

Bäume statt Beton - Realisierung von Wohnkörpern im Baumbestand

Simon Loske, Ingo Münch

Institut für Baumechanik, Statik und Dynamik, Technische Universität Dortmund

Zusammenfassung: Wohnkörper können durch Bäume unter Berücksichtigung baurechtlicher und konstruktiver Vorgaben gegründet werden. Wir stellen konkrete Projekte dazu vor und erläutern konstruktive Besonderheiten. So kann sowohl der Einsatz von Beton als auch die Versiegelung von Flächen umgangen bzw. minimiert werden. Derartige Bebauung ist z.B. für den Tourismus oder die Erschließung suburbaner Räume interessant. Die damit verbundenen Chancen und Risiken der unkonventionellen Bauweise werden ebenfalls besprochen.

1 Motivation und Allgemeines

1.1 Motivation und Vorbemerkungen

Die Nutzung bestehender Bäume zur Gründung von Wohnkörpern gestaltet neue Möglichkeiten zur Einsparung von Ressourcen sowie zur Verwirklichung naturschonender Zivilisation. Während konventionelle Erschließung von Bauland ggf. die vollständige Entwaldung vor der Bebauung vorsieht, kann die hier vorgeschlagene Methodik zumindest zur Erhaltung eines Teilbestandes beitragen. Derartige Baugebiete sind bis dato Vision, was nach Meinung der Autoren u.a. darin begründet ist, dass den damit verbundenen Chancen und Risiken bisher keine Notwendigkeit und Motivation gegenüberstand. Mit Blick auf die globalen Nachhaltigkeitsziele der Agenda 2030¹ ist die Vision durch den verantwortungsvollen Umgang mit natürlichen Ressourcen motiviert, vgl. die Ziele 11-13 und 15 der Agenda.

Die Medien präsentieren bereits laienhaft erstellte Bauwerke an Bäumen, welche Risiken und ggf. sogar das Bauordnungsrecht übersehen. Beidem möchte der vorliegende Artikel entgegenwirken, indem genehmigte Projekte sowie Maßnahmen zur Minimierung des

¹ Umsetzung der 17 globalen Nachhaltigkeitsziele der Weltgemeinschaft aus dem Jahr 2015 durch die Bundesregierung

Risikos vorgestellt werden. Dazu gehört die Einordnung solcher Tragwerke in das bestehende Baurecht sowie eine Liste konstruktiver Maßnahmen. Diese sollten beinhalten:

1. Baumschonende und dauerhafte Anbindung an Tragbäume
2. Statisch überzählige Lagerung innerhalb der Baumgruppe
3. Ggf. Rückverankerung von Tragbaum zu Tragbaum
4. Ggf. Verlagerung von Gewichtskräften auf eine/mehrere technische Stütze(n)

Punkt 1 resultiert aus der Tatsache, dass es sich bei dem Tragelement Baum nicht um einen technischen Baustoff, sondern um ein vitales und komplexes Lebewesen mit Wachstumseigenschaften handelt. Eine dauerhafte Anbindung muss z.B. das Dickenwachstum konstruktiv berücksichtigen, vgl. Kap 1.3.

In Punkt 2 wird der Tatsache Rechnung getragen, dass das Tragelement „Baum“ mit bestimmtem Stammquerschnitt etc. eine Vorgabe darstellt und im Gegensatz zu einer konventionellen Bemessung, die Anpassung der Schnittkräfte (und nicht des Querschnitts) erfordert. Durch überzählige Lagerung innerhalb der Baumgruppe können Schnittkräfte so justiert werden, dass schwächere Bäume weniger und starke Bäume mehr Last übernehmen. Sollte die Biegetragfähigkeit einzelner Tragbäume dennoch unter einem geforderten Niveau liegen, kommt Punkt 3 zum Tragen. So können z.B. Horizontallasten an benachbarte Bäume über entsprechende Seile weitergeleitet werden (Rückverankerung), vgl. auch Kap 2. Reichen die Maßnahmen in Punkt 2 und 3 nicht aus, muss die Verwendung zusätzlicher Stützen in Betracht gezogen werden, siehe Punkt 4. Genügt die Baumgruppe zur Aussteifung des Tragwerks (Windlasten etc.), können zusätzliche Stützen querkraftfrei und mit einem entsprechend kleinen Fundament ausgeführt werden, vgl. Kap 2.2.

Die Erhaltung von Tragbäumen in Baumgruppen zur Gesteuerung von Wohnraum bietet folgende Chancen:

1. Sommerlichen Wärmeschutz durch Verschattung und Transpiration von Wasser
2. Erhöhte Artenvielfalt besonders in Kombination mit Freiflächen z.B. für Garten und konventionelle Bebauung
3. Erosionsschutz und ggf. Stabilisierung von Hanglagen durch tiefgehendes Wurzelsystem
4. Erhaltung von Waldoberfläche inkl. Bodenökosystem
5. Indirekter Hochwasserschutz durch entsiegelte Fläche und erhöhte Speicherkapazität des Waldbodens

Diesen Chancen stehen folgende Risiken gegenüber:

1. Astbruch, Stammbruch, Wurzelversagen und Grundbruch bei Starkwind
2. Verlust der Baumvitalität durch Trockenheit und/oder Schädlingsbefall
3. Angriff des Wurzelsystems und/oder der Holzmatrix durch Pilze und Viren
4. Bodenverdichtung und mechanische Beschädigung des Stammes und oberflächennaher Wurzeln beim Bau und der späteren Nutzung
5. Schädigende Verbindung zwischen Tragbaum und technischen Elementen

Durch pflegerische Maßnahmen (Asteinkürzung, Bewässerung) kann den ersten beiden Punkten effektiv entgegengewirkt werden. Die Kürzung von Ästen ist eine etablierte Methode der Baumpflege und verringert die Windangriffsfläche sowie den Wasserbedarf des Baumes [1]. Das Verhältnis von Wurzelvolumen zu Kronenvolumen steigt an, so dass

Trockenperioden besser überstanden werden. Für extreme Trockenperioden können Regenauffangbecken als Wasserspeicher zur künstlichen Bewässerung vorgesehen werden, um auch diesem Risiko entgegen zu wirken. Eingehende Untersuchung der Tragbäume können auch Punkt 3, den Befall durch Pilze und Viren, in dessen Risiko abschätzen und sollten ggf. von der Bebauung abraten. Die Punkte 4 und 5 obliegen der Planung und Bauausführung, welche das Risiko durch entsprechende technische Maßnahmen minimieren oder völlig umgehen können.

Unsere Beispiele in Kap. 2 sind mit Rotbuchen (*Fagus sylvatica*) realisiert, welche Tiefwurzeln ausbilden. Im Zuge des Klimawandels sind anpassungsfähige Baumarten mit möglichst hoher Wärme- und Trockenresistenz zu bevorzugen, was i.d.R. mit einem tieferen Wurzelsystem einhergeht. Flachwurzler wie z.B. Fichte (*Picea abies*) sind zudem auf Grund des hohen Risikos durch Schädlingsbefall als riskant einzustufen.

1.2 Betrachtungen zum Bauordnungsrecht

Das Bauordnungsrecht wird nun in Anlehnung an die Musterbauordnung (MBO) der Fassung 2022 im vorliegenden Kontext einer Analyse unterzogen. Auch wenn derartige Wohnkörper vollständig über dem Boden gegründet sind, liegt gemäß MBO §2(1) eine aus Bauprodukten hergestellte Anlage vor, welche auf ortsfesten Bahnen begrenzt beweglich ist oder nach ihrem Verwendungszweck dazu bestimmt ist, überwiegend ortsfest benutzt zu werden.² Die Verbindung zum Erdboden wird über Bäume hergestellt [2], deren Einordnung in die MBO im Zuge dieser Analyse noch genauer vorgeschlagen wird.

Weiterhin definiert MBO §2 Satz 2 derartige Anlagen als Gebäude, da sie von Menschen betreten werden können und geeignet oder bestimmt sind, dem Schutz von Menschen, Tieren oder Sachen zu dienen. Somit greift auch §2 Satz 3 zur Einteilung der Gebäudeklasse und das mittlere Maß der Fußbodenoberkante des höchstgelegenen Geschosses, in dem ein Aufenthaltsraum möglich ist, über der Geländeoberfläche. Die Objekte in Kapitel 2 sind so angelegt, dass freistehende Gebäude mit einer Höhe bis zu 7 m und Gebäudeklasse 1 vorliegen. Höhere Bebauung impliziert eine höhere Gebäudeklasse, z.B. GKL 4 bis 13 m, woraus sich entsprechend höhere Anforderungen an den Brandschutz etc. ergeben.

Gemäß MBO §61 Satz 1 sind nur sehr kleine, eingeschossige Wohnkörper bis zu einer Bruttogrundfläche von 10 m² in verfahrensfreie Bauvorhaben einzustufen, was in den Landesbauordnungen allerdings variiert. Dennoch sind i.d.R. bautechnische Nachweise gemäß MBO §66 für die hier angesprochenen Gebäude zu erbringen.

Aus der MBO §16a Absatz 1 (Bauarten) wird deutlich, dass die Planung eines Bauvorhabens die Funktionalität, eine angemessene Nutzungsdauer, sowie Möglichkeiten zur Instandhaltung vorsehen muss. Diese Anforderungen sind im Sinne der Nachhaltigkeit im Bauwesen von hoher Bedeutung und sollen durch ein Beispiel in Kap. 1.3 unterlegt werden.

² In NRW haben sich Verwaltungsgerichte mit der Frage befasst, ob Baumhäuser der Legaldefinition „bauliche Anlage“ nach Landesbauordnung unterfallen. Diese Frage wurde in streitbefangenen Fällen mit Ja beantwortet, siehe z. B. Beschlüsse der Verwaltungsgerichte Aachen (Beschluss vom 14.9.2018 – 5 L 1377/18) und Köln (Beschluss vom 13.9.2018 – L 2056/18).

Da die Holzmatrix der Bäume in ihrer ursprünglichen, unverarbeiteten Form und Morphologie genutzt wird, ist weder eine Bauartgenehmigung noch die Einstufung in ein Bauprodukt zu erwarten. Die Vitalität, der Wuchs und ggf. Schädigungen in Tragbäumen müssen durch ein eingehendes Baumgutachten validiert werden, welches u.a. die Vitalitätsstufe nach Roloff [3], Kriterien der FLL [4], die maximale Anschlaghöhe von Verankerungen und auch die Beurteilung des Bodens enthalten sollte bzw. durch ein Bodengutachten zu ergänzen ist. So werden Risiken durch Bodenschichtungen erkennbar, welche die Ausprägung des Wurzelwerks ungünstig beeinflussen können. Tonböden oder auf Grund von Staunässe schlecht durchlüftete Böden führen zu einer Verflachung des Wurzelsystems und erhöhen die Windwurfgefahr [1, 5].

1.3 Konstruktive Umsetzung der Verankerung

Die Übertragung von Lasten in die Holzmatrix des Baumes erfordert eine stammnahe Anbindung technischer Tragelemente, z.B. Seile oder Träger, um Exzentrizitätsmomente zu minimieren. Exzentrizitätsmomente belasten insbesondere die äußeren Fasern der Holzmatrix und können zur Aufspaltung der Matrix führen. Da der Baum in jeder Wachstumsperiode einen neuen Jahresring generiert und damit seinen Querschnitt vergrößert, besteht die Gefahr, dass schon nach wenigen Jahren technische Tragelemente weggedrückt oder umwachsen werden. Für dauerhaft funktionale Anschlüsse sind daher spezielle Bauteile zu konzipieren [2,6], ein Beispiel ist in Abb. 1 zu sehen.

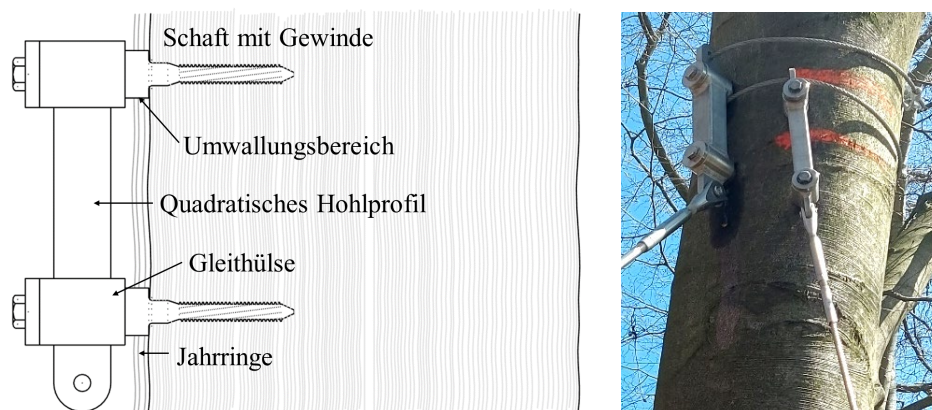


Abbildung 1: Übertragung einer Seilkraft in die Holzmatrix über Anschlussbauteile, welche für die Instandhaltung verlängert werden können und das Dickenwachstum des Stammes nutzen

Der Anschluss in Abb. 1 basiert auf zwei parallel ausgerichteten Gleithülsen, welche durch ein Hohlprofil biegesteif gekoppelt sind. Die Hülsen nehmen Baumanker auf, welche im Baum so verankert sind, dass sie im Laufe der Zeit im sogenannten Umwallungsbereich umwachsen werden. Dadurch steigt deren Belastbarkeit an, was z.B. für zukünftige Erweiterungen sehr vorteilhaft ist. Die Baumanker sind aus Edelstahl gefertigt und können durch Adapterstücke verlängert werden. Das Anschlussbauteil stellt ein statisch unbestimmtes System in Kombination mit den beiden Baumankern her, so dass im Falle einer Überlastung plastische Tragreserven aktivierbar sind.

2 Beispiele aus der Praxis

Nachfolgende werden zwei Bauprojekte vorgestellt, welche ganz oder teilweise über Tragbäume gegründet sind. Die Projekte wurden bauaufsichtlich überwacht und wenden die Verankerungstechnik aus Kap. 1.3 in zwei Varianten an: Zur Anbindung bauaufsichtlich zugelassener Seile und zur Auflagerung einer Umreifung aus Walzprofilen. Die Wohnkörper werden ganzjährig für touristische Zwecke genutzt und sind Teil eines ganzheitlichen Konzepts, den Waldbestand nachhaltig und über Generationen hinweg zu nutzen. Eine zentrale Anlage versorgt die Gebäude mit Nahwärme.

2.1 Freihängender Wohnkörper

Das im Jahr 2022 errichtete, ca. 8.4 Tonnen schwere Objekt befindet sich 3.5 m über dem Waldboden und ist durch eine ebenfalls frei hängende Treppe begehbar, vgl. Abb. 2. Das Tragwerk wurde auf einem Traggerüst montiert und nach Fertigstellung mit Hilfe der Seilspannschlösser wenige Millimeter angehoben, um das Gerüst zu entlasten, vgl. Abb. 3. Hierbei ist zu bemerken, dass die dafür notwendigen Seilkräfte nur dann eindeutig wären, wenn die Seile den Wohnkörper statisch bestimmt lagern würden, was hier nicht vorliegt.

Liegt eine überzählige Lagerung vor, können die Seilkräfte z.B. an die prognostizierbare Biegetragfähigkeit der jeweiligen Tragbäume angepasst werden, was hier zur Anwendung kam. Zur Erstellung des Berechnungsmodells wurde eine Positionsaufnahme der zum Baukörper zugewandten Stammoberflächen sowie die Vermessung der dort vorliegenden Querschnittsdurchmesser in mehreren Abschnitten durchgeführt.

In der bebaubaren Baumgruppe variiert der Durchmesser der Tragbäume in 1.3 m Höhe über Grund zwischen 37 und 85 cm und die damit prognostizierbare Biegetragfähigkeit je nach Baum zwischen 160 und 2000 kNm. Da beim Holz die Zugfestigkeit in Faserrichtung i.d.R. über der Druckfestigkeit liegt, so auch hier, kann das elastische Biegeverformungsmoment über die Druckfestigkeit der vitalen, wassergesättigten Holzmatrix in Faserrichtung ermitteln werden und liegt für Rotbuchen bei $f_{c,k} = 27.6 \text{ MN/m}^2$. Dieser Wert ist den Angaben in [7] entnommen und durch eigene Druckversuche an Vollquerschnitten, Teilquerschnitten sowie aus unseren Schadensbeobachtungen in Biegeversuchen an Vollquerschnitten der Rotbuche abgesichert [8,9].



Abbildung 2: Bauzustand sowie fertiggestellter, freihängender Wohnkörper mit Treppenaufgang

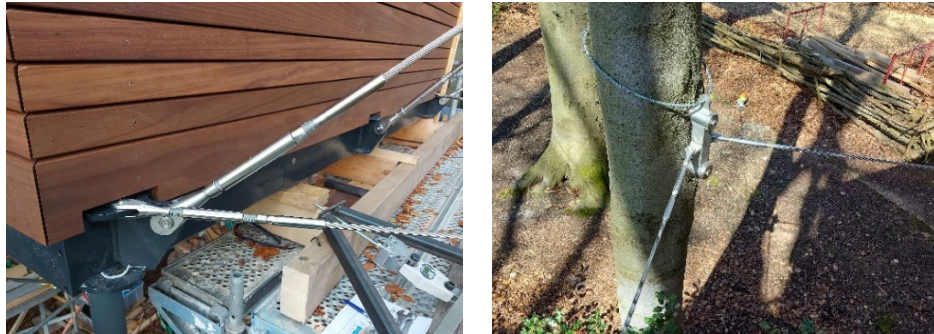


Abbildung 3: Tragseile mit Spannschlössern am Wohnkörper sowie am Baum

Insgesamt laufen 9 Seile vom Baukörper schräg nach oben, wo sie in bis zu 11 m Höhe an 7 verschiedenen Tragbäumen verankert sind, vgl. Abb. 4. Hinzu kommen 8 horizontal verlaufende Seile, welche an jeder Seite des Gebäudes mit je einem Baum verbunden sind. Stellt man die Zahl der Seile mit den 6 Gleichgewichtsbedingungen am ausgedehnten Körper im Raum gegenüber, wird leicht ersichtlich, dass das System äußerlich 11-fach statisch unbestimmt ist. Sollte der hoch belastete Tragbaum B2 ausfallen, was einen sehr ungünstigen Lastfall darstellt, steigen die verbleibenden Seilkräfte durch das Eigengewicht um maximal 16 kN auf bis zu 40 kN an, was durch die Bemessung der Seile abgedeckt ist.

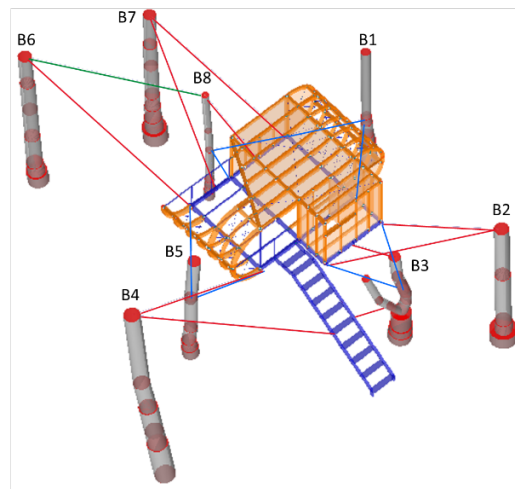


Abbildung 4: Schema der Lastabtragung über geneigte Seile (rot) und eine Rückverankerung (grün) für Gewichtskräfte sowie über horizontale Seile (blau) für Windlasten

2.2 Wohnkörper mit zusätzlicher Pendelstütze

Das im Jahr 2023 errichtete ca. 12 Tonnen schwere Objekt befindet sich ebenfalls 3.5 m über dem Waldboden und integriert im Bereich der Terrasse einen Baum vollständig, vgl. Abb. 5. Dennoch verläuft der gesamte Schaft dieses Tragbaums im Außenbereich, also seiner

natürlichen Wachstums Umgebung. Man findet in den Medien immer wieder Tragwerke, welche den Baum auch in den beheizten Bereich eines Wohnkörpers integrieren, was im Winter hohe Temperaturinhomogenität im Schaft impliziert. Da deren Auswirkung auf die Vitalität unbekannt aber von der Ursache her unnatürlich ist, wollte dies umgangen werden.

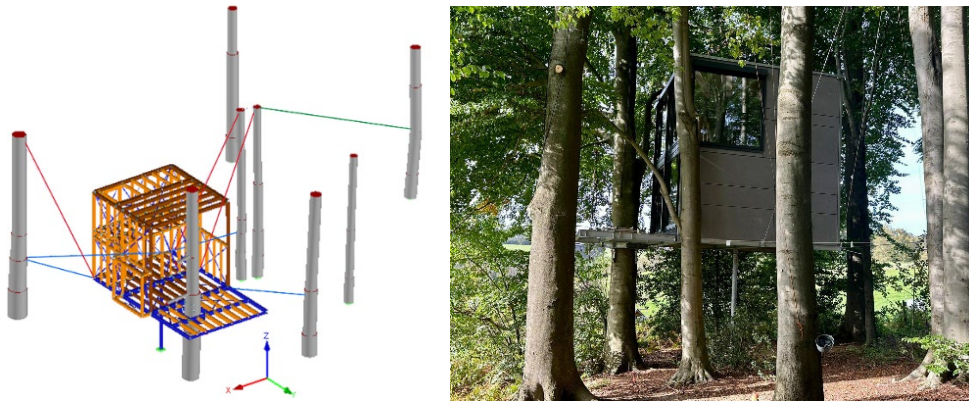


Abbildung 5: Wohnkörper mit zusätzlicher Pendelstütze und Integration eines Tragbaums als Rechenmodell (links) und nach Fertigstellung (rechts)

Nachdem die Anordnung und Belastbarkeit der Baumgruppe als nicht ausreichend befunden wurde, konnte mit einer zentralen Stahlstütze ein Großteil der vertikalen Lasten (ca. 60%) übernommen und so das Projekt ermöglicht werden. Durch die Umreifung des Tragbaums im Außenbereich, vgl. Abb. 6, kommt eine in alle Richtungen aussteifende Verbindung zum Gesamttragwerk zustande, welche durch horizontale Seile zu weiteren Bäumen ergänzt wird. Diese Maßnahmen genügen zur Aussteifung und Abtragung von Windlasten, so dass die zentrale Stahlstütze beidseitig gelenkig und damit querkräftfrei ausführbar ist. Dies minimiert das Volumen des Betonfundaments auf lediglich 0.4 m^3 .



Abbildung 6: Umreifung zur Integration des Tragbaumes

Die Umreifung des Baumes wird durch einen geschlossenen Rahmen aus U-Profilen realisiert, auf welchem Träger aufliegen und verschraubt sind. Durch die lösbare Verbindung

ist langfristig eine Weitung der Umreifung möglich, sollte das Dickenwachstum des Stammes dies erforderlich machen. Auch hier können leicht modifizierte Anschlusselemente aus Abb. 1. verwendet werden, um die Umreifung am Baum zu fixieren.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellten Projekte zeigen, wie sich Wohnkörper mit Hilfe von Tragbäumen in erhöhter Lage bauen lassen. Damit wird der Baugrund (nahezu) vollständig freigehalten, was zahlreiche Vorteile mit sich bringt. Die damit verbundenen Risiken lassen sich mit Hilfe von Voruntersuchungen, versierter Planung, Statik sowie konstruktiver Maßnahmen verantworten und mit dem Baurecht vereinbaren. Dennoch handelt es sich um eine innovative Bauweise, welche erst in neuerer Zeit aus ökologischen Gesichtspunkten und aus der Einsparung von Ressourcen motivierbar ist.

Die Wohnfläche der Projekte ist im vorliegenden Fall durch das Planungsrecht beschränkt und geringer als technisch möglich. Ausblickend wird auf eine höhere Akzeptanz dieser Bauweise hingearbeitet, um zukünftig die Umsetzung größerer Objekte zu ermöglichen.

Literatur

- [1] BERNATZKY, A. Baumkunde und Baumpflege. Bernhard Thalacker Verlag, Braunschweig, 1994
- [2] LOSKE, S., MUENCH, I., SPYRIDIS, P., ZELLER, M.: A Minimal Invasive Anchoring Technique for the Foundation of Technical Structures in Trees. In: Amziane, S., Merta, I., Page, J. (eds) Bio-Based Building Materials. ICBBM 2023. RILEM Bookseries, vol 45, Springer, Cham., 2023
- [3] ROLOFF, A.: Kronenentwicklung und Vitalitätsbeurteilung ausgewählter Baumarten der gemäßigten Breiten. Sauerländer, Frankfurt a.M., 1989
- [4] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT LANDSCHAFTSENTWICKLUNG LANDSCHAFTSBAU E.V.: Baumuntersuchungsrichtlinien- Richtlinien für eingehende Untersuchung zur Überprüfung der Verkehrssicherheit von Bäumen. 2013
- [5] KOZLOWSKY, T. T. Growth and development of trees. Volume II. Cambial growth, root growth, and reproduction growth. Academic Press, New York & London, 1971
- [6] ZELLER, M., MÜNCH, I.: Befestigung von Bauwerken in Bäumen mit Baumanker und doppelter Umreifung. Bautechnik 99, 13-22, 2022
- [7] NIKLAS, K. J., SPATZ, H.-CH.: Worldwide Correlations of Mechanical Properties and Green Wood Density. American Journal of Botany 97(10), 1587-1594, 2010
- [8] MUENCH, I., LOSKE, S.: A deterministic model combining NDT to estimate permissible bending loads on trees. ce/papers, 6(5), 258-263, 2023
- [9] LOSKE, S., MUENCH, I.: Experiments and Modelling of the Load Capacity of Green Wood. Proc. Appl. Math. Mech., 22(1), 1-6, 2022.