwendbar ist. Dieser schreibt für Bauholz eine maximal zulässige relative Ausgleichsfeuchtigkeit von $18 \pm 6 \%$ vor [27].

Niklas und Spatz stellen in [28] fest, dass Hölzer mit mindestens 50% Wassergehalt oder mehr, bezogen auf deren Darrmasse, die mechanischen Eigenschaften von Hölzern im lebenden Baum repräsentieren und bezeichnen diesen Zustand als „grünes Holz“. Die Bezeichnung grünes Holz findet in diesem Sinne nachfolgend ebenfalls Verwendung.

Weiterhin enthält [28] eine Auflistung wichtiger mechanischer Eigenschaften (Dichte, Biegefestigkeit, Elastizitätsmodul, Scherfestigkeit, Druckfestigkeit) für grünes Holz von insgesamt 161 Baumarten. Auch die Versuchsreihen von Lavers [29] enthalten mechanischen Eigenschaften von grünem Holz. Die Materialparameter für grünes und technisch getrocknetes Holz sind für 210 Baumarten dokumentiert. In den Untersuchungen von Lavers [29] werden jeweils 36 Rotbuchen aus Großbritannien im grünen, sowie im technisch getrockneten Zustand getestet. In Bezug auf die Holzfestigkeit zeigt sich nahezu eine Verdopplung der Druckfestigkeit durch die technische Trocknung (27,6 N/mm² im grünen Holz zu 56,3 N/mm² im getrockneten Holz). Auch die Biegefestigkeit erhöht sich durch die Trocknung (von 56 N/mm² auf 118 N/mm²) auf nahezu die doppelte Größe. Der Elastizitätsmodul verändert sich von 9800 N/mm² im grünen Holz auf 12.600 N/mm² im getrockneten Zustand. In [30] wird gezeigt, dass für das Holz der Rotbuche bis zu einer Holzfeuchte von 50% Feuchtigkeit der Elastizitätsmodul mit zunehmender Holzfeuchte abnimmt.

Das Bruchverhalten von Baumschäften unter statischen Belastungen infolge von Biegeversagen und Druckversagen wird in [31] und [32] behandelt. Es wird festgestellt, dass bei Biege- und Druckversagen eine Schädigung der Holzmatrix im druckbeanspruchten Bereich stattfindet, die optisch meist nicht erkennbar ist, aber die Resttragfähigkeit des Materials verringert. Auf mikromechanischer Ebene liegen Messergebnisse zur Belastbarkeit einzelner Holzbestandteile vor, wie die Zugfestigkeit der radialen Holzstrahlen [33], die Zugfestigkeit einzelner Holzfasern [34] und verarbeiteter Holzwerkstoffe [35].

Vor dem Hintergrund der Verkehrssicherungspflicht werden Bäume als eigenständiges Tragsystem methodisch untersucht, um Gefahren durch umstürzende Bäume vorzubeugen. Dabei haben sich zwei Herangehensweisen durchgesetzt. Beim Verfahren „Visual Tree Assessment“ [36] werden die Bäume nach visuellen Methoden auf Anomalien und Schadenssymptome untersucht. Durch die „Statisch integrierte Abschätzung“ [37] wird ein Standsicherheitsfaktor, der mit dem Versagensrisiko eines Baumes korreliert, auf Basis von Studiendaten aus den Eingangsparametern Lastgröße (Windeinwirkung), Materialparametern des grünen Holzes und Form des Baumes ermittelt. Diese Methoden finden sich in den in Deutschland angewandten Baumkontrollrichtlinien der „Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau – FLL“ wieder [38–41]. Im Rahmen der Baumkontrolle nach Baumkontrollrichtlinie werden alle verkehrssicherungsrelevanten

Bäume erfasst und in vorgegebenen Intervallen einer Kontrolle unterzogen. Dabei erfolgt die Einordnung des Baumes in Vitalitätsstufen. Liegen Auffälligkeiten vor, folgt eine eingehende Untersuchung, bei welcher neben der visuellen Begutachtung auch unterschiedliche Messverfahren [42] wie beispielsweise Schalltomografie [43, 44], Bohrwiderstandsmessung [45] sowie Bohrkernentnahme und Prüfung [46] zur Überprüfung von Materialparametern Verwendung finden. In zweifelhaften Fällen ist eine mechanische Prüfung mit der Inclino-/Elasto-Methode [47] vorgesehen.

Bei der eingehenden Untersuchung wurde lange Zeit das aus dem „Visual Tree Assessment“ stammende Restwandstärkenkriterium genutzt, welches besagt, dass ein Baum so lange standsicher ist, wie das Verhältnis der unbeschädigten Restwandstärke zum Radius $t/R > 0,32$ ist. Die Allgemeingültigkeit dieser Regel ist nicht bestätigt, sodass diese bei Standsicherheitsbeurteilungen nicht mehr zum Einsatz kommt [37, 48, 49].

Nach der Baumkontrollrichtlinie wird eine Abschätzung der Standsicherheit mithilfe der „Statisch integrierten Abschätzung“ vorgenommen, bei welcher mithilfe von Bemessungsdiagrammen eine Grundsicherheit des Baumes ermittelt wird. Diese Grundsicherheit wird im Nachgang durch den Einfluss von erkennbaren Vorschädigungen korrigiert und entscheidet im Ergebnis über notwendige Maßnahmen zur Verkehrssicherung. Die Bemessungsdiagramme basieren auf Messdaten, die mittels der Inclino-/Elasto-Methode an 10.000 Bäumen (Stand: 2014) ermittelt wurden [37].

Bei dieser Methode wird eine messbare Belastung über ein Schrägseil in den Baum eingeleitet und dabei die Fußpunktverdrehung des Baumes sowie die Dehnung am Baumstamm ermittelt und zu einer Traglast extrapoliert [47]. Obwohl diese Methode als zerstörungsfreie Prüfung angelegt ist, sind keine Maßnahmen zur Observation von Schädigung während der Prüfung vorgesehen.

In [50] wird das Verfahren kritisiert, da es Standardwerte für Materialeigenschaften der jeweiligen Baumart nutzt und keine individuellen Eigenschaften des Baumes berücksichtigt.

Im Wesentlichen lassen sich drei Einwirkungskategorien definieren, welche den Baum belasten. Diese Kategorien sind Eigengewicht, Schneelast und Windlast. Das Eigengewicht eines Baumes ergibt sich aus dem Produkt von Dichte und Volumen des Baumes. Allometrische Wachstumsfunktionen aus Waldvermessungsstudien, können das aktuelle Volumen eines Baumes sowie dessen Zuwachs näherungsweise vorhersagen, vgl. z.B. [51].

Schneelasten lassen sich mithilfe meteorologischer Vorhersagemodelle bestimmen. Die Bestimmung des Bruchrisikos für Bäume wird in [52] angeführt. Windlasten, welche Biegemomente im Baum hervorrufen, bilden die Ursache für den größten Teil der Baumversagensfälle. Van Haften stellt in [53] Studien zusammen, welche sich mit Versagenssituationen von Bäumen befassen. Dabei entfallen 126 von insgesamt 182 Studien auf das Versagen durch Windeinwirkungen.

Rottmann klassifiziert in [54] die Auswirkungen von Windeinwirkungen auf Bäume als langfristige Auswirkungen in Form von Anpassung der Baummorphologie und Holzstruktur sowie kurzfristige Auswirkungen als direkte Reaktion auf das Windgeschehen durch Schwingungen,

Verankerungslockerung und Versagen. Bazzigher und Schmid klassifizieren in [55] die Versagensarten von Bäumen in:

1. Wurzelbruch (eine oder mehrere Wurzeln brechen, der Wurzelballen bricht, der Stammfuß liegt direkt am Boden)
2. Wurf (der gesamte Wurzelteller wird ausgehoben, der Stammfuß bleibt erhöht)
3. Stockbruch (der Stamm wird am Stammfuß gebrochen, der Wurzelteller bleibt im Boden)
4. Stammbruch (der Bruch erfolgt im Stamm).

Die Anpassung der Morphologie äußert sich in Querschnittsvergrößerungen durch Dickenwachstum. Jaffe führt in [56] den Begriff der Thigmomorphogenese für das spannungsinduzierte Wachstum ein. Es bedeutet, dass der Baum seine Zuwachsrates in mechanisch höher beanspruchten Bereichen steigert. Dieses Verhalten konnte für eine Vielzahl von Baumarten nachgewiesen werden [57–59].

Nachfolgend wird Literatur zum Bau von Baumhäusern besprochen. Das im Jahr 1914 veröffentlichte Buch „The Practical Book of Garden Architecture“ [20] enthält erstmals Hinweise für den Bau von „Crows‘-Nests and Tree Houses“, welche aus Naturmaterialien in Bäumen errichtet werden.

Nach wie vor finden sich Monographien zum Baumhausbau aus einer kaum evidenzbasierten Position, wie z.B. „Treehouses“ [14] von Anthony Aikman oder „Be in a Treehouse“ [60] von Pete Nelson. Darin werden u.a. Verankerungstechniken zwischen technischen Tragelementen und Baum vorgeschlagen, welche den Dickenzuwachs des Baumes lokal unterbinden, was langfristig zur Schädigung der Tragbäume führen kann [23]. Eine indirekte Anbindung über Seilabhängungen ist vorteilhaft, um die natürliche Bewegung von Bäumen im Windgeschehen weniger einzuschränken [61].

Da zahlreiche Bauwerke in Bäumen auf Privatgelände für Freizeitliche Privatnutzung errichtet werden, sind sie oft „Anlagen der Garten und Freizeitgestaltung“ nach §62 MBO [62] ohne baurechtliche Anforderungen. Bei Bauwerken, die einem Genehmigungsverfahren unterliegen ergeben sich Anforderungen an die technische Beschaffenheit. Diese Anforderungen resultieren aus der Gefahrenabwehr im zivilen Raum und erfordern u.a. einen Strandsicherheitsnachweis vgl. §66 MBO [62].

Der Strandsicherheitsnachweis wird i. d. R. über Normen, Regelwerke und anerkannte Regeln der Bautechnik erbracht. Kommt Holz für die Tragstruktur zum Einsatz, greifen in Europa die Regelungen nach Eurocode 5 „Bemessung und Konstruktion von Hochbauten und Ingenieurbauwerken bzw. Bauteilen aus Holz“ [27]. Auch andere Aspekte, wie die Definition der Belastungen auf das Bauwerk, die Grundsätze der Bemessung und der Umgang mit anderen Baustoffen ergeben sich aus den Festlegungen der Eurocode-Reihe [26].

Anders hingegen verhält es sich mit den Tragbäumen selbst, sowie den Verankerungspunkten des technischen Tragwerks am Baum. Für beide Themenfelder existieren bisher keine expliziten technischen Regelwerke, um eine Beurteilung bzw. eine Bemessung durchzuführen.

Dies weist auf den notwendigen Forschungsbedarf im Bereich der Gründung von Baukörpern mittels Tragbäumen hin. Daher wird sich diese Arbeit der folgenden Arbeitshypothese widmen:

Mit Hilfe von Bäumen, Seilen und entsprechenden Verbindungselementen zum technischen Tragwerk ist das Anheben von baulichen Anlagen über den Boden dauerhaft möglich, ohne die Tragbäume zu schädigen. Der Naturraum kann damit in seiner ursprünglichen Funktion weitestgehend erhalten bleiben und erlaubt dennoch eine zivile Nutzung.

1.4. Gliederung der Arbeit:

Kapitel 2 behandelt grundlegende Aspekte zum Bau in und mit vitalen Bäumen. Die Betrachtung des Stammes als wesentliches Tragelement wird motiviert und der strukturelle Aufbau des Holzes und das sich daraus ergebende Wachstumsverhalten erläutert. Unterschiede im Tragverhalten einzelner Baumspesies werden besprochen. Zur Errichtung von Tragwerken in und mit Bäumen werden grundlegende Tragkonzepte identifiziert und deren Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten aufgezeigt. Die Bauweise über Grund durch Nutzung von Tragbäumen wird hinsichtlich Nachhaltigkeitszielen analysiert und Vorteile gegenüber konventionellem Bauen am Boden herausgearbeitet.

Die Tragfähigkeit von Bäumen wird in Kapitel 3 am Beispiel der Rotbuche experimentell untersucht. Dazu wird die Auswahl der Prüfkörper sowie die Entwicklung eines Versuchskonzeptes, welches sich aus Druck- Biege- und Zugversuchen zusammensetzt, beschrieben. Die Ergebnisse der Großversuche an vollständigen Stammabschnitten zur Ermittlung von Festigkeitsparametern werden dargestellt und eingeordnet. Aus den ermittelten Materialparametern wird ein Berechnungsmodell basierend auf einer nichtlinearen Spannungshypothese entwickelt, durch welches die Biegetragfähigkeit von Bäumen abgeschätzt werden kann.

In Kapitel 4 werden gängige Möglichkeiten der Verankerung technischer Lasten an Bäumen untersucht und miteinander verglichen. Eine detaillierte Betrachtung erfolgt für die Befestigung mittels Baumschrauben. Eine Versuchsreihe zur Tragfähigkeit von Baumschrauben wird vorgestellt und deren Ergebnisse in Hinblick auf eine bautechnische Anwendung eingeordnet. Auf Basis der Ergebnisse wird ein Befestigungselement entwickelt, welches zwei dieser Baumschrauben koppelt und deren Tragfähigkeit wesentlich erhöht. Im Entwicklungsprozess werden konzeptionelle Überlegungen sowie die Auslegung durch Analysen am Finite Elemente Modell aufgezeigt.

Kapitel 5 stellt Bauprojekte vor, welche sich auf die Bemessungsmodelle in Kapitel 2 berufen. Die insgesamt drei Baukörper, welche sich über Stahlseile an Bäumen gründen, wenden die in Kapitel 3 entwickelten Befestigungselemente an.

Es folgt eine Zusammenfassung sowie ein Ausblick in Kapitel 6. Die in der Arbeit gestellte Arbeitshypothese wird bewertet sowie Empfehlungen zu weiterer Forschungsaktivität gegeben um offene Fragen zu klären.

Kapitel 2: Grundlegendes zum Bau in und mit vitalen Bäumen

2.1. Eingrenzung auf Betrachtungen am Stamm

Die Untersuchung von Bäumen als Tragelemente fokussiert in der vorliegenden Arbeit auf die Betrachtung des Stammes im grünen Zustand, was einer Holzmatrix im fasergesättigten Feuchtigkeitszustand entspricht. Übergeordnete Aspekte wie individuelle Ausprägung, allgemeine Veranlagung, Stoffwechsel, Morphologie und Interaktion zur Umwelt werden für heimische Baumarten im Hinblick auf die prinzipielle Eignung als Tragelemente lediglich umrissen.

Hierzu gehört insbesondere die Ausbildung des Wurzelwerks. Es wird davon ausgegangen, dass sich der Baum als Tragwerk in einem abgestimmten Verhältnis zu seiner Gründung befindet. Weder eine übermäßige Tragfähigkeit des Stammes im Verhältnis zum Wurzelwerk, noch eine übermäßige Tragfähigkeit des Wurzelwerks im Verhältnis zum Stamm erscheint aus Sicht der Evolutionstheorie wahrscheinlich. Zahlreiche Parameter wie Bodenbeschaffenheit, Bodenfeuchte und Interaktionen zwischen Wurzel und anderen Lebewesen erfordern ein individuelles, stark datenbasiertes und komplexes mechanisches Modell für das Wurzelwerk, welches Gegenstand weiterführender Arbeiten sein sollte.

Obwohl auch das Wachstum des Stammes zahlreichen individuellen Parametern und einer Wachstumsgeschichte unterliegt, ist es bereits geometrisch einfacher zu erfassen. Hinzu kommt, dass die Oberfläche des Stammes für visuelle Inspektion und weitere zerstörungsfreie Prüfverfahren gut zugänglich ist.

Insofern ist die Kenntnis der mechanischen Gegebenheiten im Stamm ein erster und wichtiger Schritt, um Bäume als Tragelemente für professionelle Bauwerke im Hinblick auf praxisrelevante Situationen zu erschließen.

2.2. Aufbau der Holzmatrix

Die Holzmatrix ist zentraler Bestandteil des Stammes und ein inhomogener, orthotroper Feststoff, welcher durch Wachstumsprozesse entsprechend der Anforderungen aus Stoffwechsel und Tragfunktionen über Jahre hinweg aufgebaut wird [63, 64]. Beginnend mit einer Triebspitze, welche Zellstrukturen als Fasergewebe und Leitungsbahnen in axialer Richtung hervorbringt, findet nachfolgend ein radiales Wachstum der Holzmatrix statt, welches auch als Dickenwachstum des Stammes bezeichnet wird. Dieses radiale Wachstum findet ebenfalls über axial ausgerichtete Zellstrukturen als Fasergewebe und Leitungsbahnen statt.

Es wird dabei jedoch auch ein gewisser Anteil an Zellstrukturen für die Holzstrahlen in radialer Richtung angelegt, was aus mechanischer Sicht als radiale Bewehrung der sonstigen, axialen Fasern aufgefasst werden kann. Diese Holzstrahlen übernehmen neben dieser mechanischen Funktion den Stofftransport zwischen inneren und äußeren Holzschichten [65], teilweise bis in den Markkanal hinein.

Das Dickenwachstum des Stammes findet in einem dünnen Zellkranz, dem sogenannten Kambium, statt. Die Kambialzellen bilden einerseits nach innen gerichtete Holzzellen für das Xylem und andererseits nach außen gerichtete Bastzellen für das Phloem. Die Holzzellen des Xylems ergeben den mechanisch tragfähigen Teil des Stammes und dienen zudem der Speicherung von Nährstoffen sowie dem Transport von Wasser aus dem Wurzelwerk in die Krone [66, 67].

Die Holzmatrix lässt sich in Splintholz (jüngeres Holz im äußeren Bereich), welches am Wassertransport beteiligt ist und Kernholz (älteres Holz), welches nicht mehr am Flüssigkeitstransport beteiligt ist, einteilen. Das Verhältnis zwischen Splint- und Kernholz ist baumartenspezifisch. Splint- und Kernholz weisen unterschiedliche Materialeigenschaften auf [64]. Die Bastschicht (Phloem) dient dem Transport von Photosyntheseprodukten (Assimilaten) von der Krone in den Stamm bis in die Wurzeln des Baumes [68]. In Abb. 9 sind die einzelnen Schichten des Stammes am Beispiel einer Robinie dargestellt.

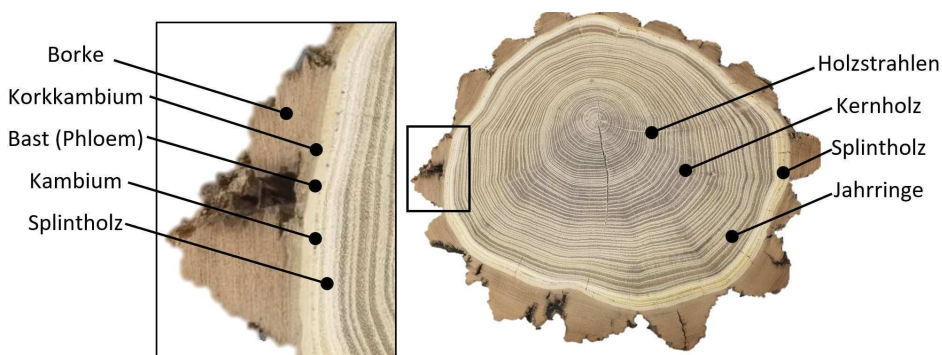


Abbildung 9: Bestandteile des Stammes im Querschnitt am Beispiel einer Robinie (*Robinia pseudoacacia*).

Bäume wachsen in jahreszeitlich geprägten Gegenden periodisch, was von Lichtintensität, Temperatur und Wasserversorgung abhängig ist. In unseren Breitengraden wird im Frühjahr ein weiches Frühholz mit großem Porenvolumen gebildet, welches die Wasserversorgung für die laufende Vegetationsperiode sichert. Im Spätsommer und Herbst wird das festere Spätholz mit geringerem Porenvolumen gebildet, welches vorrangig zur Festigkeit der Holzmatrix beiträgt. Inwieweit sich Frühholz und Spätholz auf mikroskopischer Ebene unterscheiden, ist von der Baumartenspezies abhängig.

Während bei ringporigen Hölzern, wie z.B. Eiche, Esche und Kastanie, im Frühholz mehr Leitgefäße (Tracheen) gebildet werden als im Spätholz, ist es bei diffusporigen Hölzern, wie z.B. Buche, Ahorn und Birke so, dass sich die Anzahl der Tracheen zwischen Früh- und Spätholz kaum unterscheidet. Stattdessen werden im Frühholz Tracheen mit dünneren Zellwänden ausgebildet als dies im

Spätholz der Fall ist. Dies steigert den relativen Porengehalt des Frühholzes, weshalb deren Festigkeit i.A. unter der Festigkeit des Spätholzes liegt. Dieses Verhalten zeigt sich auch bei den meisten Nadelbäumen, wie z.B. Fichte, Kiefer, Tanne und Lärche, deren Tracheiden im Frühholz dünnere Zellwände haben als im Spätholz [69].

Im Allgemeinen besitzt die Holzmatrix in axialer Richtung (Stammrichtung) höheren Widerstand gegen Zugspannung als gegen Druckspannung. Dieses Phänomen beruht auf der Porosität der Holzmatrix sowie dem lokalen Ausknicken der Holzfasern. Bäume sind in der Lage, dieser unsymmetrischen Festigkeitseigenschaft durch die Ausbildung von Wachstumsspannungen entgegenzuwirken. So baut sich im Stamm i.d.R. ein axialer Zugspannungszustand im oberflächennahen Bereich, sowie ein Druckspannungsbereich im Kern des Querschnitts als Eigenspannungszustand auf, welcher sich mit Spannungen aus Biegebelastung vorteilhaft überlagert [70–72], um die unsymmetrische Festigkeitseigenschaft zumindest teilweise zu kompensieren [73], vgl. Abb. 10.

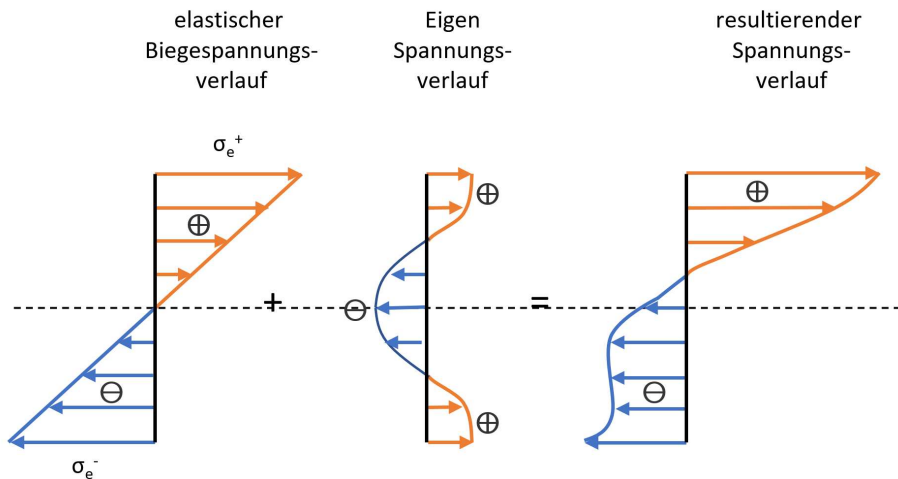


Abbildung 10: Prinzip der Wirkungsweise von Wachstums-Eigenstressungen in Kombination mit Biegespannungen im Querschnitt eines Stammes.

Das Festigkeitsverhalten der Holzmatrix unterscheidet sich weiterhin in axialer, radialer und tangentialer Richtung des Stammes. Die Zugfestigkeit der Holzmatrix in radialer Richtung ist z.B. von der Ausbildung von Holzstrahlen abhängig und wird ebenfalls von Wachstumseigenstressungen beeinflusst [69]. Wird der Stamm technisch verarbeitet, geht dies mit Trocknung und Zerlegung einher, so dass die vom Baum vorgesehenen Wirkungen seiner Wachstumseigenstressungen verändert werden bzw. verloren gehen.

Aber nicht nur die Wirkung von Wachstumseigenstressungen ist vom hohen Feuchtigkeitsgehalt in der Holzmatrix abhängig, sondern auch die Grenzen der elastischen Deformation. Beim Trocknungsvorgang schrumpfen sämtliche Zellen im Holz, was zur Versprödung der Holzmatrix führt [63]. Die Studien in [29, 65] zeigen, dass getrocknete Hölzer geringere Mengen mechanischer Energie absorbieren und bei Bruchversuchen eine sprödere Bruchfläche als grünes Holz aufweisen.

2.3. Wachstumstropismen: Wachstumsreaktionen auf externe Reize

Externe Reize, wie Licht, Schwerkraft, Wasser, chemische Substanzen oder mechanische Einwirkungen erzeugen gerichtete Wachstumsbewegungen bei Pflanzen. Diese physiologischen Prozesse sind entscheidend für die Vitalität von Bäumen, da es ihnen ermöglicht, auf Umweltveränderungen zu reagieren und sich diesen anzupassen. Bäume, als langlebige Organismen nutzen solche Tropismen, um unter dynamischen Umweltbedingungen zu gedeihen und erzielen dadurch ihre mechanische Stabilität. Im Folgenden sind die für Bäume relevanten Haupttropismen genannt.

Phototropismus (Licht)

Als Phototropismus wird die Wachstumsbewegung von Pflanzen in Richtung einer Lichtquelle bezeichnet. So haben Triebe und Blätter einen positiven Phototropismus, indem sie in Richtung des Lichtes wachsen, während Wurzeln einen negativen Phototropismus zeigen, da sie sich vom Licht weg in den Boden hinein entwickeln.

Die Hauptursache des Phototropismus liegt in der ungleichmäßigen Verteilung des Pflanzenhormons Auxin, das auf der lichtabgewandten Seite der Pflanze in höherer Konzentration vorkommt. Eine erhöhte Konzentration dieses Hormones begünstigt die Streckung der Zellen beim Wachstum, was z.B. bei einem Ast zu einer Krümmung in Richtung der Lichtquelle führt [74, 75].

Gravitropismus (Schwerkraft)

Als Gravitropismus wird die Reaktion von Pflanzen auf die Schwerkraft bezeichnet. Bei Bäumen zeigt sich positiver Gravitropismus in den Wurzeln, die nach unten in Richtung des Schwerkraftvektors wachsen, während negativer Gravitropismus in den Trieben zu beobachten ist, die entgegen der Schwerkraft nach oben wachsen.

Der Mechanismus des Gravitropismus wird durch Statolithen, schwerere Zellbestandteile in den Zellen des Pflanzengewebes, die durch Schwerkraft absinken, gesteuert. Sie lösen eine biochemische Reaktion aus, die zur Entstehung des Pflanzenhormones Auxin führt, welches die Zelle in eine definierte Richtung wachsen lässt [76].

Hydrotropismus (Wasser)

Als Hydrotropismus wird die Reaktion von Pflanzenwurzeln auf einen Wassergradienten im Boden bezeichnet. Der Hydrotropismus lässt das Wurzelsystem in Richtung feuchter Bodenzone wachsen. In Abhängigkeit der Bodenbeschaffenheit führt er zur Ausbildung unterschiedlich gearteter Geometrien im Wurzelsystem.

Die Rolle des Pflanzenhormons Abscisinsäure, das auch als „Stresshormon“ bezeichnet wird, ist von zentraler Bedeutung für den Hydrotropismus. Unter Trockenstress führt es neben dem Schließen von Stomata, was die Transpiration von Wasser reduziert, zur Anregung des Wachstums und der Verzweigung von Wurzeln in Richtung von Wasserquellen [77, 78].

Thigmotropismus (mechanische Einwirkung)

Als Thigmotropismus (auch Mechanotropismus) wird die Reaktion von Pflanzen auf mechanische Reize oder Berührung bezeichnet. Im Wesentlichen tritt der Thigmotropismus in zwei unterschiedlichen Mechanismen auf. Zum einen äußert er sich bei Berührung von festen

Gegenständen, was die Pflanze dazu bringt ihre Wachstumsrichtung zu ändern und um die Gegenstände herum zu wachsen (besonders ausgeprägt bei Kletterpflanzen, aber auch bei Wurzeln, die auf Gestein treffen). Zum anderen führt er als Reaktion auf mechanischen Stress zur thigmomorphogenetischen Reaktion (bei Bäumen besonders ausgeprägt), die dazu führt, dass mehr und stärker belastbares Zellmaterial (Reaktionsholz) gebildet wird, um den Widerstand gegen die mechanische Einwirkung zu vergrößern.

Die Änderung der Wachstumsrichtung bei Kontakt wird durch das Pflanzenhormon Auxin gesteuert, die thigmomorphogenetische Reaktion bei mechanischer Beanspruchung über Auxin und Ethylen [57, 79, 80].

Chemotropismus (chemische Reize)

Als Chemotropismus wird das Wachstum von Pflanzen als Reaktion auf chemische Reize bezeichnet. Dies zeigt sich in den Wurzeln, die in Richtung von Nährstoffen wie Stickstoff, Phosphor oder Kalium wachsen.

Wurzeln nutzen chemische Gradienten im Boden, um Nährstoffquellen effizient zu erschließen. Dabei kommen Calciumionen zur Signaltransduktion zum Einsatz, welche die Ausschüttung von Auxin hervorrufen und damit das Wachstum der Zellen in Richtung der Nährstoffquelle ausrichten [81].

Transversaler Tropismus

Als transversaler Tropismus werden alle Formen von Tropismen bezeichnet, bei denen Pflanzen seitlich, also quer zur Wachstumsrichtung auf externe Reize reagieren. Transversaler Tropismus zeigt sich bei Bäumen z.B. im Wachstum von Ästen, wenn dies den Zugang zu einer Lichtquelle ermöglicht. Auch wird die Verzweigung in Bereiche mit gutem Lichteinfall gefördert, um die Ausbeute an Photosyntheseprodukten zu erhöhen. Ebenfalls zeigt sich ein Astwachstum weg von physikalischen Barrieren in freie Räume. Die Ausbildung eines einseitigen Kronenübergewichtes kann durch Schwerpunktverlagerung zum Ausgleich der Lastexzentrizität aus Schiefstellung führen. Stark windexponierte Bäume bilden Äste vermehrt auf der windabgewandten Seite, um trotz Erhöhung der eigenen Biomasse den Windwiderstand und die daraus resultierende mechanische Belastung zu reduzieren. Damit stehen die transversalen Tropismen immer in Verbindung mit anderen Tropismen (z.B. Phototropismus, Gravitropismus, Thigmotropismus).

Diese Reaktion wird durch eine Kombination von unterschiedlichen Reizen und der Wirkung von Hormonen wie Auxinen, Ethylen und anderen gesteuert, die das Wachstum seitlich verstärken oder hemmen [82, 83].

2.4. Tragverhalten von Bäumen

Bäume stellen in ihrem vitalen Zustand einen Kragarm dar, welcher über das Wurzelsystem im Boden eingespannt ist. Die einwirkenden Lasten, die sich aus Gravitation und Umströmung durch Wind ergeben, erzeugen Normalkraft, Querkraft, Biegebeanspruchung und Torsion im Baumstamm. An der Einspannung des Stammes ist das höchste Biegemoment zu erwarten. Im Stamm bilden die unterschiedlichen radial angeordneten Schichten einen Verbundquerschnitt. Dieser Verbund ist innig, wird aber unter Biege- und Querkraftbelastung soweit beansprucht, dass es zur Delamination von Faserbündeln kommt, vgl. Kap. 3.7.

Der Querschnitt des Stammes ist i. d. R. über dessen Verlauf veränderlich. Während die Sprossachse ein primäres Wachstum in die Höhe verursacht, kommt es durch die Bildung von Kambialzellen und deren späterer Verholzung zum sekundären Wachstum in radialer Richtung (Dickenwachstum). Dabei erhöht sich die Querschnittsfläche sukzessive, was dem Stamm eine höhere Tragfähigkeit verleiht und damit ein weiteres Höhenwachstum ermöglicht. Der Durchmesser des Stammes nimmt i. d. R. im Verlauf des Stammes nach oben gleichmäßig ab, sodass er die Form eines Kegelstumpfes ausbildet. Im Bereich des Wurzelanlaufs (vom Grund bis ca. 1 m Höhe) liegt jedoch meist eine ausgeprägt nichtlineare Querschnittsänderung vor, was u.a. mit der Umorientierung horizontaler Faserstränge der Wurzeln in die vertikalen Faserstränge des Stammes zusammenhängt.

Bäume streben einen ausgeglichenen Zustand zwischen Tragfähigkeit und mechanischer Einwirkung an. Kommt es auf der Widerstandsseite z.B. durch Fäulnis oder andere Schäden oder auf der Einwirkungsseite z. B durch Starkwindereignisse zu einem Ungleichgewicht, sind Schäden in der Holzmatrix bis zum Stammbruch zu erwarten [55].

Auch der Bruch des Stammes im Bereich des Wurzelanlaufes nahe der Gründung ist häufig zu beobachten, was als Stockbruch bezeichnet wird [55]. Hierbei ist meist Fäulnis im Übergang von Wurzel zu Stamm ursächlich, was als Stockfäule bezeichnet wird. Im Wurzelanlauf ändert sich die Faserrichtung der Holzfasern. Während sie im Stammbereich axial verlaufen, nehmen sie im Wurzelanlauf auch radiale Richtung an. Gerade in diesem Übergang kommt es zur notwendigen Umlenkung von axialen in radiale Spannungskomponenten, was das Auftreten von Querkzugspannungen impliziert. Sowohl die Gefahr von Fäulnis als auch das Auftreten von Querkzugspannungen begünstigen im Wurzelanlauf das sogenannte Stockversagen [59].

Die Verankerung von Bäumen erfolgt über deren Wurzelsystem, was je nach Baumart unterschiedlich ausgeformt ist. Wurzeln werden in Skelettwurzeln und Feinwurzeln (kleiner als 2 mm im Durchmesser) unterschieden. Während die Feinwurzeln zur Wasser- und Nährstoffaufnahme dienen, bilden die Skelettwurzeln die Verankerung im Boden [84]. Die Wurzelsysteme lassen sich nach [85] grob in drei Ausprägungen einordnen: Herzwurzel, Flachwurzel und Pfahlwurzel, vgl. Abb. 11.

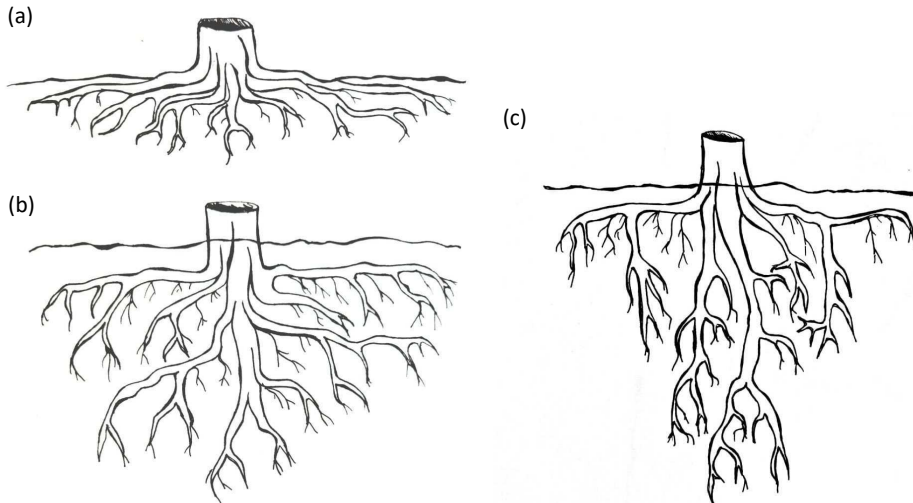


Abbildung 11: Schematische Darstellung unterschiedlicher Wurzelsysteme: Flachwurzler (a), Herzwurzler (b) und Pfahlwurzler (c). Bild entnommen aus [85].

Die Verankerung in der Tiefe ermöglicht die Erschließung von tiefer gelegenen Wasservorräten und ist vorteilhaft in Regionen, in denen die Wasserverfügbarkeit im Jahreszyklus schwankt. Eher oberflächennahe Wurzeln sind dagegen zur Aufnahme geringer Niederschlagsmengen vorteilhaft, welche sonst verdunsten oder von anderen Pflanzen aufgenommen werden [86].

Das Flachwurzelsystem bildet sich vorwiegend horizontal unter der Oberfläche aus. Es bildet sich ein tellerförmiger Gründungskörper. Die flachen Wurzeln ermöglichen einen schnellen Zugriff auf Niederschlagswasser, womit diese Wurzelform häufig in Regionen mit häufigem Niederschlag zu finden ist. Flachwurzlernde Bäume, wie z.B. Fichten (*Picea*) sind anfällig für Windwurf, da sich die Gründung auf eher lockere Bodenschichten ohne weitere Auflasten beschränkt [86].

Das Pfahlwurzelsystem zeichnet sich durch eine dominante, vertikal orientierte Hauptwurzel aus. Von dieser Hauptwurzel zweigen kleinere flach verlaufende Wurzeln ab. Die Hauptwurzel bildet die zentrale Verankerung im Boden und ermöglicht den Zugriff auf tief liegende Wasserschichten. Gute Verankerung ist somit auch in lockeren Böden möglich. Pfahlwurzeln sind allerdings anfällig für ein Versagen durch Wurzelbruch [86]. Zu finden ist diese Gründungsform häufig bei Eichen (*Quercus*) und Kiefern (*Pinus*) in semi-ariden Regionen, in denen die Bäume durch den Zugang zu tiefer liegenden Wasserquellen kaum auf Niederschläge angewiesen sind.

Beim Herzwurzelsystem bildet sich eine Kombination aus Flachwurzler- und Pfahlwurzelsystem, die sich gleichmäßig in alle Richtungen verzweigen. Herzwurzelsysteme sind bei Laubbäumen wie z.B. der Rotbuche (*Fagus sylvatica*) zu finden.

Meist weichen reale Wurzelsysteme von den Schemata in Abb. 12 ab, da Hindernisse wie Felsbrocken, Steine oder Erdschichtungen entsprechende Wachstumsreize setzen. Abweichungen finden sich innerhalb ganzer Baumbestände aber auch innerhalb des Wurzelsystem eines Individuums [84].

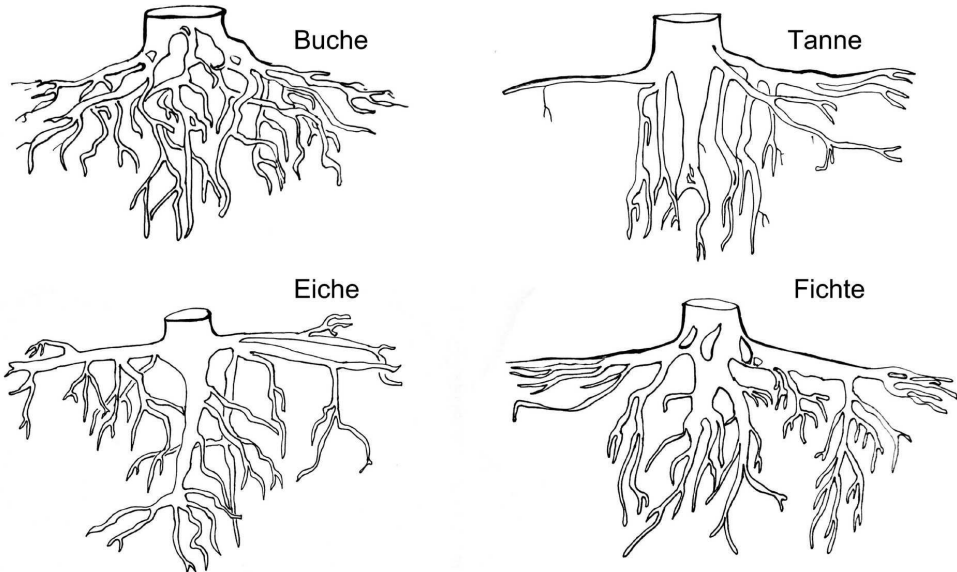


Abbildung 12: Typische Form ungehindert entwickelter Wurzelsysteme von Fichte, Tanne, Buche und Eiche. Bild entnommen aus [84].

Auf den Baum einwirkende Kräfte erzeugen ein auf die Gründung einwirkendes Biegemoment, welches durch das in der Gründung mögliche Verankerungsmoment ins Gleichgewicht gestellt werden muss. Das Biegemoment ergibt sich aus dem Moment infolge Windeinwirkung sowie exzentrischer Gewichtslast am verformten System. In [84] wird ein Drehpunkt in der Gründung genutzt, um das Verankerungsmoment zu determinieren. Kann kein ausreichendes Verankerungsmoment in der Gründung aufgebaut werden, kommt es zum Gründungsversagen als Wurzelbruch oder Wurf. Auch der Wurf ist mit einem teilweisen Wurzelbruch verbunden, da i. d. R. ein gewisser Anteil dünner Wurzeln bricht, um den Wurzelteller vollständig freizusetzen [55].

2.5. Eigenschaften heimischer Gehölze in Hinblick auf Nutzbarkeit als Tragbaum

Es folgt eine Auflistung verbreiteter heimischer Gehölze inklusive Anmerkungen zu Wachstumseigenschaften und Bebaubarkeit.

Eiche (*Quercus* spp.)

Eichen können bis zu 50 Meter hoch und 500 Jahre (in Ausnahmefällen bis zu 1000 Jahre) alt werden [88]. Sie erreichen einen Stammdurchmesser von bis zu 2,6 Metern [87]. Die Druckfestigkeit des grünen Holzes liegt bei 27,6 N/mm² und hat bei 50 % Feuchte eine Dichte von 833 kg/m³. Der Elastizitätsmodul liegt bei 8300 N/mm² [29]. Eichen sind vor allem in Misch- und Laubwäldern Mitteleuropas weit verbreitet. Sie sind sehr widerstandsfähig gegen Krankheiten und Schädlinge sowie gegen extreme Witterungsbedingungen und Klimawandel [89].

Rotbuche (*Fagus sylvatica*)

Rotbuchen können bis zu 45 Meter hoch und bis zu 500 Jahre alt werden [88]. Sie erreichen einen Stammdurchmesser von bis zu 2,9 Metern. Die Druckfestigkeit des grünen Holzes liegt bei 27,6 N/mm² und hat bei 50 % Feuchte eine Dichte von 833 kg/m³. Der Elastizitätsmodul liegt bei 9.800 N/mm² [29]. Rotbuchen sind in europäischen Wäldern weit verbreitet. Sie sind sehr widerstandsfähig gegen Krankheiten und Schädlinge sowie gegen extreme Witterungsbedingungen und Klimawandel [89].

Fichte (*Picea abies*)

Fichten können bis zu 63 Meter hoch und bis zu 500 Jahre alt werden [87]. Sie erreichen einen Stammdurchmesser von bis zu 1,65 Metern. Die Druckfestigkeit des grünen Holzes liegt bei 17 N/mm² und hat bei 50 % Feuchte eine Dichte von 497 kg/m³. Der Elastizitätsmodul liegt bei 6.300 N/mm² [29]. Fichten sind in europäischen Wäldern weit verbreitet, vorzugsweise in höheren Lagen zu finden. Fichten sind anfällig für Trockenstress und durch den Borkenkäfer sowie Pilze angreifbar [87].

Kiefer (*Pinus sylvestris*)

Kiefern können bis zu 45 Meter hoch und bis zu 600 Jahre alt werden [87]. Sie erreichen einen Stammdurchmesser von bis zu 1,50 Metern. Die Druckfestigkeit des grünen Holzes liegt bei 21 N/mm² und hat bei 50 % Feuchte eine Dichte von 625 kg/m³. Der Elastizitätsmodul liegt bei 7.700 N/mm² [28]. Kiefern sind in europäischen Wäldern weit verbreitet. Sie sind weniger widerstandsfähig gegen Krankheiten und Schädlinge sowie gegen extreme Witterungsbedingungen und Klimawandel [89]. Kiefern sind für Pilze und Kiefernborkekäfer anfällig.

Esche (*Fraxinus excelsior*)

Eschen können bis zu 40 Meter hoch und bis zu 300 Jahre alt werden [87]. Sie erreichen einen Stammdurchmesser von bis zu 2 Metern. Die Druckfestigkeit des grünen Holzes liegt bei 27,2 N/mm² und hat bei 50 % Feuchte eine Dichte von 801 kg/m³. Der Elastizitätsmodul liegt bei 9.500 N/mm² [29]. Eschen sind in europäischen Wäldern weniger verbreitet. Eschen sind sehr widerstandsfähig gegen Krankheiten und Schädlinge sowie gegen extreme Witterungsbedingungen

und Klimawandel [89]. Es finden sich allerdings häufig durch Bakterien verursachte Krebsgeschwüre [87]. Durch das Eschentriebsterben wurde diese Art in den europäischen Wäldern stark dezimiert.

Ahorn (*Acer spp.*)

Ahornbäume können bis zu 30 Meter hoch und bis zu 180 Jahre alt werden [88]. Sie erreichen einen Stammdurchmesser von bis zu einem Meter. Die Druckfestigkeit des grünen Holzes liegt bei 27,5 N/mm² und hat bei 50 % Feuchte eine Dichte von 712 kg/m³. Der Elastizitätsmodul liegt bei 8.400 N/mm² [28]. Im Baumalter zwischen 15 und 30 Jahren kommt es häufig zum Absterben von Stamm- und Kronenbereichen [87].

Birke (*Betula pendula*)

Birken können bis zu 30 Meter hoch und bis zu 120 Jahre alt werden [87]. Sie erreichen einen Stammdurchmesser von bis zu einem Meter. Die Druckfestigkeit des grünen Holzes liegt bei 26,3 N/mm² und hat bei 50 % Feuchte eine Dichte von 801 kg/m³. Der Elastizitätsmodul liegt bei 9.900 N/mm² [29]. Birken sind oft in jungen Waldflächen anzutreffen und besiedeln diese als Pionierbaum bis zum Heranwachsen anderer Spezies. Birken sind einerseits anfällig für Trockenheit und einige Schädlinge, andererseits aber auch gut anpassungsfähig [87].

Lärche (*Larix decidua*)

Lärchen können bis zu 50 Meter hoch und bis zu 500 Jahre alt werden [87]. Sie erreichen einen Stammdurchmesser von bis zu 1,5 Metern. Die Druckfestigkeit des grünen Holzes liegt bei 24,3 N/mm², und hat bei 50 % Feuchte eine Dichte von 673 kg/m³. Der Elastizitätsmodul liegt bei 7.900 N/mm² [29]. Lärchen sind in europäischen Wäldern weit verbreitet. Lärchen gelten als sehr robust und widerstandsfähig [89, 87].

2.6. Prinzipien für Tragwerke in Kombination mit Bäumen

Die Herstellung einer ebenen Fläche zur zivilen Nutzung oberhalb des Grundes mit Hilfe von Bäumen kann durch Hinzunahme folgender technische Strukturelemente erzielt werden:

1. Stützung mit Hilfe von Druckpfosten
2. Überbrückung mit Hilfe von Biegebalken
3. Abhängung mit Hilfe von Zugelementen (z.B. Seile)

Stütungen mit Druckpfosten kommen meist dann zum Einsatz, wenn Bauwerke an einzelnen Bäumen errichtet werden. Es kann in zentralsymmetrischer Anordnung des Bauwerks um den Tragbaum herum oder in die einseitige Anbindung eines Bauwerks unterschieden werden, vgl. Abb. 13.

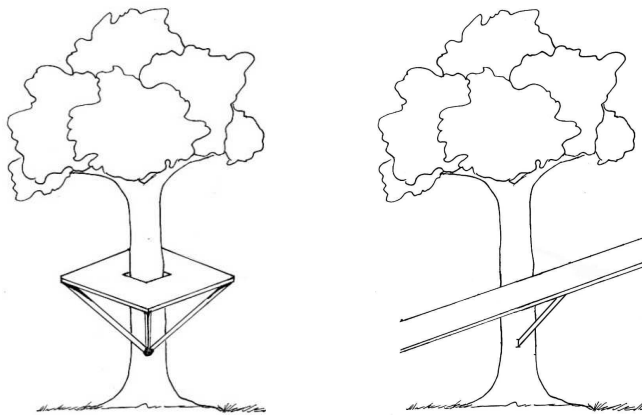


Abbildung 13: Links: Plattform mit schräger Abstützung als zentralsymmetrische Anordnung. Rechts: Einseitige Anordnung z.B. für einen Steg.

Die zentralsymmetrische Anordnung führt im Gegensatz zur einseitigen Anordnung eines Bauwerks zur vorwiegend axialen Druckbelastung im Tragbaum, während die einseitige Anordnung auch Biegemomente impliziert.

Die Überbrückung mit Hilfe von Biegebalken stellt eine direkte und ausgeprägte Kopplung dar. Diese wird noch verstärkt, wenn zusätzlich Druckpfosten in den Lastabtrag einbezogen werden, vgl. Abb. 14.

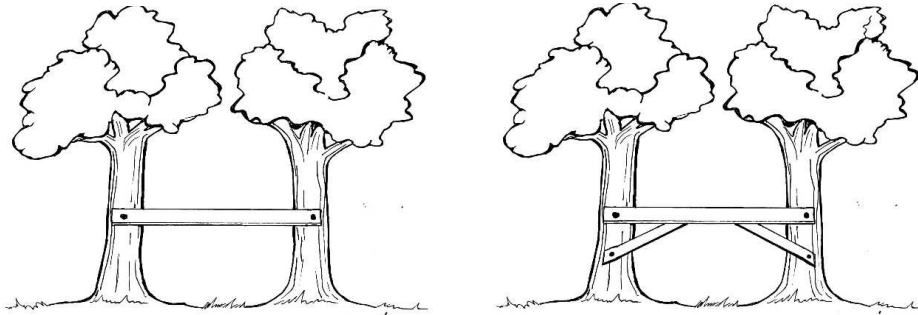


Abbildung 14: Links: Überbrückung mit Hilfe von Biegebalken. Rechts: Zusätzliche Abstrebung zur Versteifung.

Da der Baum selbst ein statisch bestimmtes System ist, führt die Kopplung mehrerer Bäume durch technische Elemente automatisch zum statisch unbestimmten System. Damit verbundene Zwängungen können einerseits erwünscht sein und zur Stabilität des Systems beitragen, sie können andererseits aber auch wachstumsinkompatibel sein und den Aufbau nachteiliger, innerer Spannungszustände bewirken.

Eine indirekte Kopplung mehrerer Tragbäume durch Abhängung des Baukörpers mit Zugelementen (Seilen) kann Zwängungen umgehen, vgl. Abb. 15.

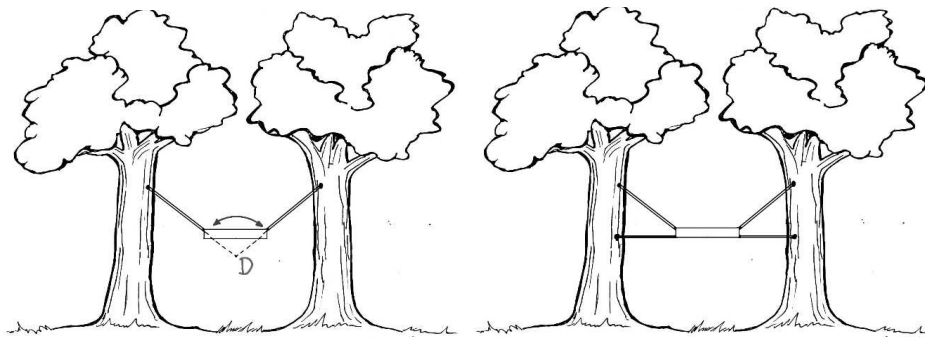


Abbildung 15: Links: Abhängung einer Plattform ohne Zwängung. Rechts: Abhängung einer Plattform mit zusätzlicher Aussteifung.

Es sind mindestens drei Abhängungen (Seile) zur Installation einer Ebene zwischen Bäumen notwendig. Diese Konfiguration ist allerdings nur im Sinne eines kinematischen Stabilitätskriteriums als tauglich zu bezeichnen und es kommt zu Pendelbewegungen z.B. im Windgeschehen.

Mit sechs Seilen lassen sich Ebenen zwischen Bäumen so installieren, dass keine freien Bewegungen möglich sind und damit das System nach statischen Kriterien tauglich ist, vgl. Abb. 15 rechts.

Werden mehr als sechs Seile zur Installation eines Bauwerks zwischen Bäumen verwendet, liegen Redundanzen vor, so dass die Umverteilung von Seilkräften z.B. hin zu stärkeren Tragbäumen möglich ist. Die Abhängung eines Bauwerks durch eine hohe Anzahl an Seilen impliziert Redundanz

für den Ausfall einzelner Seile, was z.B. bei der Verankerung im Kronenbereich sinnvoll sein kann, vgl. Abb. 16.



Abbildung 16: Redundante Verseilung eines Baukörpers im Kronenbereich von Eichen.

2.7. Nachhaltigkeitsaspekte für das Bauen in und mit vitalen Bäumen

Das Bauen in und mit vitalen Bäumen ermöglicht die Schaffung ziviler Flächen über dem Boden mit Hilfe der Tragprinzipien aus Kap. 2.6. Bewaldete Gebiete und stellen damit eine Möglichkeit zur Erschließung dar, sofern sie nicht gerodet werden. Es ist zu hinterfragen, ob diese Form der Erschließung nachhaltig sein kann. Der Begriff der Nachhaltigkeit ist in seiner ursprünglichen Form mit der Waldwirtschaft verbunden. Der Begriff wurde durch Hans Carl von Carlowitz, Oberberghauptmann aus Freiberg (Sachsen) im Jahr 1713 in einem forstwirtschaftlichen Kontext in der Form geprägt, dass aus einem Waldbestand jährlich nur so viel Holz entnommen werden sollte, wie im gleichen Zeitraum durch aktive Aufforstung Biomasse nachwachsen kann [3]. Erst 1987 wurde der Begriff der Nachhaltigkeit durch die „World Commission on Environment and Development“ auf die Konsequenzen allen menschlichen Handelns übertragen [90]. Im Jahr 2015 stellten die Vereinten Nationen die Agenda 2030 auf [91], welche 17 globale Nachhaltigkeitsziele definiert.

Konkretisiert werden die Ziele für das Bauwesen Leitfaden „Nachhaltiges Bauen“ [92] des deutschen Bauministeriums. Darin wird der Schutz des Ökosystems und natürlicher Ressourcen auf globaler und lokaler Ebene thematisiert.

Noch vor einigen Jahrhunderten bestand Deutschland zu über 70% aus natürlichen Urwäldern. Heute sind es nur 1,6% der Landfläche Deutschlands, die von solchen Wäldern bedeckt sind. Ein großer Teil des Ökosystems Wald ist durch den Eingriff des Menschen verändert oder zerstört worden [93]. Zur Erschließung ziviler Flächen wird i. d. R. zunächst jegliche organische Substanz im geplanten Baufeld bis auf die tragende Sohle abgetragen. Erst nach der Bebauung werden wieder partiell Pflanzen angesiedelt. Hierbei wird der ursprüngliche ökologische Wert i. d. R. nicht mehr erreicht. Der Bau in und mit Bäumen bietet jedoch neue Perspektiven.

Unsere heute vorhandenen, bewirtschafteten Wälder sind im Gegensatz zu den ehemals vorhandenen Urwäldern im unteren Bereich deutlich weniger bewachsen. Dies ist auf die in den meisten Wäldern angewandte Niederdurchforstung [94] zurückzuführen. Dadurch ergibt sich zwischen den ökologisch wichtigen Bereichen des Waldbodens und den Baumkronen ein großes Raumvolumen, welches lediglich durch Stämme von Bäumen durchdrungen wird. Dieser Raum bietet viele Möglichkeiten zur Errichtung von Bauwerken, die bei richtiger Umsetzung den Wald kaum beeinträchtigen. Essentiell ist dabei der nachhaltige Umgang mit den Tragbäumen, sodass diese durch die Anbindung von Bauwerken nicht in ihrer Vitalität eingeschränkt werden [61].

Neben dem Schutz des Ökosystems Wald trägt die Gründung von Bauwerken über vitale Tragbäume auch zur Ressourceneffizienz des Bauwerkes bei. Die Errichtung von Bauwerken auf dem Boden erfordert technische Fundamente. Diese werden i. d. R. durch den Einsatz von Beton und Stahlbeton realisiert. Die Herstellung dieser Materialien hat ein großes Global Warming Potential. Auch aufgeständerte Bauwerke, wie sie beispielsweise als Stelzenhäuser in einem Wald denkbar sind, müssen technische Fundamente und der damit einhergehende Ressourceneinsatz eingeplant werden. Können allerdings Bäume zur Fundamentierung genutzt werden, die im Wald ohnehin vorhanden sind, lässt sich eine Ressourceneinsparung erzielen [7]. Verstärkt wird dieser Effekt, wenn berücksichtigt wird, dass die als Tragbäume in die Konstruktion eines Bauwerkes

eingebundenen Bäume während der Nutzungsdauer weiterwachsen und damit Biomasse aufbauen. Dieser Aufbau von Biomasse lässt sich direkt in die Bindung von CO₂ umrechnen. Es ist für exemplarische Wohngebäude bereits gezeigt worden, dass das durch Wachstum in den Tragbäumen gespeicherte CO₂ die Summe aller Treibhausemissionen, die beim Bau und während der Nutzung eines solchen Bauwerks anfallen, übersteigt [7]. Damit besitzt das Bauen in und mit vitalen Bäumen ein hohes Potential, um Nachhaltigkeitsziele zu erlangen.

Kapitel 3: Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Bäumen am Beispiel der Rotbuche

Die Rotbuche (*Fagus sylvatica*) stellt mit 15 % an der Gesamtwaldfläche den am meisten verbreiteten Laubbaum in Deutschland dar, was 1,7 Mio. Hektar Buchenwald entspricht. In Europa ist die Rotbuche ebenfalls eine der dominierenden Laubbaumarten, die vorzugsweise in Mitteleuropa, sowie in einigen Teilen West- und Südeuropas vorkommt. Ihr Anteil macht je nach Region 10-15 % des Gesamtwaldbestandes aus. Ohne Abholzungsmaßnahmen der letzten Jahrhunderte wären 60-70 % der natürlichen Wälder in Europa Buchenwälder [93]. Aufgrund ihrer Verbreitung und Wachstumsform bietet sich die Buche zur Nutzung als Tragbaum für Bauwerke an, was die folgenden Untersuchungen motiviert.

3.1. Mechanische Kennwerte getrockneter und grüner Hölzer

Das Holz der Rotbuche wird nur in geringen Mengen im Bauwesen eingesetzt, auch wenn Produkte aus Buchenholz, wie z.B. Furnierschichtholzträger [95], bauaufsichtlich zugelassen und gut erhältlich sind. Dies lässt sich durch die geringe Witterungsbeständigkeit und Anfälligkeit für Fäulnis des verarbeiteten Holzes begründen. Nach DIN EN 350-2 erhält das Buchenholz mit der Dauerhaftigkeitsklasse 5 die schlechteste mögliche Beständigkeit mit der Bezeichnung „nicht dauerhaft“. Im Gegensatz dazu zeichnet sich das Holz der vitalen Rotbuche durch ein stark ausgeprägtes Abschottungsverhalten gegenüber Pilzen und Schädlingen aus [96].

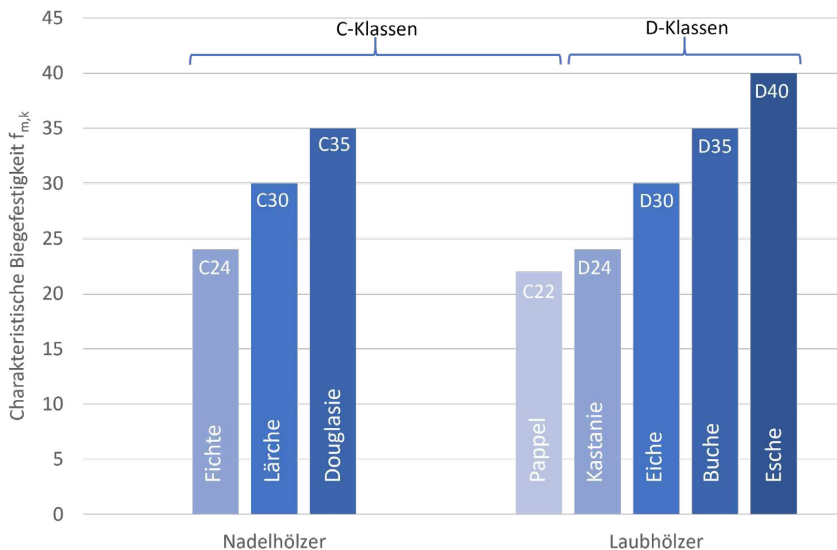


Abbildung 17: Festigkeitsklassen europäischer Laub- und Nadelhölzer. Grafik entnommen aus [97].

Technisch verarbeitetes Buchenholz wird als Bauprodukt gemäß DIN EN 1912 in die Festigkeitsklasse D35 nach DIN EN 338 eingeordnet, vgl. Abb. 17.

Vergleicht man den Elastizitätsmodul in Faserlängsrichtung, der für technisch getrocknetes Buchenholz (D35) nach DIN EN 338 mit 12.000 N/mm^2 angegeben wird mit dem für das grüne Holz von 9.800 N/mm^2 [29], zeigt sich ein Anstieg von ca. 20% durch den Vorgang der Trocknung. Grünes und somit feuchtes Holz verhält sich somit weicher, ist aber dafür weniger spröde, was sich in der höheren Biegefestigkeit von 65 N/mm^2 zu 35 N/mm^2 im getrockneten Zustand widerspiegelt.

Die Druckfestigkeit längs zur Faserrichtung ist im grünen und getrockneten Zustand ungefähr gleich: $27,6 \text{ N/mm}^2$ im grünen Holz und 25 N/mm^2 im getrockneten Holz. Dies deutet darauf hin, dass die höhere Biegefestigkeit des grünen Holzes im Vergleich zum getrockneten Holz durch eine höhere Zugfestigkeit der Fasern zustande kommt. Jedoch findet sich die Zugfestigkeit in Faserrichtung für grünes Holz weder in den Studien von Lavers [29], noch in den Tabellen von Niklas und Spatz [28].

Zur Aufstellung einer Biegespannungshypothese für grünes Holz, welche auch die axiale Zugfestigkeit der Holzmatrix beinhaltet, werden mehrere Versuchsreihen durchgeführt, welche die Biegetragfähigkeit von vitalen Bäumen am Beispiel der Rotbuche ermitteln.

3.2. Der Stamm als Biegebalken

Werden Bäume zur Verankerung technischer Lasten genutzt, wird deren Tragfähigkeit primär durch Biegung beansprucht. Dies lässt sich am Beispiel einer Rotbuche verdeutlichen. Die Masse eines Stammes besteht aus der Trockenbiomasse zuzüglich der Holzfeuchtigkeit, welche für grünes Holz bei 88% liegt [29]. Für eine ca. 100 jährige Rotbuche mit einem Stammdurchmesser von 50 cm auf Brusthöhe, lässt sich die Trockenbiomasse nach [98] über folgende empirische Funktion abschätzen:

$$\begin{aligned}
 A &= \pi r^2 = 25^2 \text{ cm}^2 \pi = 1963,5 \text{ cm}^2, \\
 m_{\text{trocken}} &= 0,1398 \cdot A^{1,2861} = 2402,6 \text{ kg}, \\
 m_{\text{gesamt}} &= (1 + 88\%) m_{\text{trocken}} = 4516,8 \text{ kg}.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Aus dem Eigengewicht und der Querschnittsfläche ergibt sich somit eine konstante, axiale Druckspannung σ_D auf Brusthöhe von:

$$\sigma_D = \frac{45.168 \text{ N}}{196.350 \text{ mm}^2} = 0,23 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}.
 \tag{2}$$

Dies entspricht 0,83 % der elastischen Druckfestigkeit des Querschnitts und deutet darauf hin, dass mechanische Beanspruchungen aus Biegung auch im unbebauten Zustand maßgebend sind. Werden einem solchen Baum rein vertikale Lasten der doppelten Größenordnung aus einem technischen Tragwerk zugewiesen (ca. 9 Tonnen), würde die Beanspruchung des Querschnitts aus Drucknormalkraft lediglich 2.5 % der elastischen Druckfestigkeit erreichen. Das Beispiel zeigt, dass Spannungen aus Normalkräften bei der Tragfähigkeitsuntersuchung von Bäumen eine

untergeordnete Rolle spielen. Greifen Vertikallasten allerdings exzentrisch an, impliziert dies Biegebeanspruchung und somit Biegespannungen.

Windlasten oder Seilzug mit Horizontalkomponenten beanspruchen den Stamm primär auf Biegung. Geht man von der Bernoulli Stabtheorie sowie linear-elastischem Materialverhalten aus, berechnet sich die axiale Spannung in Faserrichtung aus Biegemoment gemäß

$$\sigma(x, z) = \frac{M_y(x)}{I_y} \cdot z. \quad (3)$$

Somit werden die axialen Spannungen am Rand des Querschnitts bei $z = \pm R$ maximal und sind im rein elastischen Fall in der Druck- und Zugzone vom Betrag her gleich.

Technische Regelwerke wie der EC5 [97] bauen den Nachweis der Biegetragfähigkeit von Holz auf diesen Maximalwerten auf, geben aber dafür eine zulässige Biegefestigkeit vor, welche über dem Wert der Druckfestigkeit unter Normalkraftbeanspruchung liegt. Diese Tatsache lässt den Schluss zu, dass auch für technisch getrocknetes Holz dem Querschnitt unter Biegebelastung eine Abweichung vom linear-elastischen Querschnittsverhalten zugemutet wird.

Adäquat ist das Vorgehen in [28, 29], welche ebenfalls Angaben zur Druckfestigkeit und Biegefestigkeit von grünem Holz unterscheiden. Dort werden Werte experimentell an kleinen prismenförmigen Materialproben ermittelt. Die Auswahl der Prüfkörper erfolgte so, dass keine offensichtlichen Inhomogenitäten wie Äste oder Schadstellen enthalten waren [29]. Auch stammen die Materialproben aus dem Kernholz.

Es ist allerdings fraglich, ob die Biegetragfähigkeit eines Stammes mit seinen Jahrringen, den unterschiedlichen Eigenschaften von Kern- und Splintholz sowie dem Vorliegen zahlreicher Imperfektionen durch Astwuchs etc. mit Hilfe kleiner Prüfkörper vollumfänglich erfassbar ist.

Dies ist besonders dann der Fall, wenn obige Annahmen, wie z.B. linear elastisches Verhalten oder gleiche Festigkeiten in der Druck- und Zugzone, nicht vorliegen. Daher wird im Folgenden der Ansatz gewählt, den vollen Schaft eines Stammabschnittes auf Biegung zu prüfen, um die Zerlegung der Holzmatrix in Einzelteile zu umgehen und Erkenntnisse zum Eintritt und Verlauf der Schädigung zu erlangen.

3.3. Prüfung an frisch geschlagenem Holz

Um das Materialverhalten des Baumes im vitalen Zustand möglichst realitätsnah abzubilden, wird die Prüfung an frisch geschlagenen Stämmen durchgeführt. Dazu werden die im Wald ausgesuchten Probekörper unmittelbar nach der Entnahme zur Prüfstelle transportiert und Maßnahmen zur Minimierung des Feuchteverlustes getroffen. Bei der Fällung des Baumes kommt es zwangsläufig zum Anschnitt der Leitgefäße im Querschnitt. Dadurch setzt ein Wasserverlust ein, bei dem sich der Feuchtigkeitsgehalt der Holzmatrix verringert.

In [28] wird allerdings festgestellt, dass ein Feuchtegehalt von mindestens 50% das Verhalten von grünem Holz hinreichend abbildet. Im frisch geschlagenen Zustand liegt der Feuchtegehalt für die meisten Holzarten oberhalb dieses Wertes, sodass immerhin ein gewisser Wasserverlust zwischen Entnahme und Prüfung tolerierbar ist, ohne dass wesentliche Veränderungen im Versuchsergebnis zu erwarten sind.

In [99] werden die Holzporen in Makroporen mit einem Durchmesser von 10^{-1} bis 10^{-5} cm aus dem anatomischen Aufbau der Holzstruktur und Mikroporen mit einem Durchmesser von 10^{-5} bis 10^{-7} cm im Zellwandsystem unterschieden. Das Zellwandsystem ist im lebenden Organismus immer gesättigt, was als Fasersättigung bezeichnet wird. Dies entspricht je nach Holzart einer relativen Feuchtigkeit von ca. 28% [99]. Der Saftfluss des Baumes findet in den Makroporen statt. Die hier maximal eingelagerte Wassermenge hängt von der Porigkeit des Holzes ab. Damit wird der Zustand der Wassersättigung (alle Mikro- und Makroporen mit Wasser gefüllt) bei Guajakholz (Pockholz) bereits bei 31% Wassergehalt erreicht, während dies beim Balsaholz bei 770% erreicht wird [100]. Für die Rotbuche lässt sich die meiste Zeit des Jahres ein Feuchtegehalt von 60% bis 70% feststellen.

Um den Einfluss weiterer Faktoren, wie z.B. den Abbau von Holzeigenspannungen oder gar Holzersetzung vorzubeugen, wurden die Prüfungen so zeitnah wie möglich nach der Probenentnahme durchgeführt. Durch den Einsatz diffusionsdichter Folien wurden die Prüfkörper zudem vor Austrocknung während der Wartezeit geschützt.

3.4. Versuchskonzept

Es wird die integrale Prüfung des Querschnitts angestrebt, um eine Zerteilung in kleinere Prüfkörper zu umgehen. Der Stamm soll in seinem gewachsenen Zustand so geprüft werden, wie er in situ vorliegt. Lediglich die Borke wird im Bereich der mechanisch hoch belasteten Zone entfernt, um die Vorgänge auf der Oberfläche der Holzmatrix besser beobachten zu können. Zur Gewinnung präziser Daten wird eine Prüfung unter Laborbedingungen einer in situ Prüfung im Wald vorgezogen.

Die Untersuchungen zielen auf den Entwurf eines Bemessungsmodells für Rotbuchen als Tragbäume ab. Solch ein Bemessungsmodell soll auf Basis geometrischer Daten sowie von Festigkeitswerten der Holzmatrix eine Traglast unter Biegebeanspruchung vorhersagen. Unter der zu bestätigenden Annahme, dass sich die Materialparameter unterschiedlicher Bäume aber gleicher Spezies nicht wesentlich unterscheiden, ergibt sich dann die Biegetragfähigkeit in Abhängigkeit des Stammdurchmessers. Für die Durchführung einer Versuchsreihe wird der Durchmesser an der Versagensstelle zwischen den Einzelversuchen variiert.

3.5. Biegeversuche

Für die Durchführung von Biegeversuchen muss eine Versuchskonfiguration festgelegt werden. Der realen Situation würde durch eine Prüfung im Wald, vgl. Abb. 18, bestmöglich Rechnung getragen werden, da der Baum im Waldboden verankert bleibt. Eine solche Prüfung birgt jedoch folgende Schwierigkeiten:

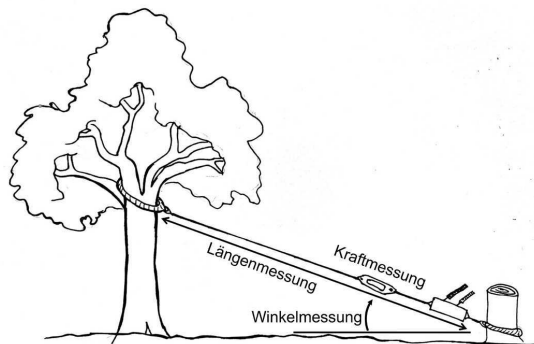


Abbildung 18: Möglicher Versuchsaufbau für eine Prüfung in situ.

1. Ein Versagen kann im Schaft oder in der Gründung auftreten
2. Für die Einleitung von Kräften wird ein Widerlager benötigt
3. Die Datenerfassung (Kraft, Weg und Seilwinkel) findet nicht unter Laborbedingungen statt
4. Messungen müssen sowohl Schädigungen im Schaft als auch im Wurzelbereich erfassen, damit eine Eindeutigkeit zur Interpretation des Schädigungsmechanismus gegeben ist

Die Einspannung des Schaftes durch Wurzelanlauf und Wurzelteller, wie sie im Waldboden vorliegt, lässt sich allerdings im Labor nur am Stamm nicht umsetzen. Jede technisch erzeugte Einspannung des Stammes ist mit Querdruckspannungen im Holz verbunden. Zwar ist die Entnahme des Stammes mitsamt seines Wurzelsystems denkbar, aber die technische Einspannung des Wurzelsystems im Labor wäre - wenn überhaupt möglich - sehr aufwändig.

Als Alternative wird hier die Durchführung eines an den Rändern des Stammes gelenkig gelagerten Biegeversuches gewählt. Bei der Planung des Versuchsaufbaus wird als Ziel gesetzt, einen möglichst großen Abstand zwischen den Auflagern zu erreichen, um ein großes Biegemoment bei kleiner Querkraft zu erzielen.

Der 4-Punkt Biegeversuch besitzt gegenüber dem 3-Punkt Biegeversuch ein konstantes Biegemoment zwischen den beiden Lasteinleitungspunkten, vgl. Abb. 19. Bei gleicher Spannweite führt dieser Versuchsaufbau allerdings zu größeren Querkraften, die benötigt werden, um das maximale Prüfmoment aufzubringen. Für die Durchführung der Biegeversuche wird als Kompromiss ein Quasi-3-Punkt Versuch gewählt. Dabei liegen zwei Lasteinleitungspunkte nah beieinander, sodass sich die benötigte Kraft zur Erzeugung des Prüfmomentes nur geringfügig gegenüber dem reinen 3-Punkt Versuch unterscheidet, aber dennoch ein kleiner Bereich mit konstantem Biegemoment entsteht.

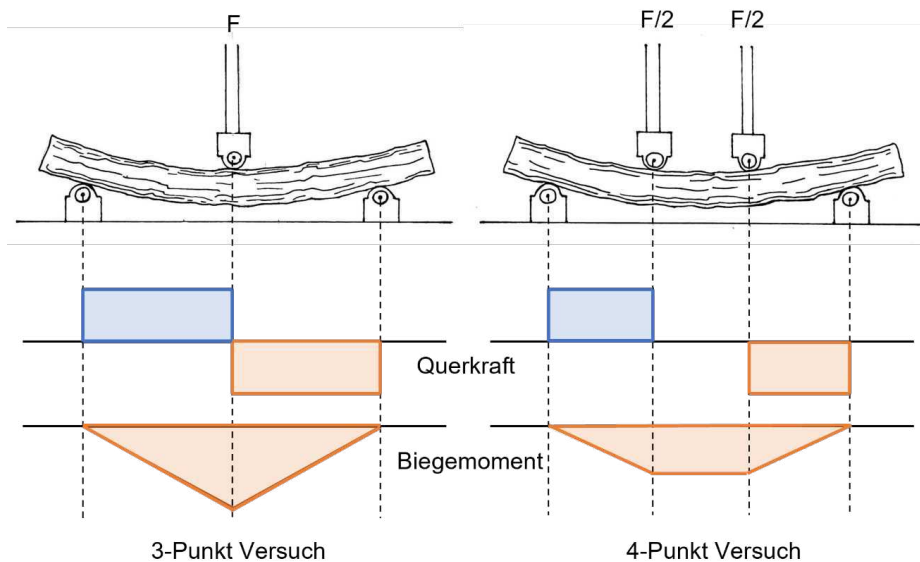


Abbildung 19: Links: Verlauf von Querkraft und Biegemoment im 3-Punkt Versuch. Rechts: Verlauf von Querkraft und Biegemoment im 4-Punkt Versuch.

Die Durchführung des Biegeversuches unter Aufbringung von Querlasten durch hydraulische Druckelemente, wie dies bei Bauprodukten mit kontinuierlichem Querschnitt standardmäßig durchgeführt wird [DIN 52186], führt bei Baumstämmen zu Risiken. Imperfekte Mittelachse und Querschnittseigenschaften können Abtriebskräfte quer zum hydraulischen Druckelement hervorrufen. Damit kann sich der Prüfkörper der Belastung entziehen und Beschädigungen an der

Prüfmaschine verursachen. Die alternative Einleitung der Querlast in Form einer Zugkraft ist dagegen per se stabil, vgl. Abb. 20. Durch den Einsatz eines hydraulischen Zugszylinders sowie durch die Kraftübertragung durch Schlingen auf den Stamm, ist der Versuch einfacher und sicherer durchführbar, als mit Druckzylindern.

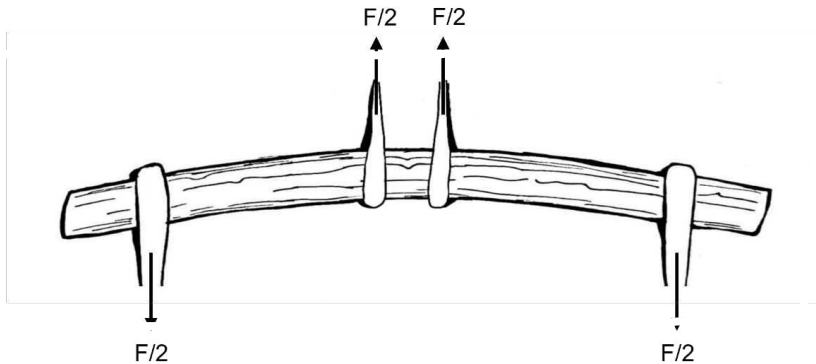


Abbildung 20: Quasi-3-Punkt Versuch mit Einleitung von Zugkräften durch textile Lastschlingen.

3.6. Auswahl der Versuchskörper

Als Versuchskörper werden Rotbuchen aus einem Bestand in Neheim (Arnsberg, NRW) verwendet und durch das Forstliche Bildungszentrum für Waldarbeit und Forsttechnik des Landesbetriebs Wald & Holz NRW zur Verfügung gestellt. Es erfolgt eine Auswahl geeigneter Bäume im Waldbestand. Im Sinne der nachhaltigen Waldwirtschaft wird dabei neben der technischen Eignung der Bäume auch die Auswirkung der Baumentnahme auf den gesamten Bestand berücksichtigt. Es werden ausschließlich Bäume entnommen, deren langfristiges Entwicklungspotential durch die Umgebungssituation eher gering eingeschätzt wird.

Die Versuchskörper werden unter Hinzunahme folgender Kriterien ausgewählt:

1. Gerader Verlauf der Mittellinie (Gradschaftigkeit)
2. Näherungsweise kreisrunder Querschnitt
3. Annähernd konstanter Querschnitt entlang des Prüfkörpers
4. Kein Abzweig größerer Äste
5. Keine erkennbare Fäulnis in der Holzmatrix
6. Keine sichtbaren Beschädigungen an der Oberfläche
7. Borke weist auf allseitig vitales Kambium hin (keine Versorgungsschatten)

Der gerade Verlauf der Mittellinie gewährleistet einen inneren Schnittgrößenverlauf wie im geraden Balkenmodell. Der kreisrunde Querschnitt erlaubt die einfache Analyse der geometrischen Widerstandswerte.

Im Rahmen der Bachelorarbeit von Sophia Langenbeck wurde für Rotbuchen an verschiedenen Standorten gezeigt, dass die Abweichung der Querschnittsform von der kreisrunden Geometrie, die durch das Verhältnis des kleinsten Durchmessers d_{\min} zum größten Durchmesser d_{\max} in einem Querschnitt definiert wurde, etwa ab der Brusthöhe (1,3 m über Grund) nahezu konstant verläuft und sich in einem Verhältnis von 0,87 bis 0,98 bewegt, vgl. Abb. 21.

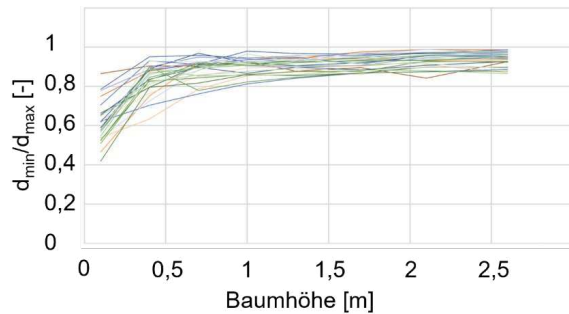


Abbildung 21: Abweichung des Querschnittes von der Kreisform in unterschiedlichen Höhenschnitten am Beispiel der Rotbuche für 27 Bäume an drei verschiedenen Standorten. Grafik aus der Bachelorarbeit von Sophia Langenbeck, TU Dortmund.

Weiterhin konnte gezeigt werden, dass der Durchmesser für den idealisierten Kreisquerschnitt der Rotbuche oberhalb von einem Höhenniveau von 2 m über dem Grund näherungsweise linear verläuft, vgl. Abb. 22. Die maximale Änderungsrate des Durchmessers, die gemessen werden konnte, liegt bei 2 % pro Meter.

Ein annähernd zylinderförmiger Prüfkörper erleichtert die Auswertung der Prüfergebnisse.

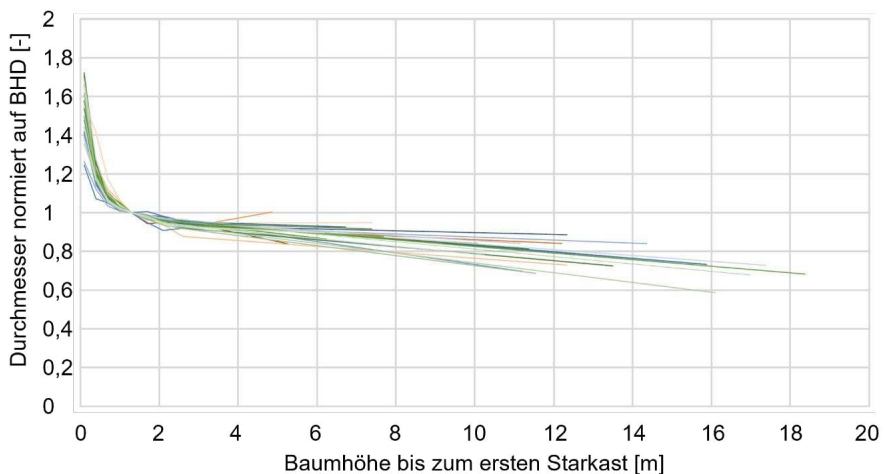


Abbildung 22: Änderung des Stammdurchmessers am idealisierten Kreisquerschnitt vom Fußpunkt bis zum Ansatz des ersten Starkastes, normiert auf den Brusthöhendurchmesser (1,3 m über Grund) am Beispiel der Rotbuche für 27 Bäume an drei verschiedenen Standorten. Grafik aus der Bachelorarbeit von Sophia Langenbeck, TU Dortmund.

Durch die Wachstumsgeschichte liegen selbst im unteren Stammabschnitt dünne Äste oder Astverwachsungen vor. Diese unterscheiden sich im Durchmesser deutlich vom Durchmesser von Starkästen im Bereich der Krone. Werden kleinere Äste im Verlauf des Baumwachstums aufgegeben und abgeworfen, können diese schon vollständig durch Faserschichten überwachsen sein, was in der Regel im Prüfkörper auch vorliegt. Der Abzweig größerer Äste würde allerdings den Prüfzustand stören, was durch die Wahl der Prüfkörper ausgeschlossen wird.

Der ideale Prüfzustand würde weiterhin durch Faul- und Schadstellen gestört, weshalb auch diese exkludiert werden.

Ein sogenannter Versorgungsschatten zeigt über Farbe und Textur der Borke die Unterversorgung von Wachstumsgewebe bzw. totes Gewebe an, welches sich von grünem Holz in den Materialeigenschaften unterscheidet. Auch dies konnte hier durch visuelle Überprüfung ausgeschlossen werden.

Fällen der Bäume und Umgang mit den Versuchskörpern

Beim Fällen der ausgewählten Bäume muss mechanische Beschädigung vermieden werden. Die Fallrichtung wurde so bestimmt, dass es beim Fallen keine Berührung mit anderen Bäumen gab. Aus den am Boden liegenden Bäumen wurden je nach zur Verfügung stehender gerader Stammlänge ein oder zwei Versuchskörper von mindestens 5,00 m Länge gewonnen.

Direkt nach dem Schnitt erfolgte das Auswiegen der Prüfkörper mittels Kranwaage. Um Beschädigungen an der Rinde zu vermeiden, wurde auf den Einsatz von Forstmaschinen mit Greifern verzichtet und die Stämme ausschließlich mit textilen Lastschlingen gehoben. Die offenen Schnittstellen wurden mit Kunststoffolie gegen Austrocknung geschützt und die Stämme zur Prüfung zum Institut für Bauforschung der TU Dortmund transportiert. Die Prüfung der Versuchskörper wurde innerhalb von 72 Stunden nach der Fällung vorgenommen.

Zum Transport wurden die Prüfkörper auf Gummimatten gelegt und mit Gurten fixiert, sodass keine Beschädigungen auftreten konnten. Der Transport wurde durch die Unterstützung des „Bundesverband Technisches Hilfswerk (THW) Ortsverband Datteln“ ermöglicht, vgl. Abb. 23.



Abbildung 23: Links: Fällung der Bäume für Versuchskörper. Rechts: Verladung für den Transport mit textilen Schlingen und Gummimatten.

Versuchskörper

Es wurden zwei Versuchsreihen mit zeitlichem Abstand durchgeführt. Die erste Versuchsreihe umfasst sechs Prüfkörper mit einer Länge von 5,00 m und Durchmessern von 18,1 cm bis 25,5 cm im Prüfbereich. Die Prüfkörper stammen aus fünf Stämmen, wobei aus einem der Stämme aufgrund seiner Länge zwei Prüfkörper gewonnen werden konnten, vgl. Abb. 24.



Abbildung 24: Prüfkörper der ersten Versuchsreihe.

Die geometrischen Eigenschaften der Prüfkörper sind in Tab. 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Geometrische Eigenschaften der Prüfkörper der ersten Versuchsreihe

Prüfkörper	Länge [cm]	Gewicht [kg]	U_{unten}[cm]	U_{oben}[cm]
1	500	224	79	68,6
	Volumen [dm³]	Dichte [kg/dm³]	U_{Mittelwert}[cm]	D_{Mittelwert}[cm]
	216,8	1,03	73,8	23,5
Prüfkörper	Länge [cm]	Gewicht [kg]	U_{unten}[cm]	U_{oben}[cm]
2	502	193,5	74	63
	Volumen [dm³]	Dichte [kg/dm³]	U_{Mittelwert}[cm]	D_{Mittelwert}[cm]
	187,5	1,03	68,5	21,8
Prüfkörper	Länge [cm]	Gewicht [kg]	U_{unten}[cm]	U_{oben}[cm]
3	500	255,5	84	74,5
	Volumen [dm³]	Dichte [kg/dm³]	U_{Mittelwert}[cm]	D_{Mittelwert}[cm]
	250	1,02	79,3	25,2
Prüfkörper	Länge [cm]	Gewicht [kg]	U_{unten}[cm]	U_{oben}[cm]
4	497,5	245,5	87	73,3
	Volumen [dm³]	Dichte [kg/dm³]	U_{Mittelwert}[cm]	D_{Mittelwert}[cm]
	254,5	0,96	80,2	25,5

Prüfkörper	Länge [cm]	Gewicht [kg]	U _{unten} [cm]	U _{oben} [cm]
5 unten	502,5	245	80,5	74
	Volumen [dm ³]	Dichte [kg/dm ³]	U _{Mittelwert} [cm]	D _{Mittelwert} [cm]
	238,8	1,03	77,3	24,6

Prüfkörper	Länge [cm]	Gewicht [kg]	U _{unten} [cm]	U _{oben} [cm]
5 oben	502	140,5	61	53
	Volumen [dm ³]	Dichte [kg/dm ³]	U _{Mittelwert} [cm]	D _{Mittelwert} [cm]
	129,9	1,08	57	18,2

Die zweite Versuchsreihe umfasst zehn Prüfkörper mit jeweils 6,00 m Länge, welche aus vier Bäumen gewonnen werden konnten vgl. Abb. 25. Durch die größere Länge der Prüfkörper kann die Kraft, die zum Bruch des Versuchskörpers benötigt wird, gegenüber der ersten Versuchsreihe reduziert werden, was u.a. die Prüfung größerer Durchmesser ermöglichte. Die Durchmesser der Prüfkörper liegen zwischen 19,1 cm und 31,0 cm.



Abbildung 25: Prüfkörper der zweiten Versuchsreihe.

Die geometrischen Eigenschaften der Prüfkörper sind in Tab. 2 zusammengestellt.

Tabelle 2: Geometrische Eigenschaften der Prüfkörper der zweiten Versuchsreihe

Prüfkörper	Länge [cm]	Gewicht [kg]	U _{unten} [cm]	U _{oben} [cm]
1	611	238	73	60
Baum	Volumen [dm ³]	Dichte [kg/dm ³]	U _{Mittelwert} [cm]	D _{Mittelwert} [cm]
2 oben	215,1	1,11	60,0	20,7

Prüfkörper	Länge [cm]	Gewicht [kg]	U_{unten}[cm]	U_{oben}[cm]
2	604	347	88,5	75,5
Baum	Volumen [dm³]	Dichte [kg/dm³]	U_{Mittelwert}[cm]	D_{Mittelwert}[cm]
3 Mitte	323,4	1,07	77,0	24,8

Prüfkörper	Länge [cm]	Gewicht [kg]	U_{unten}[cm]	U_{oben}[cm]
3	602	330	82,5	72,5
Baum	Volumen [dm³]	Dichte [kg/dm³]	U_{Mittelwert}[cm]	D_{Mittelwert}[cm]
2 Mitte	287,9	1,15	77,9	25,8

Prüfkörper	Länge [cm]	Gewicht [kg]	U_{unten}[cm]	U_{oben}[cm]
4	607	351	87,5	74
Baum	Volumen [dm³]	Dichte [kg/dm³]	U_{Mittelwert}[cm]	D_{Mittelwert}[cm]
4 oben	315,1	1,11	79,8	25,8

Prüfkörper	Länge [cm]	Gewicht [kg]	U_{unten}[cm]	U_{oben}[cm]
5	565	370	91	81
Baum	Volumen [dm³]	Dichte [kg/dm³]	U_{Mittelwert}[cm]	D_{Mittelwert}[cm]
1 oben	332,7	1,11	82,9	26,7

Prüfkörper	Länge [cm]	Gewicht [kg]	U_{unten}[cm]	U_{oben}[cm]
6	595	238	73	60
Baum	Volumen [dm³]	Dichte [kg/dm³]	U_{Mittelwert}[cm]	D_{Mittelwert}[cm]
3 unten	375,2	1,12	88,9	28,6

Prüfkörper	Länge [cm]	Gewicht [kg]	U_{unten}[cm]	U_{oben}[cm]
7	602	485	110	84
Baum	Volumen [dm³]	Dichte [kg/dm³]	U_{Mittelwert}[cm]	D_{Mittelwert}[cm]
4 unten	451	1,08	97,4	31

Prüfkörper	Länge [cm]	Gewicht [kg]	U_{unten}[cm]	U_{oben}[cm]
8	598	506	106	87
Baum	Volumen [dm³]	Dichte [kg/dm³]	U_{Mittelwert}[cm]	D_{Mittelwert}[cm]
1 unten	443,4	1,14	96,1	30,6

Prüfkörper	Länge [cm]	Gewicht [kg]	U_{unten}[cm]	U_{oben}[cm]
9	602	447	105	77
Baum	Volumen [dm³]	Dichte [kg/dm³]	U_{Mittelwert}[cm]	D_{Mittelwert}[cm]
2 unten	396,9	1,13	90,1	29,9

Prüfkörper	Länge [cm]	Gewicht [kg]	U_{unten}[cm]	U_{oben}[cm]
10	611	238	73	60
Baum	Volumen [dm³]	Dichte [kg/dm³]	U_{Mittelwert}[cm]	D_{Mittelwert}[cm]
3 oben	211,7	1,23	67,2	21,3

Die Wirksamkeit des Schutzes gegen Austrocknung kann durch die Vergleichsmessungen der Masse unmittelbar nach der Fällung, sowie zum Zeitpunkt der Prüfung bestimmt werden. Der maximale Wasserverlust liegt in Probekörper 9 der zweiten Versuchsreihe bei 18 Liter. An den Schnittflächen

der Stämme konnte das Austropfen von Pflanzensaft ab der Entnahme im Wald beobachtet werden. Dieser Wasserverlust, welcher auf freies Wasser in der Holzmatrix über dem Fasersättigungspunkt hindeutet, wird im Hinblick auf die gesamte Wassermasse im Prüfkörper nachfolgend bewertet.

Die Holzfeuchte definiert sich als Quotient aus in der Holzprobe enthaltener Wassermasse und wasserfreier (darrtrockener) Feststoffmasse. Sie wurde exemplarisch für ein Teilstück aus Prüfkörper 3 ermittelt. Dieses Teilstück wiegt vor der Darrtrocknung 10,474 kg und danach 5,678 kg. Damit enthielt das Teilstück 4,796 Liter Wasser, was einer Holzfeuchte von 84,5% entspricht. Wird am Prüfkörper 3 der Wasserverlust von 3,5 Litern des Stammes zwischen Wägung im Wald und vor der Prüfung zu den vorhandenen 115,4 Litern, die einer Feuchte von 84,5% entsprechen, hinzugerechnet, ergibt sich eine Holzfeuchte bei Entnahme im Wald von 87,1%.

Aber auch 84,5% Feuchte sind oberhalb des Fasersättigungsbereiches für Rotbuchen, der zwischen 60% und 70% Holzfeuchte liegt [100]. Somit liegt der Prüfung grünes Holz zugrunde.

Versuchseinrichtung für Biegeversuche

Zunächst wird die Gesamtlänge des Prüfkörpers, dessen Umfang an verschiedenen Stellen (in 50cm Abständen) und das Gewicht zum Prüfzeitpunkt ermittelt. Die Positionen für Lasteinleitungsstellen und Auflagerungsstellen werden definiert und am Prüfkörper angezeichnet. Die Einbaulage des Versuchskörpers wird so definiert, dass unter Belastung eine Biegung um die schwächste Achse des Querschnittes stattfindet. Damit liegen die Tragfähigkeitsergebnisse, die auf einen Kreisquerschnitt mit äquivalentem Umfang bezogen werden, als Näherung auf der sicheren Seite. Der Prüfkörper wird anhand der gesetzten Positionsmarkierungen ausgerichtet und die Lastschlingen für Lasteinleitung und Auflagerung montiert. Die Positionierung der Auflagerschlingen erfolgt so, dass diese unter der zu erwartenden Verkrümmung beim Erreichen der Traglast eine vertikale Ausrichtung haben. Dies wird durch schräge Anordnung der Schlingen in der Referenzkonfiguration erzielt, vgl. Abb. 26.



Abbildung 26: Einbau des Versuchskörpers am Verankerungspunkt.

Für die Durchführung der Biegeversuche wird eine 4-Säulen Universal Hydropuls-Prüfmaschine mit einer Nennkraft von +/- 2500kN und einem Hubweg von 250 mm, verwendet, vgl. Abb. 27. Die Prüfmaschine ist auf einer Aufspannplatte angeordnet, auf welcher Lagerungspunkte angebracht werden können.

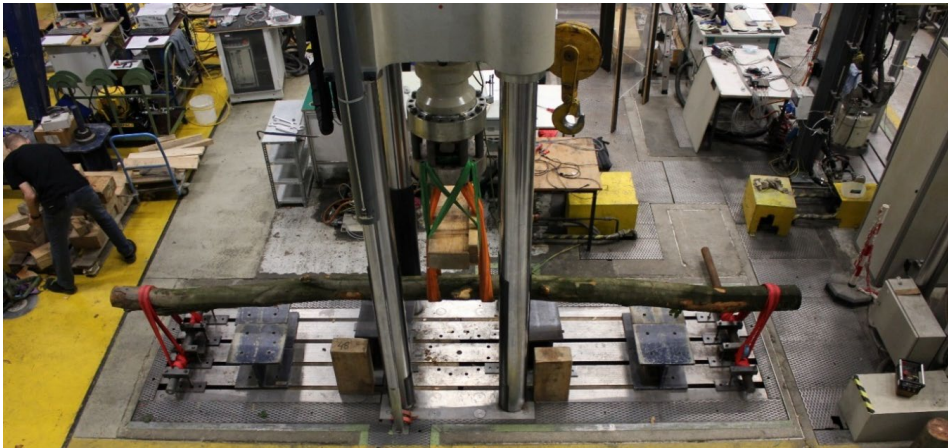


Abbildung 27: Erste Versuchsreihe mit der Versuchskörperlänge von 5,00 m.

Die Abmessungen des Versuchsaufbaus sind in Abb. 28 dargestellt. Aufgrund des limitierten Hubweges der Prüfmaschine auf 250 mm Weg, muss der Versuchskörper während der Prüfung zeitweise unterstützt und die Prüfmaschine verfahren werden. Es erfolgt eine weggesteuerte Belastung mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 50 mm/min. Dabei werden Maschinenkraft und Maschinenweg aufgezeichnet.

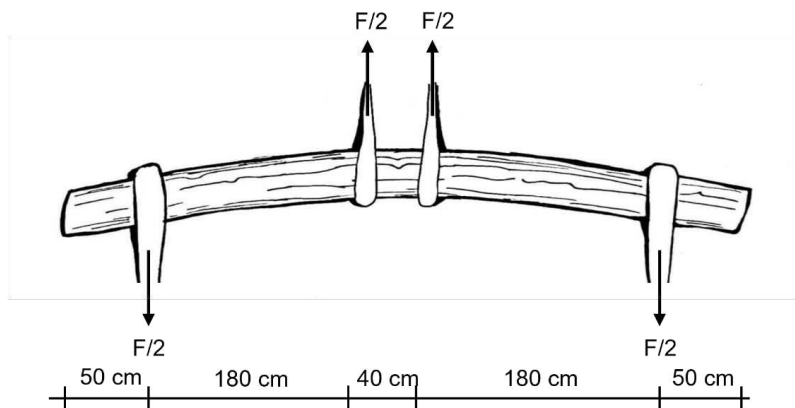


Abbildung 28: Schematischer Aufbau des Biegeversuchs der ersten Versuchsreihe.

In einer zweiten Versuchsreihe kommt ein dafür konstruierter Versuchsaufbau mit einem Langhub-Hydraulikzylinder (walter+bai AG, Differentialservoprüfzylinder AGD 500/350/1000) zum Einsatz. Dieser kann eine maximale Zugkraft von 350 kN bei einem Zylinderhub von 1000 mm bereitstellen. Durch die Anwendung des Langhubzylinders kann das Zwischenstützen und Verfahren der Prüfeinrichtung während des Biegeversuches vermieden werden. In Abb. 29 sind die Abmessungen der Prüfkörper der zweiten Versuchsreihe dargestellt.

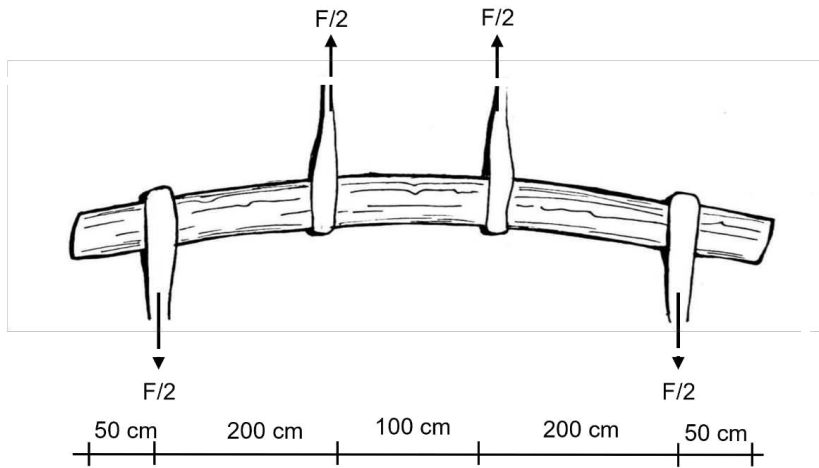


Abbildung 29: Schematischer Aufbau des Biegeversuchs der zweiten Versuchsreihe.

Die Verankerung der Auflagerpunkte erfolgt in Spanntöpfen in einem Stahlbeton-Spannfeld, vgl. Abb. 30. Es erfolgt eine weggesteuerte Belastung mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 50 mm/min. Dabei werden Maschinenkraft und Maschinenweg aufgezeichnet.



Abbildung 30: Zweite Versuchsreihe mit der Versuchskörperlänge von 6,00 m.

3.7. Auswertung der Biegeversuche

In Abb. 31 wird exemplarisch das Kraft-Verformungsdiagramm des Versuchskörpers 2 der ersten Versuchsreihe gezeigt. Bis zu einer Last von 20 kN zeigt die Last-Verschiebungskurve ein nichtlineares, verfestigendes Verhalten. Dies kann auf die Nachgiebigkeit der textilen Lastschlingen zurückgeführt werden, welche sich bis zu einem gewissen Grad recken lassen. Danach folgt bis zu einer Last von 55 kN nahezu lineares Verhalten, was Aufschlüsse zum elastischen Biege Widerstand zulässt.

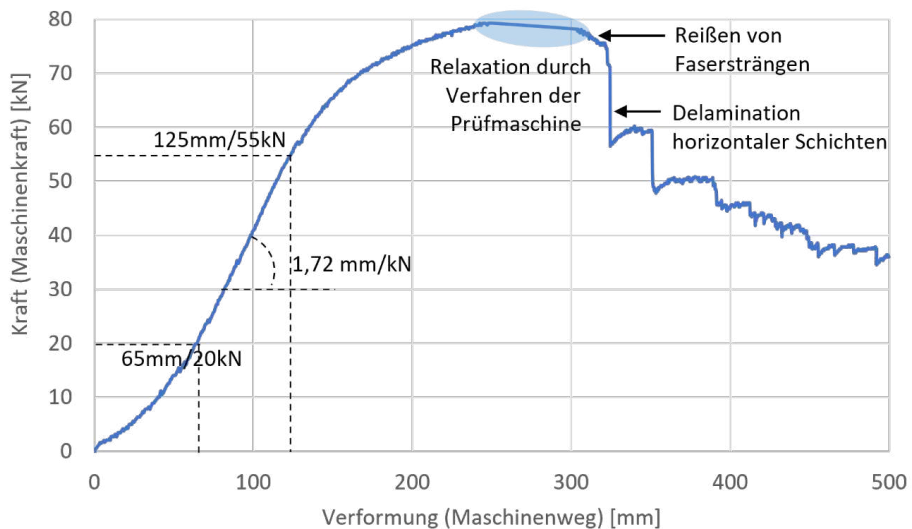


Abbildung 31: Kraft-Verformungsdiagramm des Versuchskörpers 2 der ersten Versuchsreihe.

Legt man die lineare Biegetheorie für diesen Biege Widerstand zugrunde, ergibt sich eine Nachgiebigkeit von 1,71 mm/kN, was bei einem elastischen Biege Widerstand von 55 kN zu einer Verformung infolge Durchbiegung von 94 mm führt. Durch eine Vergleichsrechnung mit einem FEM Modell mit Balkenelementen, vgl. Abb. 32, ist ein Elastizitätsmodul von 6.500 N/mm² notwendig, um dieses Ergebnis zu reproduzieren. Dieser Wert übersteigt den im Druckversuch ermittelten Wert des Elastizitätsmoduls von 5.500 kN/mm² um 18%.

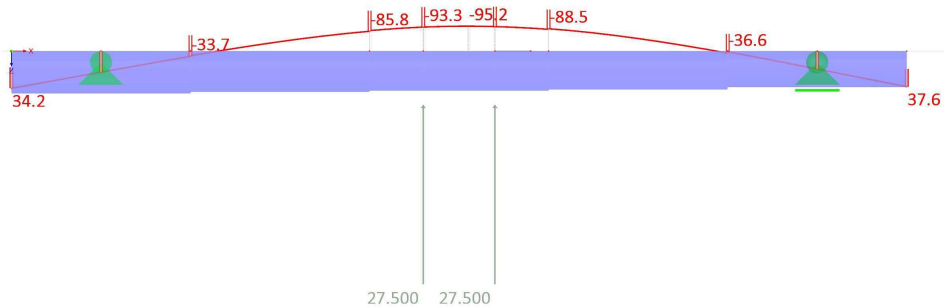


Abbildung 32: Linear elastische Vergleichsrechnung des Biegeversuch mit einem Meter langen Segmenten und abgestuften Querschnitten gemäß der Geometriedaten in Tab. 1.

Bei einer Annäherung der Prüfkraft auf 57 kN kann eine sprunghafte Zunahme der Verschiebung um wenige Millimeter beobachtet werden, was auf eine erste Schädigung im Material hindeutet. Tatsächlich geht damit ein Abplatzen der Borke zwischen den Lastschlingen auf der Biegedruckseite einher. Unter der abgeplatzten Borke werden später ausgeknickte Holzfasern in einem Band erkannt. Das Band hat eine nahezu konstante Dicke von 10 mm und besitzt einen Winkel von 31 ° zur Längsrichtung des Prüfkörpers, vgl. Abb. 33.

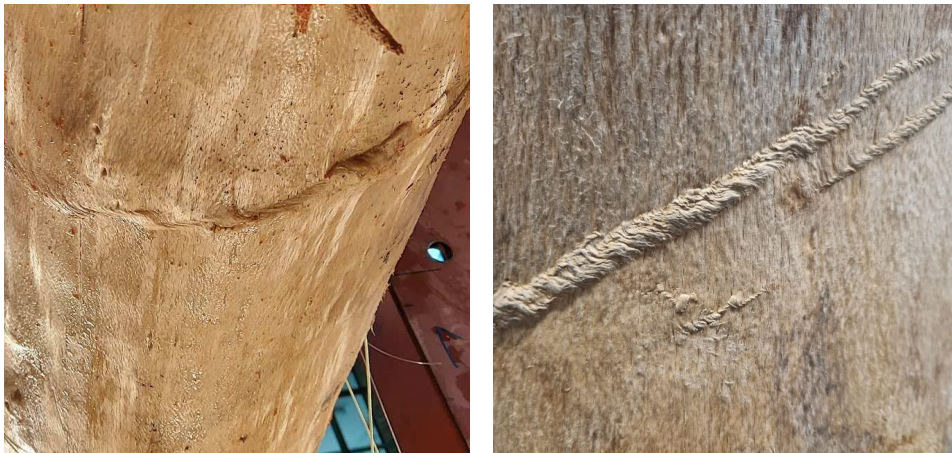


Abbildung 33: Links: Band von ausgeknickten Holzfasern nach vollständiger Ablösung der Borke während der Prüfung. Rechts: Band von ausgeknickten Holzfasern am vollständig getrockneten Prüfkörper.

Weiterhin wird bis zu einem Lastniveau von ca. 79 kN eine stetige, entfestigende Last-Verschiebungskurve beobachtet. Dabei kommt es zur großflächigen Ablösung der Borke im Biegedruckbereich und der Entstehung weiterer Bänder von ausgeknickten Holzfasern. Der darauffolgende lineare Abschnitt der Kurve zeigt die Relaxation des Prüfkörpers während der Nachjustierung des Versuchsaufbaus aufgrund des verbrauchten Maschinenweges.

Die Lastumkehr geht mit lokalem, keilzinkenartigem Auseinanderreißen oberflächennaher Faserstränge auf der Biegezugseite einher. Das schlagartige Abfallen der Prüflast mit der Delamination ganzer horizontaler Schichten im Querschnitt, vgl. Abb. 34.



Abbildung 34: Typisches Versagensbild des Querschnittes im Biegeversuch.

Bei der Prüfung der beiden Prüfkörper aus Baum 5 zeigt sich der Einfluss von Ästen im Prüfbereich. Während der untere Prüfkörper (Abb. 35) aus diesem Baum homogen und frei von oberflächlich erkennbaren Ästen verläuft, zeigt sich beim oberen Prüfkörper (Abb. 39) ein Ast im Prüfbereich.

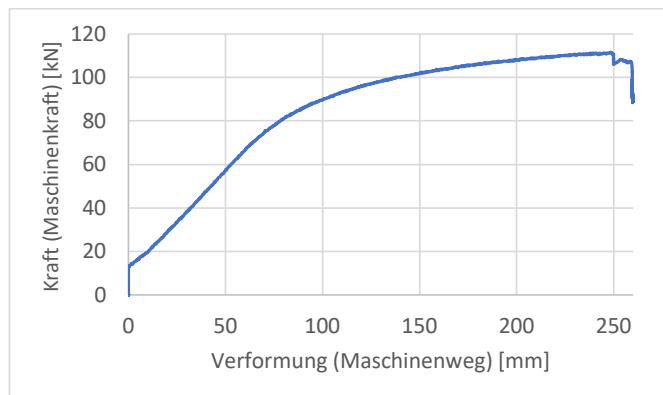


Abbildung 35: Kraft-Verformungsdiagramm des Versuchskörpers 5 (unten) aus der ersten Versuchsreihe.

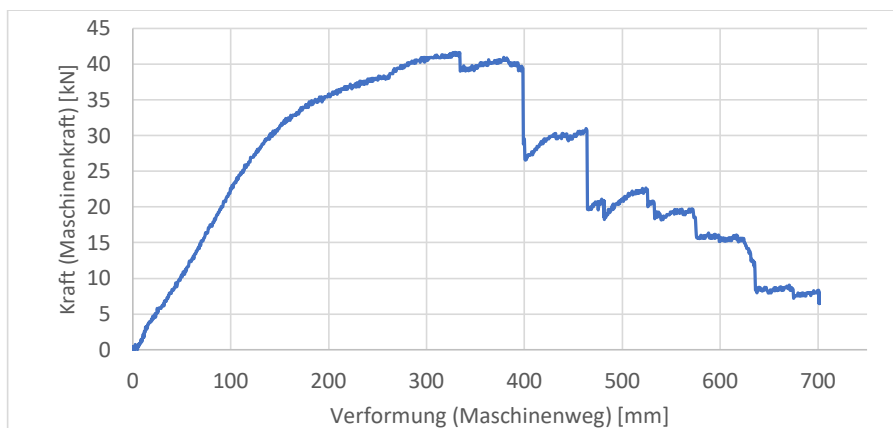


Abbildung 36: Kraft-Verformungsdiagramm des Versuchskörper 5 (oben) aus der ersten Versuchsreihe.

Das Kraft-Verformungsdiagramm des unteren Prüfkörpers aus Baum 5 zeigt einen Kraftanstieg auf ca. 17 kN ohne messbare Verformung, vgl. Abb. 35. Dies ist durch die Aufbringung einer Anfangslast über einen Verfahrmechanismus der Prüfmaschine verursacht, die aufgebracht wurde, um ein Bauteilversagen mit einem Maschinenweg von 250 mm zu erreichen. Es zeigt sich ab ca. 80 kN ein ausgeprägtes Entfestigungsverhalten, bis es bei 112 kN zum Abriss von Fasersträngen auf der Oberseite kommt. Beim Erreichen der ersten Faserdelamination wird die Prüfung beendet.

Im oberen Prüfkörper aus Baum 5 zeigt sich ein weniger ausgeprägtes Entfestigungsverhalten, vgl. Abb. 36. Das Versagen bei 330 mm und 42 kN zeigt noch keine von außen erkennbare Delamination von Faserbündeln am Prüfkörper. Bei einer Steigerung der Verformung auf 400 mm kommt es zur Delamination zahlreicher Faserbündel, sowie dem Aufreißen des Astansatzes, vgl. Abb. 37. Im Last-Verformungsdiagramm lässt sich weiterhin eine Diskontinuität bei 250 mm Verformung erkennen, die auf die Nachjustierung der Prüfmaschine nach Erreichen des maximalen Maschinenwegs zurückzuführen ist.

Die Kraft-Verformungsdiagramme aller Prüfkörper finden sich im Anhang.

Die Biegetragfähigkeiten der Prüfkörper, ergeben sich aus der maximal aufbringbaren Last und sind in Tab.3 dokumentiert.



Abbildung 37: Faserbündeldelamination und Aufreißen am Astansatz des oberen Abschnittes von Baum 5.

Tabelle 3: Durchmesser und Biegetragfähigkeiten der Prüfkörper der 1. Versuchsreihe

Prüfkörper	Mitteldurchmesser [cm]	Tragfähigkeit [kNm]
Stamm 1	23,5	83,9
Stamm 2	21,8	79,3
Stamm 3	25,2	92,1
Stamm 4	25,5	89,2
Stamm 5 unten	24,6	110,8
Stamm 5 oben	18,1	40,2

In Versuchsreihe 2 können die zum Versagen notwendigen Verformungen durch den abgeänderten Versuchsaufbau in einem Schritt aufgebracht werden.

Beispielhaft ist das Kraft-Verformungsdiagramm für Versuchskörper 3 der zweiten Versuchsreihe in Abb. 38 gezeigt. Es zeigt sich zu Beginn eine lastfreie Steigerung des Maschinenwegs, was auf die Lasteinleitungsschlingen zurückzuführen ist. Die kleinen Sprünge bei 40 kN, 75 kN und 180 kN bilden das Durchrutschen der Lastschlingen im Versuchsaufbau ab, da diese nicht ganz gleichmäßig vorspannbar sind. Nach dem Erreichen erster Faserbündelrisse auf der Biegezugseite werden die Versuche beendet und die Maschinenkraft heruntergefahren.

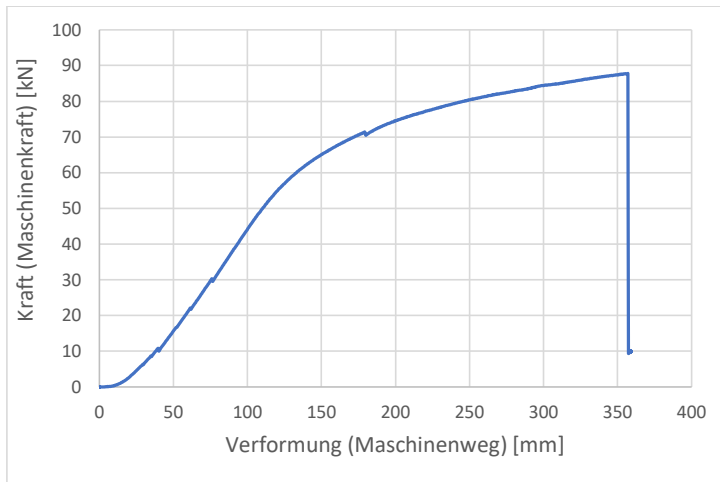


Abbildung 38: Kraft-Verformungsdiagramm des Versuchskörpers 3 aus der zweiten Versuchsreihe.

Die Biegetragfähigkeiten der Prüfkörper sind in Tab. 4 dokumentiert.

Tabelle 4: Durchmesser und Biegetragfähigkeiten der Prüfkörper der 2. Versuchsreihe

Prüfkörper	Mitteldurchmesser [cm]	Tragfähigkeit [kNm]
Stamm 1 unten	30,6	193,7
Stamm 1 oben	26,7	108,9
Stamm 2 unten	29,9	174
Stamm 2 Mitte	25,8	101,7
Stamm 2 oben	20,7	45,7
Stamm 3 unten	28,6	139,5
Stamm 3 Mitte	24,8	90,9
Stamm 3 oben	21,3	65,3
Stamm 4 unten	31	196,4
Stamm 4 oben	25,8	101,7

Die Kraft-Verformungsdiagramme aller Prüfkörper finden sich im Anhang.

3.8. Druckversuche

Neben den Biegeversuchen werden auch Druck- und Zugversuche zur Bestimmung von Festigkeiten und Elastizitätsmoduli durchgeführt. Die dafür erforderlichen Prüfkörper werden nach der Durchführung der Biegeversuche aus den gering belasteten Abschnitten des Stammes gewonnen, in denen von einer nicht geschädigten Holzmatrix auszugehen ist.

Die Druckversuche werden auf drei unterschiedlichen Skalen durchgeführt.

- Druckversuch am Vollquerschnitt
- Druckversuch am Prisma
- Druckversuch am Mikrobohrkern

Für die Druckversuche am Vollquerschnitt, werden vollständige Stammabschnitte geprüft, vgl. Abb. 39. Die Höhe für den zylinderförmigen Prüfkörper wird relativ zum Durchmesser mit $h/d = 2$ festgelegt. Die Schnittflächen werden bestmöglich senkrecht zur Mittelachse ausgerichtet, wobei die Zweite planparallel zur Ersten hergestellt wird.

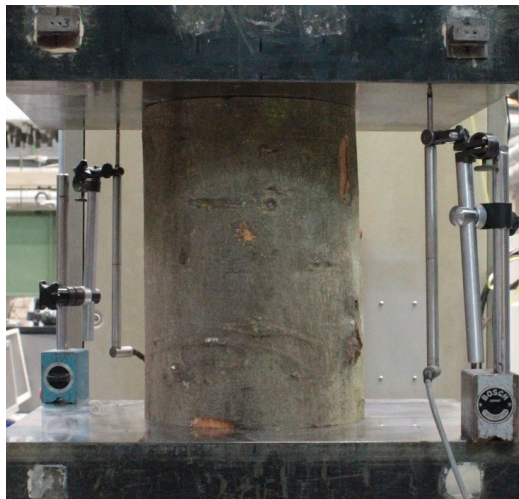


Abbildung 39: Druckprüfung am Vollquerschnitt.

Die Prüfung an Prismen wird mit zwei unterschiedlichen Geometrien durchgeführt, die sich im Verhältnis zwischen Höhe und Querschnittsfläche unterscheiden, wodurch der Einfluss dieses Parameters erfasst wird. Die Grundfläche wird als eine quadratische Form mit der Kantenlänge 50 mm festgelegt. Bei der Höhe werden würfelförmige Körper mit 50 mm Höhe, sowie Körper mit 150 mm Höhe untersucht, vgl. Abb. 40. Die Definition dieser Abmessungen ergibt sich aus den Empfehlungen der [DIN 52185] „Prüfung von Holz: Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser“. Die Prüfkörper werden nach dem Zuschnitt bis zur Prüfung in Wasser getaucht.

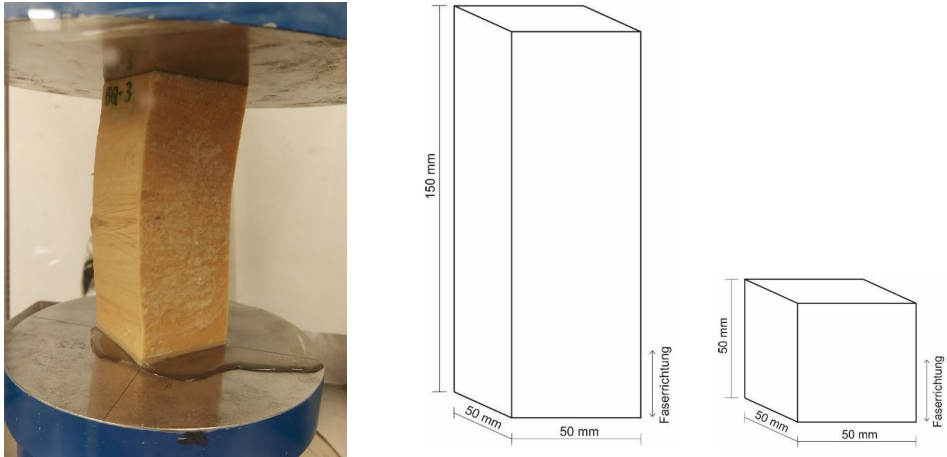


Abbildung 40: Druckfestigkeitsprüfung am Prisma sowie Abmessungen der Probekörper.

Weiterhin werden Mikrobohrkerne mit Hilfe eines Zuwachsbohrers in radialer Richtung aus dem Stamm entnommen. Die Bohrkern weisen einen Durchmesser von 5 mm auf und entsprechen in Ihrer Länge dem Radius des Baumstammes. Die Bohrkernentnahme erfolgt dabei von der Oberfläche bis zum Markkanal. Dieser Bohrkern wird in 5 mm lange Abschnitte geteilt, welche jeweils unmittelbar nach der Entnahme auf Druckfestigkeit geprüft werden. Die Prüfung erfolgt durch das Messgerät „IML Fractometer II“ [46], vgl. Abb. 41.



Messung axiale Druckfestigkeit

Abbildung 41: Bohrkernentnahme mittels Zuwachsbohrer und Prüfung durch Fractometer II.

3.9. Auswertung der Druckversuche

Für die Druckprüfung am Vollquerschnitt werden vier Probekörper aus Baum 2 untersucht. Dabei stammen zwei dieser Probekörper aus einem Bereich unterhalb der im Biegeversuch zerstörend geprüften Zone und zwei Probekörper aus einem Bereich oberhalb. Innerhalb jedes Prüfkörpers liegt ein Querschnittsunterschied zwischen Ober- und Unterseite vor. Die Vermessung dieser Flächen erfolgt durch einen Abdruck auf Papier, welcher mittels CAD Software vermessen werden kann. Die Vermessung erfolgt dabei für die Gesamtfläche A sowie für die um die Borkenstärke verkleinerte Fläche A_{red} , vgl. Abb. 42.

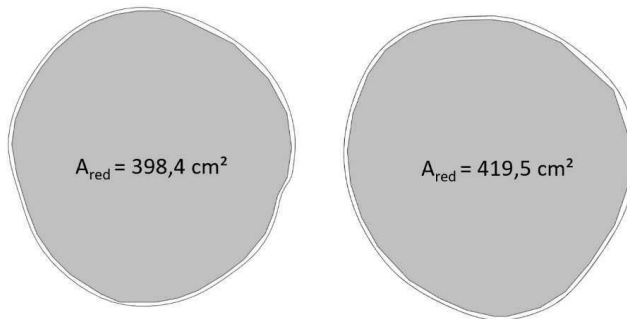


Abbildung 42: Flächenabdrücke des Druckprüfkörpers 1.

Für die Berechnung der Druckfestigkeit wird der Mittelwert des oberen und unteren Flächeninhaltes angesetzt. Im Versuch tritt im kleinsten Querschnitt (an der Oberseite des Prüfkörpers) die größte Spannung auf. Durch Reibungseffekte zwischen dem Prüfkörper und der Lastverteilungsplatte der Versuchseinrichtung kommt es hier zu einem mehraxialen Spannungszustand, der die Tragfähigkeit gegenüber reiner Druckbeanspruchung lokal erhöht. Zu einem erkennbaren Versagen kommt es etwa in der Mitte des Prüfkörpers, wo auch der gemittelte Querschnitt vorliegt.

Tabelle 5: Zusammenstellung der Druckprüfkörper aus Baum 2

Probe 1 unten								
A_{oben} [cm ²]	$A_{red,oben}$ [cm ²]	A_{unten} [cm ²]	$A_{red,unten}$ [cm ²]	A [cm ²]	A_{red} [cm ²]	F [kN]	f [N/ mm ²]	$f(A_{red})$ [N /mm ²]
422,9	398,4	445,3	419,5	434,1	408,95	1320	30,4	32,3

Probe 2 unten								
A_{oben} [cm ²]	$A_{red,oben}$ [cm ²]	A_{unten} [cm ²]	$A_{red,unten}$ [cm ²]	A [cm ²]	A_{red} [cm ²]	F [kN]	f [N/ mm ²]	$f(A_{red})$ [N /mm ²]
419,5	396,8	440,7	421,8	430,1	409,3	1378	32,0	33,7

Probe 3 oben								
A _{oben} [cm ²]	A _{red,oben} [cm ²]	A _{unten} [cm ²]	A _{red,unten} [cm ²]	A [cm ²]	A _{red} [cm ²]	F [kN]	f [N/mm ²]	f (A _{red}) [N/mm ²]
313,5	291,9	324,3	304,1	318,9	298	951,8	29,8	31,9

Probe 4 oben								
A _{oben} [cm ²]	A _{red,oben} [cm ²]	A _{unten} [cm ²]	A _{red,unten} [cm ²]	A [cm ²]	A _{red} [cm ²]	F [kN]	f [N/mm ²]	f (A _{red}) [N/mm ²]
305,1	284	310	288,6	307,55	286,3	1011,8	32,9	35,3

	Durchschnitt: [N/mm ²]		31,3	33,3
--	------------------------------------	--	------	------

Am Beispiel des Druckprüfkörpers 3 mit 298 cm² mittlerer Querschnittsfläche, was einem mittleren Durchmesser von 20,1 cm entspricht, wird das Verhalten unter Druckbelastung nachfolgend besprochen.

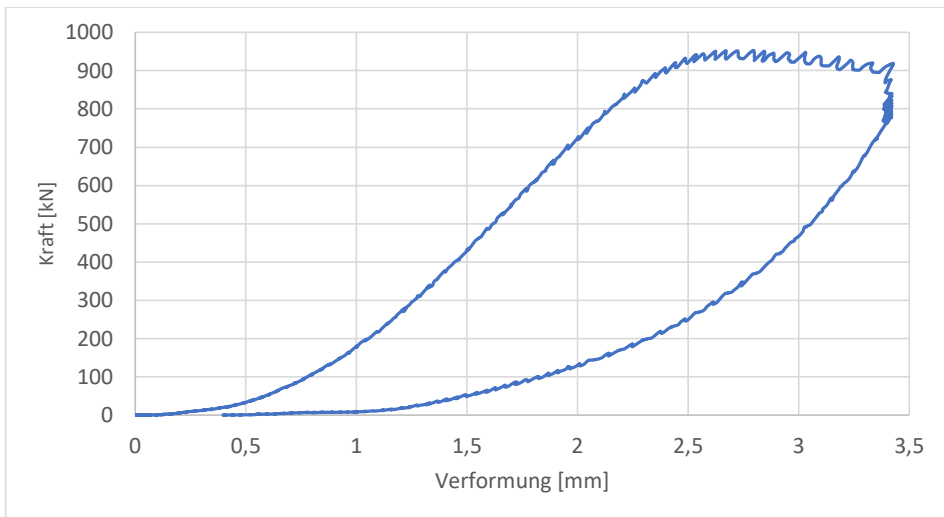


Abbildung 43: Kraft-Verformungsdiagramm für den Druckversuch am Druckprüfkörper 3.

Bis zu einer Last von ca. 200 kN stellt sich die Last-Verschiebungskurve in Abb. 43 nichtlinear verfestigend dar, was darauf hindeutet, dass sich Unebenheiten in den Kontaktflächen zwischen Prüfmaschine und Prüfkörper schließen. Zwischen 200 kN und 800 kN liegen die Messpunkte mit einer Standardabweichung von 2,7% auf einer Geraden der Steigung 557,4 kN/mm. Ab 800 kN liegt ein nichtlinearer, entfestigender Verlauf bis zum Maximalwert von 951,8 kN vor. Der sägezahnartige Verlauf geht mit der Beobachtung am Prüfkörper einher, dessen Schnittflächen sich ab ca. 900 kN zunehmend horizontal gegeneinander verschieben, was aus mechanischer Sicht die

Kinematik einer Abscherung beschreibt. Diese Kinematik wird durch das großflächige Ausknicken von Fasern in ca. 11 mm dicken Bändern unter einer Neigung von 32° zur Längsachse des Prüfkörpers verursacht. Mit dem Erscheinen dieser Kinematik ist die Grenze der Traglast für den Prüfkörper erreicht. Diese bleibt auch bei zunehmender Stauchung weitgehend erhalten, bis der Versuch bei einer Stauchung von knapp 7 mm beendet wird. Der Prüfkörper behält bis zu dieser Stauchung seinen Zusammenhalt und weist das lokale Ausknicken von Fasern in Scherbändern auf, vgl. Abb. 44.

Die Borke hebt sich bei der Druckprüfung im Bereich des Faserausknickens großflächig ab. Berücksichtigt man nur die Querschnittsfläche der Holzmatrix (ohne Borke) ergibt sich eine Druckfestigkeit von $31,9 \text{ N/mm}^2$. Die gemessenen Druckfestigkeiten variieren innerhalb eines Stammes in unterschiedlichen Probekörpern um bis zu 6%.

Der Elastizitätsmodul lässt sich als Tangentensteigung im linearen Bereich zwischen 200 kN und 800 kN zu 5.500 N/mm^2 bestimmen. Die Spanne der an unterschiedlichen Versuchskörpern ermittelten Werte des Elastizitätsmoduls liegt zwischen 5.250 N/mm^2 und 5.750 N/mm^2 .

Beim Versagen des Probekörpers kommt es zu einem lokalen Ausknicken von Fasern in tangentialer Richtung. Das Ausknicken lässt sich mit bloßem Auge erkennen und findet in einem klar abgegrenzten Bereich etwa in der Mitte des Querschnitts statt. Es bildet sich ein schräg unter 32° verlaufendes Band mit einer Breite von 11 mm aus, in welchem die Fasern ähnlich Eulerfall 4 (Eingespannt-Eingespannt) knicken. Im Bereich dieses Bandes kommt es zum Austritt von Pflanzensaft, welcher die Oberfläche des Prüfkörpers dunkler färbt. Durch die Verfärbung lässt sich die Versagensstelle am getrockneten Prüfkörper besser erkennen, als unmittelbar nach dem Versagen. In radialer Richtung lassen sich Ausbeulungen an der Oberfläche erkennen, die auf ein Faserknicken in dieser Richtung hindeuten. Die Ausbeulung hat über die Höhe eine Länge von 12 cm.



Abbildung 44: Ausbildung eines Scherbandes mit lokalem Faserknicken (links) und radiales Ausknicken von Jahrringschichten (rechts).

Bei der Prüfung der Druckfestigkeit an prismatischen Körpern in Tab. 6 zeigen sich große Schwankungen in der Festigkeit. So werden an sieben Prüfkörpern aus einem Querschnitt von Baum

2 Druckfestigkeiten im Bereich zwischen $21,0 \text{ N/mm}^2$ und $29,2 \text{ N/mm}^2$ gemessen. Neben den Schwankungen in der Festigkeit zeigen sich auch Unterschiede in der Dichte des Materials (bis zu 19% Unterschied). Dies kann für eine teilweise Austrocknung der Prüfkörper während der Herstellung, Lagerung und Vermessung sprechen und ein Abweichen von den für das grüne Holz erwarteten Festigkeiten erklären.

Tabelle 6: Prismatische Druckprüfkörper aus Baum 2

F [kN]	f [N/mm ²]	ρ [g/cm ³]	a [mm]	b [mm]	h [mm]	m [g]
73,14	28,50	1,08	51,37	49,95	151,20	419,80
76,15	29,23	1,07	50,50	51,59	150,75	420,50
55,65	22,02	0,95	50,14	50,40	151,50	364,90
52,93	21,69	0,96	49,69	49,11	150,87	351,80
57,62	21,00	1,16	52,28	52,49	146,10	466,80
55,36	21,42	1,08	51,62	50,06	150,92	420,80
64,91	25,18	1,09	50,17	51,38	150,70	422,00

Bei den würfelförmigen Prüfkörpern in Tab. 7 zeigen sich insgesamt höhere Festigkeiten, als bei den prismatischen Körpern. Die ermittelten Festigkeiten liegen im Bereich zwischen $28,9 \text{ N/mm}^2$ und $33,47 \text{ N/mm}^2$. Bei der Dichte der einzelnen Proben sind keine signifikanten Schwankungen festzustellen.

Die insgesamt höhere und weniger schwankende Festigkeit der würfelförmigen Prüfkörper deutet darauf hin, dass bei den höheren Prüfkörpern auch makroskopische Stabilitätseffekte durch Imperfektionen begünstigt werden, was in Abb. 24 auch zu erkennen ist

Tabelle 7: Würfelförmige Druckprüfkörper aus Baum 2

F [kN]	f [N/mm ²]	ρ [g/cm ³]	a [mm]	b [mm]	h [mm]	m [g]
84,79	33,47	1,08	50,71	49,96	51,00	139,60
74,97	29,15	1,09	50,68	50,74	50,65	142,60
76,40	30,59	1,08	50,09	49,86	50,69	136,60
80,08	31,13	1,07	50,97	50,47	50,57	139,00
77,06	31,17	1,09	50,96	48,51	50,61	136,00
71,17	28,86	1,09	49,13	50,19	50,61	136,50

Die Untersuchung der Druckfestigkeit an Mikrobohrkernen (5 mm Durchmesser, 5 mm Länge) liefert für Baum 2 Druckfestigkeiten zwischen $27,7 \text{ N/mm}^2$ bis $38,0 \text{ N/mm}^2$. Die Prüfung dieser Bohrkern ist von lokalen Gegebenheiten (Ästen etc.) in der Holzmatrix stark abhängig. Für eine größere Zahl von Messungen lässt sich ein Mittelwert, z.B. aus elf Messungen zu $32,7 \text{ N/mm}^2$ ermitteln, vgl. Tab. 4.

Tabelle 8: Druckfestigkeiten am Mikrobohrkern aus Baum 2

	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6	Probe 7	Probe 8	Probe 9	Probe 10	Probe 11
f [N/mm ²]	33,7	28,9	33,9	30,5	31,1	27,7	37,9	38	34,6	30,4	32,7

Dieser Mittelwert aus den elf Bohrkernmessungen in Tab. 11 weicht kaum von der Druckfestigkeit am Vollquerschnitt von 33,3 N/mm² ab (Abweichung 1,8 %). Damit erscheint die Ermittlung der Festigkeit am Mikrobohrkern eine adäquate Methode zur Ermittlung der Druckfestigkeit am vitalen Baum. Die Gewinnung der Bohrkern stellt eine nur geringe Beschädigung am Baum dar.

Zur Verifikation der Bohrkernmethode wird eine umfangreiche Studie durchgeführt. Dazu werden aus allen Probekörpern im axialen Abstand von 50 cm jeweils Bohrkern parallel und senkrecht zum im Biegeversuch hervorgerufenen Bruch entnommen, diese in 5 mm lange Segmente zerteilt und daraufhin mit dem IML Fraktometer II geprüft. Insgesamt werden im Rahmen dieser Studie ca. 4000 Einzelmessungen durchgeführt und deren Ergebnisse ausgewertet.

Am Beispiel des Baumstammes 3, aus dem drei Probekörper für die Biegeversuche gewonnen werden, ist das Ergebnis der Studie als durchschnittliche Druckfestigkeit über die Baumhöhe in Abb. 48 aufgetragen. Der Durchschnitt der Festigkeiten liegt in den einzelnen Höhenschnitten zwischen 28,75 N/mm² und 31,6 N/mm².

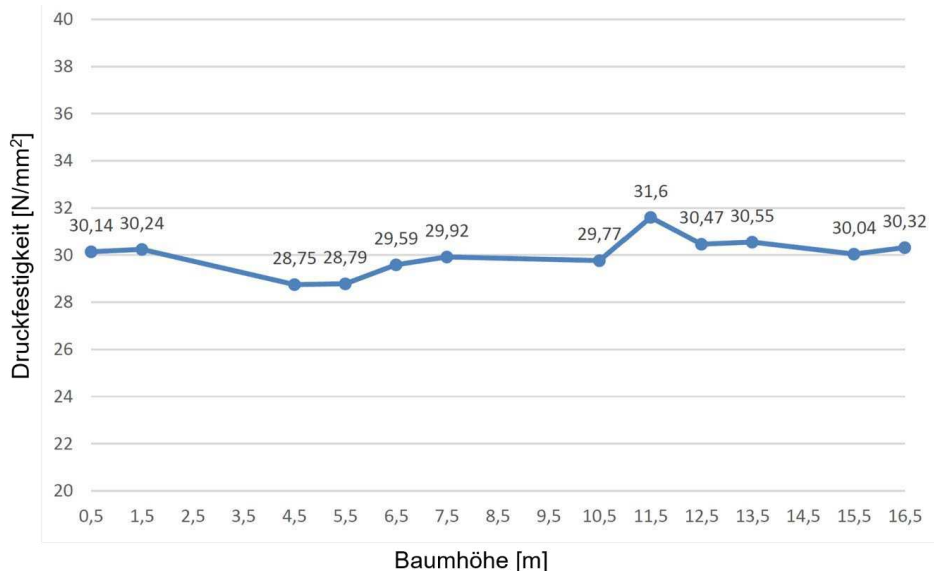


Abbildung 45: Durchschnittliche Druckfestigkeit aus Mikrobohrkernen für Baum 3 über die Stammhöhe. Bachelorarbeit Markus Waldecker, TU Dortmund.

Die Durchführung des Biegeversuches erfolgte um die etwas schwächere Achse des Stammes. Daher wurden die Bohrkerne auch hinsichtlich stärkerer und schwächerer Biegeachse unterschieden. In Abb. 46 sind die Druckfestigkeiten der aus vier verschiedenen, senkrecht zueinander angeordneten Richtungen entnommenen Bohrkerne aufgetragen. Es lassen sich jedoch keine eindeutigen Einflüsse für die Druckfestigkeit der Holzmatrix in dieser Studie feststellen.

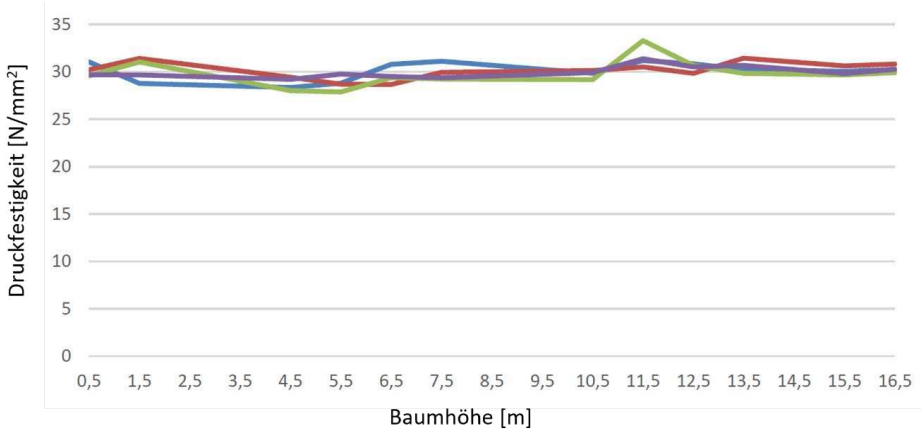


Abbildung 46: Druckfestigkeit der Mikrobohrkerne aus vier Richtungen für Baum 3. Bachelorarbeit Markus Waldecker, TU Dortmund.

Die Streuung der Einzelmessungen wird exemplarisch an einem Querschnitt diskutiert, vgl. Abb. 47. Die Werte liegen zwischen 28,5 N/mm² und 38,5 N/mm². Der Mittelwert ergibt sich zu 32,7 N/mm² mit einer Standardabweichung von 6,5%.

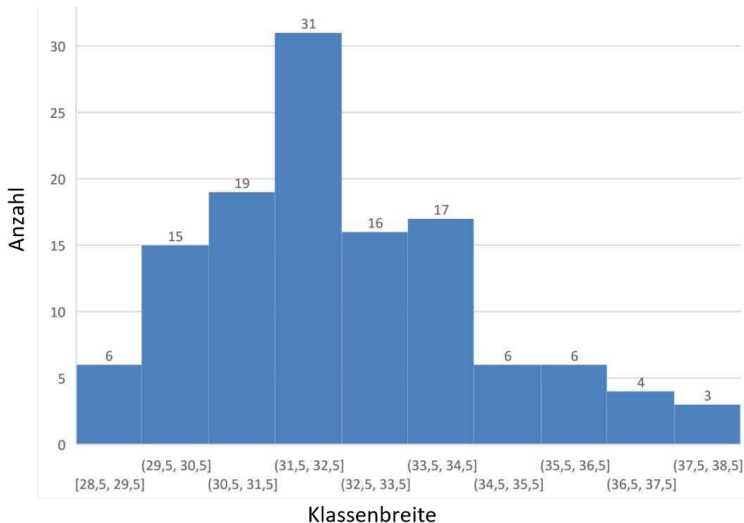


Abbildung 47: Streuweite der Druckfestigkeit der Mikrobohrkerne für Baum 3. Bachelorarbeit Markus Waldecker, TU Dortmund.

3.10. Versuchsaufbau und Auswertung der Zugversuche

Zur Durchführung der Zugversuche werden zunächst knochenförmige Probekörper nach DIN 52188 verwendet. Der Prüfbereich wird mit einem Querschnitt von 200 mm^2 und einer freien Länge von 120 mm definiert, vgl. Abb. 48. Der Übergang zwischen Klemmbereich und Prüfbereich wird ausgerundet. Die Klemmfläche zur Einspannung des Prüfkörpers hat mit 1600 mm^2 den Flächenfaktor 8 gegenüber dem Prüfquerschnitt.

Mit diesem Flächenfaktor kann allerdings kein Bruch im Prüfbereich erzielt werden. Erst durch Reduzierung des Prüfquerschnittes kann dies erreicht werden.

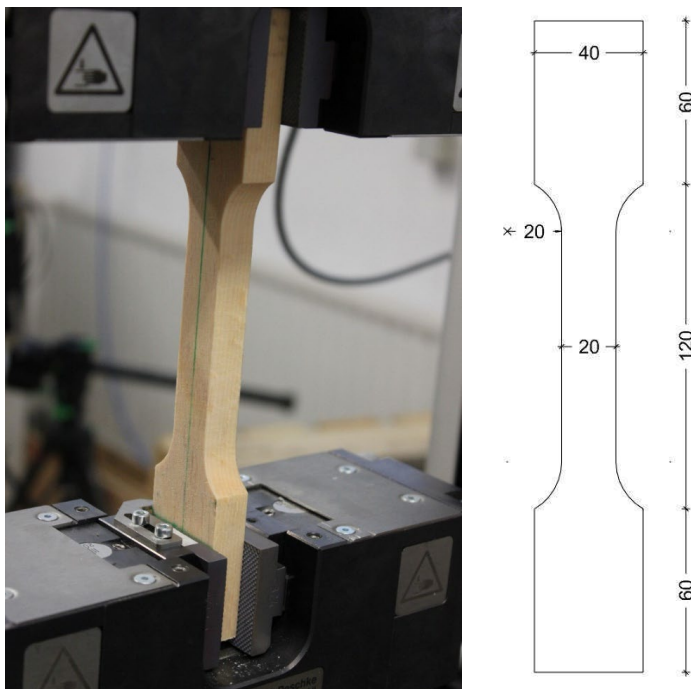


Abbildung 48: Zugversuch am knochenförmigen Prüfkörper und Prüfkörpergeometrie.

Daher wird die Probengeometrie modifiziert, vgl. Abb. 49. Der Lastenleitungsbereich besitzt nun um 60° geneigte Bauteilflanken. Durch Dehnungsmessung im Prüfbereich werden alle Nachgiebigkeiten aus der Lastenleitung ausgeblendet.

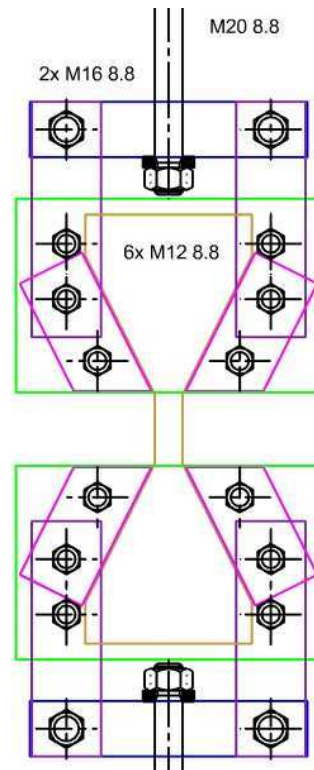


Abbildung 49: Modifizierter Zugprüfkörper mit Dehnungsmesseinrichtung und Konstruktionszeichnung.

Es werden vier Prüfkörper der modifizierten Geometrie aus der Holzmatrix des Biegeversuchskörpers 3 gewonnen. Zwei davon erhalten einen quadratischen Prüfquerschnitt mit 400 mm^2 ($20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$), während die anderen beiden einen runden Querschnitt mit $314,2 \text{ mm}^2$ Prüffläche (20 mm Durchmesser) aufweisen.

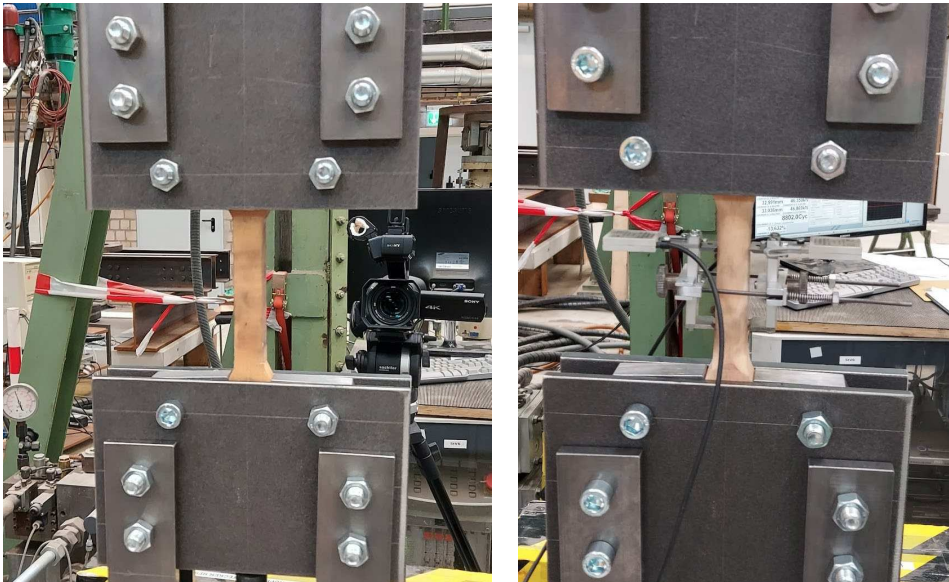


Abbildung 50: Links: Modifizierte Zugprüfkörper mit quadratischem Querschnitt. Rechts: Modifizierte Zugprüfkörper mit rundem Querschnitt.

Beispielhaft ist in Abb. 51 das Spannungs-Dehnungsdiagramm eines Zugversuchs mit rundem Querschnitt dargestellt.

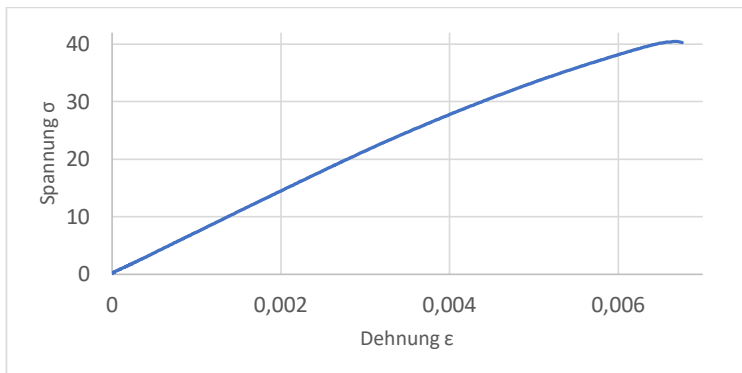


Abbildung 51: Exemplarisches Spannungs-Dehnungsdiagramm im Zugversuch.

Der Elastizitätsmodul kann aus der initialen Tangentensteigung des Spannungsdehnungsdiagramms bestimmt werden und liegt zwischen 6.400 N/mm^2 und 7.400 N/mm^2 .

In sämtlichen Versuchen stellen sich zur Längsachse nur leicht geneigte Bruchflächen ein, so dass die Zugfestigkeit primär durch das Abscheren von Faserbündeln, wie beim Biegeversuch limitiert wird, vgl. Abb. 52.



Abbildung 52: Prüfkörper im Zugversuch nach dem Versagen

3.11. Spannungshypothese zur Ermittlung der Traglast bei Biegebeanspruchung

Das Verhalten des Prüfkörpers nach Verlassen des linear elastischen Bereiches lässt sich in drei Phasen der Schädigung unterteilen. Phase 1 ist das lokale Ausknicken von Fasern auf der Biegedruckseite zu beobachten. Wird die Last weiter gesteigert, kommt es zum Abreißen einzelner Faserbündel auf der Biegezugseite in Phase 2. Dieser Mechanismus entfestigt den Gesamtquerschnitt und führt zu Phase 3, welche sich durch flächige Delamination ganzer Querschnittsbereiche bis ins Kernholz charakterisiert, vgl. Abb. 37. Während Phase 1 noch durch einen Anstieg im Last-Verformungsdiagramm begleitet wird, wirkt das Abreißen einzelner Faserbündel auf der Biegezugseite in Phase 2 entfestigend. Imperfektionen (Schadstellen oder Äste) auf der Biegezugseite scheinen das Abreißen einzelner Faserbündel in Phase 2 zu begünstigen.

Die nachfolgende Spannungshypothese berücksichtigt den geschilderten Verlauf der Schädigungen im Querschnitt, indem die axiale Druckfestigkeit als obere Schranke der Spannung auf der Biegedruckseite angesetzt wird. Erreicht das initiale, elastische Verhalten im Querschnitt diese Schranke, wird die Entwicklung eines nichtlinearen Spannungsverlaufs in der Druckzone zur Einhaltung dieser Schranke angesetzt (Phase 1). In der Zugzone wird bis zum Abreißen von Faserbündeln (Phase 2) von einem ideal elastischen Spannungsverlauf ausgegangen, vgl. Abb. 53.

Die Steigerung des Biege widerstandes, wie er im Versuch noch während des Ausknickens von Fasern auf der Biegedruckseite beobachtet wird (Phase 1), geht mit der Verschiebung der Spannungsnulllinie in Richtung der Biegezugseite einher, wodurch die maximale Zugspannung bis zum Abreißen von der Faserbündeln (Phase 2) ansteigen muss.

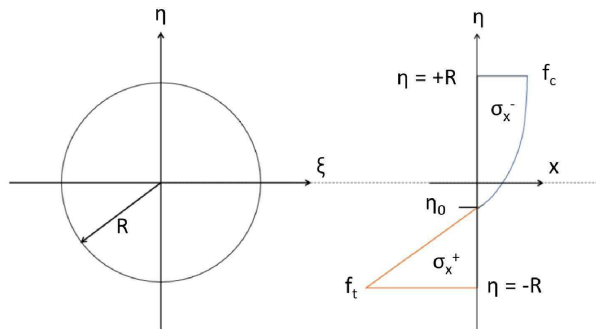


Abbildung 53: Darstellung der Spannungshypothese für Biegung eines runden Querschnitts um die ξ -Achse in Phase 1 bis Phase 2.

Die hypothetische Spannungsfunktion, welche für Druck- und Zugzone abschnittsweise definiert wird, erhält nachfolgende Rand- und Übergangsbedingungen:

1. C^1 -Kontinuität zwischen Druck- und Zugzone
2. Limitierung der Druckspannung auf die Druckfestigkeit σ_c
3. Limitierung der Zugspannung auf die Zugfestigkeit σ_t
4. Verschwindender Spannungsgradient am Rand der Druckzone

Diese Rand- und Übergangsbedingungen definieren den Grenzzustand der Tragfähigkeit gemäß

$$\begin{aligned} \sigma_x(\eta = -R) = f_t, \quad \sigma_x(\eta = \eta_0) = 0, \quad \sigma_x(\eta = +R) = f_c, \\ \sigma_x'(\eta = +R) = 0, \quad \sigma_x(\eta = \eta_0^+) = \sigma_x(\eta = \eta_0^-), \quad \sigma_x'(\eta = \eta_0^+) = \sigma_x'(\eta = \eta_0^-). \end{aligned} \quad (4)$$

Die Kreisgleichung

$$\xi_r^2 + \eta_r^2 = R^2, \quad (5)$$

definiert die Integrationsgrenzen der Spannungsfunktion auf dem Rand des Querschnitts.

Die Polynomfunktionen niedrigsten Ansatzgrades, welche die Bedingungen in (4) erfüllen können, sind auf der Biegezugseite linear und auf der Biegedruckseite kubisch

$$\sigma_x(\eta) = \begin{cases} c_1\eta^3 + c_2\eta^2 + c_3\eta + c_4 & , -R \leq \eta \leq \eta_0^- \\ c_5\eta + c_6 & , \eta_0^+ \leq \eta \leq +R. \end{cases} \quad (6)$$

Weiterhin wird die Parität der positiven und negativen Spannungsblöcke aus der Integration der Biegespannungen gefordert, da die Biegung im Querschnitt keine Normalkraft erzeugen soll:

$$\int_{-R}^R \int_{-R}^R \sigma_x(\eta) d\xi d\eta = 0. \quad (7)$$

Der Biegewiderstand um die ξ -Achse ist gegeben durch

$$M = \int_{-R}^R \int_{-R}^R \sigma_x(\eta) \eta d\xi d\eta. \quad (8)$$

Unter Berücksichtigung von (4) und (7) ergibt sich die abschnittsweise Spannungsfunktion in Abhängigkeit der Druckfestigkeit f_c , der Zugfestigkeit f_t und der Lage der neutralen Faser η_0 zu

$$\sigma_x(\eta, \eta_0, \sigma_t) = \begin{cases} \left(\frac{-f_t}{(2R - \eta_0)\eta_0^2} + \frac{2f_c}{\eta_0^3} \right) \eta^3 - \left(\frac{-f_t}{(2R - \eta_0)\eta_0} + \frac{3f_c}{\eta_0^2} \right) \eta^2 + f_c & , -R \leq \eta \leq \eta_0 \\ \frac{-f_t}{2R - \eta_0} + \frac{f_c \eta_0}{2R - \eta_0} & , \eta_0 \leq \eta \leq +R. \end{cases} \quad (9)$$

Die Druckfestigkeit f_c des Materials ist als zuverlässiger Wert aus Druckversuchen bekannt. Die Zugfestigkeit f_t und die Lage der spannungsfreien Faser η_0 sollen unbekannte Parameter sein. Sie können nun iterativ durch zusätzliche Kurvenanpassung (curve fitting) an die Versuchsergebnissen der Biegeversuche ermittelt.

Parameteridentifikation der Zugfestigkeit durch Curve Fitting der Biegeversuche

Die Parameteridentifikation der Zugfestigkeit f_t erfolgt innerhalb eines Erwartungsintervalls iterativ mittels Intervallhalbierungsmethode. Die Erwartung der Zugfestigkeit liegt in $[f_c, 3f_c]$. Als Zielfunktion wird die Differenz aus Ergebnissen der Spannungshypothese und Traglastwerten aus Biegeversuchen ermittelt und deren L_1 -Norm minimiert. Die Abweichung ist dabei die Abweichung zwischen der im Versuch gemessenen Biegetragfähigkeit $M_{\text{exp}}(R)$ und der durch die aufgestellte Spannungshypothese mit einer gewählten Zugfestigkeit f_t^{trial} ermittelten Biegetragfestigkeit $M_{\text{comp}}(R)$, ist in Gl. (10) zu finden. Als Datenpunkte stehen die 16 durchgeführten Biegeversuche mit deren Biegemoment im Traglastzustand in Abhängigkeit der jeweiligen Prüfkörper unterschiedlicher Prüfradien $R(k)$ zur Verfügung, so dass die Minimierungsaufgabe lautet:

$$\min_{f_t \in [f_c, 3f_c]} \sum_{k=1}^{16} \|M_{exp}(R(k)) - M_{comp}(R(k), f_t, \eta_0)\|_1 \quad (10)$$

In jedem Minimierungsschritt wird zur Bestimmung von $M_{comp}(R)$ und die Normalkraftbedingung (7) in einem Prediktor-Korrektor-Verfahren gelöst, um die zugehörige Lage der Spannungsnulllinie η_0 zu ermitteln. Die Ausgangskonfiguration bildet dabei die Nulllage in Querschnittsmitte $\eta_0 = 0$. Der Korrektor ergibt sich aus der Linearisierung der Normalkraftbilanz Gl. (11), wobei die Richtung der resultierenden Normalkraft die Richtung des Korrektors ergibt.

$$\eta_{0,i+1} = \eta_{0,i} + \frac{\int_{-R}^R \int_{-R}^R \sigma_x(\eta) d\xi d\eta}{\int_{-R}^R \int_{-R}^R \|\sigma_x(\eta)\|_2 d\xi d\eta} (2R - \eta_{0,i}) \quad (11)$$

Die Integration der Spannungsfunktion über das Kreisgebiet erfolgt mittels Trapezmethode und einer Segmentgröße von $R/50$.

In Abb. 57 (links) ist die Konvergenz des Lösungsalgorithmus der Spannungsnulllinie zu sehen. Bereits nach 11 Iterationen ist das Ergebnis nahezu stationär.

Auch die Auffindung der Zugfestigkeit auf Basis von Gleichung (10) zeigt bereits nach 12 Intervallhalbierungsschritten eine ausreichende Konvergenz, vgl. Abb. 54 (rechts).

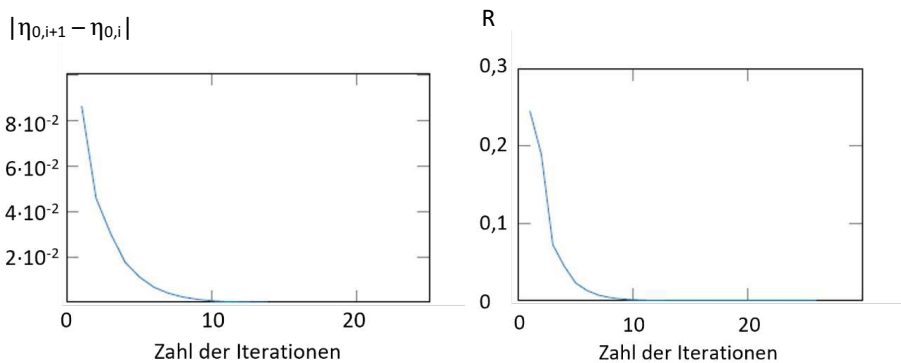


Abbildung 54: Links: Konvergenzverhalten der Lösungsalgorithmen zur Auffindung von η_0 . Rechts: Bestimmung von f_t durch Intervallhalbierung.

Bei der hier gewählten Eingangsgröße $f_c = 32 \text{ N/mm}^2$ (Druckfestigkeit) leitet sich mit der o.g. Methodik eine Zugfestigkeit von $f_t = 80,3 \text{ N/mm}^2$ ab. Dies entspricht einem Verhältnis von Zugfestigkeit zu Druckfestigkeit von $f_t/f_c = 2,51$.

Vereinfachtes Bemessungsmodell auf Basis der Spannungshypothese

Aus dem durch Kurvenanpassung ermittelten Wert für die Zugfestigkeit f_t ergibt sich mit Hilfe der gewählten Spannungshypothese aus (6) eine Traglastkurve für kreisrunde Querschnitte der Rotbuche. Diese Traglast liegt um den Faktor 1,95 über der elastischen Grenze, vgl. Abb. 55.

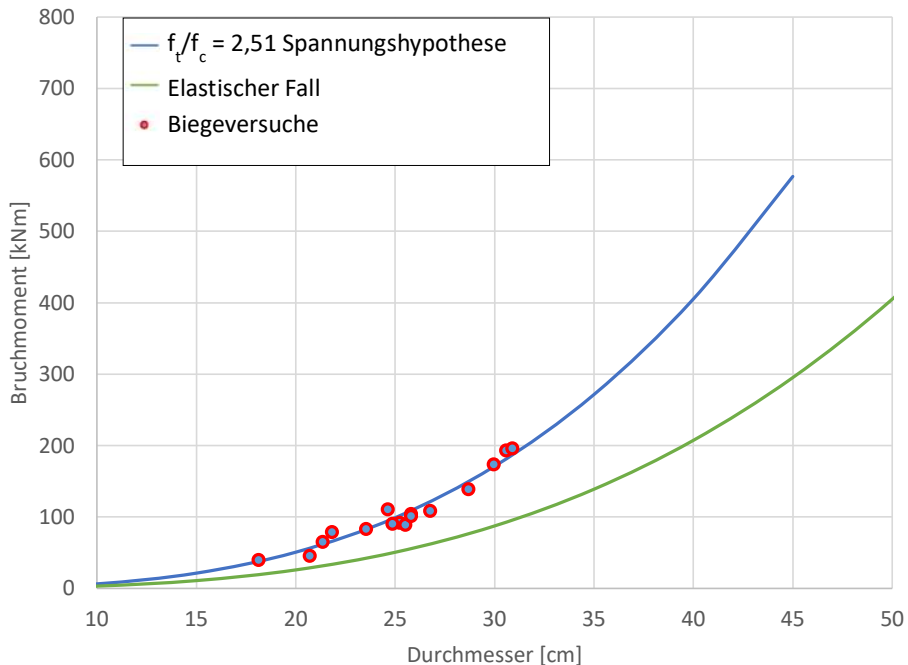


Abbildung 55: Grenzmomente für den elastischen Fall, sowie unter Ausnutzung von $f_t/f_c = 2,51$ in der hier propagierten Spannungshypothese im Vergleich zu den Traglastversuchen in Kap. 3.5.

Die Ergebnisse hier basieren auf Versuchsbeobachtungen, einer daraus abgeleiteten Spannungshypothese, zahlreichen Druckversuchen, sowie 16 Biegeversuchen an Prüfkörpern unterschiedlichen Durchmessers, welche noch keine weitgehende statistische Auswertung ermöglichen. Somit kann daraus noch kein mit statistischer Wahrscheinlichkeit (z.B. 5% Fraktile) abgeleitetes Bemessungskonzept, wie es im Bauwesen üblich ist, abgeleitet werden. Dennoch liegt mit der Methodik ein konkretes Prüfkonzept vor, um ein Bemessungskonzept zu erarbeiten. Sie stellt damit keine mit statistischer Sicherheit beaufschlagte Bemessungskurve dar, wie es im Bauwesen üblich ist (Eurocodes, vgl. [26]).

Dennoch ist aus Abb. 55 abzulesen, dass der elastische Widerstand bei Biegebeanspruchung von Grünholz bei der Rotbuche einen mittleren Abstand von ca. 95% zur Traglast besitzt.

Kapitel 4: Verankerung technischer Lasten am Baum

4.1. Notwendigkeit der Wachstumskompatibilität

Im Gegensatz zur Baubotanik [101], welche Neupflanzungen und gesteuertes Wachstum der Pflanze instrumentalisiert, definiert sich das Bauen in und mit vitalen Bäumen durch die Nutzung und Erhaltung eines vorliegenden Baumbestands. Da Bäume im Verhältnis zur durchschnittlichen Entstehungsphase von Bauwerken ein vergleichbar langsames Wachstum haben, liegen diese in einem durch Tropismen gesteuerten Gleichgewichtszustand vor, welcher durch die Baumaßnahme mehr oder weniger gestört wird. Exemplarisch sei die Entnahme eines einzelnen Baumes innerhalb einer Baumgruppe betrachtet, vgl. Abb. 56.



Abbildung 56: Die Entnahme eines Baumes innerhalb einer Baumgruppe hinterlässt eine Lücke im Kronenbereich, welche sich über den Phototropismus der umherliegenden Bäume mit der Zeit schließt. Die Entnahme stellt eine Störung des langjährig gewachsenen Zustands dar, welcher z.B. die Windangriffsfläche der verbleibenden Kronen und damit die mechanische Belastung der verbleibenden Bäume verändert.

Da Bäume autotrophe Lebewesen sind, reagieren sie auf Veränderungen ihrer Umwelt, was diese einerseits im vorliegenden Kontext einer Tragstruktur als adaptives Tragelement auszeichnet. Andererseits implizieren sich daraus Anforderungen zur Erhaltung ihrer Vitalität, um sie nachhaltig in ein Tragsystem zu integrieren.

Kann man von der Entnahme von Bäumen im Baufeld absehen, verbleiben immer noch unvermeidbare Eingriffe in das Gleichgewicht, wie z.B. zusätzliche mechanische Belastung von Stamm und Wurzel sowie die konkrete Übergabe von Lasten aus dem technischen Tragwerk in die Holzmatrix.

Die Konzeptionierung einer Verbindung zwischen Baum und technischem Tragelement sollte so beschaffen sein, dass das Wachstum und die Vitalität des Baumes sowie die Funktionalität des Verankerungselements langfristig erhalten und überprüfbar bleibt. Dafür müssen Verbindungsstellen unter dem Aspekt der Wachstumskompatibilität konstruiert werden [102].

4.2. Befestigungskategorien

Die Übertragung technischer Lasten in vitale Bäume lässt sich prinzipiell in drei Kategorien unterteilen:

1. Formschlüssige Kraftübertragung über die Oberfläche in die Holzmatrix
2. Reibungsbasierte Kraftübertragung über die Oberfläche in die Holzmatrix
3. Formschlüssige Kraftübertragung in die Holzmatrix

Die Befestigungen der Kategorie 1 und 2 sehen somit keine Abtragung von Gewebeschichten vor, was in Kategorie 3 notwendig ist.

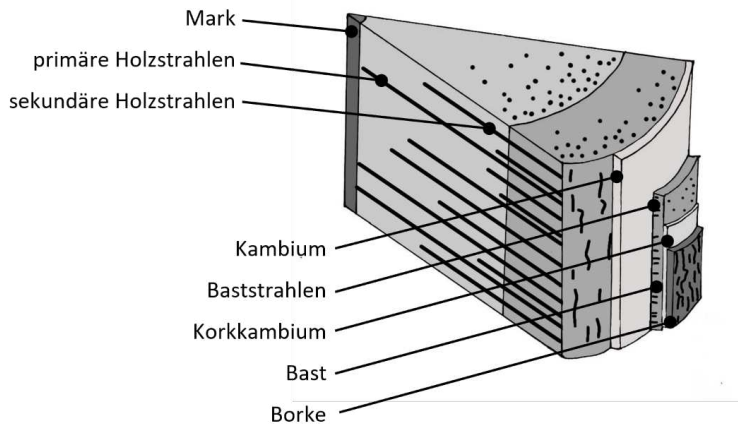


Abbildung 57: Darstellung von Gewebeschichten des Stammes.

Die Gewebeschichten der Baumoberfläche, vgl. Abb 57, welche für Befestigungen der Kategorie 3 durchdrungen werden, sind für den Stoffwechsel sowie das Wachstum von Bäumen notwendig. Daher sind möglichst kleine, lokale Störungen dieser Schichten vorteilhaft.

Während das primäre Wachstum (Längenwachstum) von Bäumen in der Sprossspitze durch das apikale Meristem stattfindet [68], ergibt sich das sekundäre Wachstum (Dickenwachstum) aus Wachstumsprozessen im vaskulären Kambium, welches zwischen Bastschicht (Phloem) und Holzmatrix (Xylem) liegt. Dieses Kambium generiert neue Zellen, die sowohl in Richtung Xylem als auch in Richtung Phloem angeordnet werden. Daraus ergibt sich durch Wachstumsprozesse im Kambium das Dickenwachstum des Stammes in radialer Richtung, welches zur Bildung der Holzstruktur und damit zur Tragfähigkeit des Baumes führt [103, 104].

Das Xylem manifestiert seine Form u.a. durch die Einlagerung von Lignin und unterliegt keinen weiteren Wachstumsprozessen, wie dies für das Phloem der Fall ist. Dieses muss der geometrischen Aufweitung des Xylems folgen. Weitere Zellbildungen finden im Korkkambium (Phellogen) statt. Die hier generierten Korkzellen bilden die Borke. Bei juvenilen Bäumen ist die Borke noch nicht vollständig vorhanden und an ihrer Stelle die Epidermis zu finden. Einige Spezies, wie die Sandbirke (*Betula pendula*) erhalten ihre Epidermis bis ins hohe Alter.

Korkschicht und Epidermis schützen den Baum gegen Austrocknung, mechanische Einwirkung sowie vor Schädlingen [105]. Borke und Epidermis definieren die Oberfläche des Stammes und variieren je nach Baumart in Dicke und mechanischer Festigkeit.

So bildet die Eichen-Gattung (*Quercus*) besonders robuste und z.T. sehr dicke Borken, wie es von der Korkeiche (*Quercus suber*) bekannt ist. Im Gegensatz dazu hat die Buche (*Fagus*), trotz ihrer Zugehörigkeit zur gleichen Familie (*Fagaceae*), eine empfindliche und dünne Borke [106], vgl. Abb. 58.



Abbildung 58: Unterschiedliche Beschaffenheit der Borke am Beispiel der Korkeiche (links) und der Rotbuche (rechts), Stamm der Korkeiche (oben links), Stamm der Rotbuche (oben rechts), Schnitt durch den Stamm der Korkeiche mit dicker Borke (unten links), Claus Ableiter CC-BY-SA 3.0, Schnitt durch den Stamm der Rotbuche (unten rechts)

Da bei Befestigungsmethoden der Kategorie 3 Gewebeschichten bis ins Xylem entfernt werden, setzt die sogenannte Kallusbildung ein, welche als Wundverschluss z.B. vom Absägen von Ästen bekannt ist. Dieser natürliche Reparaturmechanismus der Baumoberfläche wirkt dem Eindringen von Feuchtigkeit, Luft, Viren, Pilzen und anderer Organismen entgegen, da diese zur Zersetzung der Holzmatrix führen [37]. Die Kallusbildung baut Wachstumsdruck tangential und axial zur Baumoberfläche auf, was bei Befestigungsmethoden der Kategorie 3 zu beachten ist. Werden technische Bauteile im Xylem in axialer Richtung unzureichend verankert, führt der Wachstumsdruck des Kallus u.U. dazu, dass das Bauteil aus dem Xylem herausgeschoben wird. Dieser Mechanismus beruht auf der natürlichen Veranlagung von Bäumen, tote Äste am Übergang zum Stamm abzuwerfen.



Abbildung 59: Links: Kallusbildung um einen toten Ast um diesen über Wachstumsdruck abzuwerfen.

Formschlüssige Kraftübertragung über die Oberfläche

Formschlüssige Befestigungstechnik der Kategorie 1 umfasst den Einsatz von Schlingen oder Seilen. Ein Beispiel ist das Einlegen textiler Schlingen in die Gabelung von Starkästen, vgl. Abb 60. Durch die natürliche Ausrundung der Gabel lassen sich die Schlingen meist so einlegen, dass die Richtung des Lastvektors der Oberflächennormale entspricht. Dadurch können Lasten nahezu ohne das Auftreten von Reibungskräften erfolgen. Durch möglichst breite Schlingen lässt sich die Kontaktspannung zwischen Schlinge und Borke verringern. Da die Holzfasern dem Verlauf der Astgabel folgen, entstehen bei dieser Befestigungsmethode Querdruckspannungen in der Holzfasermatrix.



Abbildung 60: Einsatz textiler Schlingen an Astgabeln (links), welche auch im Falle des Astabwurfs u.U. noch nutzbar sind (rechts).

Der Wachstumsdruck (Turgeszenzdruck) des Kambiums wirkt der Kontaktspannung aus der Lastschlinge entgegen. Der Turgeszenzdruck resultiert aus der Wasseraufnahme in die Vakuolen der Zellen, wodurch sich diese dehnen, was zum Aufbau des Xylems notwendig ist. Dieser Druck kann zwischen Xylem und Phloem deutlich variieren, findet seine höchsten Werte aber im Bereich des aktiv wachsenden Kambiums. Bei der Rotbuche (*Fagus sylvatica*) liegt dieser Druck üblicherweise im Bereich zwischen $0,3 \text{ N/mm}^2$ und $0,6 \text{ N/mm}^2$. Zu Beginn der Wachstumsperiode kann dieser Druck Werte zwischen $0,5 \text{ N/mm}^2$ und $1,0 \text{ N/mm}^2$ erreichen [107, 108].

Wenn die Kontaktspannung den Wachstumsdruck überschreitet, kommt es zur Wasserunterversorgung, zum Erliegen des Wachstums und zum Absterben von Zellen in diesem Bereich. Dies führt langfristig zum Einwachsen des Befestigungselementes, da umherliegende Schichten weiterwachsen und zudem Kallusbildung einsetzt, vgl. Abb. 61.



Abbildung 61: Beispiele der Überschreitung des Turgeszenzdrucks in der Kontaktfläche zwischen Befestigungselementen und Baumoberfläche.

Liegt die Kontaktspannung unterhalb des Wachstumsdruckes, findet weiterhin Wachstum unterhalb des technischen Elementes statt. Dadurch verschiebt sich das Element entgegen der Belastungsrichtung um die Dicke der Wachstumsschichten.

Reibungsbasierte Kraftübertragung über die Oberfläche

Bei der reibungsbasierten Befestigungstechnik nach Kategorie 2 werden Kräfte normal und tangential zur Baumoberfläche übertragen. Es lassen sich zwei kritische Punkte identifizieren:

- Die Gewährleistung ausreichender Reibung zwischen Bauteil und Borke
- Die Übertragung von Schubkräften im Kambium

Zwischen Bauteil und Borke liegt Festkörperreibung (Coulombsche Reibung) vor, sodass sich die übertragbare Reibungskraft aus dem Produkt von Reibungskoeffizient und Normalkraft ergibt. Der Reibungskoeffizient ist von der Oberflächenbeschaffenheit der beiden beteiligten Materialien abhängig. Aber auch Witterungseinflüsse wie Feuchtigkeit und Temperatur beeinflussen diesen Reibverbund. Da die reibungsbasierte Kraftübertragung Kraftkomponenten senkrecht zur Oberfläche benötigt, entstehen auch hier Kontaktspannungen, welche dem Turgeszenzdruck entgegenwirken.

Daher kommt es bei Klemmungen und geschlossenen Seilschlingen in der Regel zum Einwachsen der technischen Elemente. Zusätzlich bergen Klemmstellen das Risiko der Ausbildung von Staunässe, was die Entstehung von holzersetzenen Pilzen fördert.

Exemplarisch sei das Beispiel in Abb. 62 vorgeführt, welches ursprünglich nur eine Befestigung der Kategorie 3 nutzte, vgl. Abb. 62 (links). Erst nachträglich wurde eine zusätzliche Stützung mit metallischen Stäben angebracht, welche sich über Reibung und umlaufende Zugringe am Stamm befestigen, vgl. Abb. 62 (rechts). Sowohl die Ausrichtung der Stäbe als auch die Zugringe erzeugen eine Kontaktspannung senkrecht zur Baumoberfläche, so dass Reibungskräfte aktivierbar sind. Die Zugringe sind regelmäßig zu lockern, damit diese Art der Befestigung nach Kategorie 2 auch das Dickenwachstum des Stammes ermöglicht. Während dieses Lockerungsvorgangs muss die Befestigung nach Kategorie 3 sämtliche Lasten übernehmen, was hier möglich ist. Ohne diese Kombination gestaltet sich die Lockerung derartiger Befestigungen i.A. schwierig bzw. stellt einen gefährlichen Vorgang dar.



Abbildung 62: Aussichtsplattform "Adlerhorst" im Schwarzwald vor der Anbringung zusätzlicher Abstützung sowie danach.

Am vorliegenden Beispiel soll auch hinterfragt werden, ob die Reibungskräfte durch die Kambialschicht bis zum Xylem übertragbar sind. Das Kambium weist jahreszeitabhängig im Zusammenhang mit der aktuellen Wachstumsphase und dem Wassergehalt unterschiedliche Schubfestigkeiten auf. Besonders in der Hauptwachstumsphase der Frühholzbildung ist das Kambium sehr gleitfähig und kann nur geringe Schubspannungen übertragen [109, 110]. Für Rotbuche wird in [111] die Veränderung der Schubfestigkeit zwischen Borke und Splintholz über den Jahresverlauf untersucht. So liegt die Schubfestigkeit in der Wachstumsphase von Mai bis Juli zwischen $0,39 \text{ N/mm}^2$ und $0,44 \text{ N/mm}^2$, in den verbleibenden Monaten zwischen $0,58 \text{ N/mm}^2$ und $0,82 \text{ N/mm}^2$.

Der Stammdurchmesser auf Höhe der Verbindung liegt bei 65 cm. Die Bemessungslast in vertikaler Richtung beträgt 212 kN und der Umfang liegt bei 2042 mm. Die Bauhöhe der Reibverbindung wird zu 50 mm angenommen. Damit ergibt sich die Schubspannung zu

$$\tau = 212 \text{ kN} \cdot 1000 \frac{\text{N}}{\text{kN}} (2042 \text{ mm} \cdot 50 \text{ mm}) = 2,08 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}. \quad (12)$$

Selbst wenn man im vorliegenden Beispiel von einem charakteristischen Eigengewicht von 25% der Bemessungslast ausgeht, wäre das Kambium kaum in der Lage, dieses über derartige Reibverbindung in das Xylem zu übertragen.

Wird die Scherfestigkeit des Kambiums überschritten, kommt es zum Abschälen der Borke, was großflächige Schädigungen an der Baumoberfläche verursacht, vgl. Abb. 63.



Abbildung 63: Abrutschen reibungsbasierter Verbindungen nach Kategorie 2, welche durch den Aufbau von Formschluss an Asterhebungen (links) bzw. durch die Neuausrichtung des Lastseils zum Stillstand kommt (rechts).

Formschlüssige Kraftverbindung in die Holzmatrix

Bei Verbindungen der Kategorie 3 werden technische Bauteile in das Xylem eingebracht und somit eine direkte Verbindung zwischen technischem Tragwerk und Holzmatrix hergestellt. Da derartige Bauteile in das Gewebe des Baumes dauerhaft eingebracht werden, wird auch von Implantaten gesprochen.

Die weniger festen Gewebeschichten (Borke, Phloem und Kambium) werden durch das Implantat überbrückt und müssen daher keine Lasten übernehmen. Es handelt sich immer um eine Methode, welche Gewebe entfernt, um das Implantat zu platzieren.

Um den Organismus zu schonen, sollte die Einbringung und das Implantat möglichst minimalinvasiv sein. Für die Einbringung werden i.d.R. Bohrlöcher erstellt, wobei vorherige Desinfektion des Werkzeugs dem Eindringen von Mikroorganismen und anderen subzellulären Erregern vorbeugt. Mikroorganismen und Erreger schädigen Holz in Form von Fäulnis, was zum Verlust der Tragfähigkeit in der Verbindung führt.

Auch das Material des Implantates kann durch Reaktionen mit den korrosiven Baumsäften zu einer Schädigung des Baumes und der Verbindungsstelle führen. Dieses Risiko lässt sich durch die

Verwendung eines hoch korrosionsbeständigen Materials (z.B. Edelstahl Werkstoffnummer 1.4404) reduzieren.

Prinzipiell können Implantate Normalkräfte, Querkräfte und Momente in den Baum einleiten. Bei der Konzeptionierung von Implantaten ist das Dickenwachstum des Baumes zu beachten, damit diese auch nach längerer Zeit noch zugänglich sind und ggf. eine Revision möglich ist.

Folgende Konzepte für Implantate sind denkbar:

- Spreizdübel
- Durchgehende Stäbe
- Mäßig lange Gewindestifte

Spreizdübel verankern sich durch Kompression und Reibung mit der umgebenden Holzmatrix im Bereich der Dübelspitze. Die Spreizung erzeugt hierbei rund um das Bohrloch Ringzugspannungen, vgl. Abb. 64 links. Diese verlaufen oberhalb und unterhalb des Bohrloches senkrecht zur Faserausrichtung der Holzmatrix. Dies kann zur Delamination der Faserbündel führen und einen Riss initiieren [65]. Derartige Risse verringern die Wirkung des Spreizdübels, was gegen die Verwendung dieses Systems spricht.

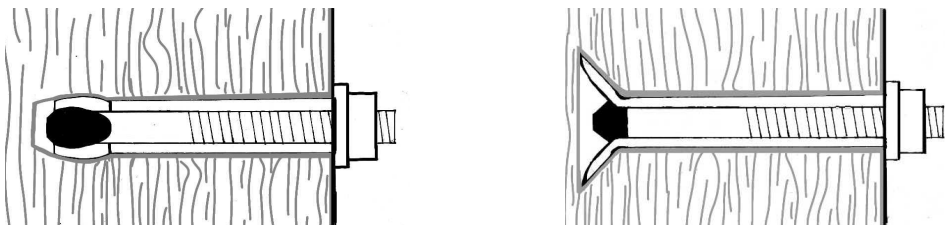


Abbildung 64: Unterschiedliche Bauformen von Spreizdübeln: Wegkontrolliert spreizender Dübel (links) und Hinterschnittdübel (rechts).

Einen Sonderfall von Spreizdübeln stellen Hinterschnittdübel dar, vgl. Abb. 64 rechts. Bei diesen wird die Auszugskraft durch eine geometrische Aufweitung am Ende des Bohrloches erreicht. Der Spreizdübel spreizt sich innerhalb dieses Bereiches auf und erreicht einen Formschluss mit dem umgebenden Holz ohne Ringspannungen aufzubauen. Aufgrund der geringen Druckfestigkeit des Holzes in radialer Richtung erfordert die sichere Verankerung eine große geometrische Aufweitung, welche in der Praxis schwer herzustellen ist.

Durchgehende Stäbe erfordern eine durchgängige Bohrung durch den Stamm, welche an zwei Oberflächen alle Gewebeschichten durchdringt und damit eine zweite Eindringpforte für Mikroorganismen und andere subzelluläre Erreger impliziert. Zugkräfte im Anker werden an der lastabgewandten Seite über die Oberfläche verankert, vgl. Abb. 65. Dabei erzeugen die Zugkräfte im Stab Kontaktspannungen (Druckspannungen) an der gegenüberliegenden Oberfläche, welche wie bei Kategorie 1 auf die wachstumsrelevanten Gewebeschichten wirken. In Abhängigkeit der Größe dieser Druckspannungen und der Beschaffenheit des Baumes ergibt sich durch das Dickenwachstum des Baumes eine horizontale Verschiebung des Implantates oder eine lokale Wachstumseinschränkung im Bereich der Verankerung.

Eine horizontale Verschiebung provoziert auf der Eintrittsseite einen Eintrag von Mikroorganismen und anderen subzellulären Erregern. Bei einer lokalen Wachstumseinschränkung kommt es zu einer Umwallung des Bauteils durch die umliegenden nicht druckgeschädigten, das Implantat umschließenden Bereiche [112]. In der Regel kommt es auf beiden Seiten zu einer Umwallung des Implantates, sodass sich schnellwachsendes Wundgewebe (Kallus) bildet [112–114], welches die Wunde nach außen verschließt.

Mit der Umwallung geht die Zugänglichkeit sowie die Lösbarkeit der Verbindung verloren, wodurch auch die Möglichkeit der visuellen Überwachung nicht mehr gegeben ist.



Abbildung 65: Durchgehende Gewindestange gemäß Kategorie 3.

Mäßig lange Gewindestifte werden auf einer Seite des Baumes in ein Sackloch eingebracht. Dabei werden nur auf einer Baumseite Gewebeschichten verletzt. Die Verankerung von Zugkräften kann nur über ein Gewinde, welches einen Formschluss zur Holzmatrix herstellt, gewährleistet werden. Die Effektivität von Gewindestiften hängt von ihrer Ausrichtung zur Holzfaser ab.

Die Ausrichtung des Stiftes kann dabei so gewählt werden, dass die Längsachse der Richtung der einwirkenden Kraft entspricht und somit die Belastung frei von Querkräften und Biegemomenten in den Stift eingeleitet werden kann. Dies führt zu niedrigen Anforderungen an die Biegetragfähigkeit des Bauteils, wodurch der Querschnitt und damit einhergehend die Invasivität des Eingriffes minimiert werden kann.

Stimmen die Achse des Stiftes und die Belastung nicht überein, werden durch den Stift Normal- und Querkräfte in die Holzmatrix eingeleitet. Die einwirkenden Querkräfte erzeugen in den äußeren Gewebeschichten, die weicher sind als das weiter innen liegende Holz, Druckspannungen, die zum Nachgeben des Gewebes führen aber den Gewindestift elastisch betten.

Beim Einbringen des Implantats in das Sackloch wird die formschlüssige Verbindung durch ein selbstfurchendes Gewinde hergestellt. Die Gewindegeometrie ist so zu wählen, dass verdrängtes

Gewebe in die Flanken des Gewindes aufgenommen werden kann, um höhere Ringzugspannungen zu vermeiden.

Die so eingesetzten Gewindestifte werden allmählich durch das Dickenwachstum des Baumes umwallt [112–114], was durch Kallusbildung unterstützt wird. Der herausstehende Teil des Implantates sollte dauerhaft zugänglich sein und ist je nach Geometrie zum Ende der Nutzungsdauer wieder aus dem Baum rückbaubar.

Aufgrund der Vorteile dieser Lösung werden mäßig lange Gewindestifte vielfach im Bereich des Bauens in und mit vitalen Bäumen eingesetzt und von verschiedenen kommerziellen Anbietern zum Verkauf angeboten. Eine gängige Bezeichnung für derartige Elemente lautet „Baumschraube“, vgl. Abb. 66.

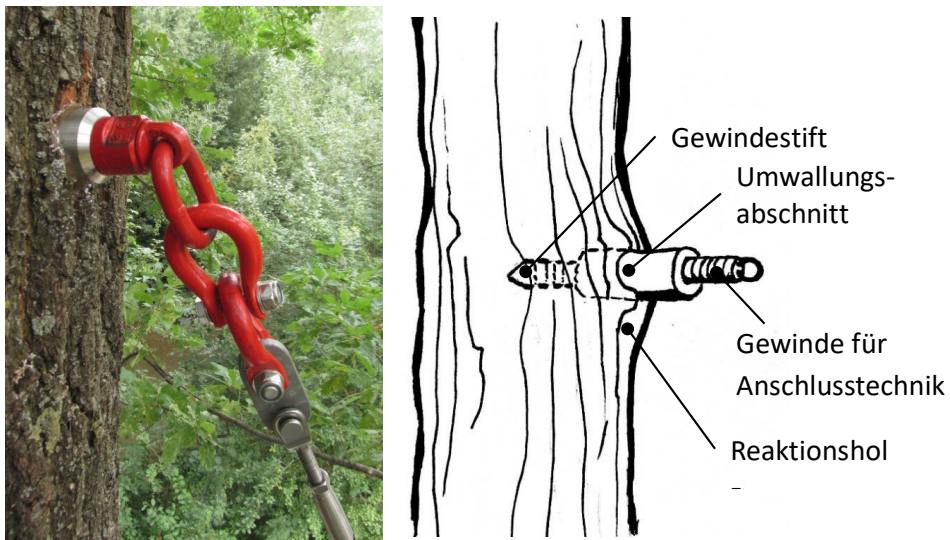


Abbildung 66: Baumschraube mit Umwallungsabschnitt und Anschluss Technik (Wirbel, Ösen, Lasche, Spanngewinde).

4.3. Baumschrauben für die Befestigung von Bauwerken an Bäumen

Weltweit sind unterschiedliche Bauweisen von Baumschrauben mit mäßig langen Gewindestiften erhältlich und unterscheiden sich in Material, Gewindeart, Durchmesser, Schaft und weiteren geometrischen Merkmalen. Die einzelnen Systeme sind derzeit nicht patentrechtlich geschützt. In Deutschland wurde 2017 ein Patent für eine „Vorrichtung und ein Verfahren zur Erzeugung eines dauerhaften Befestigungspunktes an einem Baum“ durch Herrn Martin Zeller angemeldet [115]. In Österreich wird ein Stand der Technik für die Befestigung an Bäumen über die ÖNorm L1127 [116] definiert. Diese umfasst lediglich die Betrachtung von Schrauben, die zur Aufnahme kleiner Lasten dienen (Überlandkabel, Schilder, Absperreseile, etc.) und berücksichtigt nicht die Wachstumskompatibilität.

Die Zugtragfähigkeit der Baumschraube in der Holzmatrix ist primär abhängig vom Gewindedurchmesser, der Verankerungslänge im Holz sowie dessen Festigkeit. Die mäßige Länge ist zum einen durch die Intention einer minimalinvasiven Bohrung begründet und andererseits durch den technisch vertretbaren Einschraubwiderstand (Mantelreibung des selbstfurchenden Gewindes). Beide Faktoren führen auch zu einer Minimierung des Schraubenquerschnittes. Baumschrauben weisen in der Regel folgende Bereiche und Merkmale auf:

Schaft und Gewinde stellen den Formschluss sowohl längs (über das Gewinde) als auch quer (hauptsächlich über den Schaft) zum Holz her. Der Formschluss zwischen den Gewindegängen und der Holzmatrix stellt den Widerstand gegen Herausziehen der Baumschraube dar. Geht man von einer radialen Einbringung der Baumschrauben aus, verankern die spiralförmigen Gewindegänge sich in den radial angeordneten Jahrringstrukturen. Dabei lassen sich die weicheren Frühholzschichten durch das Gewinde besser komprimieren, wodurch sich eine Verankerung der einzelnen Gewindegänge an den festeren Spätholzschichten ergibt [115]. Auch die Wirkung der Holzstrahlen trägt zum Widerstand gegen Herausziehen bei, vgl. Abb. 67. Druckkräfte können zusätzlich über Kontakt der Implantatspitze sowie durch Kontakt an der Baumoberfläche (von der Bauart abhängig) übertragen werden.

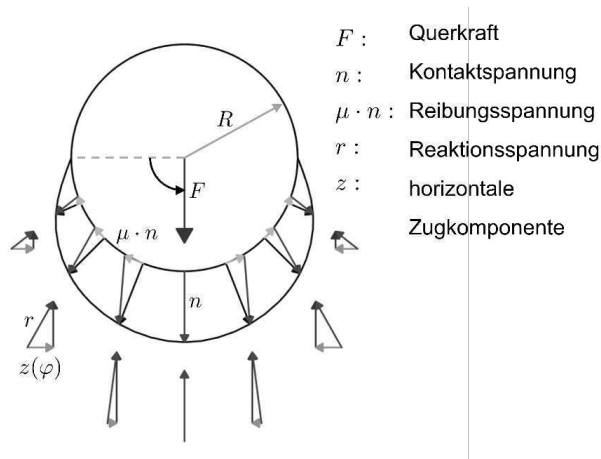


Abbildung 67: Entstehung Querkraftspannungen unter Querkraftbeanspruchung.

Sind vertikale Querkräfte über den Baumanker zu übertragen, treten durch die zylindrische Geometrie des Schaftes, der einen Formschluss zum Holz bildet, richtungsveränderliche Reaktionsspannungen unterhalb des Schaftes auf, welche horizontale Zugkomponenten quer zur Holzmatrix hervorrufen, vgl. Abb. 67. Derartige Zugspannungen können zur Delamination der Faserbündel und zum Versagen des Verankerungspunktes führen.

Wird eine Baumschraube durch Querkraft belastet, erzeugt Exzentrizität zwischen Lasteinleitung und Baumoberfläche ein zumindest bis zur Oberfläche linear ansteigendes Biegemoment. Dieses Biegemoment wächst i.d.R. auch in den äußersten Gewebeschichten des Baumes noch an, bis die elastische Bettung der umherliegenden Holzmatrix zum Abklingen des Biegemomentes führt, vgl. Abb. 68. Überschreitet jedoch das Biegemoment den elastischen Widerstand der Baumschraube, kommt es zur Ausbildung von Fließzonen und größeren Deformationen. Diese Deformationen betreffen auch die Holzmatrix, welche wie in Abb. 68 skizziert, durch horizontale Zugspannungen quer zur Faserrichtung aufspalten kann. Neben einem Verlust der Tragfähigkeit der Verbindung, entsteht dann auch eine Eintrittspforte für fäulnisverursachende Erreger.

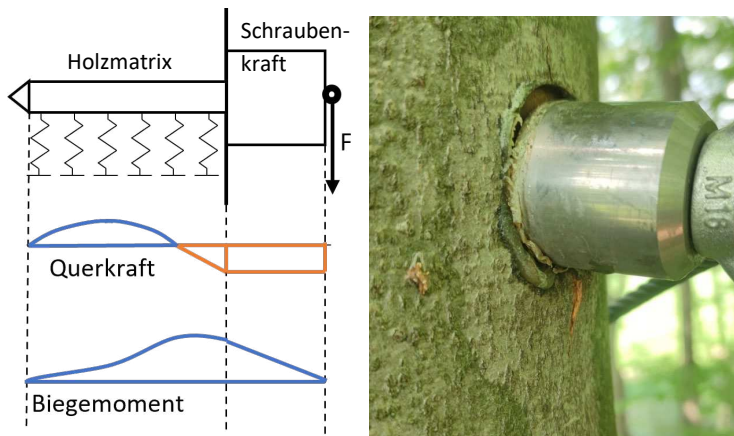


Abbildung 68: Verlauf von Querkraft und Biegemoment bei Querlastbeanspruchung (links). Baumschraube nach Überlastung durch Querlast (rechts).

Baumschrauben besitzen i.d.R. einen Gewindeabschnitt und einen sogenannten Umwallungsabschnitt. Letzterer wird durch das sekundäre Wachstum (vorschreitendes Dickenwachstum) und durch die Bildung von Reaktionsholz (Kallus) umwallt. Die Umwallung bewirkt einen Wundverschluss des Bohrloches für den Gewindeabschnitt und sorgt weiterhin für eine deutlich größere Auflagefläche bei Querkraftbeanspruchung (größere Querkrafttragfähigkeit durch Abstützung).

Zur Verhinderung der vollständigen Überwallung kommen zwei Konzepte zum Einsatz: die Schaffung einer Verlängerungsmöglichkeit oder die initiale Ausbildung eines langen Umwallungsabschnittes, welcher während der geplanten Nutzungsdauer genügt. Lange Umwallungsabschnitte führen allerdings zu einer großen Lastexzentrizität zwischen Verankerung und Lasteinleitungsstelle, was mit größerem Biegemoment einhergeht.

Für eine minimalinvasive Vorgehensweise sind kleine Gewindedurchmesser und kleine Lastexzentrizitäten zu präferieren, was die Notwendigkeit einer Verlängerungsmöglichkeit impliziert.

Müssen Baumschrauben von Beginn an große Querkräfte übertragen, kann ein Formschluss zwischen Umwallungsbereich und Holzmatrix durch eine Bohrung mit d_2 hergestellt werden, vgl. Abb. 69.

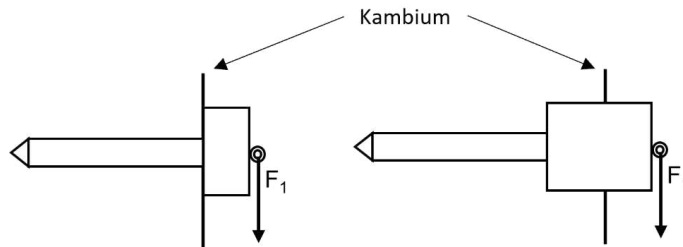


Abbildung 69: Ist die minimalinvasive Vorgehensweise (links) nicht ausreichend tragfähig, kann durch das initiale Einbringen des Umwallungsabschnitts (rechts) eine erhebliche Verstärkung herbeigeführt werden.

Stand der Technik für Baumschrauben

Die erste nachweisbare Verwendung von Baumschrauben geht auf die „World Treehouse Conference“, die jährlich in Takilma, Oregon (USA) stattfindet, im Jahr 1997 zurück. Auf dieser Konferenz treffen sich Planer und Ausführende, die sich mit dem Bau von Baumhäusern befassen, um Innovationen und Ideen zu präsentieren und diese gemeinsam zu diskutieren. Auf der Konferenz 1997 wurde eine Befestigung, bei der ein 76 mm dicker Stahlstift ins Kernholz eingebracht wurde, durch Jonathan Fair Oaks vorgestellt. Der Betreiber der Baumhausanlage in Takilma, Michael Garnier erkannte das Potential dieses Lösungsansatzes für den sich ein Standsicherheitsnachweis erbringen lassen könnte, um das Baugenehmigungsverfahren für den Bau von Baumhäusern zu vereinfachen. In den folgenden Jahren entwickelten Michael Garnier und der Ingenieur Charles Greenwood ein erstes Modell für eine Baumschraube, das unter dem Namen „Garnier-Schraube“ (Garnier-Limb®) bekannt wurde, vgl. Abb. 70. Die Ursprüngliche Version der Garnier-Schraube wurde aus rohem Stahl hergestellt [117]. Spätere Versionen werden in unterschiedlichen Materialien, wie Edelstahl, galvanisch verzinktem Stahl oder pulverbeschichteter Ausführung, sowie mit unterschiedlich langen Umwallungsabschnitten angeboten [118].

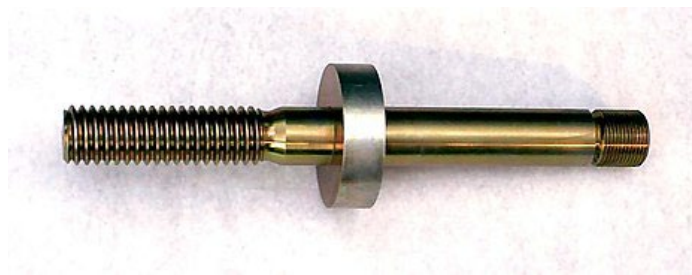


Abbildung 70: Garnier-Schraube aus gelb-verzinktem Stahl. Michael Garnier, CC-BY-SA 3.0.

Die Garnier-Schraube besteht aus Teilen: Dem Schaft, welcher an einer Seite ein Gewinde zur Zugverankerung im Holz und an der anderen Seite ein Gewinde für die Anbringung einer Lasteinleitungseinrichtung aufweist, sowie einer verdickten Unterlegscheibe, die auf den Schaft gesteckt wird und die Kontaktfläche zwischen Schraube und Holz vergrößert.

Eine Weiterentwicklung der Schrauben fand durch den deutschen Bauingenieur Vitus Wahlländer statt, der als Teilnehmer der „World Treehouse Conference“ im Jahr 2016 auf die Garnier-Schrauben aufmerksam wurde und Verbesserungspotential an der Konstruktion erkannte. Es folgten Eigenentwicklungen unter der Bezeichnung „GTS – German Treehouse Screw“ in unterschiedlichen Varianten. Ausgehend von einer sehr steifen Schraube, mit vergrößertem Querschnitt gegenüber der Garnier Schraube (GTS Allstar, Schaftdurchmesser 36 mm, Verdickung im Umwallungsbereich von 74 mm) [119] folgten kleinere Schrauben mit geringeren Abmessungen. Außerhalb von Deutschland werden die identischen Produkte auch unter der Bezeichnung „TAB – Treehouse Attachment Bolt“ vertrieben [60], vgl. Abb.71.



Abbildung 71: Baumschraube GTS-Allstar, Vitus Wahlländer, CC-BY-SA 4.0

Beide Systeme (Garnier-Schraube und GTS) verwenden zur Vermeidung der vollständigen Überwallung das Konzept von langen Baumschrauben, die während der geplanten Nutzungszeit nicht überwallt werden, was zu hohen Anforderungen an die Biegesteifigkeit und den Querschnitt führt. Eine Verlängerungsmöglichkeit ist nicht vorgesehen. Die Lasteinleitung erfolgt über Anschlusselemente aus Stahl, welche mit den Tragstrukturen der anzuschließenden Bauwerke verbunden werden.

Die in Abb. 72 gezeigte Produktpalette aus Baumschrauben und Anschlusselementen für verschiedene Nutzungsszenarien sind im Buch „Be in a Treehouse“ von Pete Nelson aufgeführt [60].

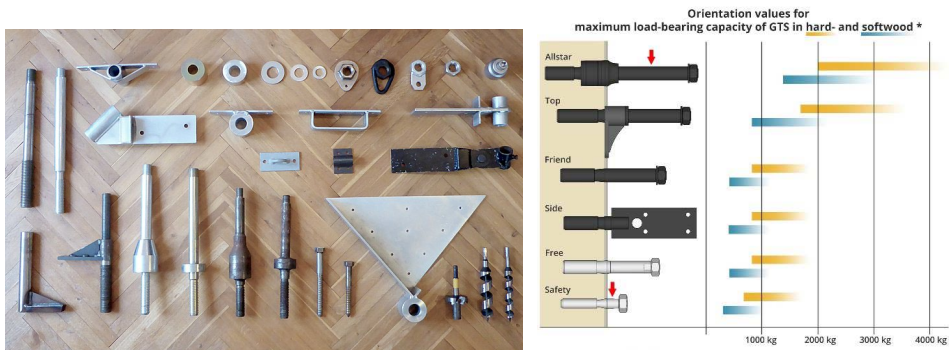


Abbildung 72: Produktsortiment von Baumschrauben und Anbauteilen der GTS Schrauben (links) und Vergleich der Tragfähigkeiten (rechts). Vitus Wahlländer, CC-BY-SA 4.0.

Baumschrauben, die den Ansatz der Einbringung eines kleinen Querschnittes und die Aufbringung der Belastung nahe am Stamm forcieren, sind durch zwei voneinander unabhängige deutsche Unternehmen entwickelt worden.

Unter der Marke b®abo der „Kletterwald Plochingen GmbH“ werden die „plo b®abo - Plochinger Baumbolzen“ vertrieben. Es werden unterschiedliche Baumbolzen aus Edelstahl, mit unterschiedlichen Gewindearten für Laub- und Nadelholz angeboten. Die Bohrdurchmesser liegen je nach Festigkeit des Holzes zwischen 20 mm und 22 mm. Die Gewindelängen werden in 100 mm und 160 mm angeboten. Die Umwallungsabschnitte weisen einen Durchmesser von 40 mm auf und sollen bei der Montage 10 mm tief eingesetzt werden. Ihre Länge beträgt typenabhängig 50 mm oder 70 mm. Zur Erzielung dieser Einbindetiefe ist je nach Dicken der Borke eine Perforation weiterer Gewebeschichten mit einem Durchmesser von 40 mm notwendig. Zusätzlich zu den Schrauben werden Verlängerungselemente, die kurz vor Überwallung der Schraube montiert werden können, sowie Anbindeelemente zum Anschluss von Stahlseilen an die Baumschraube angeboten. Auch ein Adapter zur Vergrößerung der Kontaktfläche (von 40 mm Durchmesser auf 60 mm Durchmesser) wird angeboten [120].

Baumschrauben, welche von Dipl. Des. Martin Zeller 2017 zum Patent angemeldet wurden, werden nicht mit festen Geometrien zum Verkauf angeboten. Sie werden abhängig vom Einsatzzweck durch die „Technische Überprüfungsgesellschaft mbH, Freiburg“ dimensioniert, vgl. Abb. 73.



Abbildung 73: Baumschrauben nach Patentanmeldung durch Martin Zeller in unterschiedlichen Ausführungen.

Für die Montage der Baumschrauben in Abb. 73 erfolgt zunächst eine Planfräsung der Borke im Durchmesser des Umwallungsabschnittes. Das Kambium soll dabei nicht beschädigt werden. Eine weitere, kleinere Bohrung für den Gewindeabschnitt folgt.

Die Auslegung der Länge des Umwallungsabschnittes erfolgt für den zu erwartenden Dickenzuwachs von 5 bis 10 Wachstumsperioden, sodass nach dieser Zeit die erste Verlängerung der Baumschraube notwendig wird. Die Lasteinleitung erfolgt über ein Innen- oder Außengewinde am Umwallungsabschnitt, an welchem Befestigungsmittel aus dem Bereich der Hebetchnik angebracht werden, um den Übergang zu Stahlseilen zu schaffen. Auch die direkte Schraubverbindung zu anschließenden Bauteilen ist umsetzbar [17, 121], vgl. Abb. 74.



*Abbildung 74: Direkte Verbindung von Baumschrauben in eine Umreifung an der zentralsymmetrischen Aussichtsplattform „Adlerhorst“, welche eine einzelne Weißtanne (*Abies alba*) als Tragstruktur nutzt.*

4.4. Tragfähigkeitsuntersuchung von Baumschrauben

Zur Verifikation der Tragfähigkeit von Baumschrauben wurden die Produkte von Dipl. Des. Martin Zeller in Kooperation mit der Juniorprofessur Befestigungstechnik einer Versuchsreihe unterzogen.

Konzeptionierung der Versuchsreihe

Die Versuchsreihe variiert die Winkel zwischen Baumschraube und Baumoberfläche sowie die Belastungsrichtung. Es werden Baumschrauben mit einer Gesamtlänge von 220 mm untersucht. Davon entfallen 140 mm auf den Schaft mit Gewinde, sowie 80 mm auf den Umwallungsabschnitt. Der Schaft weist eine Spitze ohne Gewinde auf um die Einbringung in den Baum zu erleichtern sowie ein 103,5 mm langes Trapezgewinde und einen 20 mm langen glatten Schafft mit ausgerundetem Übergang zum Umwallungsabschnitt.

Das Trapezgewinde hat einen Kerndurchmesser von 16 mm, einen Außendurchmesser von 20 mm und eine Gewindesteigung von 4 mm. Der Umwallungsbereich hat eine Länge von 80 mm und einen Durchmesser von 50 mm. Am Lastanschlusspunkt wird über ein M12 Innengewinde ein beweglicher Wirbel mit rundverschweißter Öse angebracht, vgl. Abb. 75.

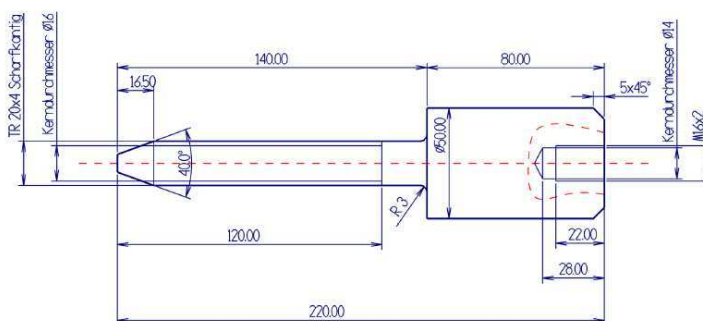


Abbildung 75: Baumschraube der Versuchsreihe.

Die Baumschrauben werden in ein Meter lange Stammabschnitte frisch geschlagener Rotbuche (*Fagus sylvatica*) eingebracht. In den Stammabschnitten wird mittels Planfräsung durch einen Forstnerbohrer ein kreisförmiger Abtrag von Borke und Bastschicht (Phloem) erzielt. In der Mitte dieses Abtrags erfolgt eine Sacklochbohrung mit dem Kerndurchmesser des einzubringenden

Gewindeschafes (16 mm). Der Versuchskörper wird in einer winkelverstellbaren Rahmenkonstruktion gegen den Boden verspannt. Die Einleitung der Zug-Prüfkraft wird durch eine vertikal wirkende servohydraulische Prüfmaschine mit einem weggesteuerten Prüfverfahren mit 5 mm/min erzeugt. Durch die variable Einspannrichtung lassen sich Abweichungen der Zugkraft F von der radialen Einbringrichtung um den Winkel β im Intervall [0°; 30°] und Winkel zwischen Lastrichtung und Schraubenachse α im Intervall [0° ; 90°] erzielen, vgl. Abb. 76.

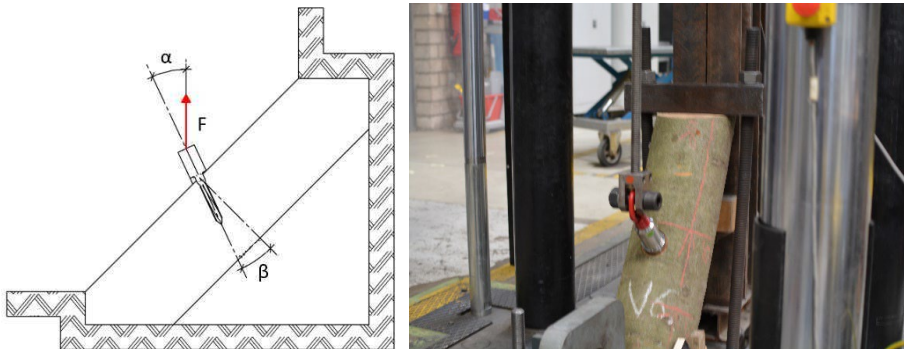


Abbildung 76: Darstellung des Versuchsaufbaus zur Tragfähigkeit von Baumschrauben.

Die Versuchsreihe betrachtet insgesamt 13 Konfigurationen, vgl. Tab. 9. Bei sämtlichen Versuchen mit $\alpha = 0^\circ$ (axialer Auszug) blieben die Baumschrauben unbeschädigt und konnten für weitere Versuche wiederverwendet werden.

Tabelle 9: Parameter und Anzahl der Versuche

Versuchs- konstellationen		Lastwinkel				
		0°	30°	45°	60°	90°
Einbring- richtung	0°	1	-	1	1	2*
	15°	1	-	2**	-	-
	30°	1	2**	2**	-	-

* ein Versuch mit vergrößerter Auflageplatte zur Erzeugung einer zusätzlichen Abstützungskraft

** jeweils ein Versuch mit zyklisch aufgebrachtener Be- und Entlastung

Durchgeführt wurden drei Versuche unter axialem Auszug mit jeweils unterschiedlichen Winkeln β zwischen Schraubenachse und radialer Richtung, zwei Versuche unter reiner Querkraftbeanspruchung ($\alpha = 90^\circ$), sowie sieben Versuche unter kombinierter Normal- und Querkraftbeanspruchung. Unter reiner Querkraftbeanspruchung wurde einer der beiden Versuche mit Unterlage einer zusätzlichen Stahlplatte durchgeführt, um die Wirkung zusätzlicher Gegenkräfte an der Baumoberfläche zu aktivieren. Bei drei Versuchen wurde die Last zyklisch erhöht, um inelastisches Verhalten deutlicher zu identifizieren. Die Ermittlung der Verdrehung erfolgt über die Methode der digitalen Bildkorrelation (DIC) mittels aufgebrachtem Sprecklemuster.

Für die Konfigurationen mit Winkel $\beta = 15^\circ$ bzw. $\beta = 30^\circ$, werden Keilscheiben aus Stahl, vgl. Abb. 77, zwischen Schraube und Holz angeordnet, um einen gleichmäßigen Anpressdruck zwischen Umwallungsstück und Holz zu realisieren.

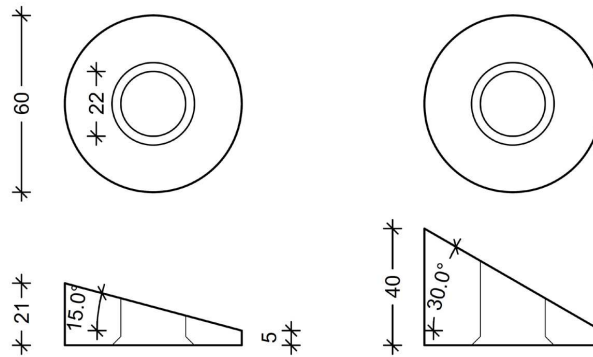


Abbildung 77: Keilscheiben zur Unterlage geneigter Konfigurationen bzgl. der Baumoberfläche.

Die Keilscheiben verkürzen die mittlere Schaftlänge im Holz um 13 mm ($\cong 12,6\%$) bei einer Neigung von $\beta = 15^\circ$ und um 22 mm ($\cong 21,3\%$) bei einer Neigung von $\beta = 30^\circ$.

Axiale Beanspruchung

Bei axialer Beanspruchung der Baumschraube mit $\alpha = 0^\circ$ zeigt sich ein veränderlicher Auszieh Widerstand durch die Richtungsabweichung zwischen Schraubenachse und Holzfasern, vgl. Tab. 10.

Tabelle 10: Auszieh Widerstände unter verschiedenen Einbringungsrichtungen β

Einbringungsrichtung	0°	15°	30°
Auszieh Widerstand	58 kN	51 kN	47 kN

Das Last-Verformungs-Diagramm, vgl. Abb. 78, weist für alle drei Konfigurationen eine ähnliche Charakteristik auf. Es kommt zu einem nahezu linearen Anstieg der Lastkurve bis zum Erreichen des Auszieh Widerstandes. In der Baumschraube wird die Streckgrenze von $35,5 \text{ N/mm}^2$ bei den vorliegenden Auszieh Widerständen nicht erreicht, sodass sich die Schraube elastisch verhält und nach dem durchgeführten Versuch wiederverwendet werden kann. Die Ausbildung eines plastischen Normalkraftgelenkes ist ab einem Auszieh Widerstand von

$$N_{pl} = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot f_{y,k} = 2,01 \text{ cm}^2 \cdot 35,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 71,4 \text{ kN} \quad (12)$$

zu erwarten.

Nach dem Erreichen des Auszieh Widerstandes folgt ein abrupter Rückgang der Prüflast. Mit zunehmendem Herausziehen der Baumschraube aus der Holzmatrix nimmt die Prüfkraft weiterhin ab.

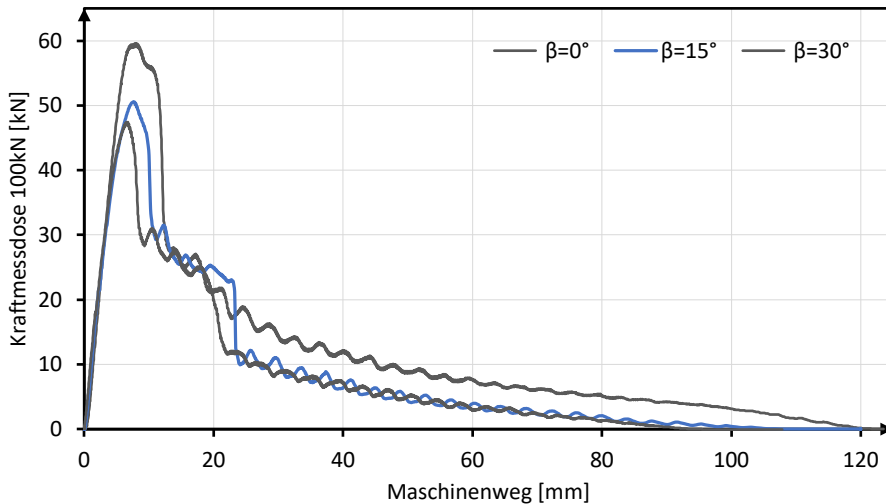


Abbildung 78: Last-Verformungs-Diagramm für die Ausziehversuche mit $\alpha=0^\circ$.

Der primäre Versagensmechanismus bei dieser Konfiguration ist das Abscheren der Holzmatrix im selbstfurchenden Gewinde zurückzuführen, vgl. Abb. 79. Nach dem Abscheren erbringt die Holzmatrix noch einen Reibungswiderstand, was sich die Resttragfähigkeit erklärt.



Abbildung 79: Baumschraube nach dem axialen Ausziehversuch

Zur Bewertung der Tragfähigkeit wird in Tab. 11 die Verkürzung des Schaftes in der Holzmatrix durch Keilscheiben berücksichtigt. Darin sind die längenbezogenen Ausziehfestigkeiten angegeben, wobei die wirksame Gewindelänge bei den geneigten Schrauben um 12,6 % bzw. 21,3 % kürzer ist.

Tabelle 11: Längenbezogene Ausziehfestigkeit beim axialen Ausziehversuch

Einbringungsrichtung	0°	15°	30°
Längenbezogener Ausziehwiderstand	5,61 kN/cm	5,64 kN/cm	5,77 kN/cm

Unter Berücksichtigung dieser Längenkompensation weisen die zur Oberfläche geneigten Schrauben einen geringfügig höheren Widerstand auf, was darauf hindeutet, dass das Abscheren der Holzfasern als primärer Versagensmechanismus etwas verzögert wird. Die Unterschiede sind aber so gering, dass sich daraus keine Empfehlung ableiten lässt. Umgekehrt ist aber festzustellen,

dass für diese Art der Schraubennutzung, die Verankerungslänge in der Holzmatrix entscheidend ist, da sich diese auf den Ausziehwiderstand proportional auswirkt. Es wird also die Scherfläche über die gesamte Gewindelänge bis in tiefere Holzschichten aktiviert.

Reine Querbeanspruchung

Konfigurationen unter reiner Querbeanspruchung ergeben sich unter einem Lastwinkel von $\alpha = 90^\circ$. Die hier aufgebrachte Querkraft hat einen Hebelarm von 12,5 cm zur plangefrästen Oberfläche des Holzkörpers, so dass sich ein Biegemoment M_E von mindestens

$$M_E = F_E \cdot \sin(\alpha) \cdot 12,5[\text{cm}] = F_E \cdot 12,5[\text{cm}] \quad (13)$$

Im Gewindeabschnitt ergibt.

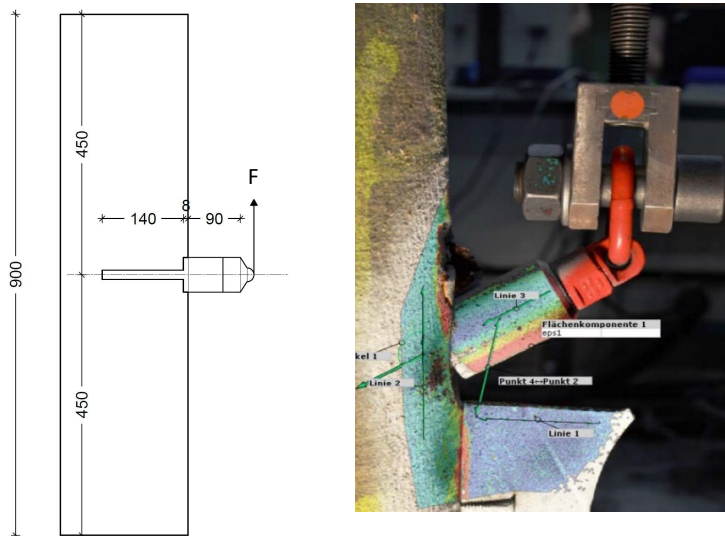


Abbildung 80: Darstellung der Versuchskörper mit Vermaßung (links) sowie exemplarisches Bild der Verformung unter reiner Querbeanspruchung (rechts).

Im Kerndurchmesser $d = 16$ mm liegt das ideale plastische Widerstandsmoment

$$M_{pl} = w_{pl} \cdot f_{y,k} = 0,68 \text{ cm}^3 \cdot 35,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 24,10 \text{ kNcm} \quad (14)$$

vor. Dies impliziert für $\alpha = 90^\circ$ bereits ab $F_E = 2$ kN plastische Effekte im Gewindeabschnitt. Im last-Verformungsdiagramm, vgl. Abb. 80, ist allerdings erst bei ca. $F_E = 4$ kN eine signifikante Veränderung des initialen Tangentenmoduls zu erkennen. Obwohl dieser bei $F_E = 4$ kN wesentlich flacher wird, nimmt die Verdrehung des Umwallungsabschnittes nahezu linear bis zu $F_E = 23$ kN zu.

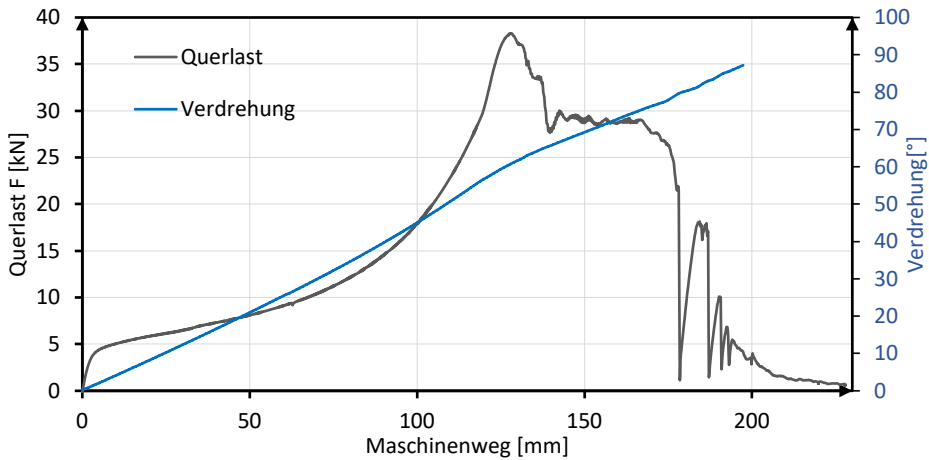


Abbildung 81: Last-Verformungs-Diagramm für die reine Querbeanspruchung $\alpha=90^\circ$, $\beta=0^\circ$.

Dieses Verhalten lässt sich mit einer Abstützkraft am Rand des Umwallungsabschnittes begründen, welche dem Biegemoment aus Lastexzentrizität entgegenwirkt. Diese Abstützkraft baut zugleich eine Zugkraft $Z = -D$ im Schaft der Baumschraube auf. Das Hebelverhältnis der Abstützkraft ist im Verhältnis zur Hebellänge der Lastexzentrizität klein ($b/a = 2,5 \text{ cm}/12,5 \text{ cm} = 0,2$), vgl. Abb. 81.

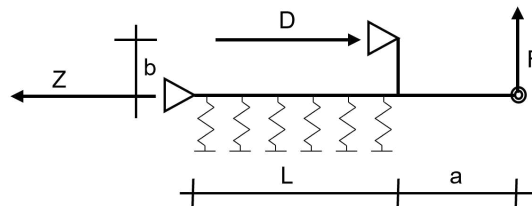


Abbildung 82: Einfaches Tragmodell zur Erfassung der Abstützkraft D .

Durch die geringe Druckfestigkeit des Holzes quer zur Faser kommt es an der Abstützung zum Querdruckversagen in der Holzmatrix, so dass die Verdrehung des Umwallungsabschnittes zwar behindert, aber nicht verhindert wird, was die kontinuierliche Zunahme der Verdrehung in Abb. 82 erklärt. Da diese Rotation den Lastwinkel α und damit das Moment M_E verändert, lässt sich der Anstieg des Kraftwiderstandes in Abb. 82 ab ca. 50 mm Maschinenweg erklären.

Die Verdrehung des Umwallungsabschnittes kann bis zu einem Winkel von 60° mit ansteigendem Widerstand beobachtet werden, bis es bei einer Verdrehung oberhalb von 60° zu einem Abfallen der Tragfähigkeit kommt.

Der Gewindeabschnitt bildet durch plastische Verformung eine gekrümmte Form, vgl. Abb. 83, so dass dieser auch nach dem Abscheren der Fasern in den Gewindegängen einen höheren Reibungswiderstand als in Kap. 4.4 zeigt



Abbildung 83: Schädigung der Holzmatrix (links) und bleibende Verformung der Baumschraube (rechts) nach der reinen Querbeanspruchung.

Die Beschädigung der Holzmatrix für bereits kleine Querlasten, limitiert die bautechnische Nutzung von Baumschrauben. Auch wenn eine akzeptable Traglast von ca. 38 kN durch plastische Verformung erzielt wird, sind Kriterien der Gebrauchstauglichkeit sowie die Unversehrtheit der Holzmatrix nicht eingehalten.

Um die Beschädigung der Holzmatrix zu reduzieren, wird in einer weiteren Konfiguration eine kraftverteilende Abstützplatte zwischen Umwallungsabschnitt und Baumoberfläche vorgesehen. Die Platte ist 20 mm dick und deren Geometrie ist in Abb. 84 spezifiziert.

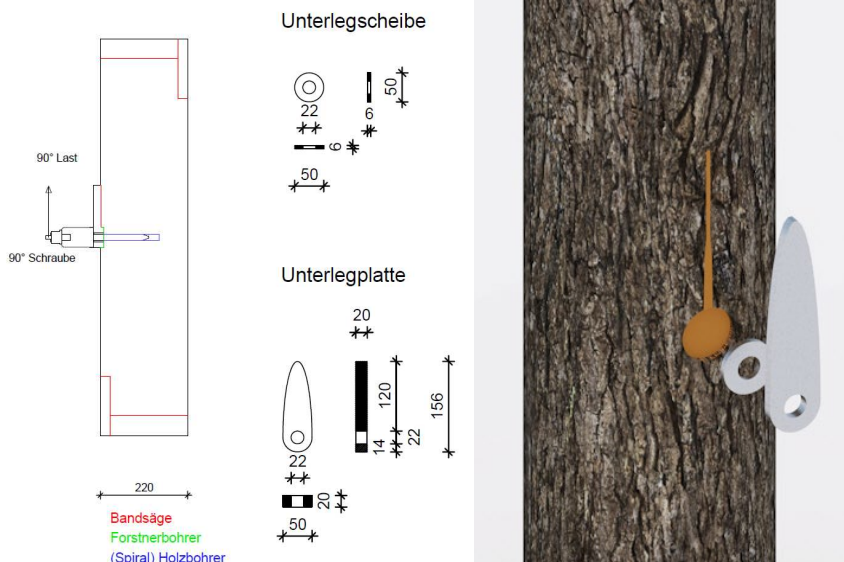


Abbildung 84: Versuchs Aufbau und Geometrie der Abstützplatte auf dem Probekörper.

Die Abstützplatte hat eine Bohrung mit 22 mm Durchmesser, wodurch sich für den Gewindeabschnitt der Baumschraube ein Lochspiel von 2 mm ergibt. Der Abstand zwischen Schraubenachse und Spitze der Abstützplatte liegt mit 131 mm in der Größenordnung der Lastexzentrizität von $a = 125$ mm.

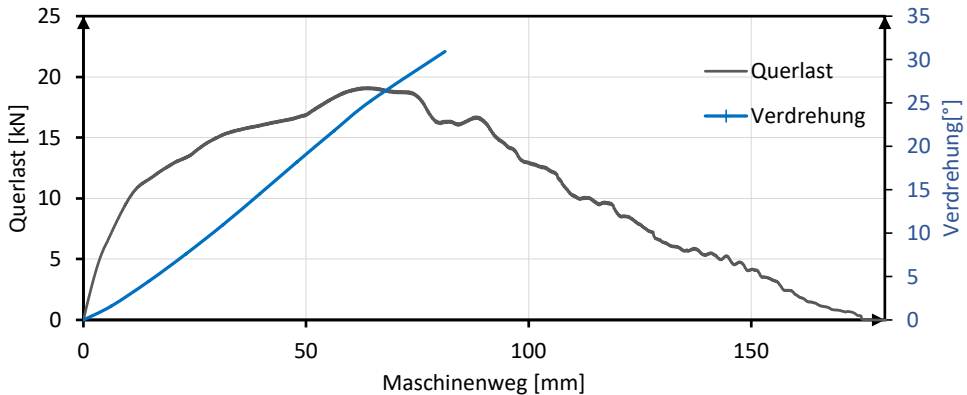


Abbildung 85: Reine Querkraftbeanspruchung mit zusätzlicher Abstützung durch Unterlegplatte.

Bis zu einer Belastung von 6 kN ist die Last-Verschiebungskurve näherungsweise linear und es lassen sich an den Prüfkörpern weder Schäden noch plastische Effekte erkennen. Dies entspricht dem 1,5-fachen Wert im Vergleich zu den Versuchen in Kap. 4.4 (ohne zusätzliche Platte).

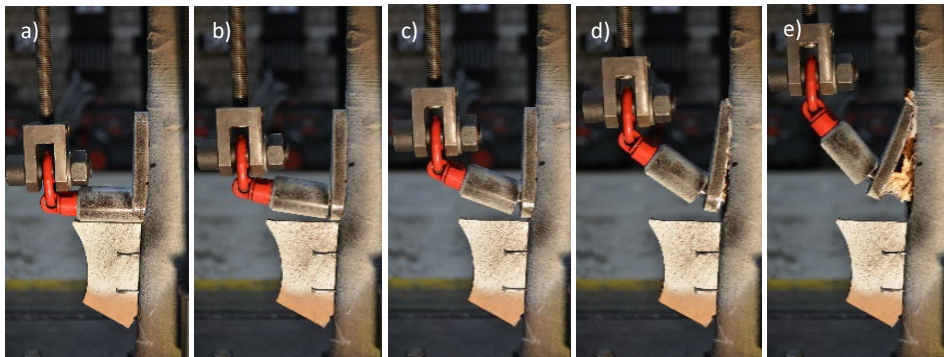


Abbildung 86: Baumschraube mit Abstützplatte unter Querkraftbelastung, a) $F = 0$ kN, b) $F = 14$ kN, c) $F = 17$ kN, d) $F = 14$ kN, e) $F = 8$ kN.

In Abb. 85 ist der Verlauf der Deformation zu sehen. Bereits bei Belastungen ab 6 kN kommt es zu einer Spaltöffnung zwischen Baumschraube und Unterlegplatte. Durch die Abstützung des Umwallungsabschnittes wird die Baumschraube sehr bald aus der Holzmatrix herausgehoben, was wiederum zum Abscheren von Fasern im Gewindegang sowie und plastischen Verformungen im Gewindeabschnitt führt. Somit ist die Wirkung einer derartigen Modifikation als nicht zielführend zu bewerten und wird nicht weiterverfolgt.

Kombinierte Beanspruchung

Die Ergebnisse für $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ sind in Abb. 87 dargestellt. Drei Versuche werden mit zyklischer Aufbringung der Last durchgeführt. In jedem Zyklus wird die Last um $\Delta F_E = 5 \text{ kN}$ erhöht. Der Versuch wird weggesteuert durchgeführt, wobei die Zyklen mit 5 mm/min durchfahren werden. aufgebracht und mit gleicher Entlastungsgeschwindigkeit wieder vollständig entlastet. Abb. 95 zeigt das Ergebnis der zyklischen und direkten Lastaufbringung für den Fall $\beta = 30^\circ$ und $\alpha = 60^\circ$. Es ergibt sich die Zug- und Querbelastung zu

$$\begin{aligned} N_E &= \cos(30^\circ) \cdot F_E = 0,87 F_E, \\ Q_E &= \sin(30^\circ) \cdot F_E = 0,5 F_E. \end{aligned} \quad (15)$$

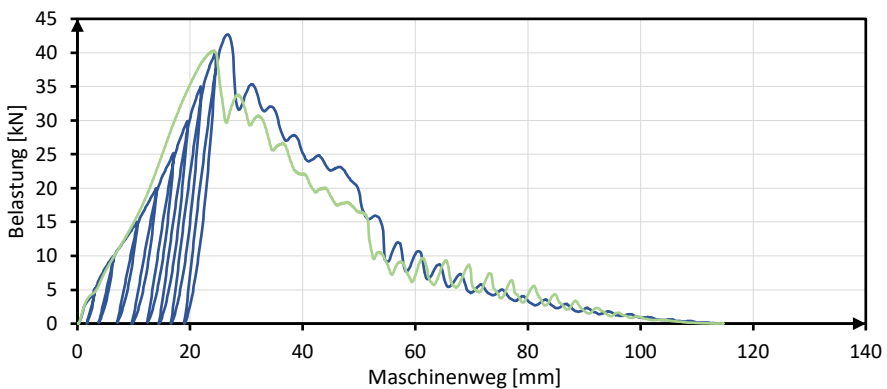


Abbildung 87: Last-Verformungs-Diagramm für beispielhaften Belastungsversuch $\alpha=60^\circ$, $\beta=30^\circ$, mit direkter und zyklischer Lastaufbringung.

Die Ergebnisse der zyklischen Belastung zeigen in Abb. 88, dass sich bereits bei kleinen Lasten plastische Deformationen ausbilden, welche mit jedem Zyklus anwachsen. Die Deformation geht mit der Veränderung des Winkels zwischen Schraubenachse und Last einher, wodurch sich die Lastexzentrizität verringert und die Verringerung der plastischen Deformationsinkremente pro Zyklus begründet.

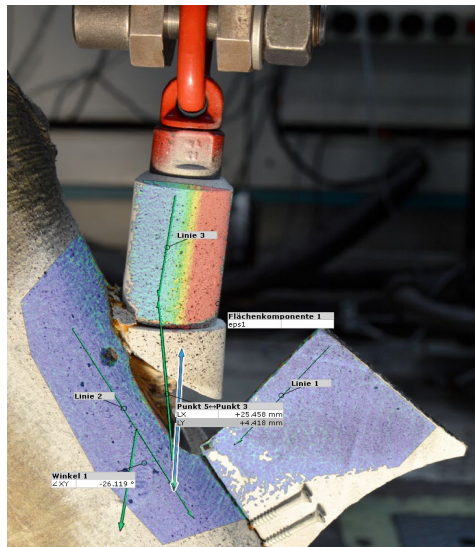


Abbildung 88: Belastungsversuch für $\alpha=60^\circ$, $\beta=30^\circ$ mit dem bereits verdrehten Umwallungsabschnitt

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich in sämtlichen Konfigurationen Schwachpunkte in der Lastübertragung finden. Unter reiner Zugbeanspruchung tritt ein sehr plötzliches Versagen auf, so dass die Bemessung hinreichend Abstand zur Traglast einhalten muss und die Baumschraube entsprechend stark zu dimensionieren ist, was dem minimalinvasiven Eingriff in die Holzmatrix widerspricht. Im Falle anteiliger oder voller Querbeanspruchung treten Schäden an der Holzmatrix schon unter geringer Belastung auf, so dass der Handlungsbedarf noch größer ist, um die Baumschraube für professionelle Anwendungen nutzen zu können.

4.5. Entwicklung eines Koppel-elementes für zwei Baumschrauben

Um dem Biegemoment durch Lastexzentrizität a bei Querbeanspruchung von Baumschrauben entgegenzuwirken, werden in der Holzmatrix zwei Lagerpunkte mit hinreichend großem Abstand H benötigt, um ein entgegengerichtetes Kräftepaar aufzubauen. Sieht man in jedem dieser Lagerpunkte eine Baumschraube vor, kann durch deren biegefesten Kopplung ein statisch unbestimmtes System mit damit verbundenen Redundanzen erreicht werden, vgl. Abb. 89.

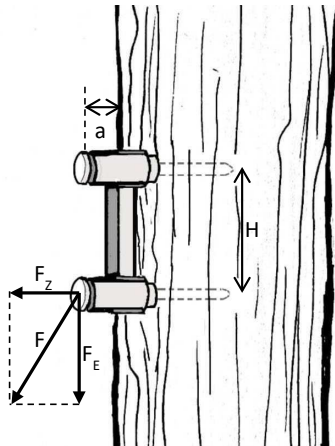


Abbildung 89: Seitliche Ansicht zur Darstellung der Grundidee der biegefesten Kopplung zweier Baumschrauben.

Das Biegemoment aus Lastexzentrizität F_E lässt sich mit dieser Grundidee über ein axiales Kräftepaar in den beiden Baumschrauben ins Gleichgewicht stellen. Liegt die Belastung F wie in Abb. 89 vor, erzeugt F_E eine axiale Zugkraft in der oberen Schraube und axiale Druckkraft in der unteren Schraube, was sich mit F_z günstig überlagert.

Ausgestaltung der biegefesten Kopplung

Da Baumschrauben in der Wachstumsperiode des Baumes mit Kallusgewebe umwallt werden, nimmt deren Tragfähigkeit mit der Zeit zu und wirkt u.a. einer Ermüdung im Gewindeabschnitt vor. Jedoch muss einer vollständigen Umwallung vorgebeugt und die Baumschraube nach gegebener Zeit verlängert werden. Diese Eigenschaft soll auch bei der Kopplung zweier Baumschrauben erhalten bleiben.

Somit muss die Kopplung durch ein Element mit ggf. aktivierbarer Kinematik umgesetzt werden. Diese Anforderung lässt sich durch zwei parallele, kreisförmige Hülsen und einem sie verbindenden Profil erfüllen, vgl. Abb. 90. Die beiden Hülsen lassen sich mit kleinem Lochspiel zum Außendurchmesser der Umwallungsabschnitte der Baumschrauben fertigen. Der Formschluss zwischen Hülse und Umwallungsabschnitt ermöglicht die Übertragung von Querkraft und Biegemoment. In Schraubenlängsrichtung wirken die Bauteile jedoch wie ein Normalkraftgelenk. Da aber auch Normalkräfte in die Baumschrauben zu übertragen sind, müssen diese über eine zusätzliche, lösbare Stirnplatte übertragbar werden, vgl. Abb. 90.

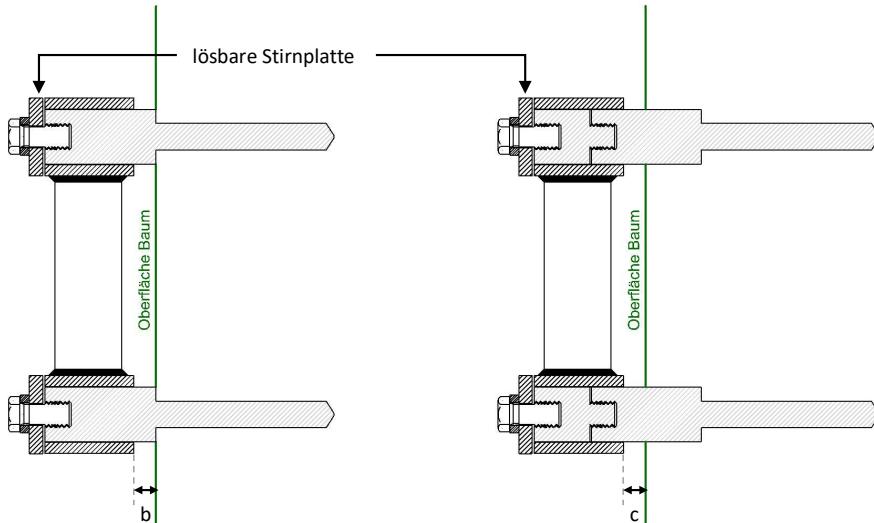


Abbildung 90: Prinziplösung für ein wachstumscompatibles Koppellement für Baumschrauben im Einbauzustand (links) und nach vorangeschrittener Umwallung und Verlängerung (rechts).

Zwischen Koppellement und Baumoberfläche wird für die Erstmontage ein Abstand b vorgesehen. Ist dieser Abstand b durch das Dickenwachstum aufgebraucht, muss der Anschluss temporär entlastet werden, um die Stirnplatte zu lösen, Verlängerungsstücke auf die Umwallungsabschnitte aufzubringen und das Koppellement auf erneute Distanz c zur Baumoberfläche zu bringen. Der Abstand c kann prinzipiell größer ausgelegt werden als bei Erstmontage, da die Baumschraube nun teilweise umwallt ist und damit eine höhere Belastbarkeit gegen Querlast und Lastexzentrizität (Biegemoment) besitzt.

Statisches System zur Traglastanalyse

Die Holzmatrix lagert den Gewindeabschnitt der Baumschraube zunächst elastisch, bis sich Schädigungen in der Druckzone einstellen. Der Elastizitätsmodul der Rotbuche ist Faserrichtung bei ca. 6000 N/mm^2 im Vergleich zum Stahl der Baumschraube mit einem E-Modul von $E_S = 200.000 \text{ N/mm}^2$ deutlich nachgiebiger. Daher kann ein einfaches Traglastmodell den Kontakt zwischen Baumschraube und Holzmatrix durch elastische Bettung quer zur Baumschraube approximieren. Geht man von einer ausreichenden Verankerungslänge des Gewindes in der Holzmatrix aus, wird das Herausziehen der Schraube hinreichend verhindert, was im Modell durch ein horizontales Lager approximierbar ist.

Werden die Hülsen mit einem Verbindungsprofil biegefest verbunden, liegt der Rahmen in Abb. 91 vor. Das Modell wird zweidimensional in Wirkebene der Kraft betrachtet und ist mehrfach statisch unbestimmt. Eine Bestimmung der statischen Unbestimmtheit ist bei elastischer Bettung über Abzählformel nicht möglich, es kann jedoch gesagt werden, dass eine kinematische Kette im vorliegenden System mindestens vier zusätzliche Gelenke benötigt, sofern sich keine kinematische

Kette durch drei Gelenke auf einer Linie ausbildet. Dies impliziert, dass der freie Teil des Rahmens, welcher nicht elastisch gebettet ist, dreifach statisch unbestimmt ist.

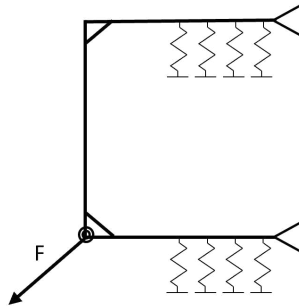


Abbildung 91: Traglastmodell zweier biegesteif gekoppelten Baumschrauben.

Somit wird das System in Abb. 91 eine höhere Traglast unter Ausnutzung plastischer Reserven gegenüber elastischer Bemessung erreichen. Da die weiche Holzmatrix die Ausbildung plastischer Deformation in der Baumschraube zulässt und somit Rotationskapazität in Fließzonen bzw. Gelenken vorliegt, vgl. Kap. 4.4 ist die plastische Traglastermittlung zulässig.

Explizite Auslegung des Anschlusselementes

Der Abstand der beiden Baumschrauben wird auf $H = 25\text{ cm}$ festgelegt. Dies entspricht etwa dem 15-fachen Durchmesser des Schraubengewindes, was dem 3-fachen Wert des Mindestabstands von Verbindungsmitteln in Holz parallel zur Faser nach EC 5 [26] entspricht. Diese Anforderung ergibt sich aus der Spaltzugfestigkeit der Holzmatrix, welche durch die runde Form des Verbindungsmittels beansprucht wird vgl. Kap. 4.4.

Die weiteren Geometrieparameter, wie z.B. die Abmessungen der Lasteinleitungslasche ergeben sich aus geometrischen Anforderungen der anschließenden Stahlseile, vgl. Abb. 92.

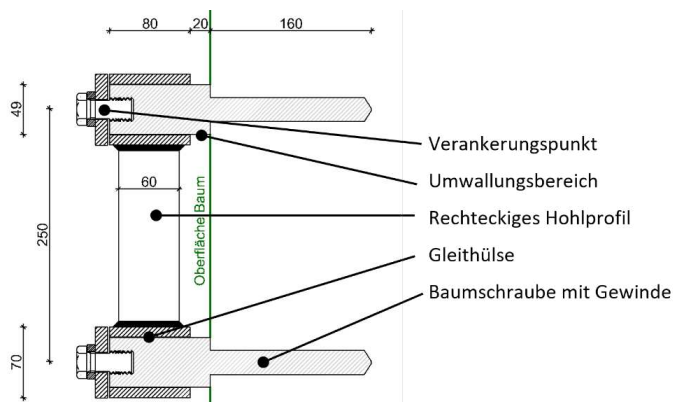


Abbildung 92: Geometrische Spezifikationen zur Kopplung zweier Baumschrauben.

Eine erste Analyse der Lastabtragung wird durch das oben vorgestellte 2D Rahmenmodell durchgeführt. Sowohl die Baumschrauben als auch das Koppellement können durch Balkenelemente und Querschnittsattribute abgebildet werden. Für die Holzmatrix werden 2D Scheibenelemente im ebenen Verzerrungszustand eingesetzt. Diese Art der Modellierung führt zu einem einfachen Simulationsmodell, welches das Tragverhalten des Koppellementes primär abzuschätzen kann.

Sowohl die Holzmatrix als auch die Stahlbauteile werden in diesem vereinfachenden Modell durch bilineare Materialmodelle erfasst. Stahlbauteile erhalten ein isotropes, elasto-plastisches Verhalten mit dem Elastizitätsmodul $E = 200.000 \text{ N/mm}^2$, der Querkontraktion $\nu = 0,3$, eine Streckgrenze von $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$ sowie dem Verfestigungsmodul $E_p = 2,0 \text{ N/mm}^2$.

Die Modellierung der Holzmatrix erfolgt über ein isotropes Materialmodell mit Spannungsversagenshypothese nach von Mises, vgl. Abb. 93. Die Vereinfachung auf isotropes Material ist eine Vereinfachung, da überwiegend Spannungen in Faserlängsrichtung am Tragmechanismus beteiligt sind. Der Elastizitätsmodul wird auf $E = 3.000 \text{ N/mm}^2$ gewählt, was der Hälfte des im Druckversuch am grünen Holz bestimmten Elastizitätsmoduls entspricht. Dies wird damit begründet, dass im realen Zustand nur Druck-Kontaktkräfte übertragen werden, im Modell aber auch Zug im Kontakt zwischen Balkenelementen (Stahl) und Flächenelementen (Holzmatrix) zugelassen wird. Auch für die maximalen aufnehmbaren Spannungen werden unter Druckbelastung 32 N/mm^2 angesetzt. Die Zugfestigkeit wird ebenfalls auf 32 N/mm^2 begrenzt, da die Zugkraftübertragung im Simulationsmodell mit der halben Materialsteifigkeit als Ersatzkraft für die halbierte Druckkraftübertragung angesetzt wird. Diese pragmatische Wahl ist ohne Verwendung von Kontaktelementen unumgänglich.

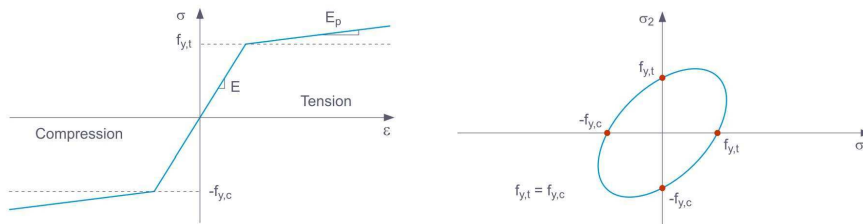


Abbildung 93: Materialmodell für grünes Holz der Rotbuche (links) mit Spannungsversagenshypothese nach der von Mises Fließhypothese (rechts).

Die Belastung des Anschlusselementes folgt der Richtung des Seiles. Für erste Untersuchungen wird zwischen Baum und Seil ein Winkel von 0° , 45° sowie 90° angenommen. In Abb. 94 ist das vereinfachte 2D Simulationsmodell zur Auslegung der Bauteile dargestellt.

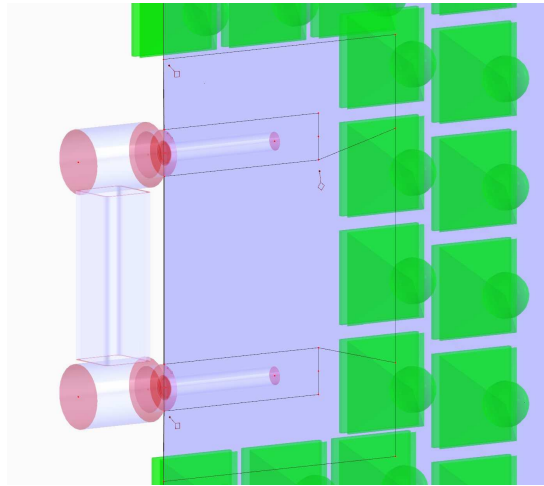


Abbildung 94: Darstellung des einfachen Simulationsmodells zur Kopplung zweier Baumschrauben.

Wahl des Lastangriffspunktes

Für den Lastangriffspunkt sollen nachfolgend drei Positionen diskutiert werden, um eine Empfehlung abzuleiten. Entscheidungskriterien sind die Maximierung der Tragfähigkeit sowie die Resilienz bei Überlastung.

Es wird die zentrische Lasteinleitung zwischen den Baumschrauben (a), die Lasteinleitung oberhalb (b) und unterhalb (c) der Baumschrauben diskutiert, was durch die Lage der Anschlusslasche in Abb. 95 zu sehen ist.

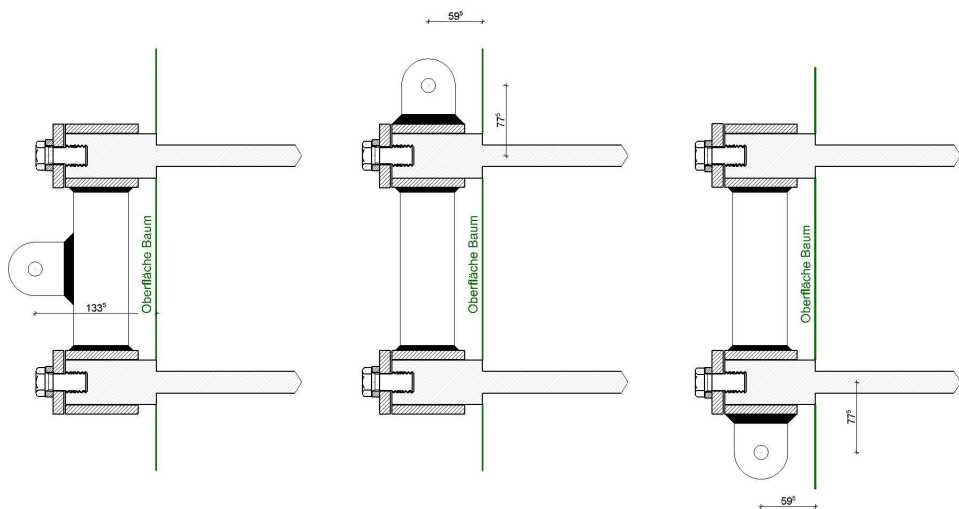


Abbildung 95: Variation der Position der Seillasche und damit des Lastangriffspunktes.

Unter einem Lastwinkel von 0° liegt eine Art der Normalkraftbeanspruchung $F_x = 40 \text{ kN}$ vor, reine Querbeanspruchung $F_z = 40 \text{ kN}$ unter einem Lastwinkel von 90° sowie die Kombination aus $F_x = 28,28 \text{ kN}$ und $F_z = 28,28 \text{ kN}$, was einer Gesamtlast von $F = 40 \text{ kN}$ unter einem Winkel von 45° entspricht. Die Normalkraftverläufe der drei Lastangriffspositionen und Lastwinkel sind in Abb. 96 dargestellt, die zugehörigen Biegemomente in Abb. 97.

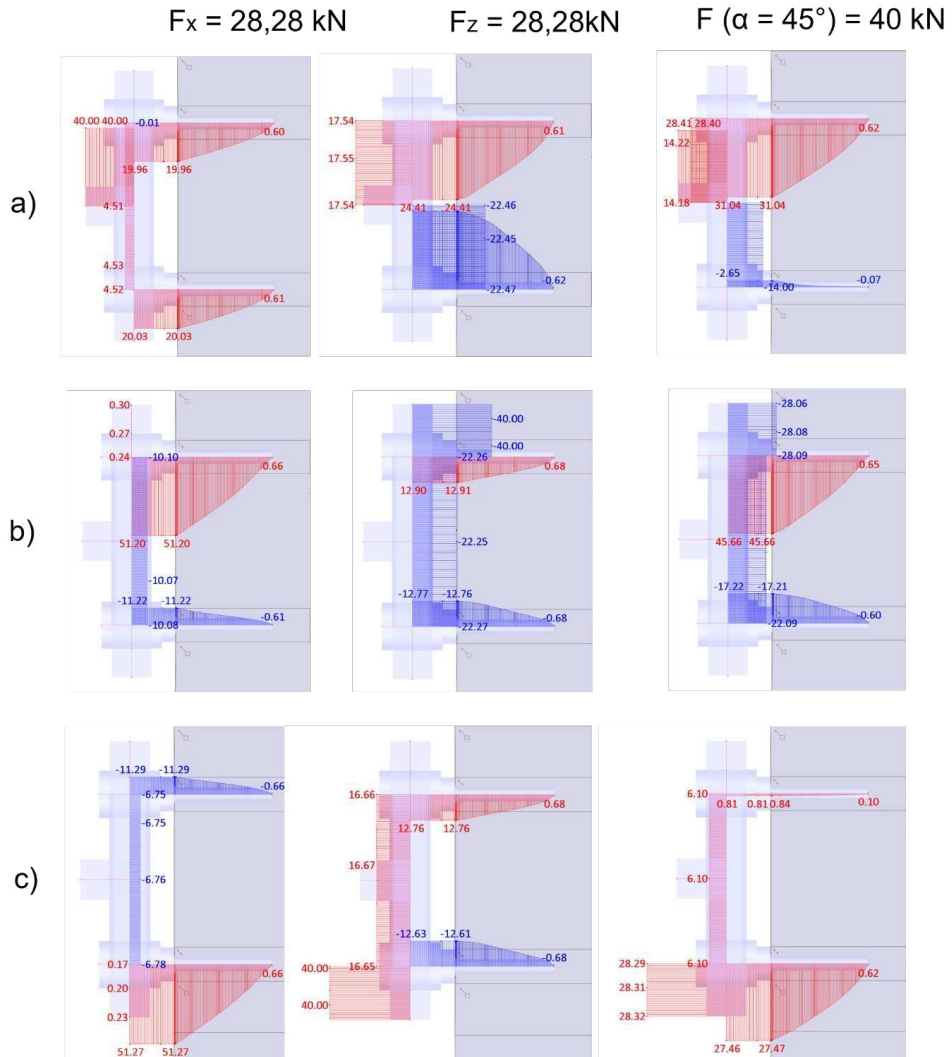


Abbildung 96: Normalkräfte im System für unterschiedliche Lasteinleitungspunkte und Lastrichtungen

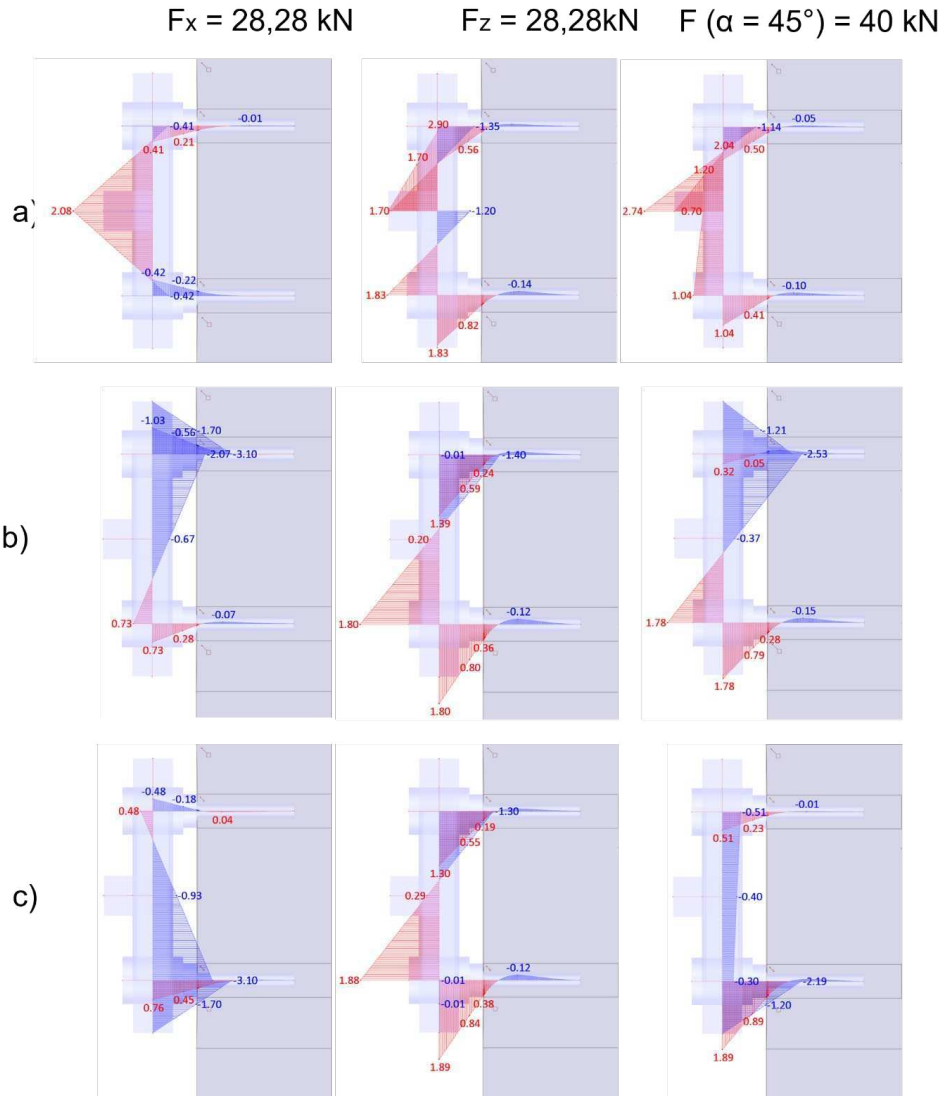


Abbildung 97: Biegemomente im System für unterschiedliche Lasteinleitungspunkte und Lastrichtungen

Die reine Querbeanspruchung F_z erzeugt in allen drei Systemen eine Zugkraft in der oberen Baumschraube sowie eine Druckkraft in der unteren Baumschraube. Für die Lasche in Position a) sind diese Kräfte aufgrund der größeren Lastexzentrizität größer, als in den Systemen b) und c). Bei Betrachtung des Seilwinkels $\alpha = 0$ sowie $\alpha = 45^\circ$ zeigen sich Vorzeichenunterschiede in der Normalkraft der Baumschrauben. So weisen die Varianten a) und b) unter kombinierter Belastung eine Zugkraft in der oberen Schraube und eine Druckkraft in der unteren Schraube auf, während einzig Variante c) eine Zugkraft in der unteren und eine Druckkraft in der oberen Schraube zeigt.

Durch die Kinematik des Systems bei Ausfall der zugbeanspruchten Baumschraube bringt einzig die Variante mit der Lastanordnung unterhalb der Baumschrauben eine zusätzliche Sicherheit durch eine Resttragfähigkeit im Falle des Versagens der zugbeanspruchten Baumschraube. In diesem Fall kommt es zu einer Schrägstellung des Koppелеlementes in Richtung der einwirkenden Last. In den Fällen a) und b) kommt es bei einem Versagen der zugbeanspruchten oberen Schraube zu einer Rotation des Koppелеlementes um 180° um die Achse der unteren Schraube. Dies führt zu großen Verschiebungen des angeschlossenen Seiles.

Wird das Herausziehen einer Baumschraube auf Grund der Belastung oder durch lokalen Zerfall der Holzmatrix (Zersetzung durch Pilze etc.) in die Diskussion mit einbezogen, besitzt die Lasteinleitung in Variante (c) einen Vorteil durch größere Resilienz.

Die Biegemomentenverläufe in Abb. 106 zeigen zudem, dass die Variante c) für die Lastrichtung $\alpha = 45^\circ$ die betragsmäßig geringsten Biegemomente. Dies führt zu einer geringeren Auslastung des Systems und zur Maximierung der Tragfähigkeit.

Daher wird für genauere Simulationsmodelle nur noch Variante c) untersucht.

Tragverhalten des Koppелеlementes

Das Tragverhalten des Koppелеlementes wird zunächst für einen Lastwinkel von $\alpha = 45^\circ$ weiter untersucht.

Die plastischen Querschnittstragfähigkeiten im Schaft der Baumschrauben ergeben sich zu

$$N_{pl} = A \cdot f_y = 0,8^2 \text{ cm}^2 \pi \cdot 35,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 71,4 \text{ kN} , \quad (16)$$

$$M_{pl} = w_{pl} \cdot f_y = \frac{16}{3\pi} \frac{\pi}{4} 0,8^3 \text{ cm}^3 \cdot 35,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 24,2 \text{ kNcm} = 0,242 \text{ kNm} .$$

In der Modellierung mit Balkenelementen lässt sich bei Laststeigerung die Ausbildung von Fließgelenken im System erkennen. Bei einer Belastung von $F = 30 \text{ kN}$ wird in der unteren Schraube das plastische Moment im Übergang zwischen Schaft und Umwallungsbereich erreicht und es kommt zur Ausbildung des ersten Fließgelenks. Wird die Belastung auf $F = 60 \text{ kN}$ gesteigert, dehnt sich die Zone plastischer Deformation in der unteren Schraube aus. Die elastische Bettung der Holzmatrix ist für die Ausbildung dieser Fließzone ursächlich. Bei weiterer Laststeigerung bildet sich auch ein Fließgelenk in der oberen Schraube.

Das Modell kann maximal $F = 78 \text{ kN}$ ins Gleichgewicht stellen, bis sich auch in der oberen Schraube die Fließzone weitet und zur Ausbildung einer kinematischen Kette im System kommt, was sich im Last-Verschiebungsdiagramm der Abb. 98 durch die abnehmende Steigung ankündigt.

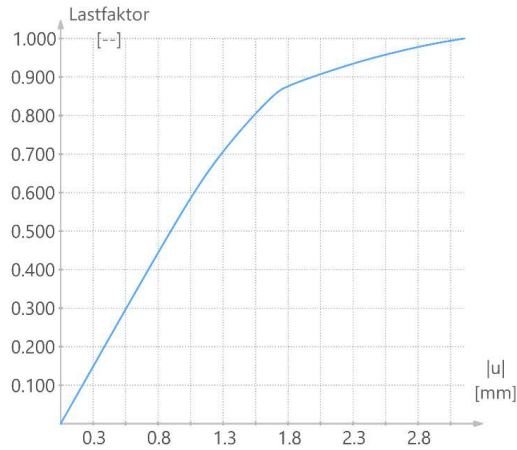


Abbildung 98: Last-Verschiebungskurve für die Simulation des Rahmens (Lastfaktor 1.0 entspricht $F = 78 \text{ kN}$).

Die Normalkraft im Schaft mit $N = 53,3 \text{ kN}$ unterhalb der Zugfestigkeit der Baumschraube von $N = 71,4 \text{ kN}$, vgl. Abb. 99. Die Länge der Baumschraube ist so groß gewählt, dass der Auszieh-widerstand die Zugfestigkeit Gewindes übertrifft, sodass es nicht zum Auszieh-versagen der Schraube kommen kann. Aufgrund der Biegemomentenbelastung in der unteren Schraube kann N_{pl} nicht erreicht werden, da die Interaktion der Normalkraft und des Biegemoments schon vorher zum Einsetzen des Fließprozesses führen.

Die in Abb. 99 dargestellten Krümmungen und die Überschreitungen der plastischen Spannungsgrenze in Abb. 100 der Schrauben bestätigt die Rotation um die ausgebildeten Fließgelenke. Dabei zeigt sich in der unteren Schraube die Ausdehnung der weiter im Holz liegenden Fließzone im Gegensatz zu den sich am Übergang zwischen Schaft und Umwallungsabschnitt ausbildenden Fließgelenken.

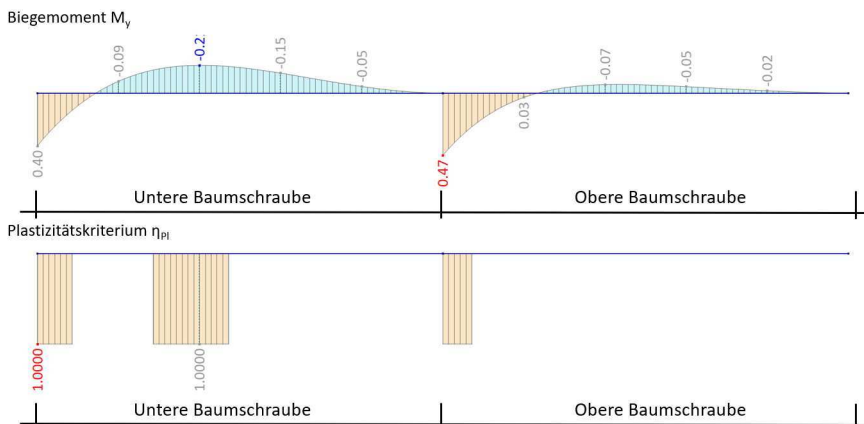


Abbildung 99: Biegemoment und Position des Fließens der beiden Baumschrauben bei $F = 78 \text{ kN}$.

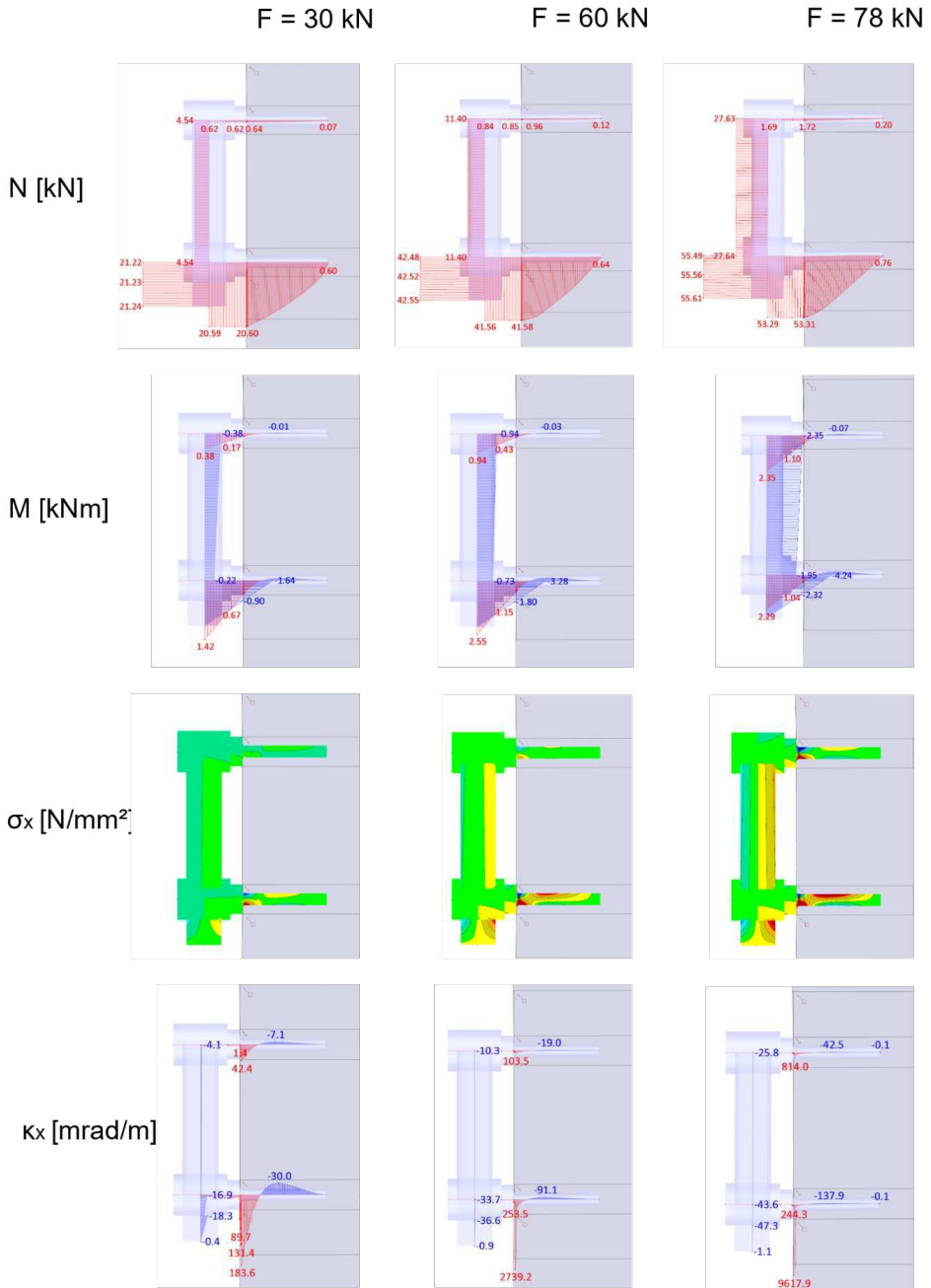


Abbildung 100: Schnittgrößen, Normalspannung sowie Krümmung in den Stabelementen des einfachen Modells zur Analyse der Traglast des Koppel-elementes.

Nachfolgend wird die Ausrichtung des Seiles und damit die Belastungsrichtung zwischen 0° und 90° variiert sowie die Traglast über ein Verformungskriterium in der Holzmatrix eingeschränkt. Dieses Verformungskriterium erlaubt eine akzeptable Spaltöffnung zwischen Schaft der Baumschraube und Holzmatrix in Höhe des Gewindeganges, welche 2 mm beträgt.

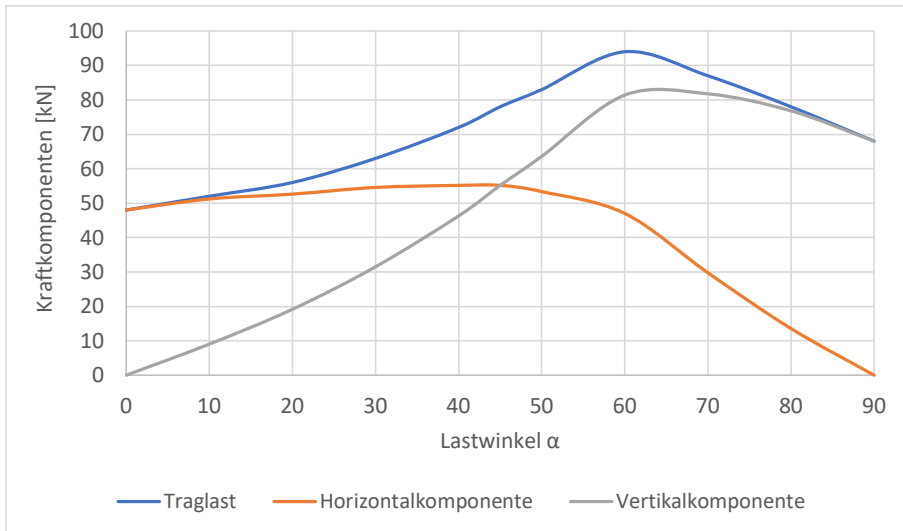


Abbildung 101: Tragfähigkeit des Koppelementes unter verschiedenen Lastwinkeln zur Horizontalen.

Die Studie ergibt das Ergebnis in Abb. 101. Dort lässt sich die höchste Belastbarkeit bei einem Lastwinkel von $\alpha = 60^\circ$ ablesen. In der Praxis wird der Lastangriffswinkel durch die mögliche Seilführung unter zahlreichen Nebenbedingungen festgelegt. Aus Abb. 101 geht aber klar hervor, dass der Anschluss für Lastwinkel zwischen $\alpha = 45^\circ$ und $\alpha = 80^\circ$ einen Seilzug von maximal 78 kN abdecken kann und dabei vertikale Kraftkomponenten von über 50 kN abträgt. Weiterhin ist aus Abb. 110 ersichtlich, dass steile Seilwinkel für die Übertragung von Gewichtskräften unerlässlich sind und ein Winkel von ca. 65° hinsichtlich der vorliegenden Traglastuntersuchung als optimal zu bezeichnen ist. Die Verformungen des Anlusselementes unter Traglast gemäß Abb. 102 liegt durch die von der Lastrichtung abhängige Verformungsrichtung insgesamt zwischen 2,0 mm und 3,4 mm.

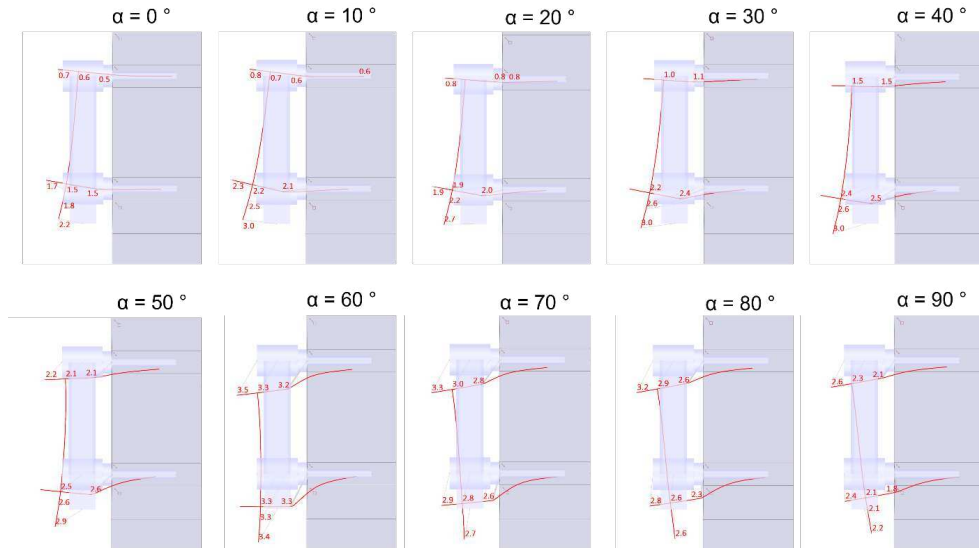


Abbildung 102: Verformungen in Millimeter bei der jeweiligen Traglast in Abhängigkeit des Lastwinkels. Die Biegelinie ist in 25-facher Überhöhung dargestellt.

3D Simulation des Koppелеlementes

Ergänzend zur einfachen 2D-Modellierung wird ein detailliertes 3D-Berechnungsmodell in ANSYS erstellt. Es werden die gleichen Materialparameter wie im 2D-Modell angewendet. Holzmatrix, Baumschrauben und Koppелеlement erhalten geringe Abstände zueinander (0,5 mm), um die separaten Oberflächen der Bauteile über Kontaktelemente zu koppeln. Die Kontaktelemente übertragen Drucknormalkomponenten und keine Zugnormalkomponenten. Hinzu kommt reibungsbasierte Schubübertragung mit $\mu_R = 0,1$ zwischen den Stahlbauteilen. Die Kontaktfläche zwischen Stahl und Holzmatrix wird als raue Kontaktfläche mit voller Schubübertragung angesetzt. Zur Reduzierung des Berechnungsaufwandes wird die vertikale Symmetrieebene genutzt und Verschiebungen senkrecht zu dieser Ebene blockiert, vgl. Abb. 103.

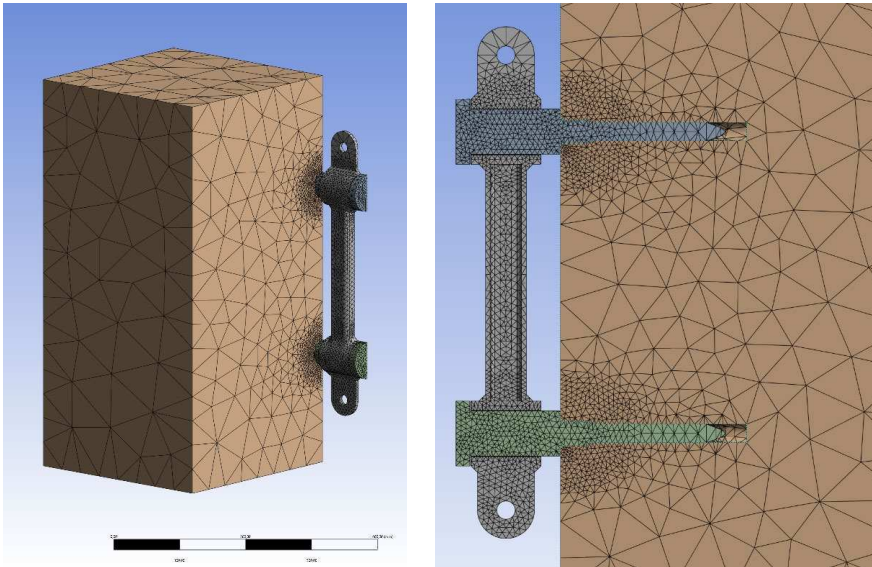


Abbildung 103: Darstellung des 3D Berechnungsmodells in ANSYS

Zur Verifikation der Berechnungsergebnisse mit dem einfachen 2D-Modell wird das 3D Berechnungsmodell für den Lastwinkel $\alpha = 45^\circ$ sowie die Nutzung der unteren Lasche als Angriffspunkt betrachtet.

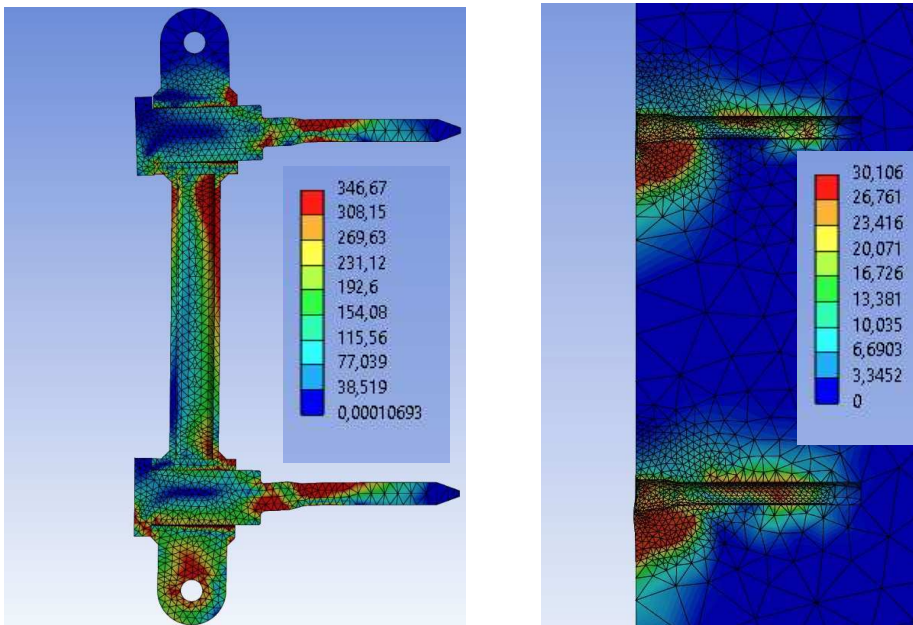


Abbildung 104: Darstellung der von Mises Vergleichsspannung am verformten System (links) sowie in der Holzmatrix (rechts) in $[N/mm^2]$.

Das Last-Verformungsdiagramm in Abb. 105 zeigt die vertikale Verschiebung am äußersten Kontaktpunkt zwischen Schaft und Holzmatrix der unteren Schraube. Als Traglastkriterium wird wie für die Studie in Abb. 110 die maximal zulässige Verschiebung von 2,0 mm definiert um die Spaltöffnung dort zu limitieren.

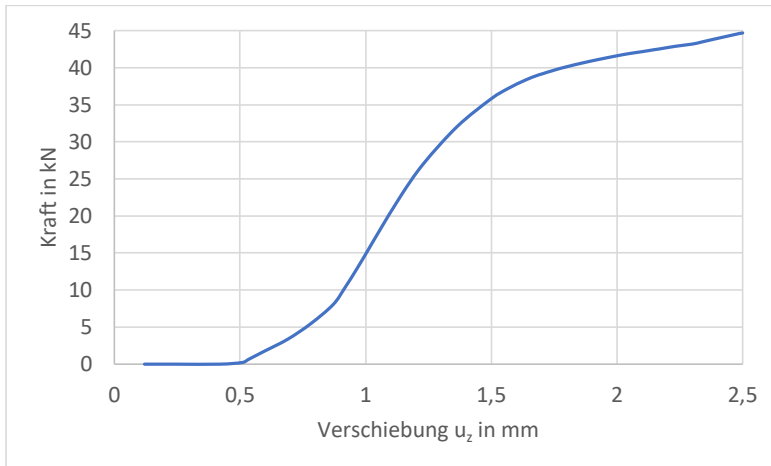


Abbildung 105: Last-Verschiebungsdiagramm der ANSYS Simulation.

Im Last-Verschiebungsdiagramm lässt sich eine initiale Kinematik erkennen, bis sich die geringen Abstände zwischen den einzelnen Teilkörpern durch die Kontaktformulierung bei ca. 0,5 mm schließt. Diese 0,5 mm stellen einen bewusst angelegten Modellierungsaspekt dar, welcher im obigen Diagramm bereinigt werden könnte. Aus Gründen der Nachvollziehbarkeit wird dieser Aspekt im Diagramm belassen und die zulässige Verschiebung zur Limitierung der Spaltöffnung auf 2,5 mm erhöht.

Die Analyse ergibt eine Traglast von 44,7 kN am halben System, was am ganzen System einer Traglast von 89,4 kN entspricht. Dieses Ergebnis liegt somit ca. 14,6 % über dem Ergebnis am einfachen 2D-Modell.

Realer Belastungsversuch

Zur Verifikation der Simulationsergebnisse wird ein Prototyp unter realen Bedingungen belastet. Die Baumschrauben entsprechen in Material und Geometrie den Parametern der Simulationen. Das Koppellement wird aus fertigungstechnischen Gründen aus Baustahl S355 gefertigt, welcher die gleiche Fließgrenze wie der Edelstahl im Simulationsmodell aufweist. Die Holzmatrix wird durch einen frisch geschlagenen Stamm der Rotbuche mit einem Durchmesser von 40 cm repräsentiert. Die Lasteinleitung erfolgt über einen Greifzug unter einem Seilwinkel von $\alpha=90^\circ$. Durch den Einsatz einer Umlenkrolle kann die maximale Prüflast durch den Greifzug auf ca. 160 kN verdoppelt werden. Die Kraftmessung erfolgt durch eine Dynafour LLX2 Kraftmesszelle, vgl. Abb. 106. Der Versuch wird bei einer Prüflast von 130kN beendet, um den Greifzug keinesfalls zu beschädigen.



Abbildung 106: Realer Belastungsversuch des Anschlusses unter $\alpha=90^\circ$.

Durch das großzügige Lochspiel von 2 mm zwischen Umwallungsabschnitt der Baumschrauben und Stahlhülsen kommt es bereits bei geringer Last zu einer anfänglichen Schrägstellung der Umwallungsabschnitte, was auf initiale, plastische Effekte im Schraubenschaft hindeutet, vgl. Abb. 107. Ist dieses Lochspiel aufgebraucht, verhält sich der Anschluss signifikant steifer und die anfängliche Schrägstellung nimmt kaum zu.



Abbildung 107: Anfangsschrägstellung infolge des Lochspiels zwischen Umwallungsabschnitt und Hülsen schon bei geringer Last.

Nach dem Erreichen der Prüflast von 130 kN und anschließender Entlastung, lässt sich das Koppel-element von dem Umwallungsabschnitt ohne Widerstand abziehen und sich die Baumschrauben aus dem Stamm herausdrehen. Im Bereich der Bohrlöcher lassen sich in der Holzmatrix visuell keine Schäden erkennen. Das Bohrloch ist allerdings an der Oberfläche des Stammes leicht ovalisiert, vgl. Abb. 108 links.

Die Baumschrauben weisen bleibende Deformation auf, aus der sich die Ausbildung von Fließzonen erkennen lässt sowie ein Unterschied zwischen oberer und unterer Schraube, vgl. Abb. 108 rechts.

In der oberen Schraube lässt sich die Ausbildung eines Fließgelenkes im Übergang von Schaft zu Umwallungsabschnitt erkennen. In der unteren Schraube zeigt sich insgesamt eine geringere Verdrehung zwischen tief im Baum liegendem Schaft und Umwallungsabschnitt. Jedoch lassen sich in der unteren Schraube die Ausbildung von zwei Fließgelenken mit entgegengerichteten Rotationen erkennen. Am Koppel-element sind keine plastischen Verformungen erkennbar.



Abbildung 108: Bohrloch nach Entfernung der unteren Schraube (links) sowie verformte Baumschrauben nach dem Belastungsversuch mit Mittelachsen und Markierung von Bereichen hoher Krümmung durch überhöhte Linien mit Punkten (rechts).

Der Belastungsversuch bestätigt das Verformungsverhalten der Simulationen und die Ausbildung plastischer Effekte. Die reale Prüflast liegt über der Traglast in beiden Simulationsmodellen, was auf konservative Annahmen im Modell rückführbar ist.

Für weitere Versuche wird die Reduktion des Lochspiels zwischen Umwallungsabschnitt und Stahlhülse von 2 mm auf 1 mm empfohlen.

Verlängerung des Kopelementes

Am Beispiel eines am Baum installierten Prototyps lässt sich die Notwendigkeit der Verlängerungsmöglichkeit der Umwallungsabschnitte demonstrieren. Unmittelbar nach der Einbringung verblieb ein freier Umwallungsbereich von 10 bis 15 mm. Dieser Umwallungsbereich wurde durch die Reaktionsholzbildung innerhalb von zwei Wachstumsperioden nahezu vollständig verbraucht. Nach einer dritten Wachstumsperiode zeigt sich nun bereits die Aufwerfung der Borke oberhalb des Reaktionsholzes, vgl. Abb. 109. Vor dem Einsetzen der nächsten Wachstumsperiode sollte dieses Befestigungselement verlängert werden, um einen weiteren freien Umwallungsbereich zur Verfügung zu stellen und ein Einwachsen des Kopelementes zu verhindern.

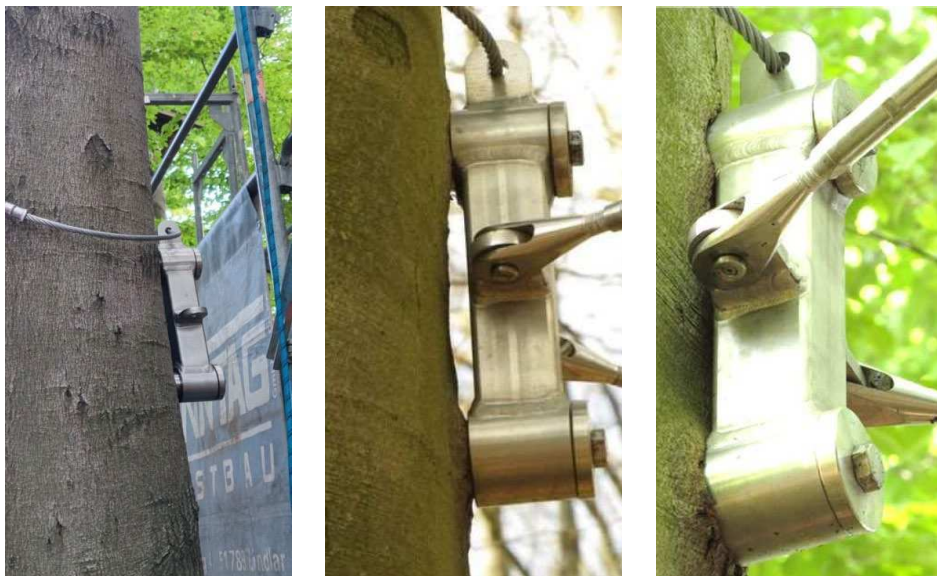


Abbildung 109: Befestigungselement unmittelbar nach der Montage (links), nach zwei Wachstumsperioden (Mitte) und nach drei Wachstumsperioden (rechts).

Kapitel 5: Gebaute Beispiele

5.1. Nachhaltigkeitsziele des Bauprojekts

Nachfolgend werden drei Bauwerke vorgestellt, in welche die hier entwickelten Ideen und Konzepte teilweise umgesetzt wurden. Die Bauwerke stellen somit ein Testfeld für die Umsetzbarkeit und Langzeitwirkung dar.

Die Bauwerke befinden sich in einem Buchenwald, welcher seit ca. 15 Jahren als Hochseilgarten genutzt wird. Es liegt ein ganzheitliches Konzept vor, um den Wald nachhaltig über mehrere Generationen wirtschaftlich zu nutzen. Die weiteren Nachhaltigkeitsziele sind:

- Erhaltung von Waldoberfläche inkl. Bodenökosystem
- Baumschonende und dauerhafte Anbindung der Bauwerke an Bäume
- Ressourceneinsparung beim Bau und Betrieb der Baukörper
- Sommerlicher Wärmeschutz durch die Baumkronen
- Erhöhung der Artenvielfalt durch baubegleitende Maßnahmen

Der Schutz der Waldoberfläche ergibt sich aus der Aufhängung der Baukörper an Tragbäume. Dadurch werden Bodeneingriffe weitgehend vermieden, wie sie für die technische Fundamentierung von Bauwerken sonst nötig wären. Die dauerhafte und schonende Anbindung an die Tragbäume über Baumschrauben mit Koppellelementen ermöglicht die Erhaltung des Baumbestandes. Durch zahlreiche Neupflanzungen an und um die Baufelder wird auf die Erhöhung der Artenvielfalt geachtet und ein Sachverständiger für Bauökologie mit einbezogen.

Die Baukörper werden vorwiegend in Holzbauweise in Kombination mit Stahlelementen erstellt. Sie sind so konzipiert, dass sie nach Ende ihrer Nutzungsdauer revitalisierbar oder rückbaubar sind. Der Verzicht auf Betonbauteile sowie die Erhaltung des Baumbestandes wirken sich vorteilhaft auf die graue Emissionsbilanz aus [7]. Weiterhin wird der sommerliche Wärmeschutz durch die Verschattung der Baumkronen und deren natürliche Transpiration begünstigt.

5.2. Konstruktive Details und Bauablauf

Die Baukörper werden in leichter Holz-Skelettbauweise auf Plattformen aus feuerverzinktem Stahl erstellt. Edelstahlseilsysteme mit allgemeiner, bauaufsichtlicher Zulassung verlaufen von der Plattform zu den Tragbäumen.

Die Errichtung der Baukörper erfolgte auf temporären Traggerüsten in der finalen Höhe über Grund, vgl. Abb. 110.

Ist die Montage des Baukörpers abgeschlossen, wird die Verbindung zu den Bäumen über Seile und Anschlusselemente, wie in Kap. 4 beschrieben, hergestellt. Es folgt die Vorspannung der Seile über die Spannschlösser des Seilsystems. Aus dem numerischen Berechnungsmodell lassen sich die notwendigen Vorspannkraften aus dem charakteristischen Lastfall durch Eigengewicht ablesen. Werden diese Vorspannkraften erreicht, hebt sich der Baukörper vom Traggerüst ab, welches anschließend zurückgebaut werden kann.



Abbildung 110: Errichtung des Baukörpers auf einem Traggerüst ca. 3 m über Grund.

Die Kontrolle der Seilkraft ist über eine Messung der zur Auslenkung des gespannten Seiles notwendigen Kraft möglich, vgl. Abb. 111.

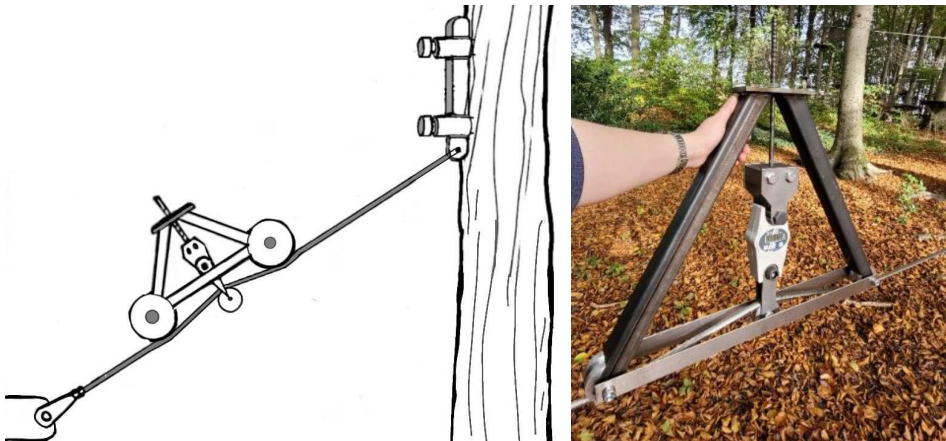


Abbildung 111: Messung der Seilspannung durch lokale Querbelastung des Seiles.

Die Anzahl der Seile wird so gewählt, dass sich statisch unbestimmte Systeme ausbilden. Diese erlauben eine begrenzte Umverteilung der Lasten von schwächeren hin zu stärkeren Tragbäumen. Weiterhin kann die genaue Ausrichtung des Baukörpers insbesondere durch horizontal angeordnete Seile angepasst werden.

Wird im Baufeld die Tragfähigkeit eines Baumes durch die technischen Lasten zu sehr beansprucht, kann i.d.R. eine zusätzliche Abspannung dieses Baumes zu einem anderen Baum dessen Biegebelastung verringern, vgl. Baum B8 in Abb. 113. Steht die Möglichkeit zur Rückverankerung nicht zur Verfügung bzw. reicht sie nicht aus, muss die Anordnung technischer Stützen mit künstlicher Fundamentierung in Erwägung gezogen werden, vgl. Abb. 118. Werden solche Stützen als Pendelstützen geplant, sind sie frei von Querkraft und Biegemoment, was auf kleinere Abmessungen der künstlichen Fundamentierung führt.

5.3. Das Bauwerk Loop

Der im Jahr 2022 errichtete und ca. 8.4 Tonnen schwere Baukörper hängt auf einer Höhe von 3,5 m über dem Waldboden und umfasst einen Wohnraum von 20 m² Bruttogrundfläche sowie eine Terrasse von 10 m². Die Zuwegung erfolgt über eine an der Plattform angeschlossene und ebenfalls an Seilen hängende Treppe.



Abbildung 112: Ansicht des Bauwerks Loop.

Die acht genutzten Tragbäume für das Bauwerk Loop, vgl. Abb. 112, besaßen zum Zeitpunkt der Planung Durchmesser zwischen 37 und 85 cm in Brusthöhe, womit die elastische Biegetragfähigkeit dieser Querschnitte zwischen 160 und 2000 kNm liegt, vgl. Kap. 3. Für den Abtrag der Vertikallasten sind insgesamt neun Seile unter einem Lastwinkel von ca. 45° installiert und bis zu 11 m über Grund an sechs der Tragbäume verankert. Die Aussteifung des Tragsystems erfolgt über acht horizontale Seile, von denen jeweils zwei an einem Befestigungselement an vier der Tragbäume zusammengeführt werden.

Der Tragbaum B8 wird durch eine Rückverankerung zum Tragbaum B6 bezüglich Biegebeanspruchung entlastet, vgl. Abb. 113.

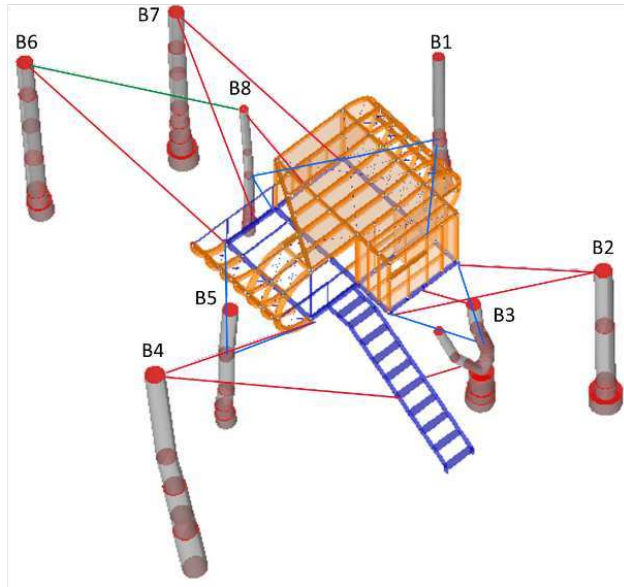


Abbildung 113: Schema der Lastabtragung über geneigte Seile (rot) und eine Rückverankerung (grün) für Gewichtskräfte sowie über horizontale Seile (blau) für Windlasten.

Die Befestigungselemente am Baum werden durch lockere Seile um den Stamm sowie eine weitere Baumschraube auf der gegenüberliegenden Seite hintersichert. Diese Hintersicherung wird bei Versagen des Befestigungselementes aktiviert, um den Totalausfall des entsprechenden Seiles zu verhindern, vgl. Abb. 114.



Abbildung 114: Anschluss der Seile über Spannschloss und Gabel am Wohnkörper (links) sowie am Baum (rechts).

Nach Aussagen des Baumgutachters zeigen die bebauten Bäume auch nach drei Wachstumsperioden seit Installation des Baukörpers keinerlei erkennbare Schäden oder Vitalitätsverluste. Die Umwallung der Baumschrauben durch Kallusgewebe schreitet stark voran, sodass vor Beginn der vierten Wachstumsperiode die Verlängerung einiger Baumschrauben bereits notwendig ist.

5.4. Bezug zum Bemessungsmodell auf Basis der Spannungshypothese

Es wird davon ausgegangen, dass Bäume ohne zusätzliche Lasten aus Bauwerken i. d. R. den Querschnitt so anlegen, dass die Spannungen im Querschnitt aus natürlichen Lasten das elastische Verhalten nicht überschreiten, um dauerhaft ungeschädigt zu bleiben. Um auch bei einer baulichen Nutzung Schädigungen an Bäumen zu vermeiden, muss die zusätzliche Belastung aus Bauwerken deutlich unterhalb dieser Grenze liegen. In Abb. 115 wird für das Bauwerk Loop die Ausnutzung der elastischen Tragfähigkeit durch die künstlichen Bauwerkslasten dargestellt.

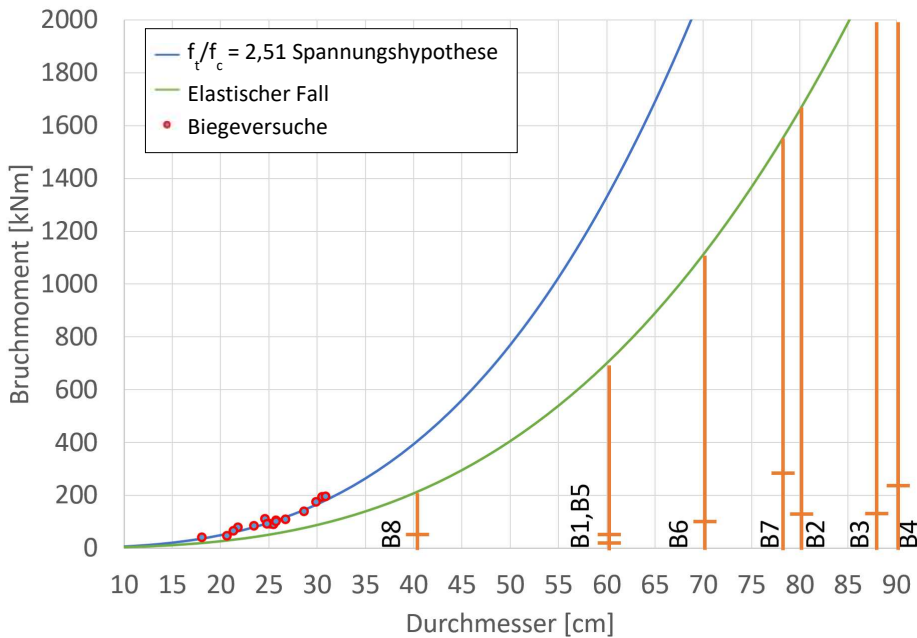


Abbildung 115: Beispielhafte Darstellung der einwirkenden Belastungen aus einem Bauwerk auf die Tragbäume am Beispiel des Bauwerks Loop (horizontale Linien markieren einwirkende Belastung).

Die Bauwerkslasten sind mit dem Teilsicherheitskonzept nach DIN EN 1991 [26] ermittelt und erzeugen auf Brusthöhe in den einzelnen Tragbäumen Biegemomente, welche mindestens 75% unterhalb der elastischen Biegetragfähigkeit und 88% unter der in Kap. 3 propagierten Biegetragfähigkeit liegen. Diese Biegetragfähigkeit ist außerhalb des Teilsicherheitskonzepts als charakteristische Tragfähigkeit ermittelt worden. Es soll nachfolgend diskutiert werden, ob ein Teilsicherheitskonzept für die Beurteilung sinnvoll ist.

Da es sich beim Baum um ein Individuum und kein technisch hergestelltes Bauprodukt handelt, ist die Ermittlung von 5% Fraktilwerten auf der Widerstandseite nicht möglich. Ähnlich einem Baugrundgutachten liegen für Tragbäume sogenannte Baumgutachten vor. Aus diesen geht die Vitalitätsstufe und Analysen zu Regelmäßigkeiten bzw. Unregelmäßigkeiten in der Holzmatrix hervor. Deuten weder eingeschränkte Vitalität noch Unregelmäßigkeiten auf mechanische

Probleme im Stamm vor, ist ein sicherer Abstand zur charakteristischen Traglast auf Biegung durch die Eintragung von technischen Lasten genauso aussagekräftig, wie ein entsprechend kleinerer Abstand zum abgeminderten Wert der Traglast.

5.5. Das Bauwerk Cube

Der im Jahr 2023 errichtete und ca. 12 Tonnen schwere Baukörper befindet sich ebenfalls 3,5 m über dem Waldboden. Die Bruttogrundfläche der Hauptebene beträgt 20 m² und wird um eine Galerieebene mit 10 m² sowie eine 10 m² große Terrasse ergänzt. Das Bauwerk bildet geometrisch einen Würfel mit einer Kantenlänge von ca. 4,5 m. Die Zuwegung erfolgt über ein entkoppeltes Zugangsbauwerk, welches mittels Schraubfundamenten und einer Lagerung an zwei Tragbäumen gegründet wird. Die geometrischen Rahmenbedingungen des zur Verfügung stehenden Baufeldes machen eine freie Platzierung des Baukörpers im Luftraum zwischen den Tragbäumen nicht möglich, sodass einer dieser Bäume die Terrasse integriert, vgl. Abb. 116.



Abbildung 116: Ansicht des Bauwerks Cube.

Während der Tragbaum im Bereich der Terrasse großen Durchmesser besitzt und in der Nähe des Schwerpunkts des Baukörpers ist, liegen weitere zu nutzende Bäume entweder in größerer Entfernung oder weisen geringe Querschnitte auf. Dies legt die Anordnung einer Stütze als Hilfsmaßnahme nahe. Durch die Positionierung der Stütze unter dem Schwerpunkt des Wohnkörpers können ca. 60 % der Lasten aus Eigengewicht an diese Stütze übergeben werden.

Die Einbindung des Tragbaumes in der Terrasse erfolgt durch eine Umreifung aus U-Profilen, welche mit vier Koppellelementen und acht Baumschrauben an den Baum angebunden wird, vgl. Abb. 117. Der Tragbaum befindet sich auf seiner gesamten Schaftlänge im frei bewitterten Außenraum, sodass er keinen unnatürlichen Temperaturschwankungen ausgesetzt ist, welche sich ergäben,

wenn dieser zur kalten Jahreszeit einen beheizten Raum durchdringen würde. Durch die Ausführung der technischen Stütze als Pendelstab kann das notwendige Volumen des Betonfundamentes auf $0,4 \text{ m}^3$ minimiert werden.



Abbildung 117: Befestigungselemente und Umreifung des Baumes unterhalb der Terrasse (links) sowie zur Realisierung einer Konsole am Baum (rechts).

Zur Stabilisierung des Systems sowie zur Aufnahme weiterer Gewichtskräfte werden drei Haupttragseile unter einem Winkel von ca. 45° vorgesehen. Bei den Bäumen B1 und B2 handelt es sich um sogenannte Zwillingebäume, da sie im Wurzelanlauf und im Wurzelsystem miteinander verwachsen sind. Der Durchmesser dieser Bäume ist mit 40 cm auf 1,3 m Höhe über dem Boden kleiner, als bei den anderen Tragbäumen (60 - 100 cm), weshalb eine Rückverankerung zu einem weiteren Baum vorgesehen wird, vgl. Abb. 118. Die beiden Bäume B1 und B2 erhalten in Höhe der Rückverankerung zudem eine Zugkraftkopplung untereinander. Zur horizontalen Aussteifung kommen neben der Anbindung der Terrasse an den durchdringenden Tragbaum B4 noch vier horizontal verlaufende Aussteifungsseile zum Einsatz.

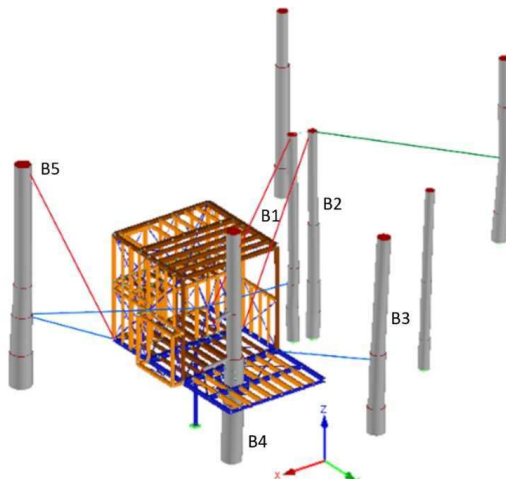


Abbildung 118: Berechnungsmodell des Baukörpers mit Seilaufhängung und zusätzlicher Abstützung mit Pendelstab.

5.6. Das Bauwerk Echo

Das im Jahr 2024 errichtete und ca. 11 Tonnen schwere Baumhaus befindet sich ca. 3 m über dem Waldboden. Die Bruttogrundfläche der Hauptebene beträgt 20 m^2 und wird durch eine Galerieebene mit 8 m^2 sowie eine 10 m^2 große Terrasse ergänzt. Die Zuwegung erfolgt über eine vom Gebäude entkoppelte Wendeltreppe. Die Grundebene des Bauwerks ist kreisförmig und wird durch gebogene Stahlträger realisiert. Auf diesen Stahlträgern wird der Baukörper in Form einer Dreiviertelkugel als geodätische Kuppel angelegt.

Dafür wird die Kugeloberfläche durch sich regelmäßig wiederholende Dreiecke polygonalisiert, vgl. Abb. 119. Der kreisförmige Grundriss des Bauwerkes wurde u.a. gewählt, um die Außenmaße dicht an die drei umherstehenden, nutzbaren Bäume zu bringen. Dies impliziert steile Seilwinkel und damit geringere Biegebelastung der Tragbäume.



Abbildung 119: Ansicht des Bauwerks Echo.

Die geodätische Kuppel wird durch eine Gitterschale aus einzelnen Vollholzstäben mit Querschnitt $40/160 \text{ mm}$ realisiert. Die Stäbe bilden Dreiecke, welche beidseitig mit leichten Plattenwerkstoffen beplankt werden. Damit ergibt sich eine effiziente und gewichtssparende Konstruktion.

Die beiden Tragbäume B1 und B2 befinden sich parallel zum Waldrand und definieren eine Haupttragachse für den Baukörper. An sie werden jeweils drei Haupttragseile angeschlossen.

Die Bäume B3 und B4 werden als Ergänzung und Redundanz hinzugenommen und erhalten jeweils ein Haupttragseil, vgl. Abb. 120.

Die horizontale Aussteifung erfolgt durch sechs Horizontalseile, von denen jeweils zwei zu einem der Tragbäume B1-B3 geführt sind.

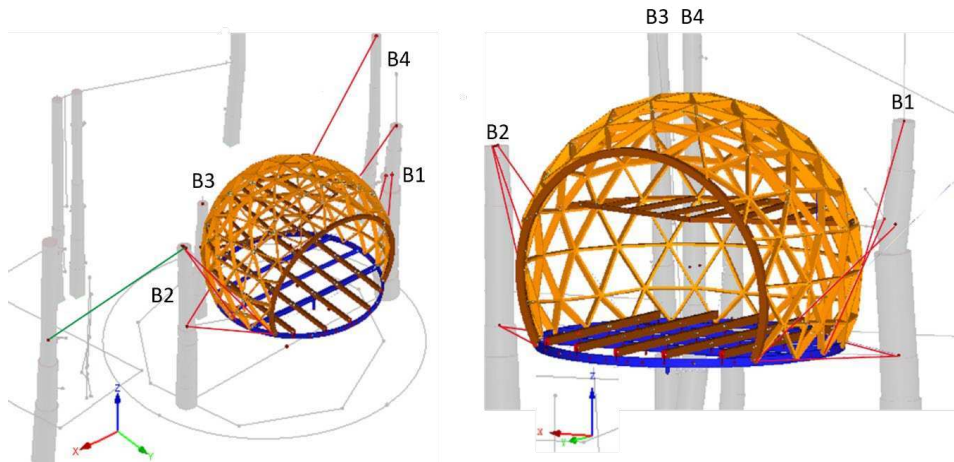


Abbildung 120: Berechnungsmodell für das Bauwerk Echo.

Durch den geringen Abstand zwischen Bauwerk und Tragbäumen können trotz einer niedrigen Verankerungshöhe von ca. 7 m über Grund immerhin Seilneigungen zwischen 60° und 70° erreicht werden, wodurch sich die Horizontallast in den Bäumen gegenüber der Anbindung unter 45° um mehr als die Hälfte reduziert.

Der Tragbaum B2 enthält eine Faulhöhle, die zur Querschnittsschwächung führt. Diese Faulhöhle steht seit vielen Jahren unter Beobachtung durch den verantwortlichen Baumsachverständigen. Durch ihn ist dokumentiert, dass der jährliche Zuwachs des Baumes durch Dickenwachstum die Wirkung der Fäulnis mehr als ausgleicht. Zur Verringerung der Biegebelastung dieses geschwächten Baumes erfolgt eine Rückverankerung zu einem weiteren Tragbaum.

Kapitel 6: Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit werden die Möglichkeiten zur Errichtung von Baukörpern durch Nutzung von Bäumen im Waldbestand untersucht. Dazu werden zunächst historische Beispiele für den Bau mit und in vitalen Bäumen chronologisch zusammengestellt und die Verbreitung derartiger Bauwerke heute besprochen. Die Etablierung einer Bauweise in und mit Bäumen wird über Nachhaltigkeitsziele motiviert.

Zu den Materialeigenschaften des grünen Holzes sind Veröffentlichungen verfügbar, welche die Materialparameter in Abhängigkeit der Baumart auflisten. Zur Beurteilung der Standsicherheit von Bäumen haben sich im Rahmen der Verkehrssicherungspflicht Methoden, wie das „Visual Tree Assessment“ und die „Statisch integrierte Abschätzung“ entwickelt, die dazu dienen, versagensgefährdete Bäume zu identifizieren. Als kritische Leiteinwirkung kann die Windlast der Baumkronen identifiziert werden. Die Versagensmechanismen von Bäumen im Waldbestand sind aus Studien bekannt, welche Baumschäden analysieren. Für die Einleitung von Bauwerkslasten in Bäume sowie die Anbindungstechnik bestehen jedoch keine anerkannten Regeln der Technik.

Die Arbeit geht der Fragestellung nach, ob **mit Hilfe von Bäumen, Seilen und entsprechenden Kopplungselementen das Anheben von baulichen Anlagen über den Boden dauerhaft möglich ist, ohne die Tragbäume zu beschädigen. Der Naturraum könnte damit in seiner ursprünglichen Funktion weitestgehend erhalten bleiben und würde dennoch eine zivile Nutzung erlauben.**

In Kapitel 2 werden die wesentlichen Grundlagen für den Bau in und mit vitalen Bäumen untersucht. Ausgangspunkt bildet die Begrenzung der Betrachtungen zum Tragverhalten auf den Stamm basierend auf der Annahme, dass die Tragfähigkeit von Stamm und Gründung in einem ausgeglichenen Verhältnis zueinanderstehen. Der strukturelle und funktionale Aufbau der Holzmatrix und dessen Auswirkungen auf die Belastbarkeit des Holzes werden in Verbindung mit der Beschreibung von umweltabhängigen Wachstumsprozessen (Tropismen) aufgeführt. Wesentliche Unterscheidungsmerkmale zu unterschiedlichen heimischen Gehölzen und deren Eignung zur Bebauung werden dargestellt. Grundprinzipien für unterschiedliche Bauweisen in und mit Bäumen werden verglichen und die Entscheidung für die intensivere Betrachtung von an Seilen aufgehängten Bauwerken motiviert. Dabei werden auch die Nachhaltigkeitsaspekte der Bauweise betrachtet.

Am Beispiel der in Europa weit verbreiteten Rotbuche (*Fagus sylvatica*) wird in Kapitel 3 die Tragfähigkeit von vitalen Bäumen untersucht. Dazu werden Materialeigenschaften des grünen Holzes mit denen des technisch verarbeiteten Bauholzes verglichen und Unterschiede identifiziert. Das Biegebruchversagen wird als kritischer Versagensfall identifiziert und Versuchsreihen zur Prüfung der Biegetragfähigkeit durchgeführt. Dazu werden vitale Bäume aus dem Wald entnommen und in Großversuchen am vollen Querschnitt durch zerstörende Prüfung auf Biegetragfähigkeit untersucht. Zur Erhebung von Materialparametern werden zusätzliche Prüfungen zur Druckfestigkeit und Zugfestigkeit am Vollquerschnitt und kleineren Prismen durchgeführt. Die ermittelte Druckfestigkeit stimmt gut mit den Literaturwerten überein. Eine Übereinstimmung kann auch zwischen Druckprüfungen am Vollquerschnitt und Mikrobohrkernen, gezeigt werden. Auf Basis der ermittelten Biegetragfähigkeiten an 16 Versuchskörpern und der

ebenfalls sicher ermittelten Druckfestigkeit wird eine nichtlineare Spannungshypothese entwickelt, auf deren Basis sich durch eine Kurvenanpassung an die Versuchsergebnisdaten die unbekannte Zugfestigkeit des Materials ermitteln lässt. Mit Hilfe dieses Bemessungsmodells ist es möglich, aus Druckfestigkeitsmessungen an Mikrobohrkernen, sowie der Querschnittsvermessung die Biegetragfähigkeit der Stämme vorherzusagen und damit eine Beurteilung durchzuführen.

In Kapitel 4 werden die bekannten Möglichkeiten zur Verankerung von Bauwerkslasten an vitalen Bäumen untersucht. Dazu werden diese Methoden entsprechend ihres Lastübertragungsweges von Bauwerk in die Holzmatrix klassifiziert und deren Einfluss auf das Wachstum des Baumes untersucht. Die Betrachtung führt zum Vorschlag der Verwendung von Baumschrauben als Befestigungsmittel. Diese Baumschrauben werden minimalinvasiv in den Baum eingebracht und können durch dessen Wachstum als ein Implantat, das in den Baum einwächst, umwallt werden. Die Auflistung kommerziell verfügbarer Baumschraubensysteme zeigt unterschiedliche Ansätze der Bauteildimensionierung. Die aus Edelstahl gefertigte Baumschraube nach dem Modell von Dipl. Des. Martin Zeller wird in einer Versuchsreihe auf Tragfähigkeit unter Variation der Einbringungsrichtungen in den Baum und der Belastungsrichtungen untersucht.

Es zeigt sich unter Querbeanspruchung eine geringe Tragfähigkeit in der Größe weniger Kilonewton, die für die Aufhängung als nicht ausreichend eingestuft wird. Zudem zeigen sich unter Belastung deutliche Schädigungen am belasteten Baum, die zu einem Verlust der Vitalität führen können. Ausgehend von den Baumschrauben wird ein Koppелеlement entwickelt, welches zwei vertikal zueinander in den Baum eingebrachte Baumschrauben steif aneinanderkoppelt und somit die Tragfähigkeit erhöht. Die Entwicklung des Koppелеlementes erfolgt durch ein FEM-Modell, welches das Zusammenspiel von Koppелеlement, Baumschrauben und Holzmatrix abbildet. Durch die Variation von Lastangriffspositionen und Lastangriffswinkel wird die Tragfähigkeit dieser Verankerungsmethode untersucht. Die ermittelten Ergebnisse werden durch eine detaillierte 3D-Modellierung in ANSYS und einem realen Belastungsversuch überprüft, wodurch die Eignung der entwickelten Verankerungsmethode für den Einsatz am realen Bauwerk gezeigt werden kann.

Zur Bestätigung der anfänglich aufgestellten These werden in Kapitel 5 Projekte vorgestellt, bei denen Baukörper auf Baumschrauben und Koppелеlemente zurückgreifen. Dazu wird das Gesamtprojekt mit dessen Zielen, die grundlegende Bauweise der an Seilen in Bäumen aufgehängten Baukörper und das Vorgehen der Tragbaumbemessung auf Basis der in Kapitel 3 ermittelten Tragfähigkeit beschrieben. Die einzelnen Baukörper werden mit ihren Tragsystemen vorgestellt und die Ergebnisse der Langzeitbeobachtung über mehrere Wachstumsperioden beschrieben.

Damit zeigt die vorliegende Arbeit und die besprochenen Beispiele, dass mit dem vorliegenden Wissensstand sowie heutiger Planungs- und Bautechnik, Wohnraum und somit Zivilisation im Naturraum entstehen kann.

Gelingt es also, die Gesellschaft und die Politik von den Vorteilen dieser Art des Bauens zu überzeugen, sind andere Disziplinen aufgerufen, sich mit übergeordneten Aspekten wie der Ökologie, Ökonomie und notwendigen sozialen Innovationen zu beschäftigen, um bestmögliche Bebauungskonzepte für Waldgebiete zu erstellen, um damit deren dauerhafte Rodung und den Verlust von Naturraum zu umgehen.

Ausblickend sei gesagt, dass die vorliegenden Experimente und Untersuchungen auf das Verhalten von Rotbuchen fokussieren, sodass für die Nutzung anderer Baumartenspezies ein adäquates Vorgehen und weitere Versuche notwendig sind.

Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen wurde die Zugfestigkeit des grünen Holzes über integrale Biegeversuche, einer Spannungshypothese sowie stochastischen Auswertungen bestimmt und unterscheidet sich zu den Ergebnissen der experimentellen Zugversuche in dieser Arbeit. Es wurde beobachtet, dass das Zugversagen von Fasern, im Biegeversuch immer mit der Delamination sehr langer Faserstränge zusammenhängt und beim Zugversuch eine Geometrie erfordert, welche derartige Delamination erlaubt. Diese Hypothese sollte in nachfolgenden Arbeiten untersucht werden.

Die in den Biegeversuchen geprüften Baumstämme, waren maximal 35 cm dick, sodass die Prüfung dickerer Bäume die Modellsicherheit erhöhen würde.

Literatur

- [1] *Sobek, Werner*: 17 THESES – Zumtobel Group Annual Report 2019/2020, Dornbirn, Austria Ausgabe 2020.
- [2] *Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Referat 513 – Nationale Waldpolitik, Jagd, Kompetenzzentrum Wald und Holz*: Waldbericht der Bundesregierung 2021 Ausgabe 2021.
- [3] *Carlowitz, H.C. von; Hamberger, J.*: Sylvicultura oeconomica: oder Haußwirthliche Nachricht und Naturmäßige Anweisung zur Wilden Baum-Zucht, Bibliothek der Nachhaltigkeit, oekom verlag, 2022.
- [4] *Grober, Ulrich*: Urtexte - Carlowitz und die Quellen unseres Nachhaltigkeitsbegriffs. *In*: : Natur und Landschaft 2/2013, S. 46-51.
- [5] *Klug, P.*: Vitalität und Entwicklungsphasen bei Bäumen. *In*: : PROBAUM, Heft 1, 2005, S. 1-4.
- [6] *Bernatzky, A.*: Baumkunde und Baumpflege. Thalacker, 1994.
- [7] *Münch, I.; Woermann, L.; Loske, S. et al.*: Gebäude über dem Boden – Aspekte der Nachhaltigkeit, praktische Umsetzung und Vergleiche zur grauen Emission/Buildings above the ground – aspects of sustainability, practical implementation and comparisons with embodied carbon. *In*: Bauingenieur 99 (2024), S. 99-108. <https://doi.org/10.37544/0005-6650-2024-04-31>.
- [8] *Henderson, P.; Mornement, A.; Krabbe, W.*: Die Welt der Baumhäuser: Wolkenkuckucksheime zum Genießen. Deutsche Verlags-Anstalt, 2005.
- [9] *Kruft, H.W.*: Geschichte der Architekturtheorie: Von der Antike bis zur Gegenwart. C.H.Beck, 2017.
- [10] *Secundus, G.P.; Herzhoff, B.*: Über Bäume (Lateinisch/Deutsch): Reclams Universal-Bibliothek, Reclams Universal-Bibliothek, Reclam Verlag, 2022.
- [11] *Bostock, J.; Riley, H.T.*: The Natural History of Pliny, Bohn's classical libraryBook XII, Chap. 5, H. G. Bohn, 1857.
- [12] *Attlee, H.; Ramsay, A.*: Italian Gardens: A Cultural History. Frances Lincoln Adult, 2012.
- [13] *Pearn, J.*: A tree house. *In*: Journal of Paediatrics and Child Health 49 (2013), Heft 9, E361-E364. <https://doi.org/10.1111/jpc.12228>.
- [14] *Aikman, A.*: Treehouses. Robert Hale, London, 1988.
- [15] *Fröhlich, H.J.*: Wege zu alten Bäumen: Thüringen. WDV-Wirtschaftsdienst OHG, 1994.
- [16] *van Enk, G.J.; Vries, L. de*: The Korowai of Irian Jaya: Their Language in Its Cultural Context, Oxford Studies in Anthropological Linguistics, Oxford University Press, 1997.
- [17] *Wenning, A.*: Baumhäuser: Neue Architektur in den Bäumen. DOM publishers, 2021.
- [18] *McFetrich, D.*: An Encyclopaedia of World Bridges. Pen & Sword Books, 2022.
- [19] *Khan, G.*: Surreal Photos of India's Living Root Bridges, 2018, <https://www.nationalgeographic.com/travel/article/living-root-bridges-clean-village-mwalynnong-india> [Zugriff am: 24.05.2024].
- [20] *Humphreys, P.W.*: The Practical Book of Garden Architecture, Applewood Bks, Applewood Books, 2008.
- [21] *Spitzer, M.*: Baumhäuser aus medizinischwissenschaftlicher Sicht. *In*: Nervenheilkunde 39 (2020), S. 577-580. <https://doi.org/10.1055/a-1162-5383>.

-
- [22] Schulze, G.: Die Erlebnisgesellschaft: Kultursoziologie der Gegenwart, Campus Bibliothek, Campus Verlag, 2005.
- [23] Zeller, M.; Münch, I.: Befestigung von Bauwerken in Bäumen mit Baumankern und doppelter Umreifung. In: Bautechnik 99 (2022), S1, S. 13-22. <https://doi.org/10.1002/bate.202100078>.
- [24] Nelson, P.; Kurzaj, R.; Hilzensauer, B.: Baumhäuser der Welt. Brandstätter, 2004.
- [25] Ludwig, F.; Schönle, D.: Growing Architecture: How to Design and Build with Trees. Birkhäuser, 2022.
- [26] Kempa, S.: Eurocodes und nationale Bemessungsnormen: Zusammenhänge, Übersichten, Ersatzvermerke, bauaufsichtliche Einführung. DIN e.V., Beuth Pocket, Beuth Verlag GmbH, 2014.
- [27] DIN EN 1995: Bemessung und Konstruktion von Hochbauten und Ingenieurbauwerken bzw. Bauteilen aus Holz.
- [28] Niklas, K.J.; Spatz, H.-C.: Worldwide correlations of mechanical properties and green wood density. In: American journal of botany, Vol. 97 (2010), Iss. 10, pp. 1587-1594. <https://doi.org/10.3732/ajb.1000150>.
- [29] Lavers, G.M.; Moore, G.L.; *Building Research Establishment: Strength Properties of Timber*, Building Research Establishment Report Series, Construction Research Communications Limited, 1993.
- [30] Hering, S.; Keunecke, D.; Niemz, P.: Moisture-dependent orthotropic elasticity of beech wood. In: Wood Science and Technology 46 (2012), Heft 5, S. 927-938. <https://doi.org/10.1007/s00226-011-0449-4>.
- [31] Niklas, K.J.; Spatz, H.-C.: Plant Physics, Ebook Central, University of Chicago Press, 2012.
- [32] *Forest Products Laboratory: Wood Handbook—Wood as an Engineering Material*, General Technical Report FPL-GTR-282, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2021.
- [33] Burgert, I.; Eckstein, D.: The tensile strength of isolated wood rays of beech (*Fagus sylvatica* L.) and its significance for the biomechanics of living trees. In: Trees 15 (2001), S. 168-170. <https://doi.org/10.1007/s004680000086>.
- [34] Rais, A.; Bacher, M.; Khaloian-Sarnaghi, A. et al.: Local 3D fibre orientation for tensile strength prediction of European beech timber. In: Construction and Building Materials 279 (2021), S. 122527. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122527>.
- [35] Ehrhart, T.; Steiger, R.; Palma, P. et al.: Estimation of the tensile strength of European beech timber boards based on density, dynamic modulus of elasticity and local fibre orientation. In: , 2018.
- [36] Mattheck, C.; Hötzel, H.J.: Baumkontrolle mit VTA, Rombach Wissenschaften Reihe Ökologie, Rombach, 1997.
- [37] Wessolly, L.; Erb, M.: Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle. Patzer, Berlin, 2014.
- [38] *Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau: FLL-Baumkontrollrichtlinien – Richtlinien für Regelkontrollen zur Überprüfung der Verkehrssicherheit von Bäumen*. 2. Ausgabe. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau (FLL), Bonn, 2010.
- [39] *Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau: FLL-Baumuntersuchungsrichtlinien – Richtlinien für eingehende Untersuchungen zur Überprüfung der Verkehrssicherheit von Bäumen*. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau (FLL), Bonn, 2013.

- [40] *Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau*: FLL-Baumkontrollrichtlinien – Richtlinien für Baumkontrollen zur Überprüfung der Verkehrssicherheit. 3. Ausgabe. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau (FLL), Bonn, 2020.
- [41] *Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V.*: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Baumpflege – ZTV-Baumpflege. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V., 2017.
- [42] *Rust, S.; Weihs, U.*: Geräte und Verfahren zur eingehenden Baumuntersuchung. *In:* , 2007, S. 215-241.
- [43] *Rinn, F.; Büchert, F.; Holz, S. et al.*: Tomography of the internal structure of roundwood – a comparison of x-ray based computed tomography and stress wave. *In:* : Proceedings 18th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium Madison. International Union of Forest Research Organizations, 2013.
- [44] *Detter, A.; Rust, S.*: Aktuelle Untersuchungsergebnisse zu Zugversuchen. *In:* : Baumzeitung. Name des Verlags, % Bitte den Namen des Verlags hier ergänzen, 2005, S. 87-100.
- [45] *Rinn, F.; Schweingruber, F.-H.; Schär, E.*: Resistograph and X-Ray Density Charts of Wood. Comparative Evaluation of Drill Resistance Profiles and X-ray Density Charts of Different Wood Species. *In:* *Holzforschung* 50 (1996), Heft 4, S. 303-311. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1996.50.4.303>.
- [46] *Götz, K.; Bethge, K.; Mattheck, C.*: Das Fractometer II - Ein feldtaugliches Holzprüfgerät. Institut für Materialforschung Programm Umwelt, FZKA 6590 Ausgabe 2001.
- [47] *Detter, A.; Rust, S.*: Aktuelle Untersuchungsergebnisse zu Zugversuchen. *In:* , 2013, S. 87-100.
- [48] *Rinn, F.*: Die „Ein-Drittel-Regel“: Richtig und wichtig, aber meist irrelevant, Heidelberg Ausgabe 2018.
- [49] *Spatz, H.; Pfisterer, J.*: Mechanical Properties of Green Wood and Their Relevance for Tree Risk Assessment. *In:* *Arboriculture and Urban Forestry* 39 (2013), S. 218-225. <https://doi.org/10.48044/jauf.2013.028>.
- [50] *Sterken, P.*: Zweifelhafte Grundlagen der Zuchversuche (2018).
- [51] *Zell, J.*: Methoden für die Ermittlung, Modellierung und Prognose der Kohlenstoffspeicherung in Wäldern auf Grundlage permanenter Großrauminventuren. Freiburg i. Brsg., Albert-Ludwigs-Universität, Dissertation, 2008.
- [52] *Zubkov, P.; Eid, T.; Gardiner, B. et al.*: Predicting snow damage in conifer forests using a mechanistic snow damage model and high-resolution snow accumulation data. *In:* *Scandinavian Journal of Forest Research* 39 (2024), Heft 1, S. 59-75. <https://doi.org/10.1080/02827581.2023.2289660>.
- [53] *van Haften, M.; Liu, Y.; Wang, Y. et al.*: Understanding tree failure—A systematic review and meta-analysis. *In:* *PLOS ONE* 16 (2021), e0246805. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246805>.
- [54] *Rottmann, M.*: Wind- und Sturmschäden im Wald: Beiträge zur Beurteilung der Bruchgefährdung, zur Schadensvorbeugung und zur Behandlung sturmgeschädigter Nadelholzbestände. Sauerländer, 1986.
- [55] *Bazzigher, G.; Schmid, P.*: Sturmschäden und Fäule, 1969.
- [56] *Jaffe, M.J.*: Thigmomorphogenesis: The response of plant growth and development to mechanical stimulation. *In:* *Planta* 114 (1973), Heft 2, S. 143-157. <https://doi.org/10.1007/BF00387472>.

- [57] *Telewski, F.W.*: A unified hypothesis of mechanoperception in plants. *In: American journal of botany* 93 (2006), Heft 10, S. 1466-1476. <https://doi.org/10.3732/ajb.93.10.1466>.
- [58] *Coutand, C.; Mitchell, S.J.; Puijalon, S. et al.*: Mechanical Signaling in Plants: From Perception to Consequences for Growth and Morphogenesis (Thigmomorphogenesis) and Ecological Significance, *Frontiers Research Topics*, Frontiers Media SA, 2017.
- [59] *Mattheck, C.*: Design in der Natur. Der Baum als Lehrmeister. Springer, Berlin, 1992.
- [60] *Nelson, P.*: Be in a Treehouse: Design / Construction / Inspiration. ABRAMS, Incorporated, 2014.
- [61] *Amziane, S.; Merta, I.; Page, J. (Hrsg.)*: Bio-Based Building Materials. , ICBBM 2023, RILEM Bookseriesvol 45. Springer,
- [62] *Bundesrepublik Deutschland*: Musterbauordnung – MBO. Bundesrepublik Deutschland, 2019.
- [63] *Kollmann, F.; Kollmann, F.; Cote, W.*: Principles of Wood Science and Technology: I Solid Wood. Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [64] *Wagenführ, R.; Wagenführ, A.*: Holzatlas. Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2021.
- [65] *Hoadley, R.B.*: Understanding Wood: A Craftsman's Guide to Wood Technology, A fine woodworking book, Taunton Press, 1980.
- [66] *Liese, W.*: Biological Transformation of Wood by Microorganisms: Proceedings of the Sessions on Wood Products Pathology at the 2nd International Congress of Plant Pathology September 10-12, 1973, Minneapolis/USA. Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [67] *Panshin, A.J.; Zeeuw, C. de*: Textbook of Wood Technology: Structure, Identification, Properties, and Uses of the Commercial Woods of the United States and Canada, Basic Skills in Electricity and Electronics, McGraw-Hill, 1980.
- [68] *Esau, K.*: Anatomy of Seed Plants. Wiley, 1960.
- [69] *Matyssek, R.; Fromm, J.; Rennenberg, H. et al.*: Biologie der Bäume: Von der Zelle zur globalen Ebene, Uni-Taschenbücher L, UTB GmbH, 2010.
- [70] *Grimmel, M.*: Mechanisches Verhalten von Holz: Struktur- und Parameteridentifikation eines anisotropen Werkstoffes, *Dresdner Forschungen / Maschinenwesen*, w.e.b.-Univ.-Verlag, 1999.
- [71] *Thibaut, B.; Gril, J.; Fournier, M.*: Mechanics of wood and trees: Some new highlights for an old story. *In: Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIB - Mechanics* 329 (2001), S. 701-716. [https://doi.org/10.1016/S1620-7742\(01\)01380-0](https://doi.org/10.1016/S1620-7742(01)01380-0).
- [72] *Archer, R.R.*: Growth Stresses and Strains in Trees, Springer series in wood science, Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [73] *Wulf, J.; Muench, I.*: Residual Stresses in Green Wood Based on a Phase Field Model. *In: Amziane, S.; Merta, I.; Page, J. (Hrsg.)*: Bio-Based Building Materials. , ICBBM 2023, RILEM Bookseriesvol 45. Springer, 899--910.
- [74] *Christie, J.*: Phototropin Blue-Light Receptors. *In: Annual review of plant biology* 58 (2007), S. 21-45. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.58.032806.103951>.
- [75] *Duque, P.; Szakonyi, D. (Hrsg.)*: Environmental Responses in Plants: Methods and Protocols. Springer US, New York, NY, 2022.
- [76] *Morita, M.*: Directional Gravity Sensing in Gravitropism. *In: Annual review of plant biology* 61 (2008), S. 705-720. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.043008.092042>.
- [77] *Dietrich, D.*: Hydrotropism - How Roots Search for Water. *In: Journal of experimental botany* 69 (2018). <https://doi.org/10.1093/jxb/ery034>.

- [78] *Garcia-Maquilon, I.; Lozano-Juste, J.; Alrefaei, A.F. et al.*: Hydrotropism: Analysis of the RootRootsResponse to a Moisture GradientMoisture gradients. In: *Duque, P.; Szakonyi, D.* (Hrsg.): *Environmental Responses in Plants: Methods and Protocols*. Springer US, New York, NY, 2022, S. 17-24.
- [79] *Coutand, C.*: Mechanosensing and thigmomorphogenesis, a physiological and biomechanical point of view. In: *Plant Science* 179 (2010), S. 168-182. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.05.001>.
- [80] *Hellgren, J.M.*: Ethylene and Auxin in the Control of Wood Formation. In: 1401-6230 (2003).
- [81] *Gilroy, S.; Jones, D.L.*: Through form to function: root hair development and nutrient uptake. In: *Trends in Plant Science* 5 (2000), Heft 2, S. 56-60. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(99\)01551-4](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(99)01551-4).
- [82] *BoyerA, J.*: Hydraulics of plant growth. In: *Functional Plant Biology* 31 (2004). <https://doi.org/10.1071/FP04062>.
- [83] *Moulton, D.E.; Oliveri, H.; Goriely, A.*: Multiscale integration of environmental stimuli in plant tropism produces complex behaviors. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117 (2020), Heft 51, S. 32226-32237. <https://doi.org/10.1073/pnas.2016025117>.
- [84] *Polomski, J.; Kuhn, N.*: Wurzelhabitus und Standfestigkeit der Waldbäume. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 120 (2001), S. 303-317. <https://doi.org/10.1007/BF02796102>.
- [85] *Köstler, J.N.; Brückner, E.; Bibelriether, H.*: Die Wurzeln der Waldbäume: Untersuchungen zur Morphologie der Waldbäume in Mitteleuropa. P. Parey, 1968.
- [86] *Ennos, R.*: The mechanics of root anchorage. In: *Advances in Botanical Research* 33 (2000), S. 133-157. [https://doi.org/10.1016/S0065-2296\(00\)33042-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2296(00)33042-7).
- [87] *Roloff, A.; Weisgerber, H.; Lang, U. et al.*: Bäume Mitteleuropas: Von Aspe bis Zirbelkiefer. Mit den Porträts aller Bäume des Jahres von 1989 bis 2010. Wiley, 2010.
- [88] *Roloff, A.; Bärtels, A.*: Flora der Gehölze. Ulmer Verlag, Stuttgart, 1996.
- [89] *Roloff, A.*: Baumkronen: Verständnis und praktische Bedeutung eines komplexen Naturphänomens. Ulmer, 2001.
- [90] *Borowy, I.*: Defining Sustainable Development for Our Common Future: A History of the World Commission on Environment and Development (Brundtland Commission). Taylor & Francis, 2013.
- [91] *United Nations, Department of Economic; Social Affairs - Sustainable Development*: Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development, <https://sdgs.un.org/2030agenda>, 2015.
- [92] *Deutschland Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen*: Leitfaden Nachhaltiges Bauen. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, 2001.
- [93] *Wohlleben, P.*: Gebrauchsanweisung für den Wald. Piper ebooks, 2023.
- [94] *Röhrig, E.; Bartsch, N.; von Lüpke, B.*: Waldbau auf ökologischer Grundlage. UTB GmbH, 2020.
- [95] *Goerlacher, R.*: Karlsruher Tage 2014 - Holzbau : Forschung fuer die Praxis, Karlsruhe, 09. Oktober - 10. Oktober 2014. Karlsruher Institut für Technologie, 2014.
- [96] *Schmidt, O.*: Wood and Tree Fungi: Biology, Damage, Protection, and Use, SpringerLink: Springer e-Books, Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [97] *Aicher, S.*: Laubholzprodukte und - anwendungen / Anschlüsse. Materialprüfanstalt Universität Stuttgart.

- [98] Grote, R.; Schuck, J.; Block, J. et al.: Oberirdische holzige Biomasse inKiefern-/Buchen- undEichen-/Buchen-Mischbeständen. In: Forstwissenschaftliches Centralblatt vereinigt mit Tharandter forstliches Jahrbuch 122 (2003), Heft 5, S. 287-301. <https://doi.org/10.1007/s10342-003-0006-2>.
- [99] Popper, R.: Das Holz/Sorbat-System mit Rücksicht auf die submikroskopische Betrachtungsweise. In: Kučera, L.J. (Hrsg.): Xylorama: Trends in Wood Research / Tendenzen in der Holzforschung. Birkhäuser Basel, Basel, 1985, S. 155-163.
- [100] Trendelenburg, R.; Mayer-Wegelin, H.: Das Holz als Rohstoff. C. Hanser, 1955.
- [101] Ludwig, F.; Schönle, D.; Dümpelmann, S.: Growing Architecture: How to Design and Build with Trees. Walter de Gruyter GmbH, 2023.
- [102] Loske, S.; Muench, I.; Spyridis, P.: A Minimal Invasive Anchoring Technique for the Foundation of Technical Structures in Trees. In: Amziane, S.; Merta, I.; Page, J. (Hrsg.): Bio-Based Building Materials. , ICBBM 2023, RILEM Bookseriesvol 45. Springer, 87--99.
- [103] Kramer, P.: Physiology of Woody Plants. Academic Press, 2012.
- [104] Larson, P.R.: The Vascular Cambium: Development and Structure, Springer series in wood science, Springer-Verlag, 1994.
- [105] Raven, P.H.; Evert, R.F.; Eichhorn, S.E.: Biology of Plants. W. H. Freeman, 2005.
- [106] Sitte, P.; Strasburger, E.; Weiler, E.W. et al.: Strasburger - Lehrbuch der Botanik für Hochschulen. Spektrum Akademischer Verlag, 2002.
- [107] Roberts, L.W.; Preston, R.D.; Gahan, P.B. et al.: Vascular Differentiation and Plant Growth Regulators, Springer series in wood science, Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [108] Masselter, T.; Speck, T.: Quantitative and qualitative changes in primary and secondary stem organization of Aristolochia macrophylla during ontogeny: Functional growth analysis and experiments. In: Journal of experimental botany 59 (2008), S. 2955-2967. <https://doi.org/10.1093/jxb/ern151>.
- [109] Vilkovský, P.; Vilkovská, T.; Klement, I. et al.: The Analysis Effect of Selected Factors on the Shear Strength of Woodbark at Different Wood Species. In: Forests 2022 (2022), S. 637. <https://doi.org/10.3390/f13050637>.
- [110] Bauer, T.: Phasenbildung der Proteinsynthese im aktiven Buchenkambium (*Fagus sylvatica* L.).
- [111] Cunderlík, I.; Vilkovský, P.; Račko, V.: Shear strength and analysis of shear area on wood/bark interface on beech wood (*fagus sylvatica* L.). In: Wood research (2017).
- [112] Dujesiefken, D.; Ebenritter, S.; Liese, W.: Wundreaktionen im Holzgewebe bei Birke, Buche und Linde. In: European Journal of Wood and Wood Products 47 (1989), S. 495-500. <https://doi.org/10.1007/BF02613032>.
- [113] Dujesiefken, D.; Liese, W.: Die Wundreaktionen von Bäumen - das CODIT-Prinzip. In: Forst und Holz : Fachzeitschrift für Forstwirtschaft, Waldökologie, Holzwirtschaft, Umwelt- und Jagdmanagement 63 (2008), Heft 4, S. 26-28.
- [114] Schmitt, U.; Liese, W.: Veränderungen von Parenchym-Tüpfeln bei Wundreaktionen im Xylem von Birke (*Betula pendula* Roth). In: Holzforschung 46 (1992), Heft 1, S. 25-30. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1992.46.1.25>.
- [115] Vorrichtung und Verfahren zur Erzeugung eines dauerhaften Befestigungspunktes an einem Baum. Erfinder: M. ZELLER. Deutschland.
- [116] ÖNorm L 1127: Befestigung an Bäumen. Ausgabe 2010-09-00.

- [117] *Nelson, P.; Sternthal, B.*: Neue Baumhäuser der Welt. Brandstätter, 2009.
- [118] <https://www.treehouseparts.com/>: Garnier-Limb [Zugriff am: 15.10.2024].
- [119] *Richter, C.; Rüggeberg, M.*: Wie man ein Baumhaus baut. Laurence King Verlag GmbH, 2023.
- [120] <https://www.babo-solutions.de/>: Plochinger Baumbolzen, 2024.
- [121] *Zeller, M.*: Baumschrauben. Persönliche Gespräche, 2020-2024.

Anhang

Kraft-Verformungsdiagramme der Biegeversuche

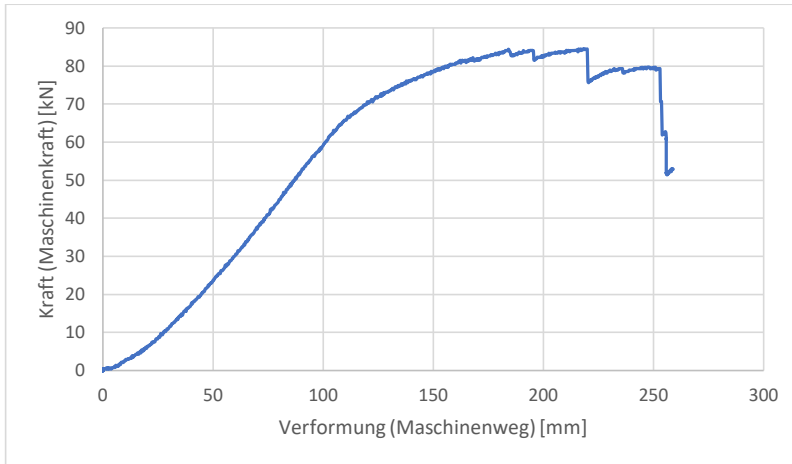


Abbildung 121: Versuchsreihe 1, Baum 1

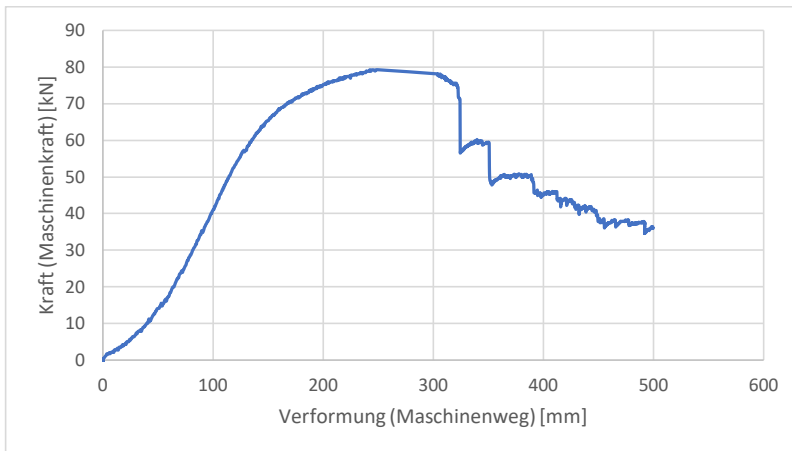


Abbildung 122: Versuchsreihe 1, Baum 2

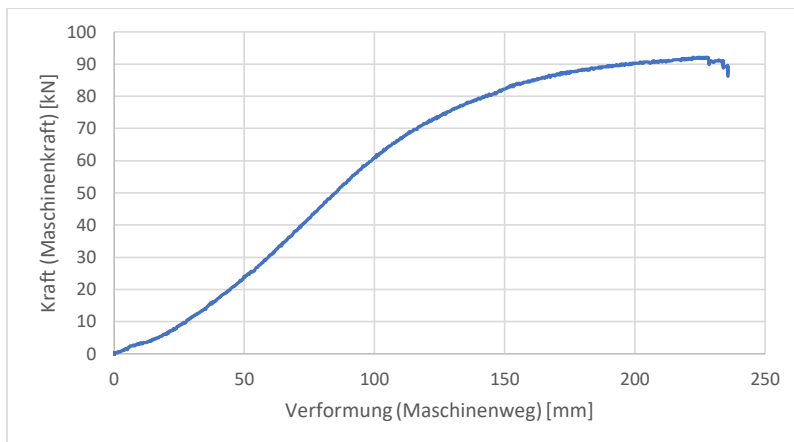


Abbildung 123: Versuchsreihe 1, Baum 3

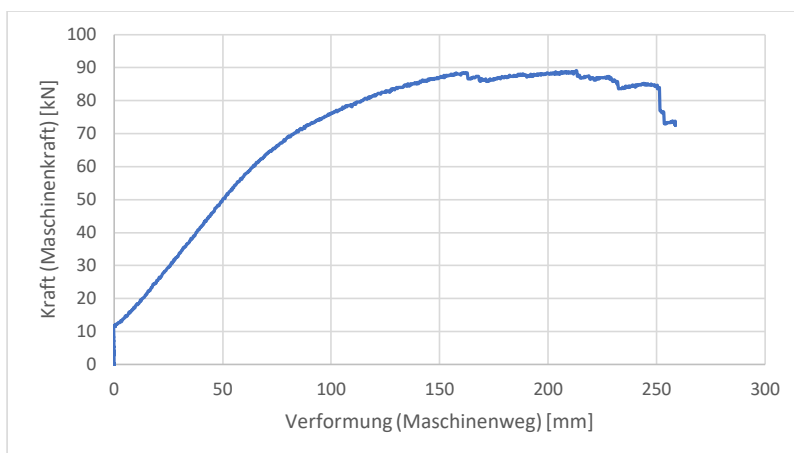


Abbildung 124: Versuchsreihe 1, Baum 4

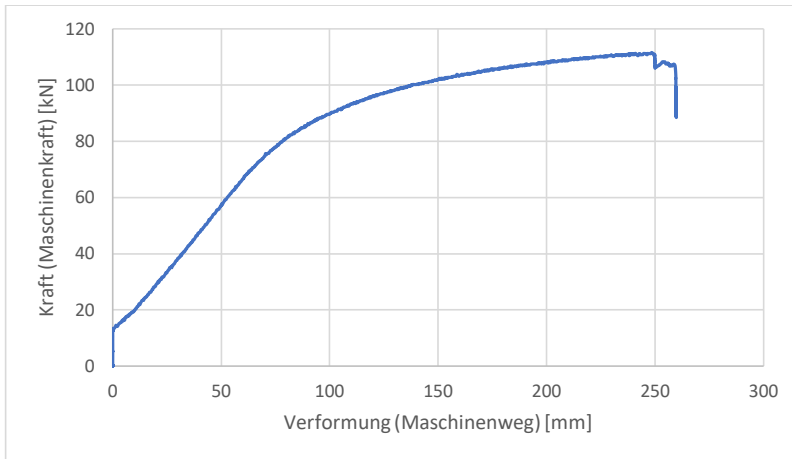


Abbildung 125: Versuchsreihe 1, Baum 5 unterer Abschnitt

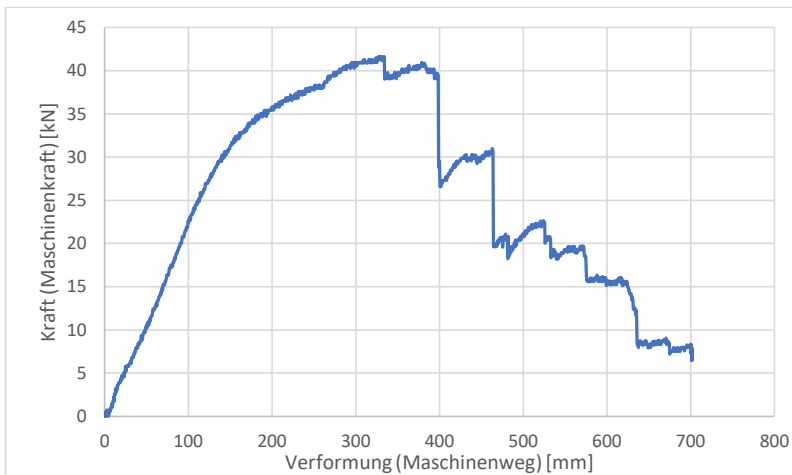


Abbildung 126: Versuchsreihe 1, Baum 5 oberer Abschnitt

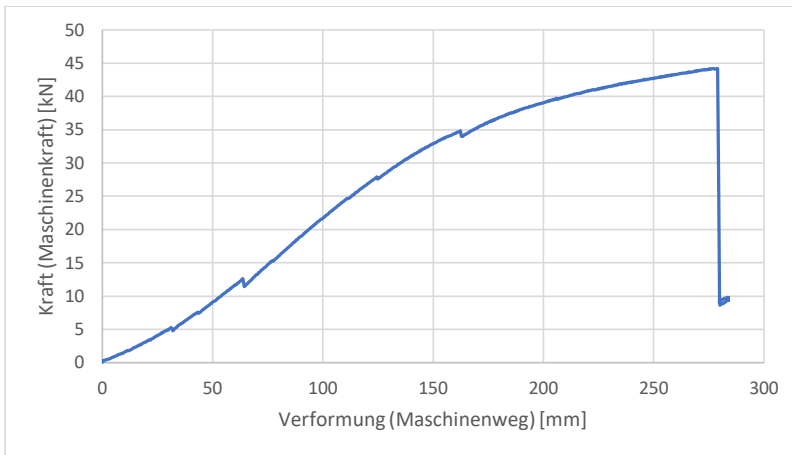


Abbildung 127: Versuchsreihe 2, V1

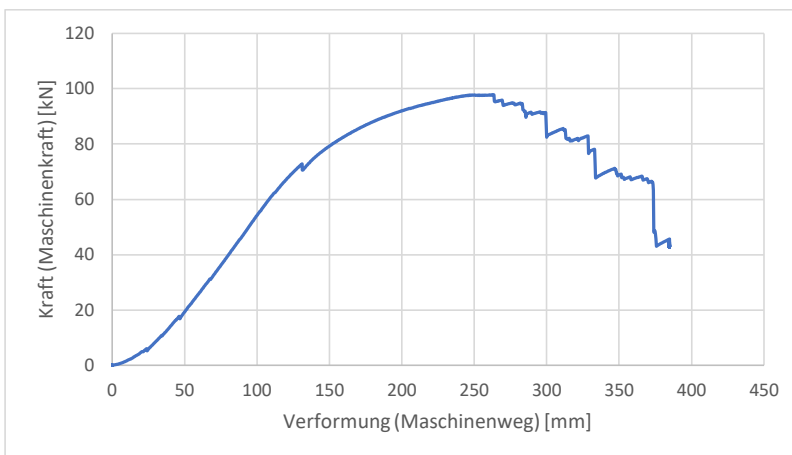


Abbildung 128: Versuchsreihe 2, V2

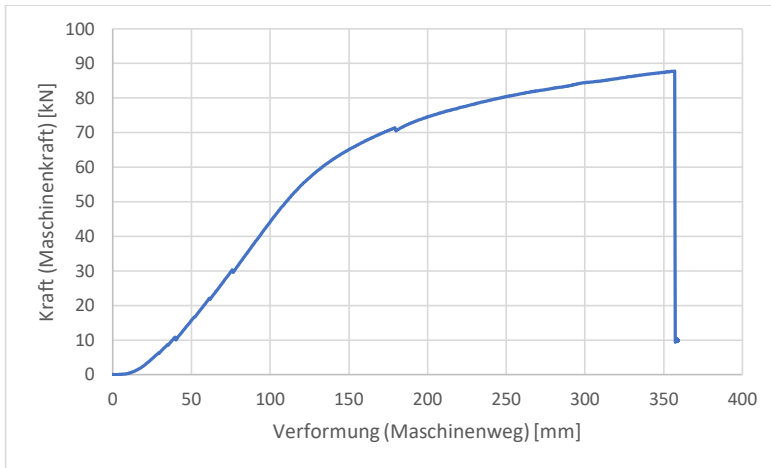


Abbildung 129: Versuchssreihe 2, V3

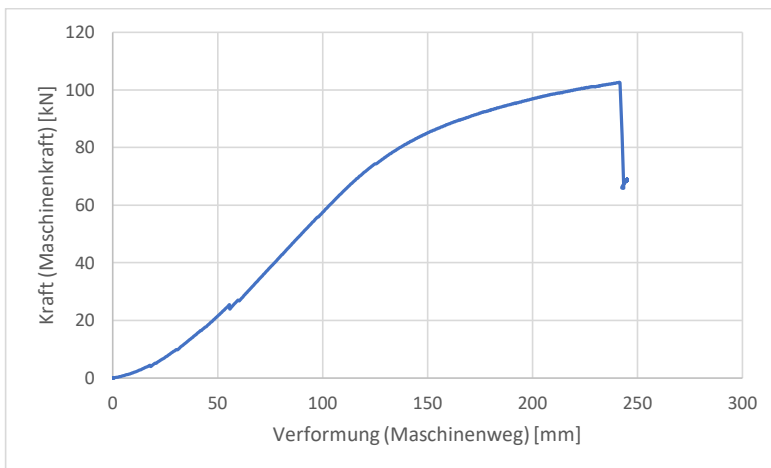


Abbildung 130: Versuchssreihe 2, V4

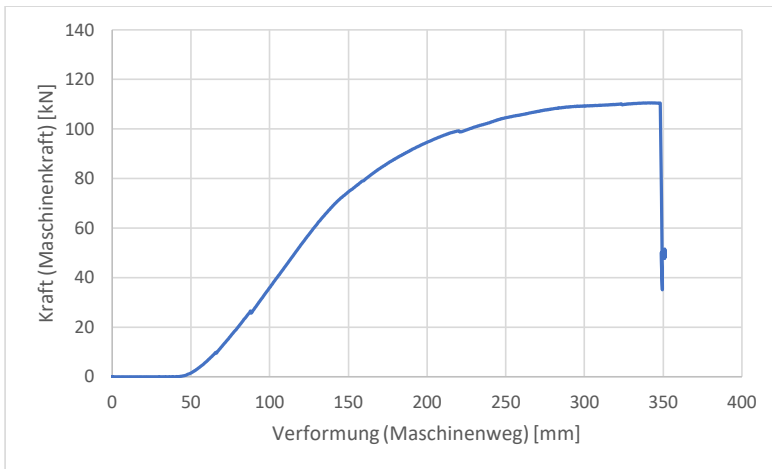


Abbildung 131: Versuchsreihe 2, V5

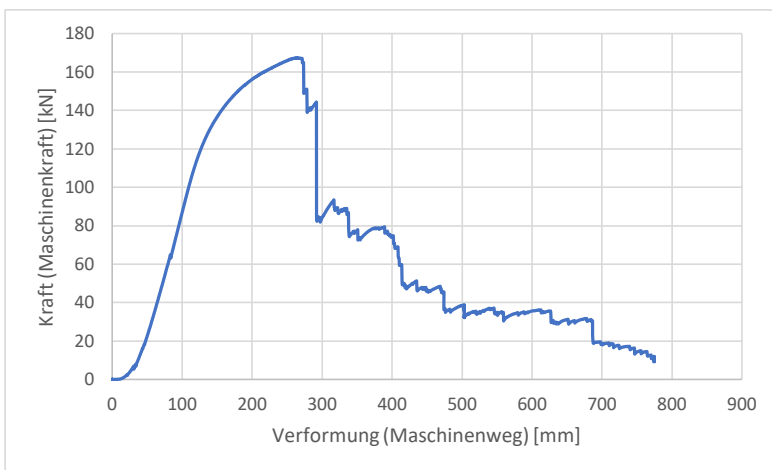


Abbildung 132: Versuchsreihe 2, V6

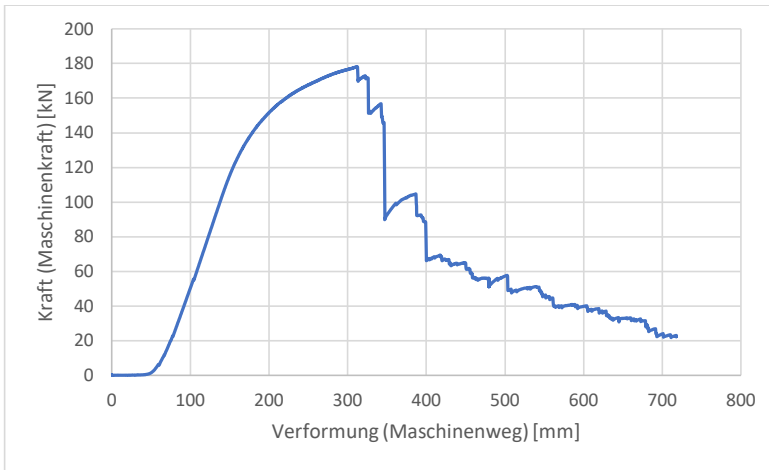


Abbildung 133: Versuchsreihe 2, V7

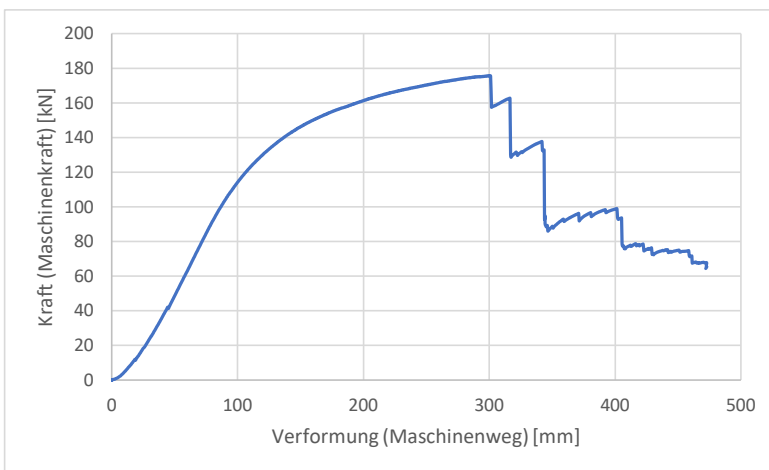


Abbildung 134: Versuchsreihe 2, V8

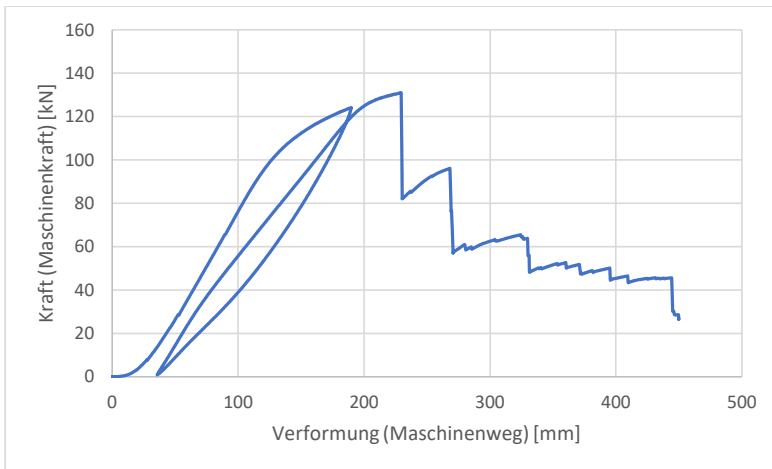


Abbildung 135: Versuchsreihe 2, V9

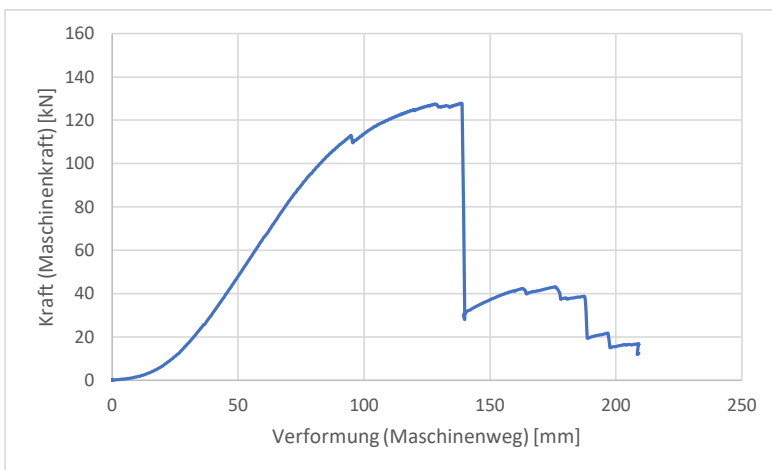


Abbildung 136: Versuchsreihe 2, V10

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Links: Tanzlinde Sachsenbrunn in Thüringen. Rechts: Rainer Lippert (gemeinfrei), rechts: Baumhaus Pitchford Hall in Shropshire. Colin Park (CC-BY-SA 2.0)	5
Abbildung 2: Parc Robinson, Postkarte 1900. unbekannter Autor, (offene Lizenz)	5
Abbildung 3: Baumhaus der Korowai. iStock.com/ANDREYGUDKOV.....	6
Abbildung 4: Wurzelbrücke in Lympungshyrgan, Bundesstaat Meghalaya, Indien. Roman Korzh (CC BY-NC-ND 2.0 DEED)	7
Abbildung 5: Pädiatrisches Baumhaus als Spielumgebung für Kinder. Paddy Griffin (CC-BY-SA 2.0) 8	
Abbildung 6: Baumkronenpfad Nationalpark Hainich. Dietmar Rabich (CC-BY-SA 4.0)	8
Abbildung 7: Links: Baumhaus in Vietnam. iStock.com/simongurney Rechts: Baumhaus in Mexiko. iStock.com/AlexKane	9
Abbildung 8: Baubotanischer Steg Kamen.	10
Abbildung 9: Bestandteile des Stammes im Querschnitt am Beispiel einer Robinie (<i>Robinia pseudoacacia</i>)	16
Abbildung 10: Prinzip der Wirkungsweise von Wachstums-Eigenspannungen in Kombination mit Biegespannungen im Querschnitt eines Stammes.	17
Abbildung 11: Schematische Darstellung unterschiedlicher Wurzelsysteme: Flachwurzler (a), Herzwurzler (b) und Pfahlwurzler (c). Bild entnommen aus [85].	21
Abbildung 12: Typische Form ungehindert entwickelter Wurzelsysteme von Fichte, Tanne, Buche und Eiche. Bild entnommen aus [84].	22
Abbildung 13: Links: Plattform mit schräger Abstützung als zentralsymmetrische Anordnung. Rechts: Einseitige Anordnung z.B. für einen Steg.....	25
Abbildung 14: Links: Überbrückung mit Hilfe von Biegebalken. Rechts: Zusätzliche Abstrebung zur Versteifung.	26
Abbildung 15: Links: Abhängung einer Plattform ohne Zwängung. Rechts: Abhängung einer Plattform mit zusätzlicher Aussteifung.	26
Abbildung 16: Redundante Verseilung eines Baukörpers im Kronenbereich von Eichen.	27
Abbildung 17: Festigkeitsklassen europäischer Laub- und Nadelhölzer. Grafik entnommen aus [97].	30
Abbildung 18: Möglicher Versuchsaufbau für eine Prüfung in situ.	34
Abbildung 19: Links: Verlauf von Querkraft und Biegemoment im 3-Punkt Versuch. Rechts: Verlauf von Querkraft und Biegemoment im 4-Punkt Versuch.	35
Abbildung 20: Quasi-3-Punkt Versuch mit Einleitung von Zugkräften durch textile Lastschlingen. 36	
Abbildung 21: Abweichung des Querschnittes von der Kreisform in unterschiedlichen Höhenschnitten am Beispiel der Rotbuche für 27 Bäume an drei verschiedenen Standorten. Grafik aus der Bachelorarbeit von Sophia Langenbeck, TU Dortmund.....	37
Abbildung 22: Änderung des Stammdurchmessers am idealisierten Kreisquerschnitt vom Fußpunkt bis zum Ansatz des ersten Starkastes, normiert auf den Brusthöhendurchmesser (1,3 m über Grund) am Beispiel der Rotbuche für 27 Bäume an drei verschiedenen Standorten. Grafik aus der Bachelorarbeit von Sophia Langenbeck, TU Dortmund.	37
Abbildung 23: Links: Fällung der Bäume für Versuchskörper. Rechts: Verladung für den Transport mit textilen Schlingen und Gummimatten.	38

Abbildung 24: Prüfkörper der ersten Versuchsreihe.	39
Abbildung 25: Prüfkörper der zweiten Versuchsreihe.....	40
Abbildung 26: Einbau des Versuchskörpers am Verankerungspunkt.	42
Abbildung 27: Erste Versuchsreihe mit der Versuchskörperlänge von 5,00 m.....	43
Abbildung 28: Schematischer Aufbau des Biegeversuchs der ersten Versuchsreihe.....	43
Abbildung 29: Schematischer Aufbau des Biegeversuchs der zweiten Versuchsreihe.....	44
Abbildung 30: Zweite Versuchsreihe mit der Versuchskörperlänge von 6,00 m.	44
Abbildung 31: Kraft-Verformungsdiagramm des Versuchskörpers 2 der ersten Versuchsreihe.	45
Abbildung 32: Linear elastische Vergleichsrechnung des Biegeversuch mit einem Meter langen Segmenten und abgestuften Querschnitten gemäß der Geometriedaten in Tab. 1.....	46
Abbildung 33: Links: Band von ausgeknickten Holzfasern nach vollständiger Ablösung der Borke während der Prüfung. Rechts: Band von ausgeknickten Holzfasern am vollständig getrockneten Prüfkörper.	46
Abbildung 34: Typisches Versagensbild des Querschnittes im Biegeversuch.....	47
Abbildung 35: Kraft-Verformungsdiagramm des Versuchskörpers 5 (unten) aus der ersten Versuchsreihe.....	47
Abbildung 36: Kraft-Verformungsdiagramm des Versuchskörper 5 (oben) aus der ersten Versuchsreihe.....	48
Abbildung 37: Faserbündel delamination und Aufreißen am Astansatz des oberen Abschnittes von Baum 5.	49
Abbildung 38: Kraft-Verformungsdiagramm des Versuchskörpers 3 aus der zweiten Versuchsreihe.	50
Abbildung 39: Druckprüfung am Vollquerschnitt.	51
Abbildung 40: Druckfestigkeitsprüfung am Prisma sowie Abmessungen der Probekörper.	52
Abbildung 41: Bohrkernentnahme mittels Zuwachsbohrer und Prüfung durch Fractometer II.	52
Abbildung 42: Flächenabdrücke des Druckprüfkörpers 1.....	53
Abbildung 43: Kraft-Verformungsdiagramm für den Druckversuch am Druckprüfkörper 3.	54
Abbildung 44: Ausbildung eines Scherbandes mit lokalem Faserknicken (links) und radiales Ausknicken von Jahrringschichten (rechts).	55
Abbildung 45: Durchschnittliche Druckfestigkeit aus Mikrobohrkernen für Baum 3 über die Stammhöhe. Bachelorarbeit Markus Waldecker, TU Dortmund.	57
Abbildung 46: Druckfestigkeit der Mikrobohrkerne aus vier Richtungen für Baum 3. Bachelorarbeit Markus Waldecker, TU Dortmund.	58
Abbildung 47: Streuweite der Druckfestigkeit der Mikrobohrkerne für Baum 3. Bachelorarbeit Markus Waldecker, TU Dortmund.	58
Abbildung 48: Zugversuch am knochenförmigen Prüfkörper und Prüfkörpergeometrie.....	59
Abbildung 49: Modifizierter Zugprüfkörper mit Dehnungsmesseinrichtung und Konstruktionszeichnung.....	60
Abbildung 50: Links: Modifizierte Zugprüfkörper mit quadratischem Querschnitt. Rechts: Modifizierte Zugprüfkörper mit rundem Querschnitt.	61
Abbildung 51: Exemplarisches Spannungs-Dehnungsdiagramm im Zugversuch.	61
Abbildung 52: Prüfkörper im Zugversuch nach dem Versagen.....	62
Abbildung 53: Darstellung der Spannungshypothese für Biegung eines runden Querschnitts um die ξ -Achse in Phase 1 bis Phase 2.	63

Abbildung 54: Links: Konvergenzverhalten der Lösungsalgorithmen zur Auffindung von η_0 . Rechts: Bestimmung von f_t durch Intervallhalbierung.	65
Abbildung 55: Grenzmomente für den elastischen Fall, sowie unter Ausnutzung von $f_t / f_c = 2,51$ in der hier propagierten Spannungshypothese im Vergleich zu den Traglastversuchen in Kap. 3.5. ...	66
Abbildung 56: Die Entnahme eines Baumes innerhalb einer Baumgruppe hinterlässt eine Lücke im Kronenbereich, welche sich über den Phototropismus der umherliegenden Bäume mit der Zeit schließt. Die Entnahme stellt eine Störung des langjährig gewachsenen Zustands dar, welcher z.B. die Windangriffsfläche der verbleibenden Kronen und damit die mechanische Belastung der verbleibenden Bäume verändert.	67
Abbildung 57: Darstellung von Gewebeschichten des Stammes.	68
Abbildung 58: Unterschiedliche Beschaffenheit der Borke am Beispiel der Korkeiche (links) und der Rotbuche (rechts), Stamm der Korkeiche (oben links), Claus Ableiter CC-BY-SA 3.0, Stamm der Rotbuche (oben rechts), Schnitt durch den Stamm der Korkeiche mit dicker Borke (unten links), CC-BY-SA 3.0, Schnitt durch den Stamm der Rotbuche (unten rechts), CC-0	69
Abbildung 59: Links: Kallusbildung um einen toten Ast um diesen über Wachstumsdruck abzuwerfen.	70
Abbildung 60: Einsatz textiler Schlingen an Astgabeln (links), welche auch im Falle des Astabwurfs u.U. noch nutzbar sind (rechts).	70
Abbildung 61: Beispiele der Überschreitung des Turgeszenzdrucks in der Kontaktfläche zwischen Befestigungselementen und Baumoberfläche.	71
Abbildung 62: Aussichtsplattform "Adlerhorst" im Schwarzwald vor der Anbringung zusätzlicher Abstützung sowie danach.	72
Abbildung 63: Abrutschen reibungsbasierter Verbindungen nach Kategorie 2, welche durch den Aufbau von Formschluss an Asterhebungen (links) bzw. durch die Neuausrichtung des Lastseils zum Stillstand kommt (rechts).	73
Abbildung 64: Unterschiedliche Bauformen von Spreizdübeln: Wegkontrolliert spreizender Dübel (links) und Hinterschnittdübel (rechts).	74
Abbildung 65: Durchgehende Gewindestange gemäß Kategorie 3.	75
Abbildung 66: Baumschraube mit Umwallungsabschnitt und Anschlussstechnik (Wirbel, Ösen, Lasche, Spanngewinde).	76
Abbildung 67: Entstehung Querzugspannungen unter Querkraftbeanspruchung.	77
Abbildung 68: Verlauf von Querkraft und Biegemoment bei Querlastbeanspruchung (links). Baumschraube nach Überlastung durch Querlast (rechts).	78
Abbildung 69: Ist die minimalinvasive Vorgehensweise (links) nicht ausreichend tragfähig, kann durch das initiale Einbringen des Umwallungsabschnitts (rechts) eine erhebliche Verstärkung herbeigeführt werden.	79
Abbildung 70: Garnier-Schraube aus gelb-verzinktem Stahl. Michael Garnier, CC-BY-SA 3.0.	79
Abbildung 71: Baumschraube GTS-Allstar, Vitus Wahlländer, CC-BY-SA 4.0.	80
Abbildung 72: Produktsortiment von Baumschrauben und Anbauteilen der GTS Schrauben (links) und Vergleich der Tragfähigkeiten (rechts). Vitus Wahlländer, CC-BY-SA 4.0.	81
Abbildung 73: Baumschrauben nach Patentanmeldung durch Martin Zeller in unterschiedlichen Ausführungen.	82

Abbildung 74: Direkte Verbindung von Baumschrauben in eine Umreifung an der zentralsymmetrischen Aussichtsplattform „Adlerhorst“, welche eine einzelne Weißtanne (Abies alba) als Tragstruktur nutzt.	82
Abbildung 75: Baumschraube der Versuchsreihe.....	83
Abbildung 76: Darstellung des Versuchsaufbaus zur Tragfähigkeit von Baumschrauben.....	84
Abbildung 77: Keilscheiben zur Unterlage geneigter Konfigurationen bzgl. der Baumoberfläche.	85
Abbildung 78: Last-Verformungs-Diagramm für die Ausziehversuche mit $\alpha=0^\circ$	86
Abbildung 79: Baumschraube nach dem axialen Ausziehversuch.....	86
Abbildung 80: Darstellung der Versuchskörper mit Vermaßung (links) sowie exemplarisches Bild der Verformung unter reiner Querbeanspruchung (rechts).	87
Abbildung 81: Last-Verformungs-Diagramm für die reine Querbeanspruchung $\alpha=90^\circ$, $\beta=0^\circ$	88
Abbildung 82: Einfaches Tragmodell zur Erfassung der Abstützkraft D.....	88
Abbildung 83: Schädigung der Holzmatrix (links) und bleibende Verformung der Baumschraube (rechts) nach der reinen Querbeanspruchung.	89
Abbildung 84: Versuchsaufbau und Geometrie der Abstützplatte auf dem Probekörper.	89
Abbildung 85: Reine Querkraftbeanspruchung mit zusätzlicher Abstützung durch Unterlegplatte.	90
Abbildung 86: Baumschraube mit Abstützplatte unter Querbelastung, a) $F = 0$ kN, b) $F = 14$ kN, c) $F = 17$ kN, d) $F = 14$ kN, e) $F = 8$ kN.	90
Abbildung 87: Last-Verformungs-Diagramm für beispielhaften Belastungsversuch $\alpha=60^\circ$, $\beta=30^\circ$, mit direkter und zyklischer Lastaufbringung.	91
Abbildung 88: Belastungsversuch für $\alpha=60^\circ$, $\beta=30^\circ$ mit dem bereits verdrehten Umwallungsabschnitt.....	92
Abbildung 89: Seitliche Ansicht zur Darstellung der Grundidee der biegefesten Kopplung zweier Baumschrauben.....	93
Abbildung 90: Prinziplösung für ein wachstumscompatibles Koppellement für Baumschrauben im Einbauzustand (links) und nach vorangeschrittener Umwallung und Verlängerung (rechts).....	94
Abbildung 91: Traglastmodell zweier biegesteif gekoppelten Baumschrauben.	95
Abbildung 92: Geometrische Spezifikationen zur Kopplung zweier Baumschrauben.....	95
Abbildung 93: Materialmodell für grünes Holz der Rotbuche (links) mit Spannungsversagenshypothese nach der von Mises Fließhypothese (rechts).	96
Abbildung 94: Darstellung des einfachen Simulationsmodells zur Kopplung zweier Baumschrauben.	97
Abbildung 95: Variation der Position der Seillasche und damit des Lastangriffspunktes.....	97
Abbildung 96: Normalkräfte im System für unterschiedliche Lasteinleitungspunkte und Lastrichtungen.....	98
Abbildung 97: Biegemomente im System für unterschiedliche Lasteinleitungspunkte und Lastrichtungen.....	99
Abbildung 98: Last-Verschiebungskurve für die Simulation des Rahmens (Lastfaktor 1.0 entspricht $F = 78$ kN).....	101
Abbildung 99: Biegemoment und Position des Fließens der beiden Baumschrauben bei $F = 78$ kN.	101
Abbildung 100: Schnittgrößen, Normalspannung sowie Krümmung in den Stabelementen des einfachen Modells zur Analyse der Traglast des Koppellementes.	102

Abbildung 101: Tragfähigkeit des Koppелеlementes unter verschiedenen Lastwinkeln zur Horizontalen.....	103
Abbildung 102: Verformungen in Millimeter bei der jeweiligen Traglast in Abhängigkeit des Lastwinkels. Die Biegelinie ist in 25-facher Überhöhung dargestellt.	104
Abbildung 103: Darstellung des 3D Berechnungsmodells in ANSYS.....	105
Abbildung 104: Darstellung der von Mises Vergleichsspannung am verformten System (links) sowie in der Holzmatrix (rechts) in $[N/mm^2]$	105
Abbildung 105: Last-Verschiebungsdiagramm der ANSYS Simulation.	106
Abbildung 106: Realer Belastungsversuch des Anschlusses unter $\alpha=90^\circ$	107
Abbildung 107: Anfangsschrägstellung infolge des Lochspiels zwischen Umwallungsabschnitt und Hülsen schon bei geringer Last.....	107
Abbildung 108: Bohrloch nach Entfernung der unteren Schraube (links) sowie verformte Baumschrauben nach dem Belastungsversuch mit Mittelachsen und Markierung von Bereichen hoher Krümmung durch überhöhter Linien mit Punkten (rechts).	108
Abbildung 109: Befestigungselement unmittelbar nach der Montage (links), nach zwei Wachstumsperioden (Mitte) und nach drei Wachstumsperioden (rechts).	109
Abbildung 110: Errichtung des Baukörpers auf einem Traggerüst ca. 3 m über Grund.	111
Abbildung 111: Messung der Seilspannung durch lokale Querbelastung des Seiles.	112
Abbildung 112: Ansicht des Bauwerks Loop.	113
Abbildung 113: Schema der Lastabtragung über geneigte Seile (rot) und eine Rückverankerung (grün) für Gewichtskräfte sowie über horizontale Seile (blau) für Windlasten.	114
Abbildung 114: Anschluss der Seile über Spansschloss und Gabel am Wohnkörper (links) sowie am Baum (rechts).	114
Abbildung 115: Beispielhafte Darstellung der einwirkenden Belastungen aus einem Bauwerk auf die Tragbäume am Beispiel des Bauwerks Loop (horizontale Linien markieren einwirkende Belastung).	115
Abbildung 116: Ansicht des Bauwerks Cube.	116
Abbildung 117: Befestigungselemente und Umreifung des Baumes unterhalb der Terrasse (links) sowie zur Realisierung einer Konsole am Baum (rechts).	117
Abbildung 118: Berechnungsmodell des Baukörpers mit Seilaufhängung und zusätzlicher Abstützung mit Pendelstab.	117
Abbildung 119: Ansicht des Bauwerks Echo.....	118
Abbildung 120: Berechnungsmodell für das Bauwerk Echo.	119
Abbildung 121: Versuchsreihe 1, Baum 1	130
Abbildung 122: Versuchsreihe 1, Baum 2	130
Abbildung 123: Versuchsreihe 1, Baum 3	131
Abbildung 124: Versuchsreihe 1, Baum 4	131
Abbildung 125: Versuchsreihe 1, Baum 5 unterer Abschnitt	132
Abbildung 126: Versuchsreihe 1, Baum 5 oberer Abschnitt	132
Abbildung 127: Versuchsreihe 2, V1.....	133
Abbildung 128: Versuchsreihe 2, V2.....	133
Abbildung 129: Versuchsreihe 2, V3.....	134
Abbildung 130: Versuchsreihe 2, V4.....	134
Abbildung 131: Versuchsreihe 2, V5.....	135

Abbildung 132: Versuchsreihe 2, V6	135
Abbildung 133: Versuchsreihe 2, V7	136
Abbildung 134: Versuchsreihe 2, V8	136
Abbildung 135: Versuchsreihe 2, V9	137
Abbildung 136: Versuchsreihe 2, V10	137

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Geometrische Eigenschaften der Prüfkörper der ersten Versuchsreihe	39
Tabelle 2: Geometrische Eigenschaften der Prüfkörper der zweiten Versuchsreihe.....	40
Tabelle 3: Durchmesser und Biegetragfähigkeiten der Prüfkörper der 1. Versuchsreihe	49
Tabelle 4: Durchmesser und Biegetragfähigkeiten der Prüfkörper der 2. Versuchsreihe	50
Tabelle 5: Zusammenstellung der Druckprüfkörper aus Baum 2	53
Tabelle 6: Prismatische Druckprüfkörper aus Baum 2.....	56
Tabelle 7: Würfelförmige Druckprüfkörper aus Baum 2.....	56
Tabelle 8: Druckfestigkeiten am Mikrobohrkern aus Baum 2.....	57
Tabelle 9: Parameter und Anzahl der Versuche	84
Tabelle 10: Auszieh widerstände unter verschiedenen Einbringungsrichtungen β	85
Tabelle 11: Längenbezogene Ausziehsfestigkeit beim axialen Ausziehversuch.....	86