

TREE BASED TIMBER STRUCTURES - BAUMBASIERTE HOLZKONSTRUKTIONEN



Bachelorarbeit

von

Viktor Ruben Wages
Matrikelnummer 398166
viktor.wages@rwth-aachen.de

Betreut durch

Erstbetreuer: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Trautz
Zweitbetreuer: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jakob Beetz

29. April 2022

Diese Arbeit wurde vorgelegt an der Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule,
Fakultät für Architektur sowie am Lehrstuhl für Lehrstuhl für Tragkonstruktionen

Communicated by - Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Trautz

Bachelorarbeit

Baumbasierte Holzkonstruktionen

Inhaltsverzeichnis

Einleitung und Zielsetzung	3
Konzept	4
Relevanz von Holzkonstruktionen in der Gesellschaft	4
Standardisierung von Holzkonstruktionen in der Bauindustrie	4
Nicht standardisierte Materialeigenschaften	5
Prozesse Industrielle Holzverarbeitung	5
Prozessübersicht	6
Nutzungszyklus von Holz und CO ₂ Bindung	6
Prozesse im Vergleich	6
Analyse	7
Elemente	8
Datenbank	9
Digitalisierung	10
Formfindung	11
Konstruktionsweisen	12
Live Modellierungs Software	12
Adaption von Idealgeometrien	13
Fallstudie - Anwendung auf Turmkonstruktion	14
Verbindungsdetails	18
Zusammenfassung	20
Optimierungen	20
Literaturverzeichnis / Abbildungsverzeichnis	21

Einleitung und Zielsetzung

Der aktuelle Trend zum Bauen mit Holz ist wegweisend für die Zukunft und zudem sehr attraktiv, besonders aus Sicht der Nachhaltigkeit. Gebäude aus Holz speichern Kohlenstoff, dieser Effekt ist besonders groß, da Holzprodukte im Bauwesen lange eingebaut bleiben und so der im Holz enthaltene Kohlenstoff langfristig gebunden bleibt. Für die Herstellung und Entsorgung von Baustoffen aus Holz ist in der Regel weniger fossile Energie notwendig als für Materialien auf Basis endlicher, mineralischer Rohstoffe. Zusätzlich können energieintensivere Baustoffe durch Holz ersetzt, wodurch CO₂ Emissionen eingespart werden.

Dabei darf nicht vergessen werden, dass Bäume natürlich gewachsene Strukturen sind, welche über ihre gesamte Lebenszeit mit ihrer Umgebung interagieren und sensibel auf Umwelteinflüsse reagieren. Es handelt sich also schon bei einem einzelnen Baum um eine sehr komplexe Struktur, welche stets in wechselhafter Beziehung von sich und seiner Umwelt steht und auch verstanden werden muss. So ist jeder Baum, jeder Ast und jedes Blatt in seiner Art und Weise einzigartig gewachsen und erfüllt einen höheren Zweck im Gesamtsystem. Es entstehen zum Teil sehr außergewöhnliche Formen, die für den konventionellen Holzbau auf Grund dieser ungeeignet sind. Hier werden in der Regel nur lange und gerade Teile des Baumes verwendet und der gesamte Bearbeitungsprozess wurde bereits genau darauf ausgelegt.

Die Zukunft im Holzbau wird dagegen zunehmend durch individuelle Lösungen für komplexe Problemstellungen dominiert. Im Sinne der Nachhaltigkeit sollten wir folglich versuchen sogar noch mehr Teile des Baumes, wie beispielsweise eine Gabelung, welche eine von Natur aus sehr stabile Struktur aufweist, als ein konstruktives Element einzusetzen. Hierzu fehlt es aktuell jedoch an geeigneten Gesamtkonzepten von der Aufforstung unserer heimischen Wälder bis hin zum späteren Einsatz des Baumes in einem Tragwerk und den dazugehörigen Planungswerkzeugen.

Basierend auf diesen Fakten ist das Ziel der Arbeit, die Entwicklung eines Prozesses, zur nachhaltigen Nutzung von Bäumen im konstruktiven Holzbau und die daraus entstehenden Potentiale aufzuzeigen. Die gewählte Form hierfür wird nach einer abschließenden Analyse festgelegt. Es soll die zukünftige Herausforderung im Umgang mit unseren Rohstoffen versinnbildlichen.

Konzept

Relevanz von Holzkonstruktionen in der Gesellschaft

Die Baubranche ist in Deutschland einer der rohstoffintensivsten Wirtschaftsbereiche, rund 90 Prozent¹ aller verwendeten mineralischen Rohstoffe werden zur Herstellung von Baustoffen und -produkten eingesetzt. Damit hat der Bausektor einen bedeutenden Anteil am Endenergiebedarf und den durch ihn entstehenden CO² Emissionen. Mehr als die Hälfte aller Fertigprodukte aus Holz, ausgenommen von Papier, werden im Bauwesen eingesetzt¹. Das Bauwesen ist somit der wichtigste Einsatzort für Holzprodukte. Durch den steigenden Bedarf entwickelte sich der Holzbau zum „Zugpferd für die Holzverwendung“ – mit positiven Effekten für Beschäftigung und Wertschöpfung im gesamten Cluster Forst & Holz. So stieg die Anzahl der Beschäftigten im Bereich des Bauens mit Holz innerhalb von zehn Jahren um 28 Prozent¹.

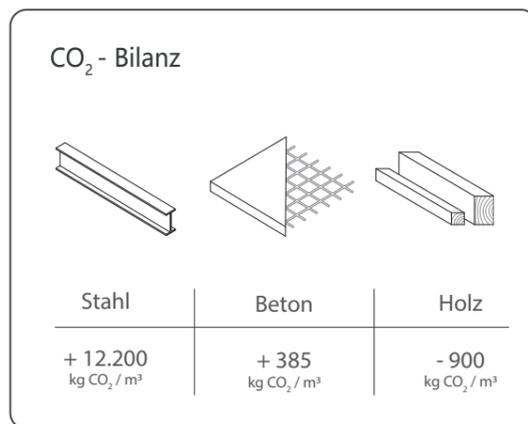


Abb. 1 - Co2 Bilanz Baustoffe im Vergleich

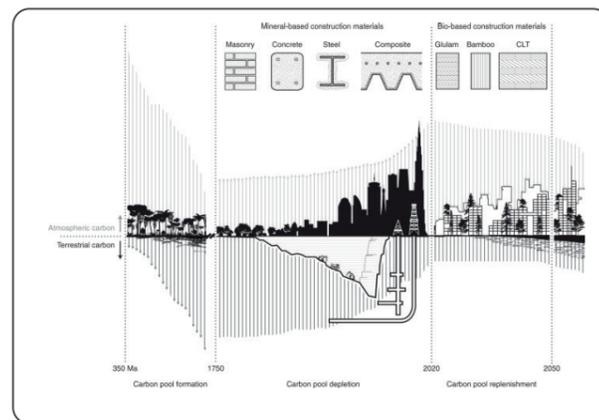


Abb. 2 - Buildings as a global carbon sink, Churkina et al 2020

Standardisierung von Holzkonstruktionen in der Bauindustrie

Standardisierung ist eine gemeinsame Herausforderung für die gesamte Bauindustrie. Der technologische Fortschritt wird sich auch weiterhin auf die Art und Weise auswirken, wie Firmen arbeiten und Industrien sich weiterentwickeln. Auch die Bauwirtschaft kann sich diesen Veränderungen nicht entziehen. Der Zeitpunkt ist jetzt für die Baubranche gekommen, sich der Digitalisierung und Standardisierung anzuschließen. Daten bilden das Kernstück der digitalen Projektabwicklung und verbinden Prozesse, Standards und Systeme. Bei so vielen Unterschieden zwischen Märkten und Branchen ist die Standardisierung ein Hindernis, dem sich die meisten Unternehmen gegenübersehen, einschließlich derjenigen in der Bauindustrie². Industriestandards sind entscheidend für die Gewährleistung der Sicherheit und Qualität, Effizienz in allen Prozessen und Datenerfassung. Diese Prozesse sind entscheidend, um Erkenntnisse zu gewinnen, die für fundierte Entscheidungen notwendig sind. Standardisierung entfacht auch Innovationen. Viele der erfolgreichsten Unternehmen in der Branche maximieren ihre Produktivität und steigern die Qualität durch die Einführung konsequenter Prozessverbesserungen. Diese Unternehmen wenden von Projekt zu Projekt die gleichen Prozesse an und entwickeln dann Benchmarks, um ihre Ergebnisse zu validieren und die Einhaltung von Vorgaben zu gewährleisten.

¹ vgl. Charta für HOLZ 2.0 - Bauen mit Holz in Stadt und Land S. 18-22

Nicht standardisierte Materialeigenschaften

Der Holzbau beruht traditionell auf konfektionierten Holzhalbzeugen mit geometrisch einfachen und vielseitig einsetzbaren Grundformen wie Rechteck- oder Quadratquerschnitten. Dennoch ist dieses Konfektionieren von Holzbauelementen in Form von Brettern, Latten, Balken mit einem nicht zu unterschätzenden logistischen und produktiven Aufwand verbunden. Natürlich gewachsene Strukturen in einem Tragwerk einzusetzen und zu standardisieren ist eine Herausforderung.

Anisotropes Werkstoffverhalten

Maximales Schwindverhalten in %			
Holzart	Tangential	Radial	Longitudinal
Fichte	7,8	3,6	0,3
Kiefer	7,7	4,0	0,4
Eiche	7,8	4,0	0,4
Buche	11,8	5,8	0,3

Abb. 3 - Anisotropes Werkstoffverhalten

Prozesse Industrielle Holzverarbeitung

Aktuell wird fast die Hälfte des geschlagenen Holzes, das im Werk ankommt für die Weiterverarbeitung zu genormten KVH oder BSP Elementen, welche in der Bauindustrie eingesetzt werden, ausgeschlossen und geschreddert. Zudem konzentriert sich die Industrie besonders Nadelholz, da die Bäume im Verhältnis zu Laubholz schneller und deutlich gerader wachsen. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit wurde in der Vergangenheit vermehrt auf Monokulturen gesetzt, welche die Folgen des Klimawandels am stärksten spüren.

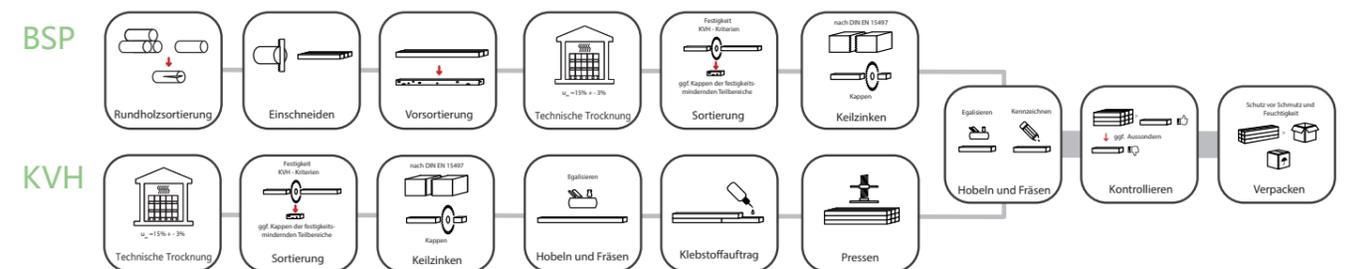


Abb.4 - Informationsdienst Holz - Hochleistungsbaustoffe Holzbau, Herstellung von KVH / BSP

Das Potential der Laubbäume als Bauholz bleibt bis auf wenige Ausnahmen weitgehend ungenutzt und stellt in Zukunft einen schnell wachsenden Markt da, der neue Industriezweige und Innovationen für die Verwendung von Laubholz einschließen wird. Hier setzt der Vorschlag für die Etablierung eines neuen Prozesses an, baumbasierte Holzkonstruktionen sind individuelle Produkte vom Design bis zur Produktion.

Prozessübersicht

Ziel der Arbeit ist, die Entwicklung eines Prozesses, zur nachhaltigen Nutzung von Bäumen im Konstruktiven Holzbau und die daraus entstehenden Potentiale aufzuzeigen und die zukünftige Herausforderung im Umgang mit unseren Rohstoffen versinnbildlichen.

Nutzungszyklus des Materials und CO₂ Bindung (Kaskadennutzung)

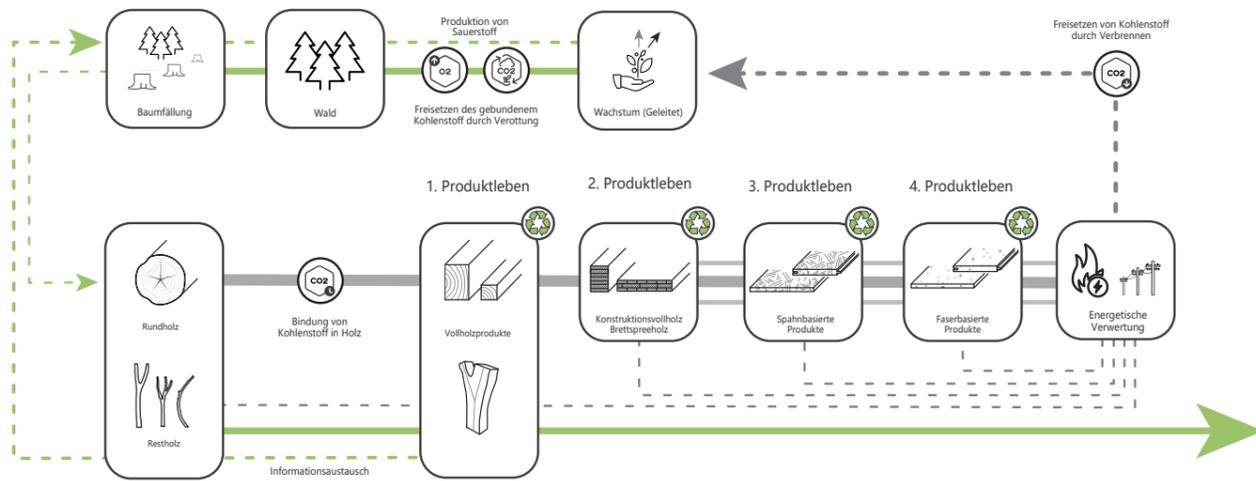


Abb.5 - Nutzungszyklus des materials und CO2 Bindung

Im Sinne der Nachhaltigkeit wollen wir mehr Teile des Baumes, wie beispielsweise eine Gabelung, welche eine von Natur aus sehr stabile Struktur aufweist, als ein konstruktives Element einzusetzen. Um dieses Ziel erreichen zu können muss bereits früh im Prozess angesetzt werden, da bereits der Forstarbeiter ein Auge auf bestimmte gewachsenen Strukturen von Bäumen haben muss um diese nicht bei der Baumfällung bereits zu zerstören. Die hier mehr eingebrachte Energie zahlt sich jedoch im weiteren Verlauf des Bearbeitungsprozesses aus da das material nicht mehr Homogenisiert werden muss und als Vollholz Element verarbeitet wird.

Prozessübersichten im Vergleich

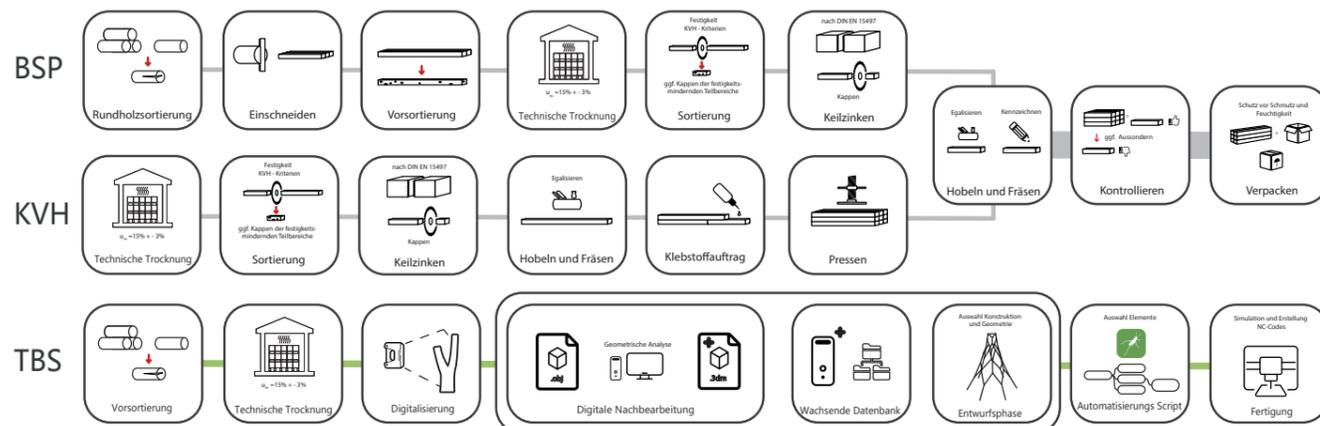
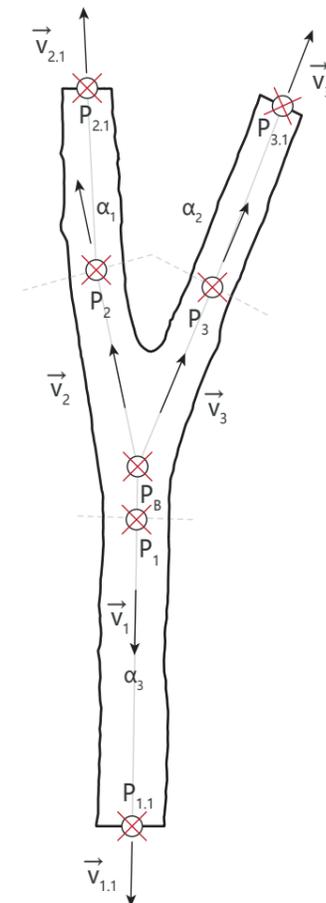
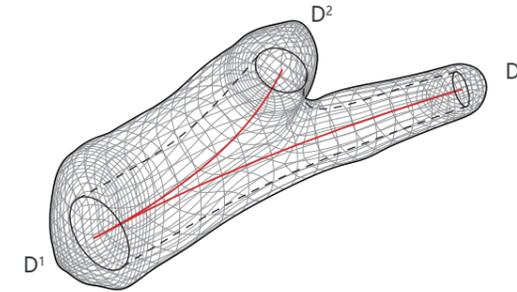


Abb.6 - Prozessübersichten im Vergleich

Analyse



Kenndatenermittlung

Standort	Deutschland - NRW, Aachener Forst
Alter	ca 60 Jahre
Holzart	Kronenholz, Eiche
Festigkeitsklasse	D30 (Vergleichswert aus DIN EN 338)
Kerndurchmesser	10 cm
D ¹	D ¹ = 112 mm
D ²	D ² = 92 mm
D ³	D ³ = 73 mm
Gesamtlänge	754 x 548 mm

Bsp. Verbindungs Detail

Geometrische Analyse

Vektoren der Endpunkte

$$\vec{v}_{1,1} = (\overline{P_1 P_{1,1}})$$

$$\vec{v}_{2,1} = (\overline{P_2 P_{2,1}})$$

$$\vec{v}_{3,1} = (\overline{P_3 P_{3,1}})$$

Vektoren der Knotenpunkte ≠ Vektoren der Endpunkte

$$\vec{v}_1 = (\overline{P_B P_1}) = \vec{v}$$

$$\vec{v}_2 = (\overline{P_B P_2}) \neq \vec{v}_{2,1}$$

$$\vec{v}_3 = (\overline{P_B P_3}) \neq \vec{v}_{3,1}$$

Abzweigwinkel im Knotenpunkt

$$\alpha_1 = \Delta \vec{v}_1 / \vec{v}_2$$

$$\alpha_2 = \Delta \vec{v}_2 / \vec{v}_{2,1}$$

$$\alpha_3 = \Delta \vec{v}_3 / \vec{v}_{3,1}$$

Abweichungen und Toleranzen

$$\vec{v}_2 \neq \vec{v}_{2,1}$$

$$\Delta \alpha = (\vec{v}_2 - \vec{v}_{2,1}) \text{ kleiner } 5^\circ \text{ ok}$$

$$\vec{v}_3 \neq \vec{v}_{3,1}$$

$$\Delta \alpha = (\vec{v}_3 - \vec{v}_{3,1}) \text{ größer } 5^\circ \text{ nicht ok}$$

Abb.7 - Analyse Vektoren

Elemente

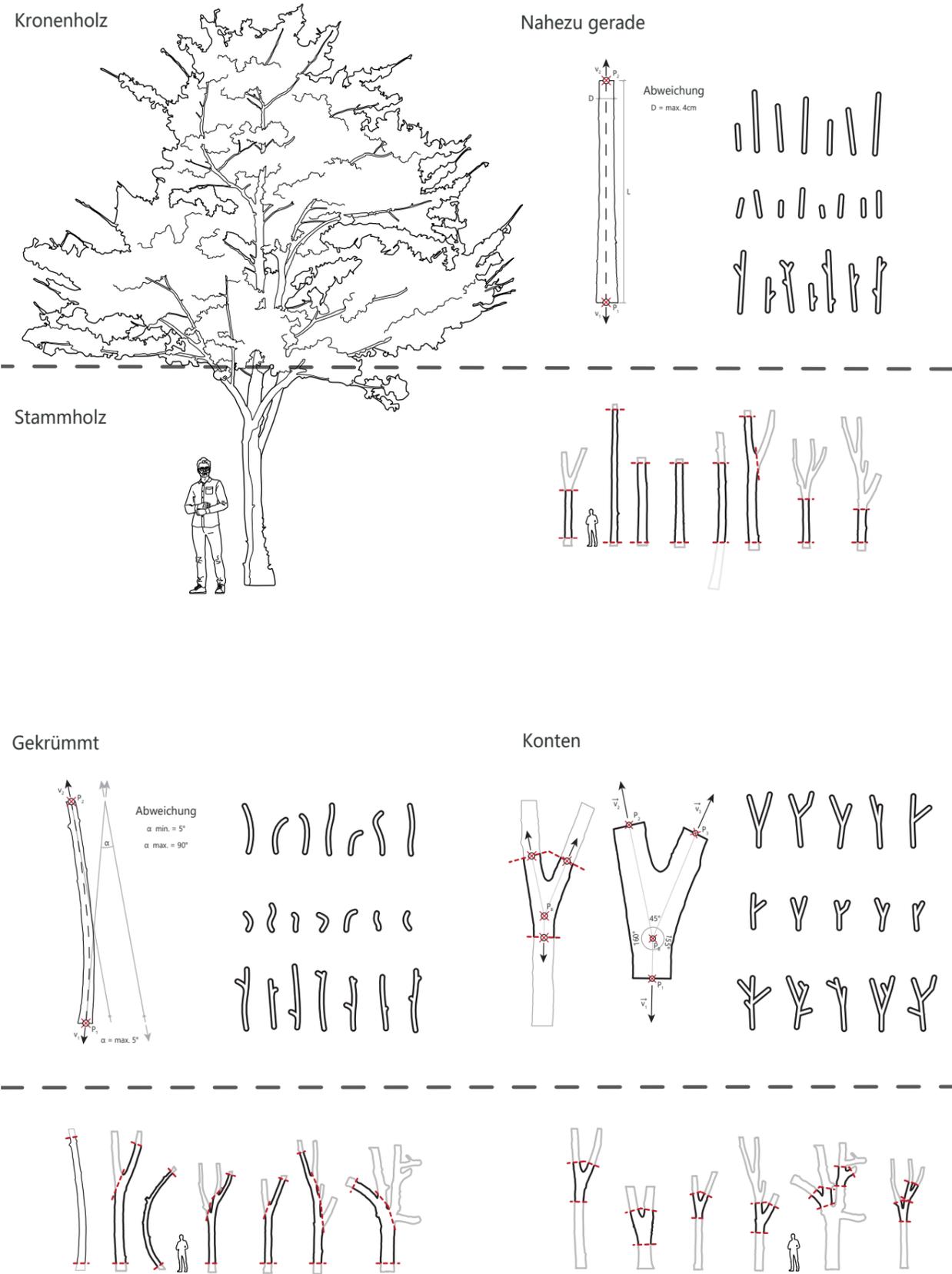


Abb.8 - Elemente

Datenbank

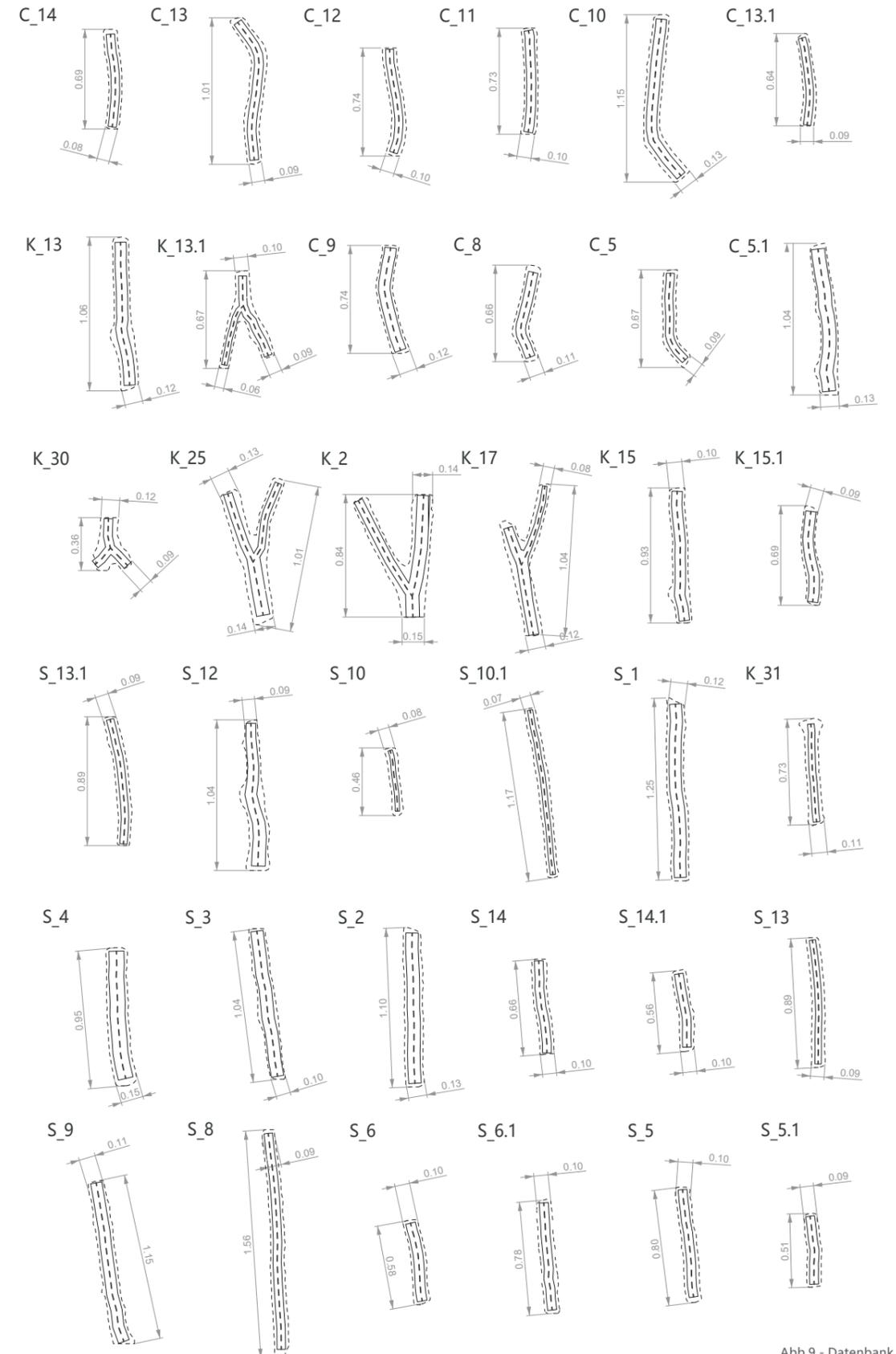


Abb.9 - Datenbank

Digitalisierung

In dieser Arbeit wurde sich im Rahmen der Möglichkeiten an der Universität, für ein Aufmaß mit einem 3D Laserscanverfahren für Dreidimensionale Elemente und für Zweidimensionale wurde ein eigener Prozess auf basis von Bildbasierter Modellierung konzipiert. Entscheidend hierbei ist, dass in beiden Fällen eine Konturlinie und Linien oder Splines durch die geometrische Mitte des Objekts erstellt werden können.

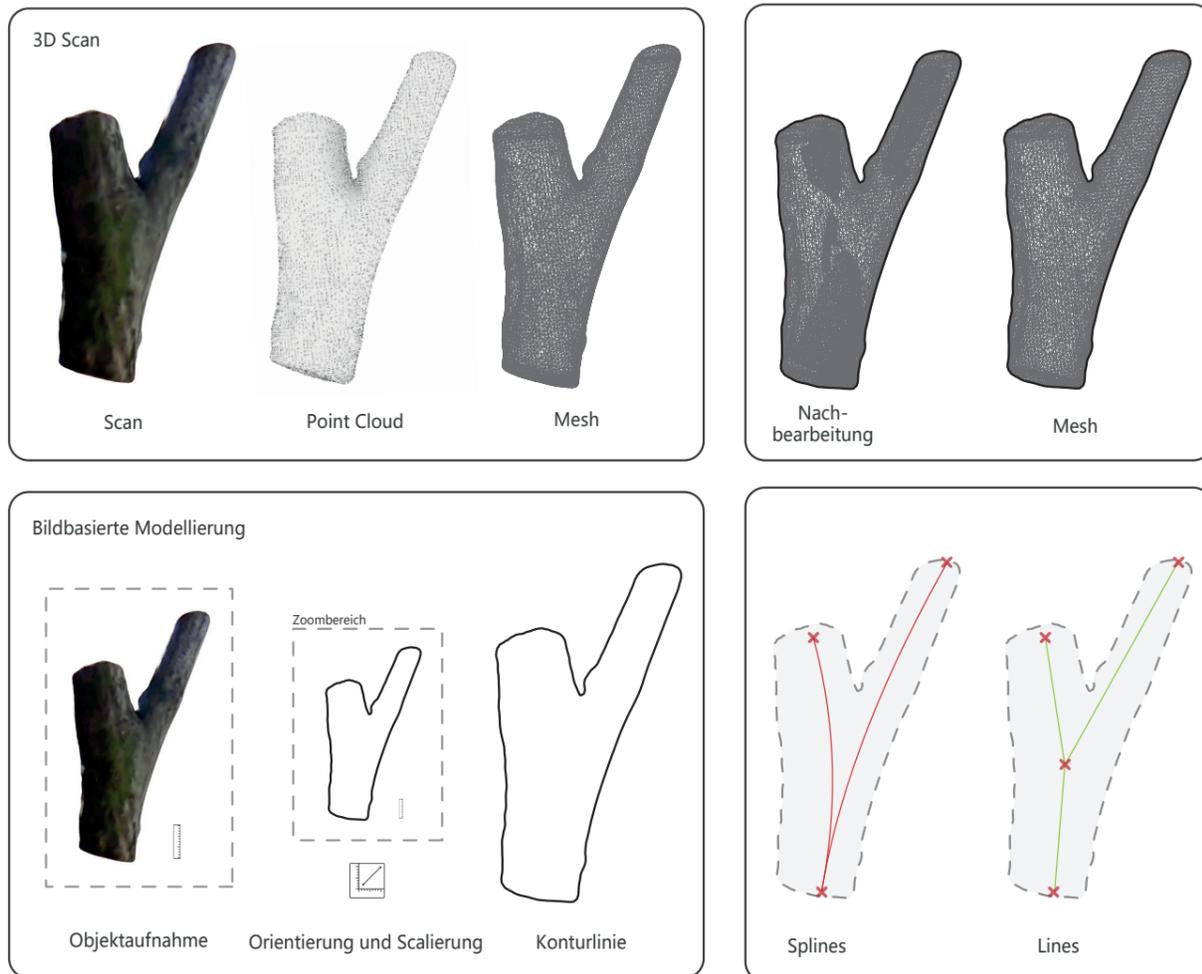


Abb.10 - Digitalisierung

Formfindung

Da sich alle Elemente voneinander unterscheiden, muss in einigen Fällen für eine bessere-Formfindung die Anzahl der Kontrollpunkte erhöht werden. So kann eine ideale Geometrie innerhalb der Kontur des Digitalisierten Objekts erzeugt werden, welche wie bei dem abgebildeten Beispiel sowohl in zwei- als auch dreidimensional funktioniert. Für diesen Ersten versuch wurde das Werkstück jedoch schon vorher von beiden seiten abgerichtet und konnte sicher auf einer Unterlage bearbeitet werden. Zwei zueinander definierte Ebenen und die Konturlinie aus der Aufsicht sind als Geometriedaten für den zweidimensionalen Fertigungsprozess bereits ausreichend.

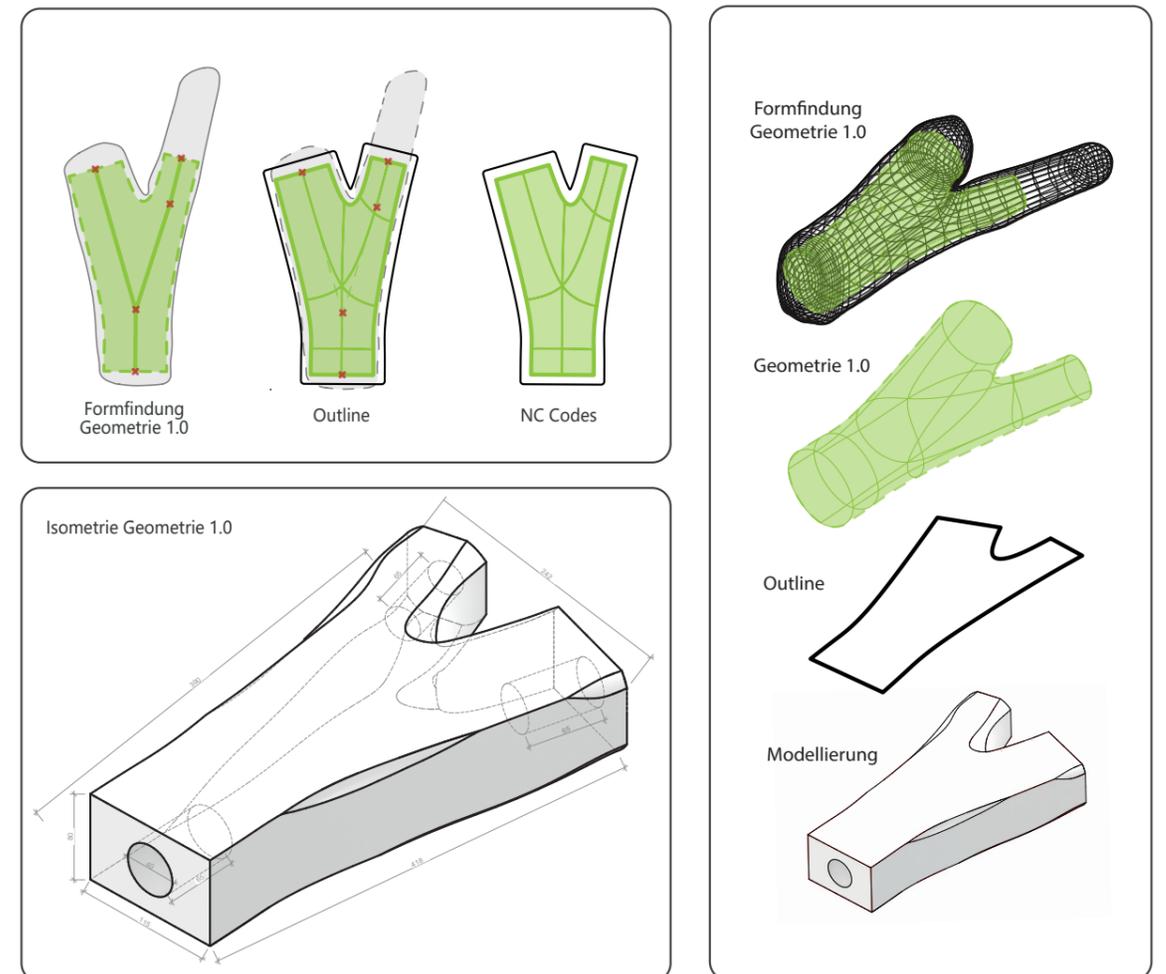
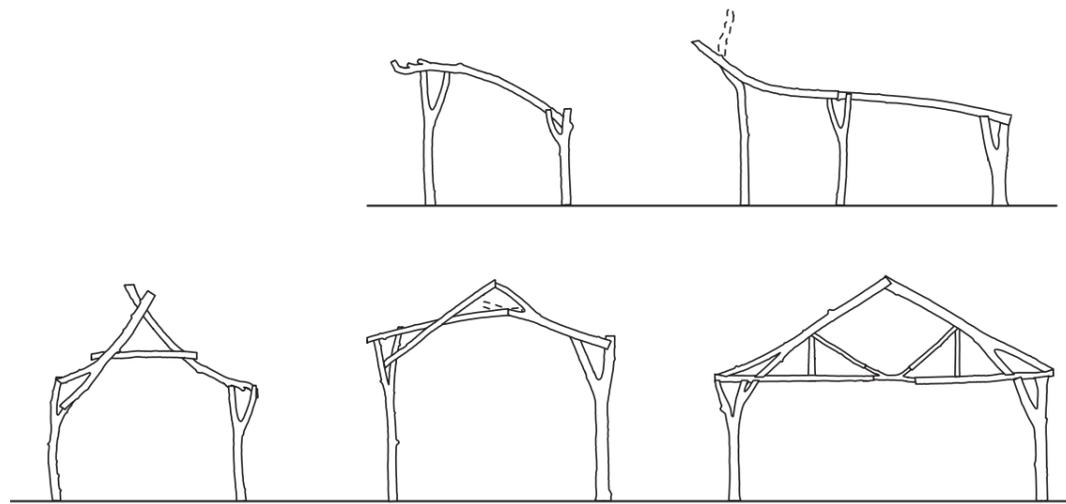


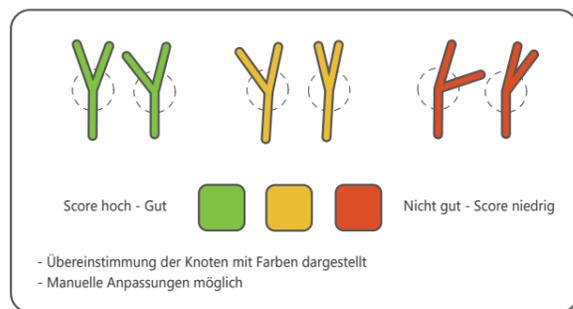
Abb.11 - Formfindung

Konstruktionsweisen



Ein Ansatz wäre es mit den Elemente die man zur Verfügung hat, bereits altbewährte Konstruktionen aus dem traditionellen Holzbau nachzubauen. Die Gabelungen würden hierbei sicher eine Bereicherung sein. In diesem Projekt wurde sowohl physisch am Modell als auch mit einer Echtzeitmodellierungssoftware gearbeitet, welche die Knoten aus der angelegten Datenbank am Linienmodell zuordnet und mit den Ampelfarben angibt wie gut diese zugeordnet werden konnten. Mit diesem Echtzeitmodellierungsverfahren können jedoch auch am Linienmodell Änderungen vorgenommen werden und es wird eine neue Berechnung gestartet.

Matching Score



Structural upcycling: Matching digital and natural geometry

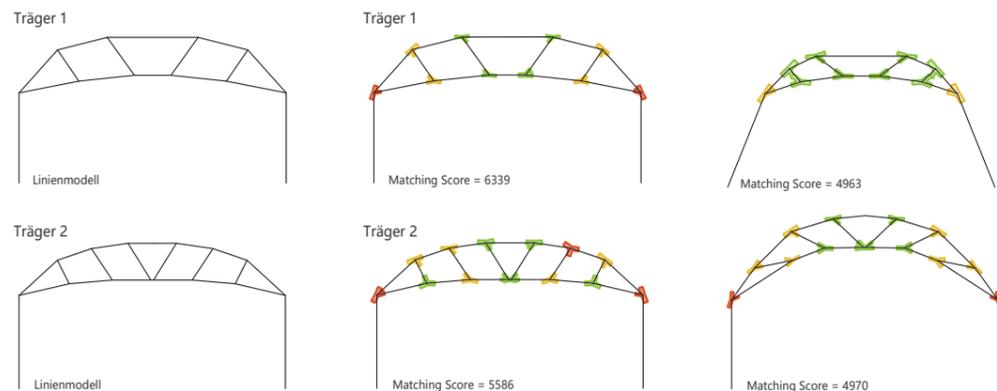
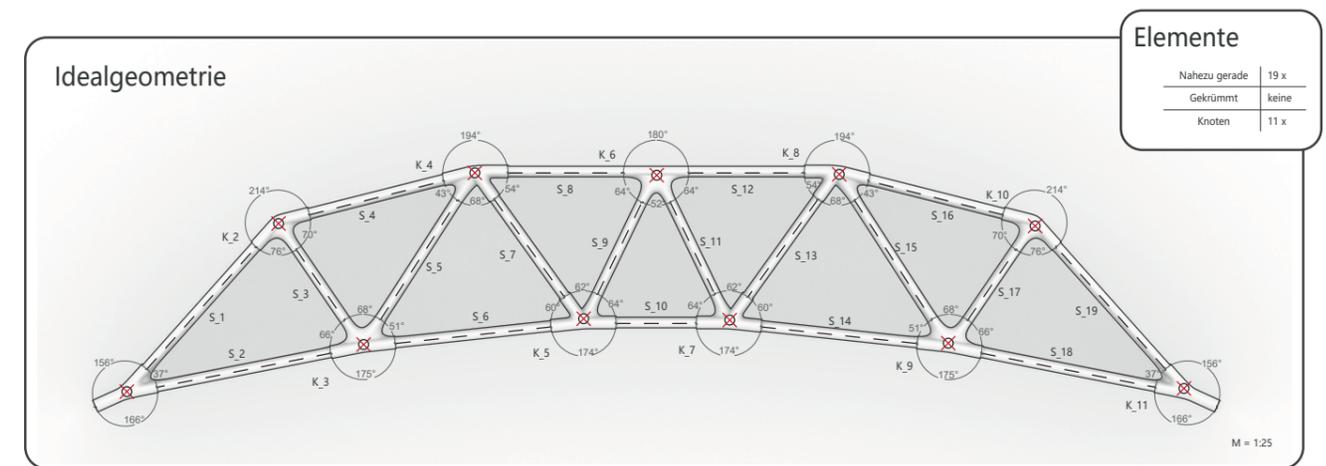


Abb.12 - Konstruktionsweisen



Die hier abgebildete Idealgeometrie ist klar definiert und nach der Abzählformel von Föppl wurde mit $f = 2 \times k - (a + s)$ auf Brauchbarkeit untersucht, mit folgendem Ergebnis :

f = Freiheitsgrad des gesamten Tragwerks

k = Anzahl der Knoten

a = Anzahl der Auflagerbedingungen / Festhaltungen

s = Anzahl der Stäbe

als Fachwerk

$$2 \times 11 - (2 + 18) = 0$$

(S₁₀ - Nullstab)

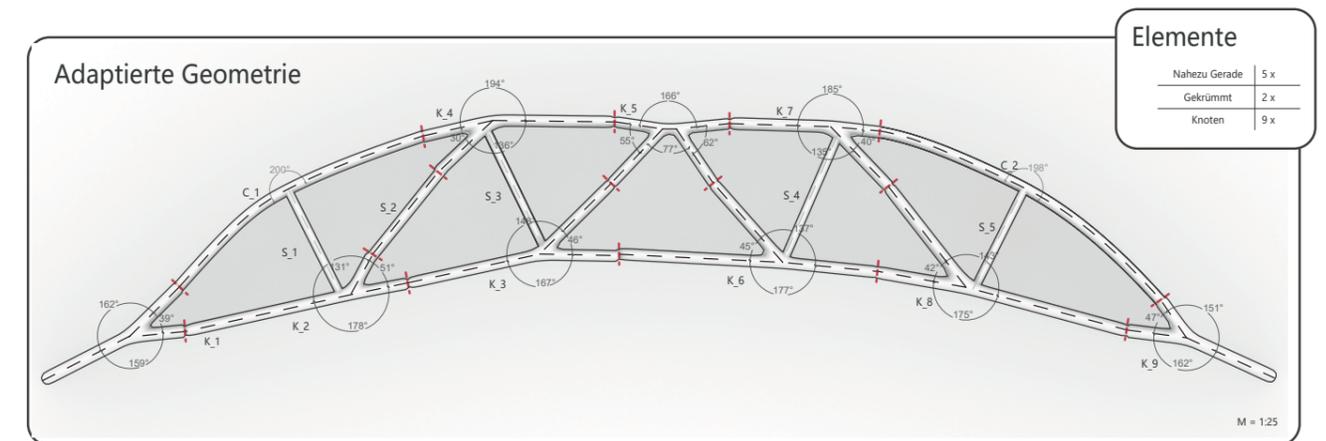


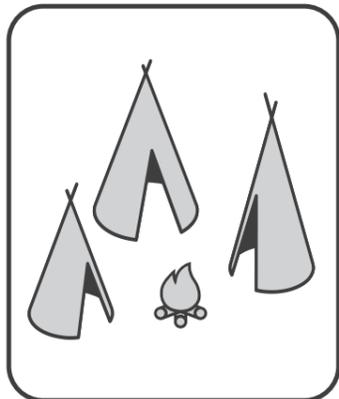
Abb.12 - Idealgeometrie und Adaption des Systems

Hier abgebildet ist eine mögliche Adaption des Fachwerks aus natürlich gewachsenen Elementen mit weniger Knotenpunkten.

Fallstudie - Anwendung auf Turmkonstruktion

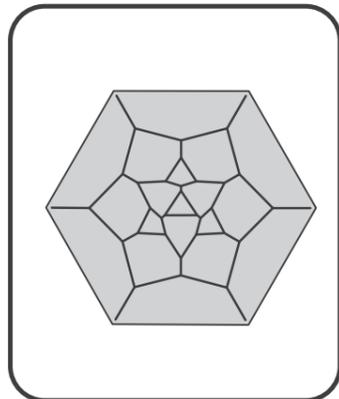
In dieser Fallstudie wurden alle zu diesem Zeitpunkt des Projekts bekannten und erarbeiteten Prinzipien am Modell angewendet. Zuerst an einem Arbeitsmodell, dieses wurde anschließend gescannt, ein Linienmodell erstellt und daraus eine ideale Form mit einem Geometrischen Muster abgeleitet. Der gesamte Arbeitsprozess bis zum Entwurf des Turms sind hier im folgenden abgebildet worden.

Tipi



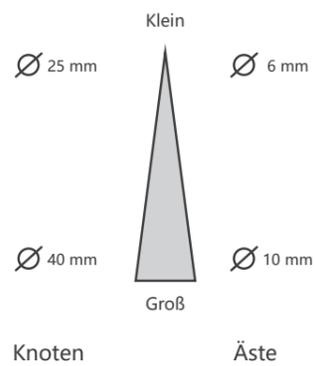
Natürlich gewachsene Bauelemente als tragende Struktur und Schaffung eines geschützten Ortes in der Natur.

Muster



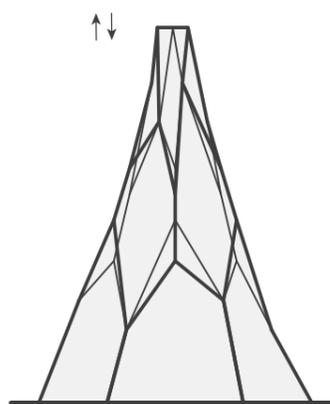
Das Muster ähnelt einigen Faltpatterns, die auf einem Sechseck basieren. Es können mehrere Vorlagen für Schalengeometrien wie das Zelt verwendet werden.

Optimierungen



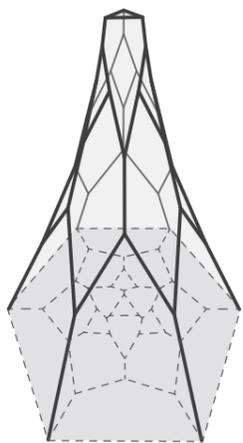
Anpassen des Durchmessers der einzelnen Elemente an den Lastabtragung und Optimieren der Schablone.

Knoten zueinander versetzen



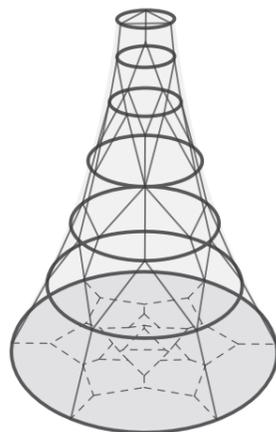
Anordnen jedes Knotens auf unterschiedlicher Höhe, nicht in einem Ring.

Projektion



Das Muster wird auf eine dreidimensionale Struktur projiziert und ein Drahtmodell erstellt.

Keine Ringausbildung



Das Muster ist symmetrisch, somit sind auch die Knoten alle auf der gleichen Höhe. Dies steht im Widerspruch zum optimalen Tragverhalten.

Zuordnung der Knoten am Linienmodell

Linienmodell

Zuordnung

Matching Score = 13170

Zuordnung der Knoten erfolgt Parametrisch. Das Modell wird dazu mit einem Matching Score als Referenzwert nach Übereinstimmung von den Elementen aus der Datenbank und der Konstruktion bewertet.

Ausgehend von der Zuordnung wird die Fertigungs eingeleitet und eine Auflistung der Einzelteile erstellt.

Elemente

Knoten

Ø 40 mm

6 x

Ø 25 mm

6 x

3 x

Äste

Ø 8 - 10 mm

6 x 60 mm, 12 x 38 mm

Ø 6 - 9 mm

12 x 35 mm, 6 x 30 mm

Ø 6 mm

6 x 20 mm

Struktur

Knoten

Ø 25 mm

Ø 40 mm

Äste

Ø 6 mm

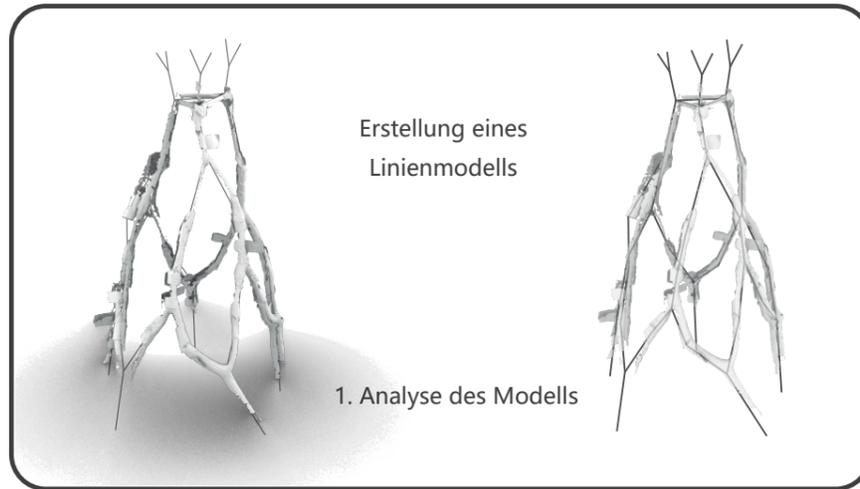
Ø 6-9 mm

Ø 8-10 mm

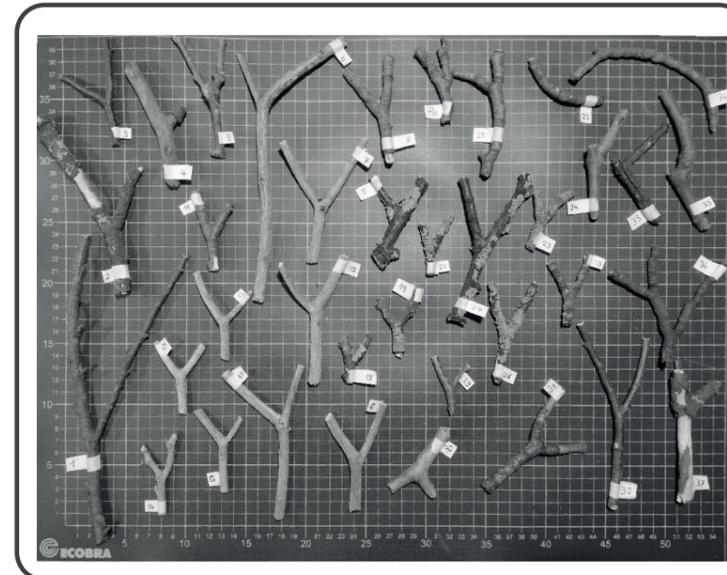
Arbeitsmodell



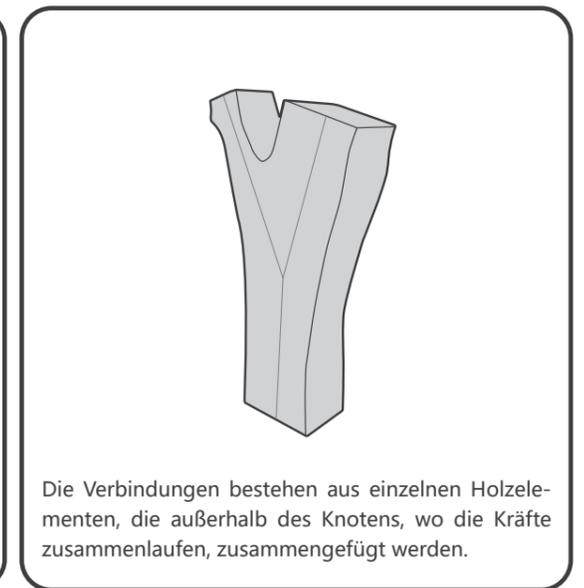
3D Scan



Datenbank



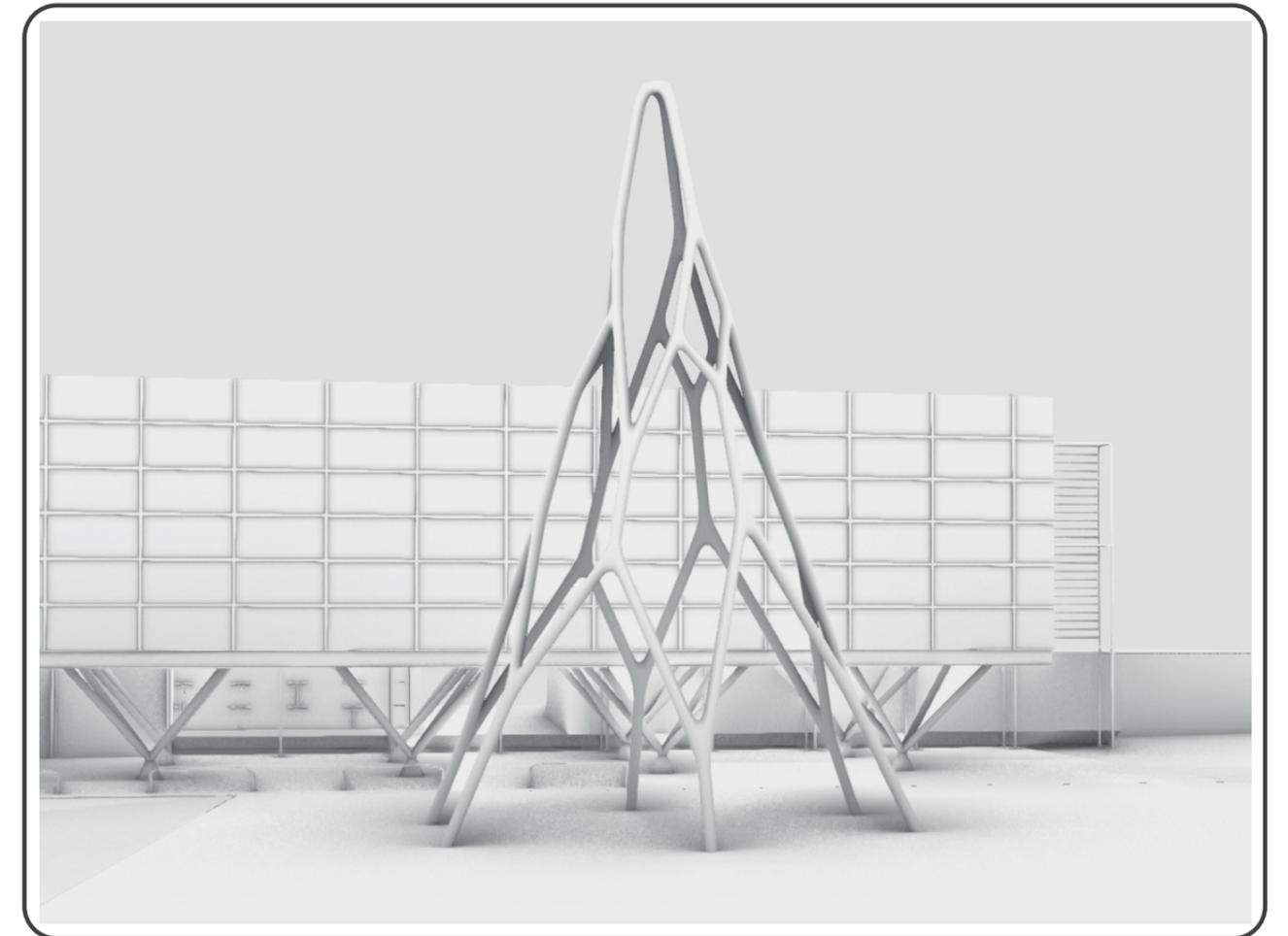
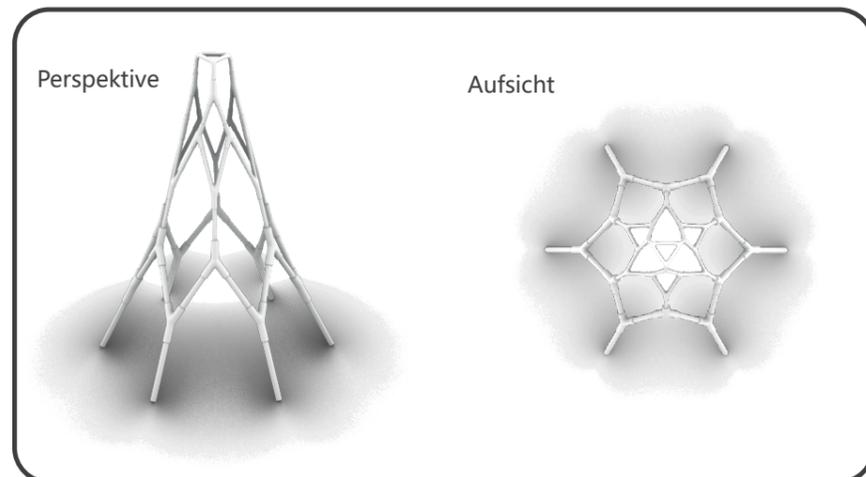
Verbindungen



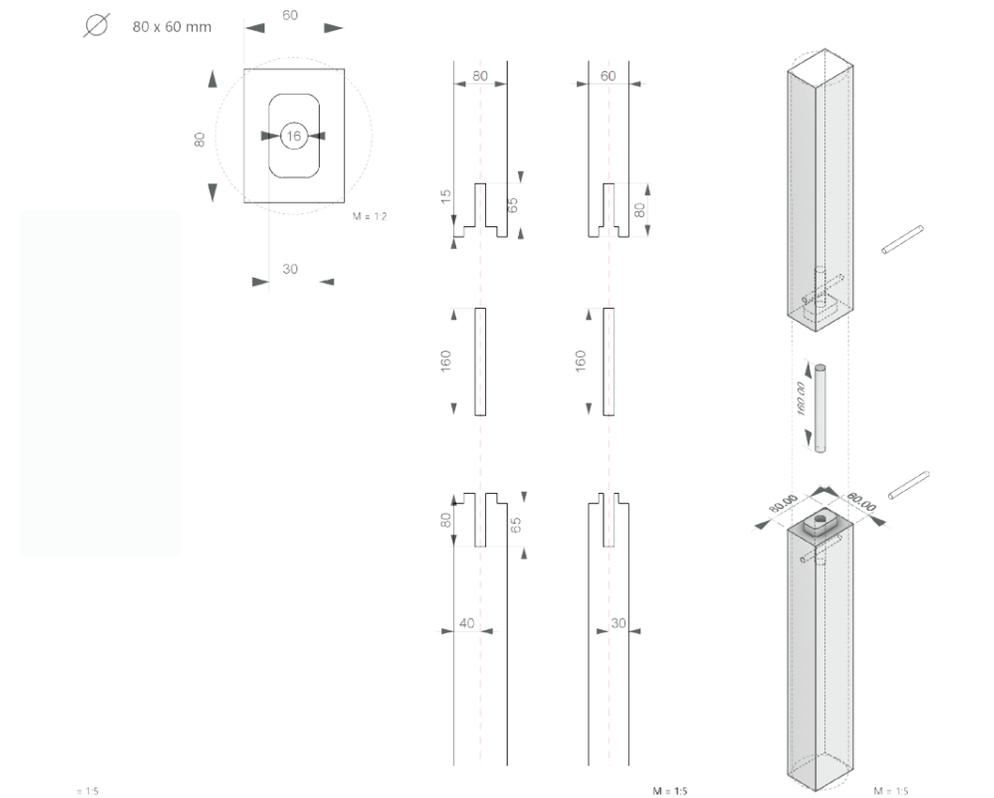
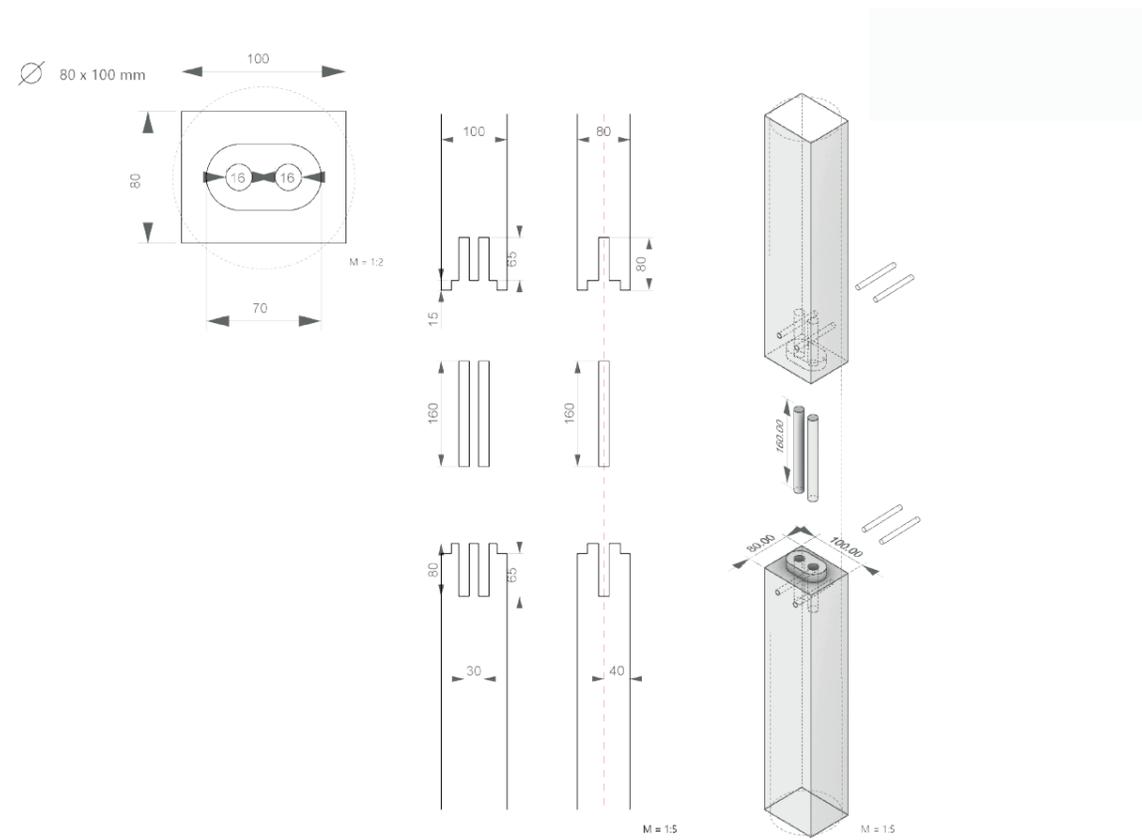
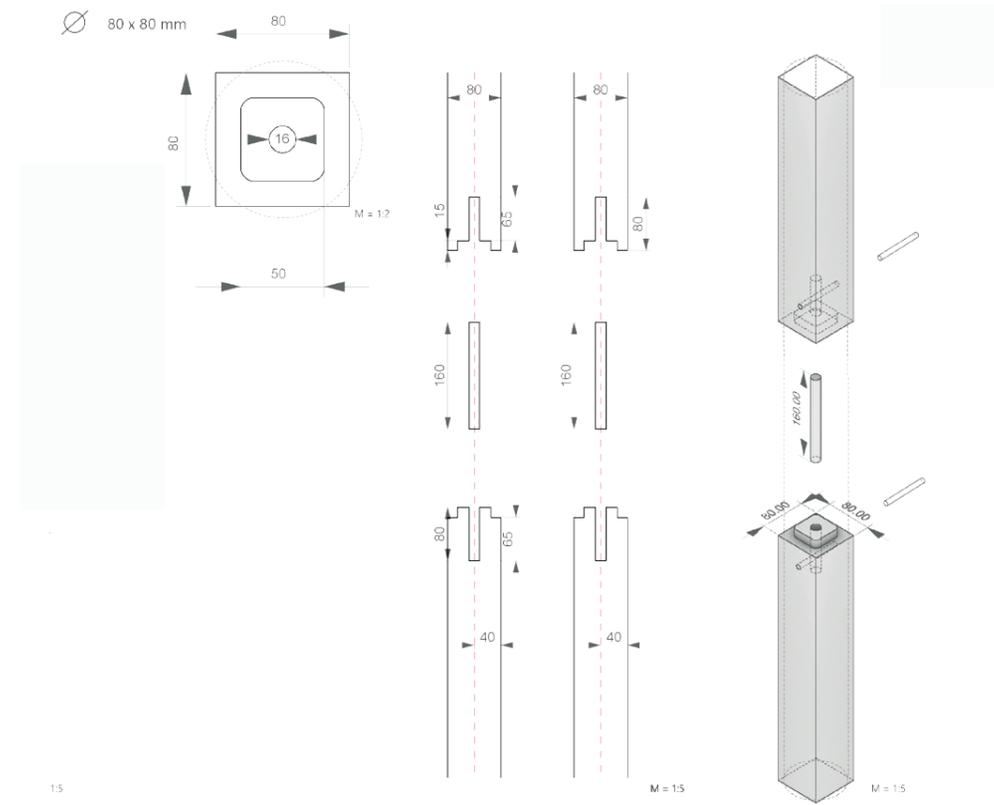
Modell Rebuild



Ansichten



Verbindungsdetails



Zusammenfassung

Da sich dieses Projekt schwerpunkthaft mit Prozessen und der Entwicklung neuer Herangehensweisen für die Erstellung von Konstruktionen aus nicht homogenisiertem Rohmaterial befasst. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Ansatz bereits früh in die Prozesse im Wald einzugreifen und die ausführenden Gewerke im Forst mit in den Produktionsprozess einzubeziehen, eine ganzheitlich nachhaltige Kreislaufwirtschaft von Produktion und Informationsaustausch anstrebt. Die bereits Entwickelten Verfahren und Verbindungsgeometrien lassen sich jedoch gut mit dem Einsatz modernerer Technik vereinen, um ein komplexeres Produkt zu erzeugen zu können.

Optimierungen

Im Folgenden gilt es auszuloten, wie der Prozess weiter optimiert werden kann, dies kann auf mehreren Ebenen erfolgen.

Zum einen muss die wachsende Datenbank aus 2D und 3D Objekten weiter ausgebaut werden sowie nötige Werkzeuge hierfür angeschafft oder Zeitweise geliehen. Dies ermöglicht mehr Flexibilität bei der Planung mit dem unregelmäßigen Elementen und der Zuordnung mittels Automationen, welche alle limitiert sind durch ihre Datenbank.

Ein weiterer bedeutender Optimierungsansatz liegt in den Fertigungsprozessen. Durch den Einsatz von Robotern oder einer Scanvorrichtung an der CNC können neue Prozesse für die Fertigung runder Elemente die nicht planiert werden müssen entwickelt werden. Sie werden beispielsweise mit einem Motion Capture System an der Anlage selbst referenziert. Es entsteht ein Workflow aus einer Analog- und digitaler Arbeit, diese Methodik wird in einer Skalierung der Prozesse in einem größeren Maßstab von zentraler Bedeutung.

Literaturverzeichnis

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2021): Charta für HOLZ 2.0 - Klima schützen. Werte schaffen. Ressourcen effizient nutzen.

Julie Lyslo Skullestada, Rolf André Bohneb, Jardar Lohne (2016): High-Rise Timber Buildings as a Climate Change Mitigation Measure - A Comparative LCA of Structural System Alternatives

Raspall, Felix / Amtsberg, Felix / Bañón Sombra, Carlos (2018): Verde 's 3D Printed Bamboo Structure Bridges the Gap Between Tradition and Technology

Amtsberg, Felix / Moreno Gata, Kevin / Huang, Yijiang / Marshall, Daniel / Mueller, Caitlin (2020): Di-Terial - Development of sensory-informed design-to-fabrication process for the efficient use and robotic production of discarded one-off hardwood Elements

Mad Rain, Iasef / Sassone, Mario (2013): Tree-inspired dendriorms and fractal-like branching structures in architecture - A brief historical overview

Moreno Gata, Kevin / Grizmann, Denis / Trautz, Martin (2021): Guiding the Tree Growth for Timber Structures Design

Moreno Gata, Kevin / Musto, Juan / Pranjic, Andrija / Trautz, Martin (2021): Study and Simulation of Self-formation for Local Tree Growth

Moreno Gata, Kevin / Musto, Juan / Trautz, Martin (2021): Growing Construction Components - Design and simulation strategy for self-formation following tree growth

Niels Martin Larsen / Anders Kruse Aagaard (2020): Robotic processing of crooked saw-logs for use in architectural construction

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 : Co2 Bilanz Baustoffe im Vergleich

Abb. 2 : Buildings as a global carbon sink, Churkina et al 2020

Abb. 3 : Anisotropes Werkstoffverhalten

Abb. 4 : Informationsdienst Holz - Hochleistungsbaustoffe Holzbau, Herstellung von KVH

Abb. 5 : Nutzungszyklus des Materials und CO2 Bindung

Abb. 6 : Prozessübersichten im Vergleich

Abb. 7 : Analyse Vektoren

Abb. 8 : Elemente

Abb. 9 : Datenbank

Abb. 10 : Digitalisierung

Abb. 11 : Formfindung

Abb. 12 : Konstruktionsweisen / Matching Score

Abb. 13,14 : Idealgeometrie / Adaption des Systems