Botanische Grundlagen der Baubotanik und deren Anwendung im Entwurf

Von der Fakultät für Architektur und Stadtplanung
der Universität Stuttgart zur Erlangung
der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Ferdinand Ludwig

aus Überlingen

Hauptberichter: Prof. Dr. Gerd de Bruyn
Mitberichter: Prof. Dr. Thomas Speck
Mitberichter: Prof. Antje Stokman

Tag der mündlichen Prüfung: 16.04.2012

Institut Grundlagen Moderner Architektur und Entwerfen
der Universität Stuttgart

2012

Kurzfassung

Der Grundgedanke der Baubotanik ist, Bauwerke durch das Zusammenwirken technischen Fügens und pflanzlichen Wachsens entstehen zu lassen, indem Pflanzen als lebende Konstruktionselemente eingesetzt und derart mit nicht-lebenden Bauteilen verbunden werden, dass sie zu einer pflanzlich-technischen Verbundstruktur verwachsen. Eine solche Vorgehensweise scheint nur dann erfolgversprechend zu sein, wenn dieser Ansatz systematisch als eine auf botanischen Grundlagen basierende Bauweise entwickelt wird und wenn die Wachstumsregeln der Botanik zu elementaren Regeln des Konstruierens und Entwerfens werden. Beiden Ansprüchen – der Entwicklung baubotanischer Bautechniken und der Erarbeitung einer botanischen Grundlage für das Entwerfen – stellt sich die vorliegende Arbeit.

Die mit diesem Ziel durchgeführten Untersuchungen und Entwicklungen sind in drei Kapitel untergliedert, denen eine kurze historische Betrachtung vorangestellt ist. Diese zeigt auf, dass die Baubotanik an vielfältige Traditionen pflanzlicher Architektur anknüpft, bei der lebende Bauten durch das Schneiden, Formen und Verbinden von Trieben bzw. Wurzeln gebildet werden. Als Beispiele können hier die lebenden Brücken der Khasi in Ostindien und die mittelalterlichen Tanzlinden genannt werden. Auch in der jüngeren Vergangenheit hat es an Ideen, Visionen und Projekten, Bauwerke aus lebenden Bäumen zu bilden, nicht gefehlt. Diese lassen jedoch zumeist eine systematische Aufarbeitung des botanischen und gartenbauwissenschaftlichen Stands der Forschung und Technik missen und schätzen daher die Möglichkeiten und Grenzen pflanzlichen Wachstums häufig falsch ein. Mit der vorliegenden Arbeit wird versucht, diese Lücke zu schließen, und biomechanische bzw. pflanzenphysiologische Erkenntnisse und gartenbauliche Techniken gezielt zu nutzen, um die Möglichkeiten und Grenzen des Konstruierens mit lebenden Pflanzen systematisch zu entwickeln.

Ziel der im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen und Experimente war es, Schlüsseltechniken, Methoden und Verfahren zu erarbeiten, die die Realisierung baubotanischer Bauten in der Dimension ausgewachsener Bäume ermöglichen. Dazu wurde in **Anzuchtversuchen und biomechanischen Experimenten** untersucht, wie Pflanzen für die baubotanische Verwendung produziert werden können, und wie deren biomechanische und morphologische Eigenschaften durch die Steuerung von Wachstumsfaktoren beeinflusst werden können. Parallel wurden anhand von **Verwachsungsversuchen** sowohl für baubotanische Zwecke geeignete Verbindungstechniken entwickelt als auch unterschiedliche Baumarten bezüglich ihrer Verwachsungseigenschaften untersucht. Neben diesen Techniken und praktischen Verfahren, die notwendige Voraussetzungen für die Realisierung baubotanischer Bauten schaffen, gilt es jedoch auch, Entwurfsmethoden zu entwickeln, die gewährleisten, dass die künstlich gebildeten Pflanzenstrukturen langfristig (über)lebensfähig sind und die beabsichtigte Zielsetzung mit der tatsächlich eintretenden Entwicklung übereinstimmt. Dieser Aspekt wurde anhand des Entwurfs und der Realisierung eines prototypischen Bauwerks, des Projekts **baubotanischer Turm**, untersucht. Dabei wurde zum einen versucht, auf botanischen Wachstumsregeln basierende **Entwurfsregeln** zu erarbeiten, zum anderen sollte das Projekt aber auch dazu dienen, die prinzipielle Machbarkeit der **Pflanzenaddition** zu demonstrieren. Dabei handelt es sich um ein vom Wachstumsmuster semi-epiphytisch wachsender Würgefeigen abgeleitetes Verfahren, bei dem aus einer Vielzahl junger Pflanzen durch Verwachsungen ein einziger pflanzlicher Organismus gebildet wird. Dazu werden diese mithilfe temporärer Gerüste neben- und übereinander im Raum angeordnet und so miteinander verbunden, dass eine fachwerkartige Struktur entsteht. Durch die Verwachsungen entsteht dann mit der Zeit eine physiologische Einheit, die sich au-

tark vom Boden aus mit Wasser und Nährstoffen versorgen kann und anfangs notwendige Anlagen zur Bewässerung und Düngung entfernt werden können. Gleichzeitig nimmt die Tragfähigkeit der künstlich gebildeten Pflanzenstruktur durch sekundäres Dickenwachstum zu, sodass eine selbstragende Konstruktion entsteht und die Gerüste entfernt werden können.

Mit den durchgeführten Untersuchungen zur Produktion von Pflanzen als baubotanisches Konstruktionsmaterial wurde versucht, durch die gezielte Steuerung von Umweltfaktoren möglichst lange und dünne Triebe zu erzeugen, die sich leicht und in engen Radien biegen lassen und so in der Baubotanik universell einsetzbar sind. Dazu wurde in einem speziellen Anzuchtgewächshaus die spektrale Zusammensetzung des Lichts durch Filterfolien gezielt verändert, um die Pflanzen bei größtmöglicher Gesamt-Wachstumsleistung zu einer starken Schattenfluchtreaktion anzuregen. Als Baumart wurde *Platanus acerifolia* (gewöhnliche Platane) gewählt, da diese Art insgesamt für baubotanische Projekte gut geeignet ist. Als besonders effektiv stellte sich eine Umhüllung der Achsen mit lichtfilternder oder lichtdichter Folie heraus; die so behandelten Triebe wurden ca. 25 cm länger als die vergleichbarer Kontrollpflanzen und erreichten Längen von ca. 260 cm (Jahreszuwachs). Da es gleichzeitig zu einer deutlichen Reduktion der Durchmesser kam, ergab sich gegenüber den Kontrollen u.a. auch eine signifikante Steigerung des Schlankheitsgrades.

In einem zweiten Schritt wurden die so erzeugten Triebe anatomisch und biomechanisch untersucht. Durch Anzucht in gefiltertem Licht (sehr kleines Verhältnis von rotem zu dunkelrotem Licht) und insbesondere durch Umhüllung der Achsen mit lichtdichten oder lichtfilternden Folien konnte eine Reduktion des E-Moduls um bis zu 3.000 MPa erreicht werden (E-Modul der Kontrollen um 8.000 MPa). In Kombination mit der oben beschriebenen Reduktion der Durchmesser ergab sich dadurch bei lichtdicht oder lichtfilternd umhüllten Achsen eine Reduktion der Steifigkeit von ca. 70%. Damit lassen sich die so produzierten Pflanzen sehr viel leichter biegen und sind damit weitaus besser für baubotanische Anwendungen geeignet als die unbehandelten, im Gewächshaus gewachsenen Kontrollen. Bei Biege-Bruchversuchen zeigten die meisten Triebe insbesondere im basalen Bereich ein gutmütiges Bruchverhalten (zähes Brechen), während die oberen Triebabschnitte häufig plötzlich versagten und spröde brachen. Alle im Versuchsgewächshaus gewachsenen Pflanzen ließen sich in sehr engen Radien biegen ($R < 5{,}5$ cm) und erfüllen daher in diesem Aspekt die gesteckten Mindestanforderungen ($R < 10$ cm). Zu Kontrollzwecken gemessene, im Freiland gewachsene Triebe erfüllen diese Anforderungen jedoch nicht und konnten nur bis zu einem Radius von 20 bzw. 15 cm gebogen werden.

Ziel der durchgeführten Verwachsungsversuche war, die Eignung verschiedener Baumarten für baubotanische Anwendungen zu untersuchen und Grundlagen für die Entwicklung praxistauglicher Verbindungstechniken zu erarbeiten. Dazu wurden im Rahmen eines Screenings unterschiedliche Verbindungstechniken bei zehn Baumarten und mehreren Verbindungsgeometrien angelegt und der Verwachsungsprozess morphologisch sowie anatomisch über ein bis drei Jahre dokumentiert. Die untersuchten Baumarten unterscheiden sich in ihrer Wüchsigkeit und in ihren holz- und rindenanatomischen Eigenschaften. Gewählt wurden die schnellwüchsigen Pionierbaumarten Silberweide (*Salix alba*), gemeine Birke (*Betula pendula*), Schwarzerle (*Alnus glutinosa*) und gewöhnliche Robinie (*Robinia pseudoacacia*), sowie die in der Regel etwas langsamer wachsenden Arten gewöhnliche Platane (*Platanus acerifolia*), gemeine Esche (*Fraxinus excelsior*), Spitzahorn (*Acer platanoides*) und Stieleiche (*Quercus robur*), und des weiteren die sehr schattentoleranten und langsamwüchsigen Arten Hainbuche (*Carpinus betulus*) und Rotbuche (*Fagus sylvatica*).

Bezüglich der untersuchten Verbindungstechniken kann zwischen drei Kategorien unterschieden werden. Erstens wurden Verbindungstechniken untersucht, bei denen die Pflanzen mit breiten, auf der Rinde aufliegenden und dem Dickenwachstum nachgebenden Bändern zusammengehalten wurden. Zweitens wurden Techniken getestet, bei denen die Pflanzen mit dünnen, in der Regel nicht nachgebenden, sondern einwachsenden Seilen verbunden wurden. Und drittens kamen in den Untersuchungen Techniken zur Anwendung, bei denen die Pflanzen mit Schrauben zusammengehalten wurden, die die Holzkörper durchdringen. Sofern möglich und sinnvoll wurden mit allen Techniken bei allen Arten sowohl kreuzweise als auch parallele Verbindungen angelegt, wobei jeweils zwischen zwei und acht Pflanzen miteinander verbunden wurden.

Mit den gewählten Verbindungstechniken konnten bei fast allen Arten in vielen Fällen Verwachsungen erzeugt werden. Die Neigung zu Verwachsungen nimmt offenbar mit der Wüchsigkeit zu und mit dem Anteil der Abschlussgewebe (Korkschichten, Borke) ab. Sofern es gelang, die beschriebenen Verwachsungsprozesse zu initiieren, konnten zwischen den einzelnen Baumarten innerhalb des Beobachtungszeitraums kaum qualitative Unterschiede im Verwachsungsergebnis dokumentiert werden. Die Arten unterscheiden sich jedoch sehr deutlich in ihrer Reaktion auf die verschiedenen Verbindungstechniken, wobei hier insbesondere wieder ein Einfluss der Rindenanatomie, speziell des Anteils an Festigungsgeweben (Fasern), besteht. Auch die Holzanatomie (zerstreute oder ringförmige Anordnung der Poren) und die Eigenschaft einer Art, Verletzungen des Holzes abschotten und verschließen zu können, sind bei einigen Verbindungstechniken wichtige Einflussfaktoren. Insgesamt haben sich Platanen als besonders geeignet erwiesen, da bei dieser Art alle getesteten Verbindungstechniken anwendbar sind und rasch Verwachsungen entstehen. Ungeeignet scheinen insbesondere Robinien zu sein, die kaum miteinander verwachsen.

Mit dem Entwurf und der baulichen Umsetzung des experimentellen Bauwerks „baubotanischer Turm“ wurde prinzipiell aufgezeigt, wie mit dem Ansatz der Pflanzenaddition in kürzester Zeit erlebbare, vertikal erschlossene Grünräume unmittelbar in der Dimension eines ausgewachsenen Baumes realisiert werden können. Gleichzeitig wurden einige Erkenntnisse der Versuche zur baubotanischen Produktion und Verbindung von Pflanzen praktisch angewendet. Vor allem aber wurde versucht, den Entwurf eines baubotanischen Projekts systematisch auf Gesetzmäßigkeiten des pflanzlichen Wachstums aufzubauen. Im Unterschied zu einem gewöhnlichen Architekturentwurf ist hier nicht in erster Linie ein Objekt, sondern ein Wachstums- bzw. Entwicklungsprozess zu entwerfen, der zu den gewünschten Entwicklungszuständen führen soll.

Da aus der Art und Weise, wie die Pflanzen einer baubotanischen Struktur angeordnet und miteinander verbunden werden, besondere Wachstumsbedingungen resultieren, wurden diese zunächst allgemein beschrieben und analysiert. Dabei wurden die vier Themenkomplexe „Konkurrenzbedingungen“, „Gravimorphe Reaktionen“, „Mechanische Reizungen“ und „Stofftransport“ als für das baubotanische Entwerfen besonders relevant identifiziert. In der genaueren Analyse zeigte sich, dass mechanische Reizungen die Entwicklung baubotanischer Strukturen weitaus weniger beeinflussen als anfangs angenommen. Diese wurden daher beim Entwurf nicht weiter berücksichtigt. Demgegenüber können Konkurrenzbedingungen als entscheidend entwurfsprägend angesehen werden, weil es bei der Bildung baubotanischer Strukturen zwangsläufig zu einer Überlagerung der Kronenräume kommt. Bezüglich der Konkurrenzsituation konnte aus in den Forstwissenschaften etablierten Methoden ein Verfahren zur Bestimmung kritischer Pflanzendichte-Stammdurchmesser-Verhältnisse für baubotanische Strukturen abgeleitet werden, mit dem im Entwurfsprozess eine sinnvolle Pflanzendichte hergeleitet und zu-

mindest grob abgeschätzt werden kann, wann in der weiteren Entwicklung mit dem Absterben einzelner Pflanzen zu rechnen ist.

Gravimorphe Reaktionen prägen die Entwicklung baubotanischer Strukturen, weil durch das Neigen und Biegen von Trieben das natürliche Wachstumsmuster verändert wird. Aus vorliegenden Untersuchungen wurde die vorläufige Entwurfsregel abgeleitet, dass in baubotanischen Strukturen alle Triebe möglichst gering und gleich stark geneigt bzw. gebogen werden sollten, um eine möglichst gleichförmige Entwicklung aller Triebabschnitte zu gewährleisten. Bezüglich der Transportprozesse wurden die Betrachtungen auf Zusammenhänge zwischen dem Wassertransport im Holz (Xylemstrom) und dem Dickenwachstum fokussiert. Aus zwei in der Pflanzenphysiologie bzw. Ökophysiologie bekannten Theorien, der Pipe-Model-Theorie und dem Widerstandmodell, wurde ein Verfahren abgeleitet, mit dem die Xylemströme in Verwachsungs- und Additionsstrukturen zumindest qualitativ beschrieben werden können, um die Auswirkungen unterschiedlicher Anordnungsmuster der Pflanzen abschätzen zu können.

Ausgehend von diesen Überlegungen wurde die Pflanzenstruktur des baubotanischen Turms als ein regelmäßiges Rautenmuster entwickelt, in das horizontal aussteifende, technische Bauteile eingebunden wurden. Bei diesen handelt es sich um drei begehbare Ebenen mit einer quadratischen Grundfläche von ca. 2,8 m Kantenlänge sowie um Handläufe, die ebenfalls als aussteifende Elemente ausgebildet wurden. Diese insgesamt ca. 8 m hohe Struktur wird von einem temporären Gerüst aus Stahlrohren gestützt, das auch die auf sieben Ebenen angeordneten Pflanzcontainer trägt. Aufgrund ihrer Schnellwüchsigkeit und der Standortbedingungen (Feuchtwiese) wurde die Baumart *Salix alba* (Silberweide) gewählt. Abschließend wurden die Wachstumsbedingungen der baubotanischen Struktur des Turms analysiert und es wurde versucht, die weitere Entwicklung zu prognostizieren sowie Möglichkeiten aufzuzeigen, wie in die Entwicklung entsprechend der im Entwurfsprozess festgelegten Zielsetzungen eingegriffen werden kann (Pflegekonzept). Dabei zeigte sich, dass aufgrund der Pflanzendichte bereits relativ frühzeitig (ab einem Durchmesser von ca. 1,5 cm) mit dem Absterben einzelner Pflanzen zu rechnen ist. Gleichzeitig kann angenommen werden, dass sich die verwachsene Pflanzenstruktur autark vom Boden mit Wasser und Nährstoffen versorgen kann, sobald die Stämme an der Basis des Turms einen Durchmesser von ca. 8 cm erreicht haben. Mithilfe überschlägiger Berechnungen zur Biomasseproduktion von Weiden wurde ermittelt, dass dazu eine Wachstumsdauer von ungefähr 8 Jahren nötig sein müsste. In der weiteren Entwicklung ist dann damit zu rechnen, dass aufgrund von Konkurrenzbedingungen, die auch in Verwachsungsstrukturen auftreten, vermehrt Stammabschnitte absterben und sich die regelmäßige Rautenstruktur allmählich auflöst.

Der Ansatz, in der Architektur mit dem Wachstum von Bäumen zu arbeiten, bringt es mit sich, dass im Rahmen eines auf wenige Jahre beschränkten Promotionsvorhabens keine abschließenden Ergebnisse und Schlussfolgerungen vorgelegt werden können. Inwiefern sich die entwickelten Techniken in der Praxis dauerhaft bewähren und ob sich die Prognosen und Entwurfsregeln als richtig erweisen, kann deshalb nur die Zeit zeigen. Auch konnten mit der vorliegenden Arbeit lediglich erste Ansätze erarbeitet werden, die mehr Fragen aufwerfen, als beantwortet werden konnten. So sind insbesondere viele pflanzenphysiologische und technische Fragestellungen der Pflanzenaddition noch großteils unbeantwortet und bedürfen eigener empirischer Forschungs- und Entwicklungsansätze.

Abstract

The basic idea of Baubotanik[1] is to create buildings by combining technical joining and vegetal growth. Plants are being used as a living construction material and are connected with non-living building elements. In this way they merge into a vegetal-technical compound structure. This approach seems to be promising only if developed as a holistic building technique. That is to set construction and design of Baubotanik buildings on the base of botanical fundamentals and rules of growth. The present work is dealing with both objectives: Developing Baubotanik building techniques and compiling a botanical base for design.

The examinations carried out with this aim are grouped in three main chapters that are commenced by brief historical reflections. These reviews show that the Baubotanik approach ties in with various traditions of vegetal architecture, which produces living buildings by pruning, bending and connecting branches or roots of trees. For instance the living bridges of the Khasi people in East India and the medieval dance lime trees can be mentioned here. More recently several ideas, visions and projects addressing buildings made of living trees have emerged and widely discussed. Mostly, these approaches seem to lack of a systematic survey considering the current state of research and technology in botanical and horticultural sciences. Therefore, potentials and challenges of vegetal growth are often being misjudged. One aim of the present work is to close this gap of knowledge and to use biomechanical and plant physiological findings and state of the art horticultural techniques to explore the possibilities and limitations of living plant constructions.

The main aim of the examinations and experiments carried out in the present work was to develop key techniques, methods and practices that allow the realization of Baubotanik buildings in the dimension of fully grown trees. Thereto in **cultivation tests and biomechanical experiments** it was investigated how plants can be produced for Baubotanik purposes and how their biomechanical and morphological properties can be controlled by altering growth factors. In parallel **investigations concerning the inosculation[2] of plant stems** Baubotanik joining techniques were developed and the inosculation talents of different tree species were examined. Beside these techniques and practices that are necessary precondition to realize Baubotanik buildings, it is essential to develop design methods making sure that the artificially created plant structures can survive on a long-term basis and that the predicated developmental aims coincide with the actual development. This aspect was further explored within the project **Baubotanik tower** by designing and realizing a prototypical building. The attempt in doing so was to work out botanically based **design rules** and to demonstrate the principal feasibility of **plant addition**. The procedure of plant addition is derived from growth patterns of semi-epiphytically growing strangler fig trees. Its characteristic feature is that plenty of young plants are joined by inosculation techniques to create one single organism. Thereto a temporary scaffold is used to arrange the plants above and next to each other and to connect them in a way that a framework-like structure is formed. Over time the initial watering and fertilizing facilities can be removed, since the individual plants merge into one physiological unit that is able to feed itself from the

---

1 Baubotanik is a German neologism created at the Institute of Architectural Theory and Design (University of Stuttgart). It may be translated as “living plant constructions”.

2 Inosculation is a technical term that can be paraphrased as “natural grafting”.

ground. At the same time the stability of the artificially created plant structures increases by secondary growth in thickness in such a way that the structure becomes self-supporting and the scaffold can be removed.

The objective of the cultivation test was to produce plants with very long and thin shoots so that they can be bent easily and in a narrow radius. Thus, they become suitable for a wide range of Baubotanik applications. Therefore the environmental conditions were specifically altered in a special greenhouse that allowed changing the spectral composition of sunlight by using light filtering films with the aim to initiate that the plants show a pronounced shade avoidance reaction and an overall high growth rate. The tree species chosen was *platanus acerifilia* (London Plane) because this species is generally appropriate to many Baubotanik projects. Cladding the stems of the young trees with light filtering or light tight film seemed to be fairly effective; shoots treated in this manner grew 25 cm longer than control plants and reached a total length of 260 cm (annual growth). Since this treatment reduced the growth in thickness drastically, too, a significant increase in degree of slenderness was achieved.

In a second step the shoots produced in the described manner were anatomically and biomechanically examined. Plants grown in filtered light (very low ratio of red and dark red light) and especially those with filtering or light tight wrapping of the stems showed a Youngs Modulus of Elasticity which was 3000 MPa lower than that of control plants (8000 MPa). In combination with the reduction of the diameter (growth in thickness) mentioned above, the treatment with light filtering or light tight wrapping resulted in 70% less stiff shoots. Plants produced in this manner can be bent much easier and thereby are much more applicable for Baubotanik projects than untreated greenhouse-grown control plants. In bending- and fracture tests most samples of the basal shoot sections showed a ductile breaking pattern whilst those of the upper parts often broke suddenly and showed a brittle breaking pattern. All plants grown in the experimental greenhouse could be bent with vary narrow radii ($R < 5{,}5$ cm) und reached in this aspect the set target ($R < 10$ cm). Field-grown shoots that were examined in additional experiments did not reach that goal since they were breaking at bending radii between 20 and 15 cm.

One aim of the inosculation tests was to examine the applicability of different tree species for Baubotanik purposes and to gather fundamentals for the development of practical joining techniques. For that reason different joining techniques were applied to ten species and multiple joining geometries within a screening and the inosculation process was documented morphologically and anatomically during a period of one to three years. The species chosen were the fast growing pioneer trees White Willow (*Salix alba*), Silver Birch (*Betula pendula*), Black Alder (*Alnus glutinosa*) and Black Locust (*Robinia pseudoacacia*), as well as the generally a little slower growing species London Plane (*Platanus acerifolia*), European Ash (*Fraxinus excelsior*), Norway Mapple (*Acer platanoides*) and English Oak (*Quercus robur*), and furthermore the very shade tolerant and slow growing species Common Hornbeam (*Carpinus betulus*) Common Beech (*Fagus sylvatica*).

The joining techniques can be divided into three sections. At first there are techniques in which the plants are tied together with wide and pliable ties that lay over the bark. Secondly techniques were tested in which the plants where tied together with thin ropes that cut into the bark and do not ply though are incorporated by the growth processes. And thirdly there are techniques in which the plants where connected with screws that penetrate the wooden core of the stems. If

possible and reasonable these techniques were applied to all species and to parallel as well as crosswise connections, each with two to eight plants.

With the chosen joining techniques inosculations could be initiated in many cases with nearly all species. The affinity to inosculate increases with the vigor and decreases with the amount of secondary epidermal tissues (cork, bark). Insofar it was possible to initiate the described inosculation processes, nearly no qualitative differences between the species could be documented during the observation period. However, the species differ clearly in their reaction to the different joining techniques, whereas the anatomy of the bark, especially the percentage of sklerenchym and fibers is obvious. Though the anatomy of the wood (circularly or diffuse arrangement of the pores) and the ability of a species to partition and seal wounds of the wood are important factors at some joining techniques. All in all London Plane seems to be the most applicable species because it is possible to apply all tested joining techniques to it with good and fast inosculation results. In particular Black Locust showed nearly no inosculations and seems to be inapplicable at all.

With the design and realization of the experimental building “Baubotanik tower” it was principally demonstrated how vertically accessible green spaces in the dimension of a fully grown tree can be realized within a very short time by employing the method of plant addition. At the same time some findings of the inosculation and cultivation tests could be applied under practical conditions. But above all attempts were made to derive a design proposal of a Baubotanik project systematically from vegetal growth patterns. In difference to a common architectural project it is not mainly an object that has to be designed but rather a growth and developmental process that allows the desired states of development to come into existence.

Since the way the plants of a Baubotanik structure are arranged and connected with each other constitute special growing conditions, these general conditions have been described and analysed at first. Four sets of topics that seemed to be relevant for Baubotanik design processes have been identified: “competitive conditions”, “gravimorphism”, “mechanical stimulations” and “transport processes”. In a more detailed analysis it became clear that mechanical stimulations influence the development of Baubotanik structures far less than expected in the beginning; thus these conditions haven’t been considered any more. In contrast competitive conditions can be regarded as strongly influential, since the construction of a Baubotanik structure inevitably causes an overlapping of crown spaces. Concerning competitive conditions a method to deduce a critical plant density could be retrieved from forestry sciences. With this method it was possible to work out a reasonable plant density and to roughly estimate critical points in the development when individual plants are in danger to die.

Gravimorphism influences the development auf Baubotanik structures because bending and deflecting the shoots changes the natural growth patterns. Existing studies were used to deviate the design rule that shoots should be bent and deflected as less as possible and in more or less the same angle to achieve a consistent development of all shoot sections. Concerning transport processes the considerations were focused on the relations between water transport in the wood and growth in thickness. Based on two models that are well established in plant physiology and plant ecology, the pipe-model-theory and the resistance model, a method to qualitatively describe the water flow in plant structures formed by inosculation and plant addition was developed. With this method it is possible to describe the consequences of different plant arrangements.

Based on these considerations the living plant construction of the Baubotanik tower was designed as a regular rhomboid structure, which was connected with technical construction elements for horizontal reinforcement. These elements form three accessible platforms with a square footprint of 2,8 m side length as well as handrails. This all in all 8 m high structure is supported by a scaffold made of steel pipes that also supports the plant containers which are arranged on seven different levels. Because of the site conditions (marsh area) and because of their fast growth rate the species *salix alba* (White Willow) was chosen. Finally the growing conditions in the Baubotanik structure of the tower were analysed and it was tried to predict the further development and to present some possibilities to manipulate the development regarding the intended objectives (care concept). Here it is to be expected that single plants will die quite early in the development (starting at a diameter of 1,5 cm) because of the relatively high plant density. At the same time it can be assumed that the plant structure will be able to feed itself autonomously from the ground at least at the time when the stems have reached a diameter of about 8 cm. By using rough estimations of biomass production of willow stands it was calculated that this should take a time period of about eight years. Because of the competitive conditions that exist in merged/inosculated structures, too, probably more and more stem sections will die back in the further development and the rhomboid structure will disintegrate over time.

The approach to work with the growth of living trees in architecture means that it is not possible to present concluding results and final implications within a PhD study that is limited to a few years. So only time will tell to what extend the developed techniques will be proved in long terms under practical conditions and if the forecast and design rules will come true or not. Furthermore in the present work only some initial steps could be done and the work raises more questions than it answers. Specifically, many questions regarding the physiology of plants and the new technology of plant addition remain unanswered. They call for more detailed research and further developmental approaches.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung **3**

Abstract **7**

Inhaltsverzeichnis **11**

1 Einleitung und Thema **14**

1.1 Ausgangspunkt 14
1.1.1 Rückblick: Das Projekt *baubotanischer Steg* 15
1.2 Motivation 20
1.2.1 Lebendes Holz als ökologischer Baustoff und „Smart Material“ 21
1.2.2 Verlebendigung der Architektur 22
1.2.3 Baubotanische Bauten als Biofakte 24
1.2.4 Baubotanische Bauten als konstruierte Baumkronen 24
1.2.5 Baubotanik als stadtökologische Chance 25
1.3 Kurze Kultur- und Technikgeschichte der Architektur mit lebenden Pflanzen 27
1.3.1 Pflanzenarchitektur durch Schneiden, Formen und Verbinden 27
1.3.2 Bepflanzte und bewachsene Bauten 42
1.3.3 Pflanzenarchitektur der Ökologiebewegung 46
1.3.4 Aktuelle Beispiele 51
1.4 Herleitung und Gliederung des Forschungsansatzes 54
1.4.1 Schlussfolgerungen aus den historischen Betrachtungen 54
1.4.2 Botanische Grundlagen 57
1.4.3 Strategien der Raumeroberung in der Natur 58
1.4.4 Grundidee der Pflanzenaddition 60
1.4.5 Vorgehensweise 61

2 Produktion und biomechanische Charakterisierung von Pflanzen als lebendes Konstruktionsmaterial **63**

2.1 Einleitung 63
2.1.1 Anforderungsprofil und Zielsetzung 63
2.1.2 Pflanzenphysiologischer Hintergrund 64
2.2 Material und Methoden 65
2.2.1 Praktische Umsetzung 66
2.2.2 Versuchsdesign 2008 67
2.2.3 Versuchsdesign 2009 70
2.2.4 Untersuchungen 71
2.3 Ergebnisse 74
2.3.1 Versuchsreihe 2008 74
2.3.2 Versuchsreihe 2009 84
2.4 Diskussion 85

2.4.1 Morphologische Reaktionen (2008/2009) ... 85
2.4.2 Zusammenhänge zwischen anatomischen und biomechanischen Eigenschaften ... 87
2.4.3 Schlussfolgerungen für die baubotanische Praxis ... 89
2.4.4 Weiteres Vorgehen ... 90
2.5 Zusammenfassung ... 92

3 Verwachsungsversuche: Entwicklung baubotanischer Verbindungstechniken ... 94
3.1 Einleitung ... 94
3.1.1 Natürliche Verwachsungen ... 94
3.1.2 Techniken der Pflanzenveredelung ... 99
3.1.3 Verwachsungen und Verbindungstechniken in der Baubotanik ... 102
3.1.4 Fragestellung und Zielsetzung der Versuche ... 106
3.2 Material und Methoden ... 108
3.2.1 Zeitliche Gliederung der Versuche ... 108
3.2.2 Baumarten ... 108
3.2.3 Pflanzenmaterial ... 111
3.2.4 Praktische Umsetzung ... 111
3.2.5 Anordnung der Pflanzen, Verbindungsgeometrie ... 113
3.2.6 Verbindungstechniken ... 113
3.2.7 Dokumentation und Untersuchungen ... 119
3.3 Ergebnisse ... 122
3.3.1 Silberweide (*Salix alba*) ... 122
3.3.2 Gewöhnliche Platane (*Platanus acerifolia*) ... 137
3.3.3 Gemeine Esche (*Fraxinus excelsior*) ... 151
3.3.4 Gemeine Birke (*Betula pendula*) ... 157
3.3.5 Schwarzerle (*Alnus glutinosa*) ... 161
3.3.6 Spitzahorn (*Acer platanoides*) ... 165
3.3.7 Gewöhnliche Robinie (*Robinia pseudoacacia*) ... 169
3.3.8 Stieleiche (*Quercus robur*) ... 170
3.3.9 Hainbuche (*Carpinus betulus*) ... 173
3.3.10 Rotbuche (*Fagus sylvatica L.*) ... 175
3.4 Diskussion ... 177
3.4.1 Unterschiede zwischen den Versuchsreihen 2008 und 2009 ... 177
3.4.2 Beurteilung der Verbindungstechniken ... 181
3.4.3 Unterschiede zwischen den Verbindungsgeometrien ... 187
3.4.4 Bewertung und Beurteilung der Baumarten ... 191
3.5 Zusammenfassung ... 195

4 Entwurf und Realisierung eines prototypischen Bauwerks ... 198
4.1 Einleitung ... 198
4.2 Wachstumsbedingungen und Entwicklungsprozesse in baubotanischen Strukturen ... 199
4.2.1 Konkurrenz und Biomasseproduktion ... 201
4.2.2 Gravitrope und gravimorphe Reaktionen ... 205
4.2.3 Mechanische Reizungen ... 209
4.2.4 Transportprozesse und Dickenwachstum ... 212

4.3 Detailbetrachtung der Pflanzenaddition....219
4.3.1 Pflanzenaddition und Xylemstrom....219
4.3.2 Pflanzenaddition und Spross-/Wurzelentwicklung....220
4.3.3 Vorversuch zur Pflanzendaddition....221
4.4 Entwurfsbeschreibung....222
4.4.1 Zielsetzung und Projektvoraussetzungen....222
4.4.2 Standort und Baumart....223
4.4.3 Baubotanische Pflanzenstruktur....224
4.4.4 Technische Bauteile und Hilfskonstruktion....227
4.4.5 Vegetationstechnik und Pflanzenproduktion....228
4.5 Entwicklungsprozesse und Pflegekonzept....230
4.5.1 Entwicklungsphase I: Entwicklung der Einzelpflanzen....230
4.5.2 Entwicklungsphase II: Additionsprozess/Additionsentwicklung....238
4.5.3 Entwicklungsphase III: Dickenwachstum und Mortalität....242
4.6 Diskussion....248
4.7 Zusammenfassung....251

5 Schlussbetrachtungen und Ausblick....253
5.1 Eine Baumkrone als öffentlicher Ort in der Stadt: Platanenkubus Nagold....254
5.2 Ökologisch motivierte baubotanische Begrünungen: Baumwand und Baumfassade....256
5.3 Baubotanische Quartiersentwicklung: Grow!....259
5.4 Fazit....261

Anhang....262
Abkürzungsverzeichnis....262
Abbildungsverzeichnis....264
Tabellenverzeichnis....275
Glossar....276
Standardschnitte Verwachsungsversuche....281
Übersichtszeichnungen Turm....286
Entwicklungsprozess Turm....287
Danksagung....289

Literaturverzeichnis....292

1 Einleitung und Thema

1.1 Ausgangspunkt

Am Institut Grundlagen Moderner Architektur (IGMA) der Universität Stuttgart wird seit 2004 der Ansatz verfolgt, lebende Pflanzen zum Gegenstand des Konstruierens und Entwerfen zu machen. Ziel ist dabei, Bauwerke durch das Zusammenwirken technischen Fügens und pflanzlichen Wachsens entstehen zu lassen, indem Pflanzen als lebende Konstruktionselemente eingesetzt und derart mit nicht-lebenden Bauteilen verbunden werden, dass sie zu einer pflanzlich-technischen Verbundstruktur verwachsen. Um diese Vorgehensweise möglichst präzise zu fassen, wurde am IGMA der Begriff BAUBOTANIK entwickelt, der zunächst rein technisch als die Idee, „Tragstrukturen aus lebenden Holzpflanzen zu bilden", definiert wurde. (Ludwig und Storz 2005, S. 72)

Mit dem Projekt „baubotanischer Steg" wurde 2005 ein erstes experimentelles Bauwerk realisiert, bei dem diese Grundidee konsequent zur Anwendung kam und wesentliche Charakteristika der Baubotanik exemplarisch veranschaulicht werden konnten. Basierend auf relativ einfachen Konstruktionsmethoden ermöglichte der Steg auch erste praktische Erfahrungen im Umgang mit lebenden Pflanzen als Konstruktionsmaterial, die als Grundlage für einige weitere Projekte dienten, die in den folgenden Jahren realisiert wurden. Bei diesen Bauten kam es aber auch zu einer Reihe konstruktiver und botanischer Probleme und es wurde deutlich, dass das Entwerfen und Bauen mit lebenden Pflanzen eine komplexe Herausforderung ist, die nur auf Basis botanisch und biomechanisch ausgerichteter Forschung und Entwicklung gelingen kann. Parallel zu diesen technischen und baupraktischen Aktivitäten etablierte sich ein interdisziplinäres Netzwerk von Architekten, Ingenieuren, Natur- und Geisteswissenschaftlern, das erstmalig 2007 in der Konferenz „Lebende Bauten – Trainierbare Tragwerke" zusammenkam und im „Forschungsgebiet Baubotanik" am IGMA verankert wurde.[3] In der interdisziplinären Diskussion weckte die Baubotanik in den verschiedenen Disziplinen großes Interesse und es zeigte sich, dass der Ansatz trotz der oben wiedergegebenen knappen und technischen Definition sehr unterschiedlich interpretiert werden kann und einen großen Assoziationsraum eröffnet.

Diese Situation bildet den Ausgangspunkt der vorliegenden Arbeit und soll daher im Folgenden etwas ausführlicher dargestellt werden. Rückblickend wird dazu zunächst der baubotanische Steg und dessen Entwicklung in den vergangenen Jahren vorgestellt, um den eigenen Stand der Technik zu Beginn der Arbeit wiederzugeben und wesentliche Charakteristika der Baubotanik herauszuarbeiten. Anschließend werden unter der Überschrift „Motivation" mögliche Zielsetzungen und Sichtweisen der Baubotanik zusammengetragen, die in den vergangenen Jahren im Forschungsnetzwerk diskutiert wurden. Genauso vielfältig wie diese Sicht- und Interpretationsweisen sind auch mögliche Anknüpfungspunkte zu historischen wie aktuellen Ansätzen,

[3] Aspekte der Botanik und Biomechanik werden in Zusammenarbeit mit der Plant Biomechanics Group des Botanischen Gartens der Universität Freiburg bearbeitet. Konstruktive Aspekte werden in Kooperation mit dem Institut für Tragkonstruktion und konstruktives Entwerfen der Universität Stuttgart weiterentwickelt. Seit 2010 werden stadtökologische und entwurfliche Fragestellungen insbesondere auch in der Zusammenarbeit mit dem Institut für Landschaftsplanung und Ökologie der Universität Stuttgart bearbeitet. Die Forschungsarbeiten sind konzeptionell eingebunden in das Internationale Zentrum für Kultur- und Technikforschung der Universität Stuttgart. Weitere Kooperations- und Netzwerkpartner sind im Internet unter www.baubotanik.org aufgeführt.

lebende Pflanzen in der Architektur zu verwenden. Mit der exemplarischen Darstellung einiger dieser Ansätze wird versucht, einen kultur- und technikgeschichtlichen Hintergrund zu schaffen, vor dem der baubotanische Ansatz dann reflektiert und präzisiert wird. Dabei wird deutlich, dass wesentliche Erwartungen und Zielsetzungen – egal ob sie konstruktiv, ästhetisch oder ökologisch motiviert sind – von der Baubotanik nur erfüllt werden können, wenn sie systematisch als eine auf botanischen Grundlagen basierende Bauweise entwickelt wird und wenn pflanzliche Konstruktionsmaterialen und Bautechniken zur Verfügung stehen, die größere architektonische Möglichkeiten bieten als dies z. B. beim baubotanischen Steg der Fall war. Auch wird deutlich, dass in der Baubotanik die Wachstumsregeln der Botanik zu elementaren Regeln des Konstruierens und Entwerfens werden und die Limitierungen pflanzlichen Wachstums insgesamt das Feld prinzipiell möglicher Lösungen definieren. Beiden Ansprüchen – der Entwicklung baubotanischer Bautechniken und der Erarbeitung einer botanischen Grundlage für das Entwerfen – stellt sich die vorliegende Arbeit.

1.1.1 Rückblick: Das Projekt *baubotanischer Steg*

Der 2005 als ein Studentenprojekt realisierte Steg[4] veranschaulicht das für die Baubotanik typische Zusammenspiel pflanzlichen Wachsens und technischen Fügens, indem lebende Pflanzen als Baumaterial konstruktiv verwendet und mit nicht-lebenden, technischen Materialen zu einer Tragkonstruktion verbunden wurden. Als „pflanzliches Baumaterial“ wurden bei diesem ersten experimentellen Projekt Ruten bzw. Steckhölzer der Weidenart *Salix viminalis* (Korbweide) genutzt, da diese als Plantagenware in großer Stückzahl und gleichmäßiger Qualität unmittelbar zur Verfügung standen[5] und sich aufgrund ihrer pflanzenphysiologischen Eigenschaften sehr einfach als Konstruktionselemente verwenden lassen. So können Weidenruten für die Verwendung als lebendes Baumaterial einfach abgeschnitten werden, da sie sich unter anderem durch die Fähigkeit zur Adventivwurzelbildung auszeichen: Sie entwickeln neue Wurzeln, wenn sie mit dem unteren Ende tief genug in einen ausreichend feuchten Boden eingegraben werden.

Der Steg besteht aus ca. 1000 derartigen Ruten, die im Wesentlichen nach technisch-konstruktiven Gesichtspunkten zu einer Tragstruktur zusammengefügt wurden. Dazu wurden zunächst aus den einzeln kaum belastbaren Ruten tragfähige Konstruktionselemente gebildet, indem jeweils 12 bis 15 Pflanzen zu einem Bündel zusammengefasst wurden. Diese Bündel wurden meist senkrecht, teils aber auch diagonal angeordnet und nehmen eine aus Stahlprofilen und Gitterrosten gebildete Ebene sowie ein als Handlauf dienendes Edelstahlrohr auf. Insgesamt entsteht so eine sich selbst aussteifende pflanzlich-technische Verbundstruktur, bei der alle auftretenden Lasten durch die Pflanzen in den Boden abgetragen werden. Deshalb verfügt das Bauwerk über kein konventionelles Fundament, sondern ist ausschließlich durch die ca. 80 cm tief eingegrabenen Ruten und die sich an diesen bildenden Adventivwurzeln im Erdreich verankert (Abbildung 1). Bei dieser Vorgehensweise war beabsichtigt, dass alle Ruten eines Bündels aufgrund ihres Dickenwachstums zu einem einzigen Stamm verschmelzen und die Polyesterbänder, die die einzelnen Pflanzen zusammenhalten, dabei einwachsen. Ausgehend von Forschungsergebnissen zur biomechanischen Anpassung von Bäumen an mechanische Reizungen wurde an den Verbindungsstellen der Pflanzen mit den technischen Bauteilen versucht, durch einen relativ hohen Anpressdruck ein Umwallen zu provozieren und so einen Formschluss zu

---

[4] Entwurfsprojekt von Ferdinand Ludwig und Oliver Storz bei Prof. Dr. Gerd de Bruyn am IGMA (Wintersemester 2004/2005); in Zusammenarbeit mit Cornelius Hackenbracht, Neue Kunst am Ried

[5] Weiden werden für die Verwendung in der Ingenieurbiologie sowie für die Biomasseproduktion bzw. Energiegewinnung im großen Stil auf sogenannten Kurzumtriebsplantagen angebaut.

erreichen. (vgl. (Mattheck et al., 1989)) Eine vertikale Verschiebung dieser Detailpunkte tritt nicht ein, da Bäume lediglich an der Triebspitze in der Länge wachsen und in den bereits verholzten Abschnitten ausschließlich Dickenwachstum auftritt.

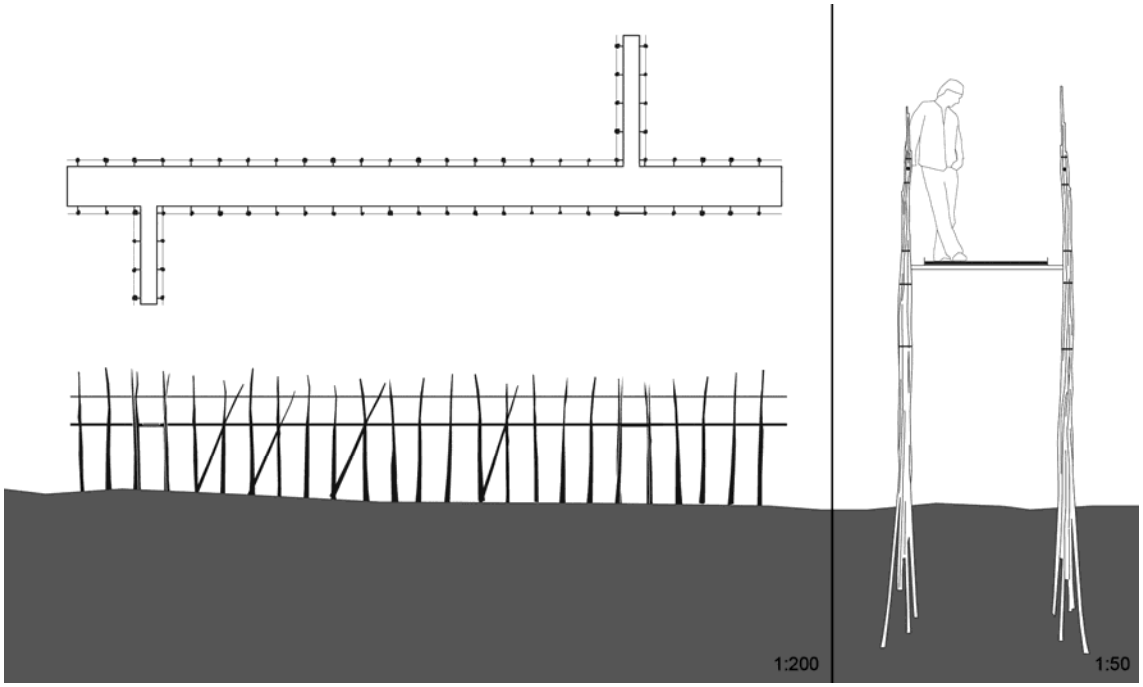


Abbildung 1 Konstruktionszeichnungen baubotanischer Steg (Ansichten und Schnitt). Durch den Verbund von Pflanzen und horizontal angeordneten, technischen Bauelementen entsteht ein stabiler Verbund.

Bereits unmittelbar nach der baulichen Fertigstellung (März 2005) zeigte der Steg eine beeindruckende Vitalität und Wachstumskraft: Im Mai 2005 entwickelten sich die ersten Blätter, und da diese unmittelbar an den tragenden Stützen entstanden, wurde bereits zu diesem Zeitpunkt deutlich, dass es sich bei dem Bauwerks selbst um etwas Lebendiges und nicht um eine lediglich begrünte Struktur handelt (Abbildung 2 links). Bis zum Sommer des gleichen Jahres waren dann bereits Triebe von teilweise über einem Meter Länge entstanden, die den Charakter des Bauwerks vollständig veränderten: Aus der Stützenstruktur entstanden durch Wachstumsprozesse grüne Blätterwände, die teilweise so dicht waren, dass das Bauwerk von weitem kaum noch als solches erkennbar war, sondern eher das Aussehen einer Hecke annahm (Abbildung 2 rechts). Diese Entwicklung macht deutlich, dass baubotanische Bauwerke nicht allein durch menschliche Schaffenskraft entstehen, sondern viel eher durch eine Co-Produktion des Menschen mit dem Baum. Der Architekt, der ein solches Bauwerk plant, lässt sich auf einen Prozess ein, bei dem er einen Teil seiner Gestaltungshoheit an den Baum abgibt, der damit zum „Co-Architekten“ wird und durch sein „Weiterbauen“ die räumliche Wirkung des Bauwerks grundlegend verändern kann (vgl. Ludwig, 2007). Diese bedingten Verwilderungsprozesse können baubotanische Bauwerke derart natürlich erscheinen lassen, dass sie sich nahezu bruchlos in Natur- bzw. Kulturlandschaften einfügen.

Abbildung 2 Links: Erster Blattaustrieb im Frühjahr 2005. Rechts: Ansicht im Sommer des gleichen Jahres:. Aus der Stützenstruktur ist eine dichte Blätterwand geworden.

Die am Steg beobachteten Entwicklungsprozesse zeigen aber auch, dass sich das Verhältnis von Technik und Natur im Wechsel der Jahreszeiten immer wieder verändert. Durch den Blattfall im Herbst treten nicht nur die technischen Bauteile wieder deutlich hervor, auch wird ablesbar, dass die Stammstruktur nicht gewachsen, sondern artifiziell konstruiert ist – der hybride Charakter des Bauwerks wird wieder deutlich erkennbar. Gleichzeitig bleiben auch im Winter Folgen der Wachstumsprozesse der vorausgegangenen Vegetationsperioden sichtbar. Denn obwohl sich durch das Wachstum die Grundgeometrie nicht verändert, verschieben sich doch die Proportionen des Bauwerks: Endete der Steg zu Anfang im Prinzip mit dem Handlauf, entwickelte sich im Lauf der Zeit eine Baumkrone, die die Gesamthöhe nahezu verdoppelte, sodass der Handlauf nunmehr die Mitte des Bauwerks markiert (Abbildung 4). Diese Entwicklung verdeutlicht, dass das Entwerfen bestimmter Formen und Proportionen, das gewöhnlich eine wichtige Rolle im architektonischen Entwurf einnimmt, in der Baubotanik kaum relevant ist und durch das Entwerfen dynamischer Entwicklungsprozesse ersetzt wird.

Abbildung 3 Entwicklung des Verbindungsdetails Pflanzenstütze-Handlauf. Von links nach rechts: Frühjahr 2005, Sommer 2005, Sommer 2010. Erkennbar sind der entstehende Formschluss und die Dickenzunahme der Pflanzen, aber auch die Strangulation im Bereich der Polyesterbänder (rechts).

Mit dem jährlichen Neuaustrieb im Frühjahr – den frischen, grünen Blätter oder den Weidenkätzchen, die im März erscheinen – artikuliert der Steg Lebensäußerungen, wie man sie von Bäumen, nicht jedoch von Bauwerken her kennt. Die Entwicklung unterliegt damit einer klaren jahreszeitlichen Rhythmik, ist aber gleichzeitig auch durch zufällige, nicht planbare Einflussfak-

toren geprägt, die dazu führen, dass baubotanische Bauten – genauso wie alte Bäume – einen individuellen Charakter entwickeln und jedes Detail im Verlauf der Entwicklung zu einem Unikat wird. Besonders deutlich wird dies beim Steg an den 64 Detailpunkten, an denen das Edelstahlrohr des Handlaufs mit den Bündelstützen verbunden ist (Abbildung 3). Häufig kam es hier relativ rasch zu den erwarteten Überwallungen, während an anderen Stellen nur geringe Reaktionen erkennbar waren oder aber der Wachstumsdruck so groß wurde, dass die Polyesterbänder aufgesprengt wurden. (vgl. Abschnitt 3.1.3.3)

Abbildung 4 Entwicklung des Stegs im Verlauf von 6 Vegetationsperioden. Von links nach rechts: Frühjahr 2005, Frühjahr 2006, Sommer 2006, Winter 2007-08, Sommer 2008, Herbst 2010.

Aufgrund dieser teilweise sehr heterogenen Entwicklung, vor allem aber aufgrund ihrer visuellen Wirkung wurden und werden diese Verbindungsstellen durchaus kontrovers diskutiert. Einerseits wird in ihnen die konzeptionell klare Fügung pflanzlicher und technischer Elemente gesehen, die die ästhetischen und konstruktiven Entwicklungsprozesse ablesbar macht. So werden die Pflanzen im Verlauf der Zeit immer knorriger und reagieren individuell auf ihre Umwelt, während sich die Oberfläche des Edelstahlrohrs so gut wie nicht verändert. Diese Entwicklungen veranschaulichen, dass die Belastbarkeit bzw. mechanische Leistungsfähigkeit der Pflanzenkonstruktion durch das Dickenwachstum zunimmt: Waren anfangs die Rohre häufig dicker als die Pflanzen, kehrte sich dieses Verhältnis innerhalb weniger Jahre meist um. Gleichzeitig kommt es durch das Überwallen des Rohrs zu einer Art Formschluss, der die Verbindungsstelle deutlich stabiler erscheinen lässt als die anfängliche Anpressung (vgl.

Abbildung 3).[6] Die dabei entstehende Durchdringung der verwachsenden Pflanzen mit dem Edelstahlrohr kann jedoch nicht nur als eine konstruktive Fügung angesehen, sondern durchaus auch als eine „Penetration der Pflanze durch die Technik“ interpretiert werden, die dann nicht als ein produktives Zusammenspiel von Technik und Natur, sondern als eine gewaltsame Überformung und ein technischer Missbrauch lebender Pflanzen bzw. natürlicher Entwicklungsprozesse interpretiert wird. Obwohl diese Wirkung im Rahmen der konstruktiv-technischen Vorgehensweise keineswegs beabsichtigt war, hat sie durchaus eine gewisse Entsprechung zu botanischen Gesichtspunkten. So gelten in der Baumpflege bzw. Arboristik Einschlüsse von Fremdkörpern im Allgemeinen als kritische Punkte, da an den Kontaktstellen die Rindengewebe früher oder später absterben und so – gerade bei Weiden – Fäulnisbakterien eindringen können. Tatsächlich lassen sich am Steg derartige Entwicklungen an einigen Detailpunkten beobachten.

Neben diesen sich nicht immer optimal entwickelnden Detailpunkten traten beim Steg aber auch Entwicklungen auf, die insgesamt nicht den gewünschten Zielvorstellungen entsprachen. So verwuchsen die Bündelstützen in der Regel nicht zu einem einzigen Stamm, da nur wenige Ruten ein kräftiges Dickenwachstum zeigten und alle anderen in ihrer Entwicklung mehr oder weniger stagnierten oder abstarben. Dies betraf vor allem diagonal angeordnete Rutenbündel sowie solche Pflanzen, die konstruktionsbedingt bereits auf Höhe der Gitterroste endeten.[7] Auch wuchsen die verbindenden Polyesterbänder meist nicht ein, sondern verursachten vielmehr einen Saftstau, der zu einem starken Anschwellen oberhalb und einem sehr geringen Dickenwachstum unterhalb der Bündelungsstelle führte (vgl. Abbildung 3 rechst).[8]

Diese Entwicklungen unterstreichen, dass bei baubotanischen Entwürfen auf allen Maßstabsebenen konstruktive und pflanzenphysiologische Anforderungen in Einklang gebracht werden müssen. Geschieht dies nicht, entwickeln sich die Strukturen nicht wie gewünscht, sondern sterben ab und können damit letztendlich auch die an sie gestellten Erwartungen (z. B. Tragfähigkeit) nicht erfüllen. Beim Entwurf des Steges und weiterer Projekte zeigte sich darüber hinaus, dass die Konstruktionsmethode mit Weiden-Steckhölzern zwar wie beschrieben über gewisse Vorteile verfügt, aber auch eine Reihe von Nachteilen und Einschränkungen mit sich bringt. So sind Weiden nicht nur besonders schnellwüchsig, sondern auch eher kurzlebig und neigen zu Fäulnisbildung. Sie benötigen für Ihr Wachstum volles Sonnenlicht sowie eine optimale Wasserversorgung und stellen damit sehr spezifische Anforderungen an ihren Standort, die vor allem im Kontext von Bebauungen und allgemein unter urbanen Bedingungen in der Regel nicht gegeben sind. Gleichzeitig ist die mögliche Größe der Bauwerke durch die Länge der zur Verfügung stehenden Ruten auf ein bis maximal zwei Stockwerke begrenzt (vgl. Abbildung 5). Darüber hinaus sind die geometrischen Möglichkeiten, aus diesen Ruten Konstruktionen zu bilden, sehr stark dadurch beschränkt, dass sie sich nur sehr bedingt biegen lassen, sodass neben den beim Steg eingesetzten Bündelstützen[9] hauptsächlich einfache Gitterschalen bzw. gitterartige Wände gebildet werden können. Diese Umstände und die aufgezeigten Probleme der Baumart Weide eröffnen den beim baubotanischen Steg verwendeten Techniken nur einen sehr begrenzten Anwendungsbereich.

---

[6] Die Zunahme der Belastbarkeit durch diese Überwallungsprozesse werden in dem Promotionsvorhaben von Oliver Storz detailliert untersucht, sieh dazu auch: STORZ, O. 2009. Wachstum und Tragfähigkeit in der Baubotanik. *In:* DE BRUYN, G., LUDWIG, F. & SCHWERTFEGER, H. (eds.) *Lebende Bauten - Trainierbare Tragwerke.* Berlin: Lit-Verlag.

[7] Diese Pflanzen konnten sich keinen ausreichenden Kronenraum erschließen, vgl. die entsprechenden Untersuchungen am Projekt „baubotanischer Turm“ in Abschnitt 4.5.1.3

[8] Durch das Anpfropfen von „Bypässen“ in der Vegetationsperiode 2008 konnten diese Probleme teilweise behoben bzw. entschärft werden.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, sowohl Konstruktionsmethoden und Regeln zu entwickeln, die eine pflanzengerechte Konstruktion baubotanischer Strukturen und damit eine langfristig vitale Entwicklung der Pflanzen ermöglichen, als auch einen Ansatz zu erarbeiten, der es ermöglicht, baubotanische Strukturen unmittelbar in der Dimension ausgewachsener Bäume realisieren zu können (vgl. Abbildung 5), und dabei ein möglichst breites Spektrum an Baumarten zu nutzen, um eine Vielfalt architektonischer Lösungen in unterschiedlichen, insbesondere städtischen Kontexten zu ermöglichen.

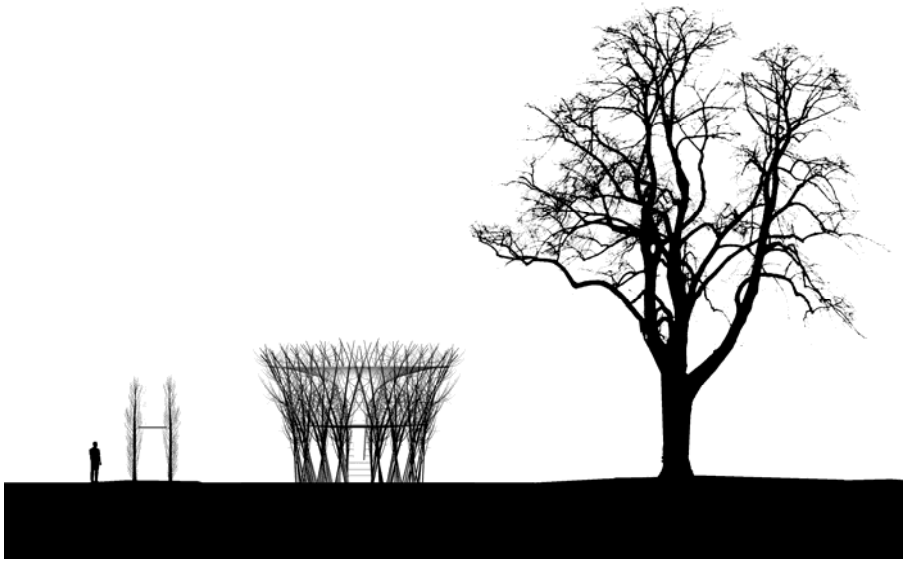


Abbildung 5 Größenvergleich zwischen baubotanischen Konstruktionen, die sich mit der beim Steg angewandten Weidenbautechnik realisieren lassen, und einem ausgewachsenen Baum. [10]

1.2 Motivation

Der Ansatz der Baubotanik wurde an der Fakultät für Architektur und Stadtplanung der Universität Stuttgart entwickelt und damit im Kontext einer vor allem auch baukonstruktiv ausgerichteten Fakultät. Daher standen zunächst Aspekte des „Konstruierens mit lebendem Holz“ im Vordergrund, die in der Zusammenarbeit mit der Plant Biomechanics Group Freiburg auch aus Sicht der Bionik betrachtet und weiterentwickelt wurden und werden. Die Baubotanik ist jedoch nicht an einem Konstruktionslehrstuhl, sondern am Institut Grundlagen Moderner Architektur und Entwerfen, und damit an einem Theorieinstitut, beheimatet. Sie wurde daher von Anfang an vor allem auch als ein kulturelles und ästhetisches – und damit originär architektonisches – Projekt entwickelt. Dies soll hier deshalb betont werden, weil die vorliegende Arbeit im Kern naturwissenschaftlich-technisch ausgerichtet ist, der Forschungsansatz jedoch nicht in erster Linie konstruktiv, sondern konzeptionell, ästhetisch und ökologisch motiviert ist. Um diesen Zusammenhang genauer zu beleuchten, werden in den folgenden Abschnitten unterschiedliche Aspek-

---

[9] Bei diesen stirbt jedoch wie oben dargestellt häufig ein großer Teil der Pflanzen ab.

[10] Weidenruten stehen bis zu einer Länge von ca. 7 Metern zur Verfügung. Längere und damit dickere Ruten lassen sich nicht mehr verlässlich bewurzeln bzw. es kommt an den Schnittflächen zu Fäulnisproblemen.

te und Sichtweisen des baubotanischen Ansatzes vorgestellt, die in den vergangenen Jahren im Forschungsnetzwerk diskutiert wurden.

1.2.1 Lebendes Holz als ökologischer Baustoff und „Smart Material“

Betrachtet man die Baubotanik primär als eine Bautechnik, so kann man sie als „lebenden Holzbau“ und damit als eine Bauweise beschreiben, bei der versucht wird, sowohl die bekannten technischen und ökologischen Eigenschaften des Baustoffs Holz,[11] als auch die Möglichkeiten von Wachstumsprozessen konstruktiv zu nutzen. In erster Linie bedeutet dies, dass Konstruktionen zu großen Teilen durch pflanzliches Wachstum entstehen und daher beim „Bauprozess“ nicht Rohstoffe und Energie verbraucht und Treibhausgase freigesetzt, sondern CO_2 durch Photosynthese gebunden und Sauerstoff produziert wird. Dieser Entstehungsprozess verspricht nicht nur besonders ökologisch und nachhaltig zu sein, sondern auch Konstruktionen entstehen zu lassen, die gewöhnlichen Holzbauwerken technisch überlegen sein könnten. Denn Bäume verfügen über die Eigenschaft, die äußere Form und innere Struktur ihrer Stämme und Äste kontinuierlichen an die vorhandenen Belastungen anzupassen. Wenn es gelingt, diese Form- und Strukturoptimierung für baubotanische Konstruktionen nutzbar zu machen, kann man den Werkstoff „lebendes Holz“ als biologisch erzeugtes und biologisch abbaubares „smart material“ bezeichnen, das dynamisch und adaptiv auf sich verändernde Belastungen reagiert (vgl. Abschnitt 4.2.3). Demgegenüber werden beim gewöhnlichen Holzbau die optimierten Strukturen eines Baumstamms in der Regel ignoriert und – beispielweise beim Sägen von Brettern und Balken – teilweise zerstört. Dabei wird zuallererst aber auch immer die Rinde entfernt, die den lebenden Baum vor Schadorganismen und dem Einfluss der Witterung schützt. Baubotanische Konstruktionen verfügen nicht nur über die lebende Rinde als Schutzmantel, sondern behalten die natürlichen Mechanismen der Abschottung und Wundheilung bei, die Bäumen in gewissen Grenzen eine Selbstreparatur ermöglicht (vgl. z. B. Shigo, 1994). Baubotanische Konstruktionen kommen deshalb ohne Holzschutzmittel aus und sie benötigen darüber hinaus kein gewöhnliches Fundament, da sie durch die Wurzeln im Erdreich verankert sind. Dadurch werden keine technischen Bauteile in den Boden eingebracht und es ergibt sich – wie das Beispiel des Stegs in einem Moorgebiet zeigt – die Möglichkeit, auch in schwierigen Untergründen mit einem minimalen Eingriff in den Naturhaushalt und ohne Flächenversiegelung zu „fundamentieren“.

Inwiefern die beschriebenen Aspekte der „Selbstkonstruktion durch Wachstum“, der Selbstoptimierung und der Selbstreparatur tatsächlich praktische Vorteile darstellen, ist jedoch insbesondere vor dem Hintergrund der in Abschnitt 1.4.1 dargestellten Limitierungen des pflanzlichen Wachstums und der in Abschnitt 4.2.3.1 dargestellten Bedingungen, unter denen die natürliche Selbstoptimierung stattfindet, kritisch zu hinterfragen. Und wie bereits am Beispiels des Stegs gezeigt, sind bei baubotanischen Konstruktionen nicht nur technische Faktoren, sondern vor allem auch die physiologischen Anforderungen der Pflanzen zu beachten, die den gesamten Entwurf stark determinieren. Zu bedenken ist darüber hinaus auch, dass baubotanische Konstruktionen eine im Vergleich zu technischen Bauweisen ungemein langsame Entwicklung aufweisen, die bis zur vollen Nutzbarkeit Jahrzehnte in Anspruch nehmen kann. Insgesamt ergibt

[11] Der Baustoff Holz zeichnet sich u. a. dadurch aus, dass er bei relativ geringem Eigengewicht eine erstaunlich hohe mechanische Leistungsfähigkeit aufweist, die (bezogen auf die Dichte trockenen Holzes) mit derjenigen von Stahl vergleichbar ist. Gleichzeitig gilt der nachwachsende Rohstoff Holz – sofern nachhaltig produziert – im Allgemeinen als ökologischer Baustoff, da bei der Produktion vergleichbar geringe Umweltbelastungen entstehen und (unbehandeltes) Holz als Naturstoff problemlos in natürliche Stoffkreisläufe zurückgeführt werden kann.

sich daraus, dass aus lebenden Pflanzen gebildete Konstruktionen möglicherweise als hochgradig effizient angesehen werden können, da sie die ihnen zur Verfügung stehende Baumasse optimal nutzen, ihre tatsächliche Effektivität, d. h. Leistungsfähigkeit ist jedoch im Vergleich zu konventionell-technischen Konstruktionen z. B. aus Stahl oder auch Bauholz gering ist. Aus diesem Grund trat eine rein technische Herleitung des baubotanischen Ansatzes seit der Begründung des Forschungsgebiets im Jahr 2007 mehr und mehr in den Hintergrund, während die im Folgenden dargestellten konzeptionell, ästheisch und ökologisch begründeten Motive an Bedeutung gewannen.

1.2.2 Verlebendigung der Architektur

Sieht man in der Baubotanik nicht in erster Linie eine Konstruktionsweise, sondern eine Architekturform, so steht sie in der Tradition unterschiedlicher Bestrebungen, Aspekte der lebenden Natur in der Architektur produktiv werden zu lassen. Eine Verlebendigung der Architektur strebten beispielsweise zu Anfang des 20. Jh. die Organiker[12] und in ihrer Gefolgschaft die Metabolisten[13] an, die Bauten und ganze Städte entwarfen, die nicht in erster Linie organisch aussehen, sondern wie lebende Organismen funktionieren sollten. Die vitalen Kräfte der Natur finden aber genauso in der Ornamentik ihren Ausdruck. So verband z. B. Louis Sullivan mit seiner Arbeit am Ornament den Anspruch, Bauwerke in etwas Lebendiges zu verwandeln, indem er Ornamente schufen, deren Geometrie völlig von floralen Motiven überwuchert wurden, „um sich schließlich ganz und gar in einer verwirrenden Vielzahl organischer Kurven aufzulösen“ (de Bruyn 2009, S. 129; vgl. Sullivan, 1967). Heute kommt das Ziel einer verlebendigten Architektur nicht nur in biomorphen Formen wie der Blobarchitektur zum Ausdruck, sondern schlägt sich z. B. auch in der „Evolutionary Architecture“ nieder, bei der Mechanismen der Selektion und Mutation Eingang in den Entwurfsprozess finden (vgl. z. B. Hensel et al., 2004). Auf ähnliche Art und Weise wird in der Architekturbionik versucht, durch systematisches Beschreiben und Abstrahieren biologischer Prozesse und Strukturen Lösungsvorschläge für konstruktive und bautechnische Problemstellungen zu finden (vgl. z. B. Gruber, 2010).

Ein unmittelbarer, ja geradezu körperlicher Zugang kann in der Arbeit von Hermann Finsterlin und Friedrich Kiesler gesehen werden, die mit ihren expressionistischen bzw. surrealistischen Zeichnungen und Modellen eine Architektur entwickelten, die in jedem Detail lebendig sein sollte.[14] Diese Absicht kann man in gewissem Sinne auch Buckminster Fuller unterstellen, der seine Konstruktionen zwar meist auf Basis rein geometrischer Überlegungen entwickelte, in einem 1971 publizierten Interview jedoch die von ihm geplanten Geodesic Domes wie folgt kommentierte: „ … Ich habe nicht viel davon sichtbar werden lassen, außer dass jemand, der

---

[12] Hier sei exemplarisch auf Hugo Häring verwiesen, der mit seinem Ansatz der Leistungsform nicht versuchte, natürliche Formen nachzuahmen, sondern mit dem Erreichen der Leistung die „Wesenheit des Objekts“ herauszuarbeiten versuchte und darin den Bezug zur belebten Natur sah. Siehe z. B.: KREMER, S. 1982. Hugo Häring (1882-1958) Bauten, Entwürfe, Schriften, Dissertation. München: TU München.

[13] Nach den Vorstellungen der japanischen Architekten und Stadtplaner Kisho Kurokawa, Kiyonori Kikutake, Fumihiko Maki, Sachio Otaka und Noboin Kawazoe sollte die Stadt als ein lebendiger Prozess gestaltet werden und ausschließlich aus erweiter- und wandelbaren Großstrukturen bestehen.

[14] Zu Finsterlin siehe: HARBISON, R. 1991. *Das Gebaute, das Ungebaute und das Unbaubare: auf der Suche nach der architektonischen Bedeutung.,* Berlin, Birkhäuser. S.. 178: „Seine phantastischen, karbunkularen Studien sind die unteilbarsten und undurchschaubarsten "Gebäude", die jemals erdacht wurden … Die Perspektiven sind mit Farbe leicht angehaucht, sie wirken wie entzündet, sie wachsen sich aus zu beinahe schönen Abszessen, geschwülztig, schwanger, organisch, eine Vermischung von pflanzlicher Verwurzelung und animalischen Gliedern.“ Zu Kiesler vgl.: KIESLER, F. J., BOGNER, D. & NOEVER, P. 2001. *Frederick J. Kiesler, Endless Space,* Ostfildern, Hatje Cantz.

sich den Expo-Dome in Montreal angesehen hat, ein schönes Stück Mechanik zu sehen bekam. (...) Man sieht, da gibt es Vorgänge, die sich artikulieren können und vollkommen artikulieren können sie sich durch Photosynthese (...) Es ist möglich, all diese Zellen wie unsere eigene Haut mit allen ihren Poren zu organisieren, so dass manche lichtempfindlich, und manche sind tonempfindlich, und andere sind wieder wärmeempfindlich; … Einige davon könnten ein Bildschirm sein, andere könnten Luft atmen, andere Licht einlassen, und das Ganze könnte sich artikulieren genauso sensitiv wie die Haut eines menschlichen Wesens. Und ich glaube wirklich, dass Geodesic Domes dieser Art entwickelt werden."[15]

Nimmt man Fuller hier wörtlich, so zielt er darauf ab, Bauwerke zu schaffen, die auch ein Biologe als lebendig bezeichnen würde. Er unterscheidet sich damit von den zuvor genannten Beispielen, die in direkter oder indirekter Analogie zu Naturprozessen stehen und daraus ihre technischen Konsequenzen ziehen bzw. Aspekte des Lebendigen im metaphorischen Sinne in die Architektur wirksam werden lassen. In diesem Sinne kann man die Baubotanik in eine Linie mit Fuller stellen, denn auch sie zielt ja darauf ab, im biologischen Sinne lebende Bauten zu schaffen. Dabei ergibt sich jedoch unmittelbar ein (vermeintlicher) Widerspruch zwischen der Lebendigkeit im biologischen Sinne und dem Ansatz der Baubotanik, Konstruktionen aus lebenden und nicht lebenden, technischen Bauteilen zusammenzufügen: Inwiefern können Bauwerke, die nur zu Teilen aus lebenden Pflanzen bestehen, insgesamt als lebende Bauwerke bezeichnet werden? Eingangs wurde der baubotanische Steg als ein lebendes Bauwerk beschrieben, da bei diesem Projekt offensichtlich die Lebensäußerungen der verwendeten Bäume als Lebensäußerungen des gesamten Bauwerks interpretiert werden. Dies scheint insbesondere damit zusammenzuhängen, wie das Bauwerk konstruiert ist: Weder die pflanzlichen noch die technischen Strukturen geben für sich genommen ein funktionierendes Bauwerk ab. Folglich ist es unmöglich, zwischen den Pflanzen auf der einen und einem Bauwerk auf der anderen Seite zu unterscheiden.

Daraus ergibt sich die Schlussfolgerung, dass man nur dann von einem lebenden Bauwerk sprechen kann, wenn die Pflanzen unentbehrlicher Bestandteil des Bauwerks sind. Durch eine (rein) attributive Verwendung von Pflanzen (wie z. B. bei einer Begrünung mit Kletterpflanzen) kann zwar auf den ersten Blick ein visuell durchaus vergleichbares Ergebnis erzielt werden, bei näherem Hinsehen wird man aber immer zwischen Bauwerk und Pflanze unterscheiden können und es kommt nicht zum Verschmelzen von Lebendem und Technischen in einem Bauwerk. Wenn jedoch – wie beim Beispiel des Stegs – die primär tragende Konstruktion aus lebenden Pflanzen besteht, wenn also alle vertikalen Kräfte von den lebenden Konstruktionselementen aufgenommen werden, ist die Unentbehrlichkeit der Pflanzen offensichtlich. Zwingend notwendig ist diese tragende Rolle der Pflanzen nicht, sie ist aber eine der wesentlichen Motivationen, in der Baubotanik die primär tragenden Strukturen aus lebenden Pflanzen zu konstruieren.

---

[15] Zitiert nach: KRAUSE, J., LICHTENSTEIN, CLAUDE 1999. *Your Privat Sky. R. Buckminster Fuller. Design als Kunst einer Wissenschaft,* Basel CH, Lars Müller. S. 428. Siehe auch: DE BRUYN, G. 2009. Der Dornröscheneffekt. Architekturtheoretische Überlegungen zur Baubotanik. *In:* DE BRUYN, G., LUDWIG, F. & SCHWERTFEGER, H. (eds.) *Lebende Bauten - Trainierbare Tragwerke.* Berlin: Lit-Verlag. S. 132.

1.2.3 Baubotanische Bauten als Biofakte

Die Vorgehensweise, in der Baubotanik Konstruktionen zu bilden, die sowohl aus Pflanzen als auch aus technischen Bauteilen bestehen, ist nicht nur der Zweckmäßigkeit und Benutzbarkeit geschuldet, sondern vor allem eine konzeptionelle Entscheidung: Die Bauwerke werden ganz bewusst als hybride Strukturen entworfen, die nicht so tun, als wären sie „Natur an sich". Denn in der artifiziellen Form der Pflanzenkonstruktion und durch das Einwachsen der technischen Bauteile wird deutlich, dass Wachstumsprozesse gezielt eingesetzt und damit zumindest zu Teilen dem menschlichen Tun verfügbar gemacht werden. Gleichzeitig bleiben Architekten wie Nutzer aber auch immer der „Biodynamik" unkontrollierbarer Wachstumsprozesse ausgesetzt (vgl. de Bruyn et al. 2009, S. 10). Durch diese Ambivalenz wird die gewohnte Trennung zwischen den autonomen Prozessen der Natur und der Autonomie von Artefakten aufgehoben, weshalb baubotanische Strukturen weder rein künstliche noch rein natürlich gewachsene Produkte sind. Sie sind etwas Drittes, durchaus Strittiges, wofür die Philosophin Nicole Karafyllis den Begriff „Biofakt" eingeführt hat (Karafyllis, 2003; Karafyllis, 2009). Karafyllis unterscheidet dabei zwischen Biofakten, bei denen die Anteile des technischen und des natürlichen sinnlich erfahrbar beiben, und solchen, bei denen beispielsweise der künstliche Anteil nicht bzw. nur mit Hilfe analytischer Verfahren erkannt werden kann. Zu dieser letztgenannten Art der Biofakte zählen vor allem gentechnisch veränderte Organismen, die gerade aufgrund ihres nicht erkennbaren künstlichen Anteils als unsichtbare Gefahr angesehen werden und daher Ängste schüren. Weil in baubotanischen Bauten der Anteil des Technischen immer sichtbar, ja regelrecht greifbar und damit fühlbar bleibt, kommt der Baubotanik möglicherweise eine Übersetzungsfunktion zu: Sie macht einen technischen Fortschritt – oder zumindest die mit diesem Fortschritt einhergehende Problemstellung – sinnlich erfahrbar.

Auch bezüglich eines zweiten Aspekts kommt der Baubotanik eine Übersetzungsfunktion zu. Denn heute können wir nicht nur immer weniger zwischen dem, was unberührte Natur und dem, was Menschenwerk ist unterscheiden, sondern betrachten zunehmend unseren Umgang mit der Natur insgesamt außerordentlich skeptisch. Hieran sind natürlich die gewaltigen, vom Menschen selbst verursachten Umweltzerstörungen schuld, und die Tatsache, dass unser Wirtschaften die Ressourcen der Erde weitaus schneller ausbeutet, als sich diese regenerieren können. Die natürlichen „Grenzen des Wachstums", wie sie der Club of Rome erstmals 1972 anmahnte (Meadows et al., 1972), die in der ökologischen Debatte allzu oft eine rein abstrakte Größe bleiben, werden in der Baubotanik zu einer erfahrbaren Realität: Die zur Verfügung stehende Konstruktionsmasse ist durch die Stoffwechselvorgänge limitiert und entsteht unmittelbar vor Ort durch natürliche Wachstumsprozesse, die sich technisch nur bedingt beschleunigen und nur in gewissen Grenzen steuern lassen. Ein Entwerfen und Bauen, das diese Grenzen nicht akzeptiert, wird unweigerlich daran scheitern, dass die gesteckten Ziele nicht erreicht werden und die lebende Konstruktion ihren Dienst verweigert, indem sie als Ganzes oder zu Teilen abstirbt. Nur wenn bereits im Entwurf diese Grenzen als gegebene Parameter akzeptiert werden, kann langfristig eine sich vital entwickelnde Struktur entstehen – genauso wie global nur dann ein nachhaltiges Wirtschaften erreicht werden kann, wenn sich Verbrauch und Entstehung von Ressourcen die Waage halten.

1.2.4 Baubotanische Bauten als konstruierte Baumkronen

Wenn wir von den „Grenzen des Wachstums" sprechen, liegt dem oft eine pessimistische Geisteshaltung zu Grunde, bei der Natur als etwas Zerbrechliches angesehen wird, das es vor dem Zugriff des Menschen zu schützen gilt. Baubotanische Bauten machen aber gerade auch die

Kraft und Vitalität erlebbar, die Bäume als die größten und beeindruckendsten Lebewesen der Erde zeigen. So flößt uns bereits der Anblick eines alten Baumes aus der Ferne große Achtung ein – seine sinnlichen und räumlichen Qualitäten können wir jedoch erst dann voll erleben, wenn wir uns nicht unter, sondern in der Baumkrone aufhalten. Dieses Erlebnis ist vielen als eine Kindheitserinnerung erhalten geblieben und kommt u .a. in der großen Popularität von Baumhäusern zum Ausdruck: Hoch oben, weit entfernt von den alltäglichen Dingen, werden wir von einem leicht schwingenden, und dennoch robust wirkenden Ast getragen, und umgeben von den rauschenden Blättern und deren Schattenspiel kann man – ohne selbst gesehen zu werden – oft einen atemberaubenden Ausblick genießen.

Angesichts der Beliebtheit von Baumhäusern ist es durchaus verwunderlich, dass die schönsten (Natur-)Räume, die beispielsweise ein Park zu bieten hat, in der Regel nicht betreten werden und auch nicht Gegenstand der Entwürfe von Architekten und Landschaftsarchitekten sind. Wenn es mit der Baubotanik gelingt, pflanzliche Tragwerke in der Dimension ausgewachsener Bäume zu konstruieren, könnten diese Qualitäten unmittelbar entworfen und gebaut werden. Denn anders als beim Baumhaus, das einen natürlich gewachsenen Baum voraussetzt, in den ein mehr oder weniger konventionell konstruiertes Haus hineingebaut wird, ist es in der Baubotanik der Baum selbst, der entworfen und (zumindest in seiner Grundstruktur) gebaut wird. Welche phantastischen räumlichen Potentiale hier zu entwickeln sind, haben vor allem die Expeditionen und Forschungsvorhaben in den Baumkronen tropischer Regenwälder gezeigt, bei denen die aufblasbaren „Baumkronen-Flöße“ (canopy raft) des französischen Architekten Gilles Ebersolt genutzt wurden. Diese ultraleichten Strukturen werden mit Luftschiffen oder Hubschraubern zu ihrem Einsatzort gebracht, „landen“ dann auf dem Blätterdach, wo eine Forschungsstationen eingerichtet werden kann, die den – mehr oder weniger komfortablen – Aufenthalt in dem von einer Vielzahl an Pflanzen und Tieren besiedelten Habitat Baumkrone ermöglicht (Halle et al., 2004).

Vermutlich waren es diese Qualitäten, die James Cameron inspirierten, als er für den Film Avatar die Phantasiewelt von Pandora entwarf. Hier sind die Baumkronen, die mit ihren gewachsenen Wendeltreppen in gewissem Sinne als baubotanische Strukturen bezeichnet werden können, Heiligtümer und Behausungen der „edlen Wilden“. Mit der Baubotanik könnte es gelingen, Baumkronen so zu transformieren, dass Aufenthaltsräume entstehen, die zumindest einige der Vorzüge und Bequemlichkeiten gewöhnlicher Bauwerke aufweisen. Damit werden sie zu Orten, an denen sich nicht nur die Phantasiefiguren eines Hollywoodfilms wohlfühlen, sondern gewöhnliche Menschen sicher und komfortabel verweilen können. Die sinnlichen Qualitäten der Bäume sollten dabei freilich nicht nur erhalten, sondern mit den technischen Konstruktionselementen zu einem Gesamterlebnis gesteigert werden.

1.2.5 Baubotanik als stadtökologische Chance

Im Städtebau sind Bäume heute nicht nur aufgrund ihrer ästhetischen Qualitäten, sondern insbesondere auch aufgrund ihrer ökologischen Potentiale fast schon obligatorischer Bestandteil der meisten aktuellen Planungen. Dass dies eine relativ moderne Errungenschaft ist, verdeutlicht die Tatsache, dass erst im 19. Jahrhundert, als die teils noch aus dem Mittelalter, teils aus der Renaissance stammenden Festungsanlagen geschliffen wurden, in größerem Umfang öffentliche Grünräume in Städten entstanden. Anders als in der so gut wie baumlosen mittelalterlichen Stadt durchzogen nun von Bäumen gesäumte Ringstraßen und Boulevards das städtische Gefüge (Hartung 1997, S. 21 f.). Mit der Pflanzung von Bäumen wurden hygienische Vorteile wie z. B. die Verbesserung der Luftqualität (Staubbindung) angestrebt, die Baumbestände ermöglichten es aber auch, dass die bürgerliche Bevölkerung auf den breiten Straßen im Schatten flanie-

ren konnte (vgl. Mollik et al. 1980, S. 322f.). Anfang des 20. Jahrhunderts nahmen Grünflächen dann einen immer wichtigeren, vor allem auch sozial begründeten Stellenwert in der Stadtentwicklung ein.[16] Und mit der ringförmig aufgebauten Gartenstadt von Ebenezer Howard sollte die Trennung zwischen Stadt und Land insgesamt aufgehoben werden – Ein Anspruch, der dann im „fließenden Landschaftsraum" von Le Corbusier und dem Leitbild der aufgelockerten und durchgrünten Stadt mündete, das verbunden mit der funktionalen Trennung in Arbeiten, Wohnen und Erholung vor allem den Städtebau nach dem zweiten Weltkrieg prägen sollte.

Genauso wie die funktionale Trennung der Stadt geriet jedoch auch das Leitbild der aufgelockerten und durchgrünten Stadt im Verlauf der zweiten Hälfte des 20. Jh. immer stärker in die Kritik, da es einerseits einen hohen Flächenverbrauch nach sich zieht und anderseits häufig keine urbanen, belebten Orte entstehen lässt, wie wir sie uns von Städten erhoffen (vgl. z. B (Kutzki, 1996) . Heute wird daher häufig eine Nachverdichtung dieser Stadtstrukturen gefordert, die aber angesichts der Gefahr, dass dichte und wenig durchgrünte Städte im Zuge des Klimawandels zu regelrechten Hitzeinseln werden, die Stadtplanung vor ein Dilemma stellt.[17] Wenn es gelingt, baubotanische Strukturen als dreidimensional begehbare Grünräume zu gestalten, die gleichzeitig bauliche Funktionen übernehmen können, dann könnten sie einen wertvollen Beitrag zu einer ökologischen Stadtentwicklung leisten, da urbane Dichte, Naturerfahrung und stadtklimatische Aspekte vereint werden können.[18]

Insgesamt scheint die Frage, wie heute adäquate urbane Grünräume geschaffen werden können, von größerer Bedeutung denn je. Denn die weltweit rasant ablaufenden Urbanisierungsprozesse führen nicht nur dazu, dass immer mehr Menschen in Städten wohnen, in den nächsten Jahrzehnten werden Millionen Menschen in Städte bzw. Stadtviertel ziehen, die heute noch gar nicht existieren. Und diese in kürzester Zeit gebauten städtischen Strukturen verfügen dann natürlich (noch) nicht über die grünen Qualitäten, die wir von alten Baumbeständen in Alleen und Parks kennen und lassen daher die positiven stadtökologischen Qualitäten (zunächst) missen. Eine Ursache für diese Diskrepanz kann darin gesehen werden, dass die Bautechnik seit der Einführung der modernen Materialien Glas, Stahl und Beton und der dazugehörigen Bautechniken die immer schnellere Realisierung immer höherer Gebäude erlaubt, während nach wie vor in der Regel Jahrzehnte vergehen, bis beispielsweise Baumpflanzungen groß genug geworden sind, um in nennenswertem Umfang Schatten zu spenden und durch ihre Laubmasse die Luft zu filtern und zu kühlen. Wenn es mit der Baubotanik gelingt, Strukturen aus Bäumen zu bilden, die nicht durch Wachstum allein, sondern durch das Verbauen pflanzlicher Konstruktionselemente die Größe ausgewachsener Bäume erreichen, könnten viele Aspekte ausgewachsener Bäume zeitlich vorweggenommen werden, da sie nicht in Jahrzehnten, sondern in wenigen Monaten entstehen.

---

[16] Z. B. mit den Volksparks der Reformbewegung., wie sie z. B. von dem (Garten-)Architekten Leberecht geplant wurden. Siehe hierzu: BAUMANN, M. 2002. *Freiraumplanung in den Siedlungen der zwanziger Jahre am Beispiel der Planungen des Gartenarchitekten Leberecht Migge,* Halle, Trift-Verl.

[17] Hervorzuheben ist insbesondere, dass Bäume durch Verschattung und Verdunstung zu einer Kühlung der Luft beitragen, wohingegen sich Städte bei fehlender Vegetation bekanntermaßen besonders stark aufheizen. Vgl. u.a.: BAUMÜLLER, J., REUTER, U., HOFFMANN, U. & ESSWEIN, H. 2008. *Klimaatlas Region Stuttgart,* Stuttgart, Verband Region Stuttgart.; KUTTLER, W. 1993. Stadtklima. *In:* SUKOPP, H., WITTIG, G. (ed.) *Stadtökologie.* Stuttgart: G. Fischer Verlag.

[18] Durch das so verbesserte Mikroklima können auch weitere ökologische Effekte wie z. B. eine Energieeinsparung bei der Gebäudekühlung erreicht werden (vgl. GIVONI, B. 1991. Impact of planted areas on urban environmental quality: A review. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere,* 25**,** 289-299.)

1.3 Kurze Kultur- und Technikgeschichte der Architektur mit lebenden Pflanzen

Die Baubotanik zeichnet sich dadurch aus, dass lebende Pflanzen sowohl mit einer funktionalen Absicht (Konstruktion), als auch mit dem Ziel der räumlichen Gestaltung eingesetzt werden. Historisch steht der Ansatz damit in einer Linie mit Ansätzen, bei denen Pflanzen mit einem vergleichbaren Ziel verwendet werden, wobei bezüglich der zum Einsatz kommenden Techniken zwei mehr oder weniger scharf voneinander zu trennende Entwicklungslinien auszumachen sind. So können Ansätze, bei denen Pflanzenbauwerke durch das **Schneiden, Formen und Verbinden von** Trieben (bzw. auch Wurzeln) gebildet werden, von solchen unterschieden werden, bei denen aus nicht-lebenden Baumaterialien gebildete Grundstrukturen und Unterkonstruktionen **bepflanzt bzw. begrünt** werden.

Ansätze, die sich durch das Schneiden, Formen und Verbinden von Trieben auszeichnen, lassen sich zumeist auf im Kern bäuerliche Nutzungsformen und Techniken der Pflanzenverwendung zurückführen. Aus diesen „Urtechniken" entwickelten sich im Lauf der Geschichte vielfältige Praktiken und Anwendungsfelder, bei denen teilweise eher räumlich-gestalterische Absichten im Vordergrund standen (z. B. Gartenarchitektur/Lustgarten), teilweise aber auch funktional-technische Aspekte weiterentwickelt wurden (z. B. Ingenieurbiologie). Auch bei Ansätzen, die auf der Bepflanzung bzw. Begrünung technischer Substrukturen basieren, ist häufig ein gärtnerisch-bäuerlicher Ursprung auszumachen. So dienen z. B. Rankgerüste und Spaliere dazu, auf engstem Raum die Produktion von Obst zu ermöglichen und dabei das positive Mikroklima, wie es beispielsweise vor einer südlich orientierten Hauswand entsteht, optimal zu nutzen. Gleichzeitig wurden und werden derartige Bepflanzungen mit dem Ziel angelegt, die Bauwerke vor Witterungseinflüssen zu schützen und Temperaturschwankungen im Inneren des Gebäudes zu reduzieren, wodurch indirekt ein baulicher Nutzen entsteht (vgl. Köhler et al. 1993, S. 37f.). Noch deutlicher wird der baulich-konstruktive Nutzen einer Bepflanzung am Beispiel von Grassodenhäusern, bei denen die als Wand- und Dachbaustoff dienenden Torfsoden durch den Grasbewuchs dauerhaft zusammengehalten und vor Erosion geschützt werden. Demgegenüber ist die Bepflanzung von Bauwerken mit Bäumen, Sträuchern und Zierpflanzen, die ihren historischen Höhepunkt in den Hängenden Gärten findet, meist gartenkünstlerisch motiviert – was jedoch nicht bedeutet, dass nicht auch Dachgärten einen klimatischen Nutzen für das Bauwerk und die Stadt haben können.

Im Folgenden werden diese Entwicklungslinien exemplarisch an einigen Beispielen nachgezeichnet, da sie interessante Schlussfolgerungen für die Einschätzung bzw. Bewertung aktueller Ansätze und Trends ermöglichen und wertvolle Hinweise für die Entwicklung des eigenen, baubotanischen Ansatzes bieten.

1.3.1 Pflanzenarchitektur durch Schneiden, Formen und Verbinden

1.3.1.1 Bäuerliche Urtechniken

Um die bäuerlichen Ursprünge lebender Bauten bzw. pflanzlicher Architektur verstehen zu können, muss man sich alte, heute oft nicht mehr gebräuchliche Bewirtschaftungs- und Nutzungsformen von Gehölzen vergegenwärtigen. Dabei ist zunächst zu bedenken, dass nicht nur die Bäume des Waldes, sondern vor allem auch Hecken, Baumreihen, Alleen und Anpflanzungen wie Streuobstwiesen bis weit über das Mittelalter hinaus wichtiger Bestandteil des bäuerlichen Wirtschaftens waren. Im Unterschied zu unseren modernen, zumeist monofunktionalen

land- und forstwirtschaftlichen Produktionsmethoden dienten die Gehölze dabei meist nicht nur einer Funktion, sondern wurden beispielsweise gleichzeitig zur Erzeugung von Viehfutter und/oder Obst, zur Produktion von Holz, als Windschutz und Zaun genutzt. Insbesondere die Nutzung als Zaun und die heute meist unbekannte Produktion von Viehfutter auf Bäumen ist für das Verständnis der Ursprünge lebender Bauten und pflanzlicher Architektur von großer Bedeutung. Denn während wir heute hauptsächlich Wiesen und Äcker als Produktionsflächen ansehen und den bei Pflegemaßnahmen von Gehölzen anfallenden Grünschnitt als Abfall betrachten, wurden in früheren Zeiten Bäume und Hecken nicht selten mit dem Ziel der „Laubheuproduktion“ angelegt. Dazu wurden die jungen Zweige und Blätter von Bäumen und Hecken in regelmäßigen Abständen „geerntet“ und dann direkt an das Vieh verfüttert oder als Heu getrocknet. Derart bewirtschaftete Bäume, die man auch als „Luftwiesen“ bezeichnete, wurden so „erzogen“, dass sie ein stabiles, möglichst bequem zu besteigendes Ast-Grundgerüst entwickelten. Sie ermöglichten durch die Erschließung einer zweiten oder auch dritten Ebene die mehrfache Nutzung des oft begrenzten Agrarlandes und lieferten bei regelmäßiger Pflege über mehrere Generationen einen häufig existenziell notwenigen Ertrag. (Machatscheck, 2002)

Die bei der Laubheuwirtschaft angewandten Techniken des häufigen und flächigen Rückschnitts zur Laubernte sind der Ursprung des uns heute aus Ziergärten bekannten Hecken- und Formschnitts (Abbildung 6 links). Und die im mehrjährigen Turnus stattfindende „Schneitelung“ ist die (handwerkliche) Basis des heute z. B. bei Alleebäumen häufig zu sehenden kopf- oder kandelaberförmigen Baumschnitts (Abbildung 6 rechts). Beide Schnitttechniken wurden im Barock, teils jedoch auch schon in mittelalterlichen Lustgärten, zur Bildung pflanzlicher Räume genutzt und dabei mit dem Ziel einer ästhetischen Überhöhung handwerklich perfektioniert (vgl. Abschnitt 1.3.1.3).

Abbildung 6 Links: Mehrgeschossige und multifunktionale, bäuerliche Gehölznutzung. Die geschnittene Hecke unten dient als Abgrenzung und zur Laubheuproduktion, die Bäume der Wertholzproduktion (Steffen Heinz/ Wikimeida Commons). Rechts: Schneitelbäume zur Gewinnung von Viehfutter (Kurz and Machatscheck, 2008) S. 37).

Genauso wie die Schneitelung ist die Verwendung von Pflanzen zur Herstellung lebender Zäune eine bereits seit der Jungsteinzeit praktizierte Technik. Nicht überraschend ist daher, dass in mittelalterlichen Quellen eine ganze Reihe unterschiedlicher Flechttechniken zu finden ist, bei denen meist lebende Triebe und nicht-lebende Äste und Ruten in unterschiedlichen Anteilen miteinander verflochten wurden. Überraschend ist jedoch, dass der Anteil der lebenden Pflanzen

in diesen Konstruktionen ab dem 15. Jahrhundert zunimmt und den Bauern im Barock schließlich administrativ vorgeschrieben wird.[19] In einer Verordnung der österreichischen Landvogtei heißt es beispielsweise „… dass die Untertanen anstatt der hölzernen Planken und Verzäunungen um die Felder, Gärten und Hofplätze zu Pflanzungen lebender Zäune angehalten werden sollten, in der besten Absicht nämlich, damit der schädliche, unnütze Holzverbrauch gehemmt…“ werde (zit. nach Kurz et al. 2001, S. 44; vgl. Abbildung 7 rechts) Hintergrund dieser Tendenzen ist zum einen, dass seit dem Mittelalter durch eine Intensivierung der Landnutzung und durch die Privatisierung vormals gemeinschaftlich genutzter Flächen (Allmende) vormals offene Flächen umzäunt wurden und gleichzeitig durch eine veränderte Waldnutzung[20] ein Holzmangel eintrat (ebd. S. 43ff.). Bemerkenswert ist dabei vor allem, dass Pflanzen als lebender Baustoff die Nutzung toten Bauholzes ersetzen sollten, um – in unserem heutigen Verständnis – Ressourcen zu sparen und eine nachhaltigere Form des Wirtschaftens zu erreichen.

Lebende Zäune sind zwar mit Sicherheit äußerst einfache bauliche Anlagen, in ihrer Konstruktionsweise können sie aber durchaus als baubotanische Strukturen bezeichnet werden, da man sie ohne Übertreibung als pflanzliche Konstruktionen bzw. pflanzlich-technische Mischkonstruktionen bezeichnen kann, die u.a. durch das Verwachsen der Pflanzen untereinander und das Einwachsen nicht-lebender Konstruktionselemente entstehen. So ist die einfachste Übergangsform von der Hecke zum Zaun z. B. durch das Einlegen horizontaler Holzstangen in das Astgerüst gegeben. Diese Stangen werden „immer mehr von neuen Austrieben umwachsen und auf diese Weise in der Hecke aufliegend befestigt.“ (ebd. S. 123) Teilweise wurden dazu auch längere Triebe um horizontale Holzstangen herumgeschlungen, um einen stabilen Verbund zu erzeugen (Abbildung 8 links) Bei einfachen Flechthecken wurden meist einige Triebe nach mehr oder weniger regelmäßigen Mustern horizontal umgebogen und dann mit senkrechten Trieben verflochten oder mit abgeschnittenen Weidenruten an diese gebunden. Dabei kam es teilweise zu Verwachsungen, die jedoch nicht systematisch herbeigeführt wurden (Abbildung 7 links).

Abbildung 7 Unterschiedliche Typen lebender Flechtzäune bzw. Flechthecken. Links: Einfache, „ungeordnete“ Form. Mitte: Gitterartig ausgebildete Flechthecke mit systematisch angelegten Verwachsungen. Rechts: Anleitung zur Herstellung bzw. Pflanzung und Pflege einer derartigen Hecke (alle Abbildungen aus Kurz et al., 2001; Links nach Lengerke, 1847; rechts: Original aus: Schenk, 1833)

[19] Die Ausführungen beziehen sich im Wesentlichen auf die Situation in Österreich.

[20] Der aufkommende Bergbau verlangte nach großen Mengen an Bau- und Brennholz; gleichzeitig wurden große Waldgebiete von der höfischen Jagd beansprucht und damit einer bäuerlichen Nutzung entzogen.

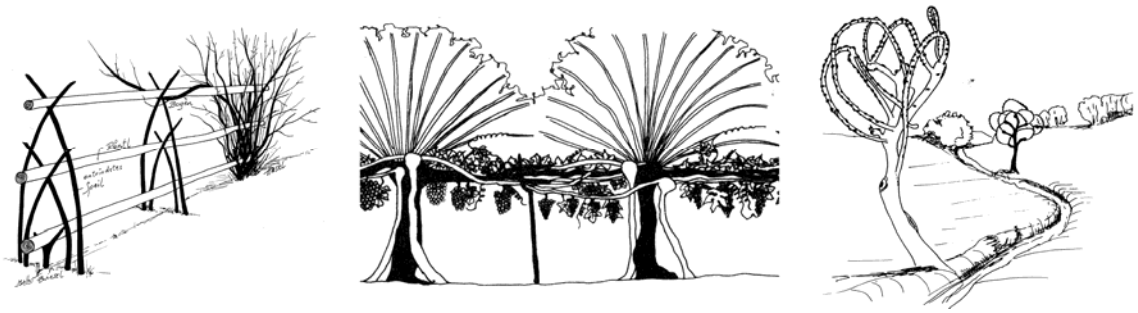


Abbildung 8 Links: Zaunhecke als Verbundkonstruktion aus Rundhölzern und lebenden Pflanzen. Mitte: Mit Wein beranktes lebendes Spalier aus gezogenen Bäumen. Rechst: Der Flechtrutenproduktion dienende Weiden mit bogenförmig verwachsenen Hauptästen. (Alle Abbildungen aus Kurz et al., 2001)

Erst im Barock, als auch die Flechttechniken in der Gartenkunst perfektioniert wurden, sind von Bauern angelegte lebende Zäune bekannt, bei denen Verwachsungen systematisch genutzt und gezielt angelegt wurden. Dazu wurden junge Triebe der in regelmäßigen Abständen gesetzten Pflanzen diagonal gekreuzt und an den Verbindungsstellen durch Verflechten verbunden und/oder mit Hilfe von Weidenruten zusammengebunden, um so Verwachsungen zu provozieren (vgl. Abschnitt 3.1.1). Dieser Hecken- bzw. Zauntyp galt jedoch als besonders arbeitsintensiv, da „die Gerüstäste gezogen[21], zum Verwachsen zusammengebunden und ständig überprüft werden mussten, damit eine entsprechende Instanthaltung gewährleistet werden konnte." (Kurz et al. 2001, S. 154). Verwachsungen wurden jedoch bereits seit der Antike in südlicheren Ländern gezielt genutzt, um langlebige Stützgerüste für den Weinbau zu erzeugen. Dazu wurden von in Reihe gepflanzten Bäumen je zwei Leittriebe in waagerechter Stellung zusammengebunden, sodass ein lebendes Spalier entstand, dessen Austriebe regelmäßig geschnitten und zum Aufbinden der Weinreben verwendet wurden. (ebd. S. 154 f., Abbildung 8 Mitte) Bekannt sind darüber hinaus auch Weidenpflanzungen, bei denen die Haupttriebe bogenartig miteinander verbunden wurden, wobei durch Verwachsungen ein stabiles Gerüst entstand, an dem besonders viele, für das Flechtarbeiten geeignete Triebe entstehen (Abbildung 8 rechts).

1.3.1.2 Lebende Brücken aus Luftwurzeln

Die oben dargestellten bäuerlichen Techniken des Bauens mit lebenden Pflanzen scheinen maßgeblich durch die in Mitteleuropa vorherrschenden klimatischen Bedingungen und die relativ begrenzte Anzahl der hier vorkommen Holzgewächse geprägt und auch beschränkt zu sein. Welche Möglichkeiten in tropischen Klimazonen durch die dort vorkommenden Pflanzenarten und Wachstumsbedingungen gegeben sind, veranschaulichen die lebenden Brücken des indigenen Volksstamms der Khasi (Ki Hynñiew trep) im ostindischen Regenwald, die dort vermutlich seit Jahrtausenden mithilfe der Grundtechniken des Schneidens, Formen und Verbindens lebender Pflanzen angelegt werden. Diese Brücken überspannen oft reißende Flüsse, die in den tropischen Bergwäldern des heutigen Bundesstaates Meghalaya sehr häufig sind, da nirgendwo sonst auf der Erde derart viele und heftige Niederschläge verzeichnet werden. Das dauerfeuchte Klima[22] liefert aber auch hervorragende Wachstumsbedingungen für verschiede Ficusarten wie z. B. den Gummibaum (*Ficus elastica*), der sich u. a. dadurch auszeichnet, dass den Stämmen und

[21] Unter dem „Ziehen" von Gehölzen versteht man das Leiten und Formen von Trieben.

[22] Die Luftfeuchtigkeit liegt fast immer bei annährend 100%.

Ästen Luftwurzeln entspringen, die sich zu stabilen Stützstrukturen entwickeln, sobald sie den Boden erreicht haben, und so die ausladenden Kronen stabilisieren.[23]

Die Khasi machen sich dieses Wachstumsmuster zu Nutze, indem sie die Luftwurzeln ausgewachsener Gummibäume, die an den Ufern eines zu überquerenden Flusses stehen, zum jeweils gegenüberliegenden Ufer umleiten, bevor sie den Boden erreicht haben. Dazu nutzen sie ausgehöhlte Stämme der Betelnusspalme (*Areca catechu*), die über den Fluss gelegt werden und den Luftwurzeln quasi als Wachstumspfad dienen. Wenn die Luftwurzeln auf diese Art das andere Ufer erreicht habe, verzweigen sie sich im Boden und die hohlen Betelnuss-Stämme werden entfernt. Im Laufe der Zeit werden sie dann immer dicker und verwachsen untereinander zu einer stabilen, mehr oder weniger zufällig geformten, fachwerkartigen Struktur. Im Verlauf dieser Entwicklung werden große Steinplatten in bzw. auf dem Wurzelgeflecht ausgelegt, die in die Pflanzenstruktur einwachsen und eine begehbare Fläche bilden. Einige solcher Brücken sind bis heute erhalten geblieben, sie sollen bis zu 400 Jahre alt sein und scheinen sich tatsächlich aufgrund ihrer Wachstumsprozesse selbst zu erhalten bzw. zu reparieren. (Abbildung 9)

Abbildung 9 Zweistöckige lebende Brücken der Khasi in der Nähe von Cherrapunjee, Indien. Erkennbar sind die aus Luftwurzeln gebildete Verwachsungsstruktur (links und Mitte) sowie die einwachsenden Steine, die eine begehbare Fläche bilden (rechts). (www. Cherrapunjee.com /19.09.2011)

Darüber, wie diese ausgeklügelte „Bautechnik" entstanden sein könnte, lässt sich nur spekulieren. Anzunehmen ist jedoch, dass sie eine ähnliche Entwicklungsgeschichte wie die in Mitteleuropa bekannten lebenden Zäune hat. So könnte der Ausgangspunkt in gewöhnlichen Brückenkonstruktionen liegen, die in tropischen Wäldern häufig zu finden sind und aus abgeschnittenen Lianen und anderem Totholz gebildet werden. Derartige Konstruktionen sind unter den dauerfeuchten Bedingungen jedoch nicht besonders langlebig, da das Holz in kürzester Zeit fault und die Brücken unbrauchbar werden. Es ist gut möglich, dass die Khasi schon vor Jahrtausenden einen schräg über einen Bach wachsenden Gummibaum entdeckt hatten, dessen Luftwurzeln am anderen Ufer in der Erde wurzelten, und dabei auf die Idee kamen, die Luftwurzeln eines zufällig in der Nähe einer Brücke wachsenden Gummibaums in die Konstruktion aus totem Holz einzuflechten. Während die ursprüngliche Brücke im Laufe der Zeit verfaulte, erreichten die Luftwurzeln das andere Ufer und durch ihr Dickenwachstum entstand eine neue, immer stabiler werdende, lebende Brücke – die Urform einer baubotanischen Konstruktion.

[23] Zum Wachstumsmuster von Ficus-Arten bzw. Würgefeigen und zu den Eigenschaften und dem Wachstum der Luftwurzeln siehe Abschnitt 1.4.3.

1.3.1.3 Pflanzenarchitektur der Lustgärten vom Mittelalter bis zum Barock

Die lebenden Brücken der Khasi sind offensichtlich Gebrauchsarchitekturen, die trotz einer vermutlich Jahrzehnte dauernden Entstehungszeit in ihrer Herstellung und ihrem Unterhalt praktikabler waren als vergleichbare Strukturen aus nicht-lebenden Baumaterialien. In Mitteleuropa sind keine vergleichbaren Bauten auszumachen, die aus primär funktionalen Gründen angelegt worden wären. Allerdings wurde der ästhetische Wert der nach bäuerlichen Methoden behandelten Gehölze relativ früh erkannt und in der Gartenkunst gezielt zur Bildung von Räumen eingesetzt. So ist beispielsweise der Formschnitt seit der Antike als Gestaltungselement der Gartenkultur überliefert.

Die erste ausführliche Beschreibung und Anleitung zur Anlage pflanzlicher Architekturen im Garten ist von dem Bologneser Gelehrten Pietro de Crescenzi überliefert, der im Spätmittelalter einflussreiche Werke zu allen bäuerlichen und gärtnerischen Tätigkeiten verfasste und auch ein Buch über den Lustgarten publizierte.[24] In diesem ist folgende Passage zu lebenden Bauwerken zu finden: „Es soll in diesem Lustgarten ein Palast mit Gängen und Kammern ganz aus Bäumen errichtet werden, in dem König oder Königin mit den Rittern und Damen sein können, wenn es nicht regnet. … anstelle der Wände werden, wenn es gefällt, Fruchtbäume gepflanzt, die leicht wachsen, wie Kirsch- und Apfelbäume. … Und durch Pfropfen sowie mit Hilfe von Pfählen, Latten und Bändern wird ihr Wachstum über viele Jahre hindurch so geleitet, dass sich Wände und Dach aus ihnen bilden.“ (zit. nach Wimmer, 1989, S. 27) Neben diesem Palast beschreibt Crescenzi auch Einfriedungen aus (immergrünen) Bäumen, die so geschnitten werden sollen, dass sie den Türmen und Zinnen einer Burg ähneln. Bemerkenswert ist dabei insgesamt, dass allen bäuerlichen Techniken ein hoher ästhetischer Wert zugesprochen wird. So schreibt Crescenzi über Verwachsungen: „…außerdem trägt es viel zum Vergnügen bei, wenn im Lustgarten wunderbare Pfropfungen geschehen, auch mehrere an ein und demselben Baum…“ (ebd.) und meint damit wahrscheinlich kreuzförmige Verwachsungen, wie sie beim Verflechten der Triebe zu lebenden Zäunen entstehen. Wie die folgende Textstelle belegt, wurden die mit Hilfe dieser Techniken gebildeten Strukturen nicht nur zur räumlichen Untergliederung des Gartens eingesetzt, sondern bildeten teilweise auch tragfähige, begehbare Konstruktionen: „… Diese [die Triebe] schneide man, wenn sie die … Höhe erreicht haben, ab und biege sie mit Hilfe von Stangen gegen die zunächst und gegen die außen stehenden Pflanzen nieder und die außen stehenden wieder gegen sie; und das soll so jedes Jahr geschehen, bis gleichsam eine Art starkes Geflecht entstanden ist, auf dem Menschen sicher verweilen können.“ (ebd. S. 28f.)

Der von Crescenzi vorgezeichnete Weg, lebende Pflanzen systematisch zur Bildung von Räumen, tragfähigen Strukturen und zur Imitation steinerner Architektur im Garten einzusetzen, machte dann in der Renaissance Schule und erreichte im Barock seinen Höhepunkt. So kann man den Barockgarten mit seinen Laubengängen und Bosketten insgesamt als einen „Palast aus Pflanzen“ bezeichnen, in dem an jeder Ecke „in Laub gehauene“ architektonische Zitaten zu finden sind: Aus einer Baumreihe wird eine Arkade, eine Hecke erhält Pfeilvorsprünge, zur Bekrönung Kugeln, Voluten, ja richtige Skulpturen, Fenster, Türen usw. Das Boskett besteht aus Sälen, Kabinetten und Galerien aus Heckenwänden. (Wimmer 1987, S. 62); Abbildung 10 rechts) Der Laubengag wurde bereits in der Renaissance zu einem wichtigen Gestaltungselement, und insbesondere im Werk des holländischen Architekten Vredeman die Vries zu dem wichtigsten Bauwerks des Gartens. In einer Vielzahl von Zeichnungen beschreibt er unterschiedliche räumliche Ausformungen, unter denen vor allem ein zweistöckig begehbarer, wahr-

[24] Gemeint ist der achte Teil das in 12 Teile gegliederten Buches „Liber ruralium commodorum“, das Crescenzi zwischen 1304 und 1309 verfasste.

scheinlich aus Hainbuchen gebildeter Laubengang hervorsticht, der jedoch vermutlich ein Phantasieprodukt des Architekten war und nie zur Ausführung gelangte (Abbildung 10 links).

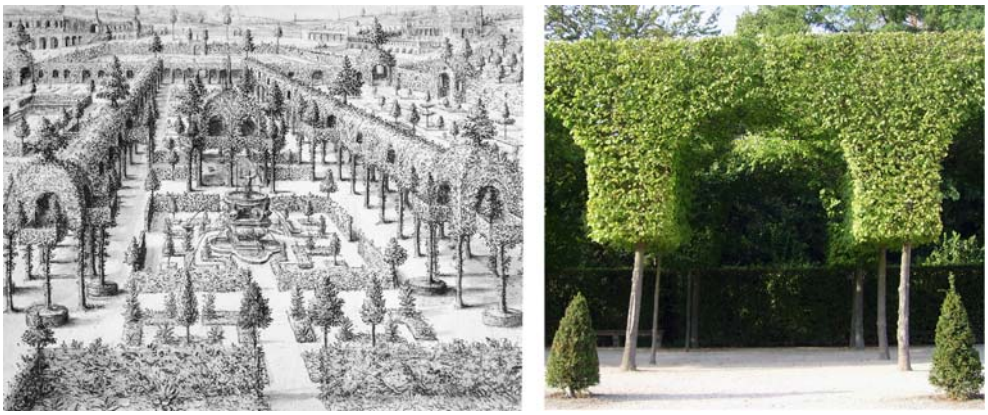


Abbildung 10 Links: Zeichnung eines zweigeschossigen Laubengangs von Vredeman de Vries, vermutlich aus Hainbuchen (Fitzwilliam Museum, University of Cambridge, UK / The Bridgeman Art Library). Rechts: Für den Barock typische Imitation steinerner Architektur durch Formschnitt im Schlossgarten Schwetzingen (Immanuel Giel/Wikipedia)

1.3.1.4 Tanzlinden

Mit den begehbaren Baumgeflechten im Lustgarten griff Crescenzi vermutlich die im Mittelalter weit verbreitete Tradition der geleiteten Linden auf, bei der ganze Bäume so in ihrem Wachstum beeinflusst wurden, dass begehbare Baumkronen-Räume beeindruckender Größe entstanden. Derartige Baumgebilde sind spätestens ab dem 12. Jahrhundert im deutschsprachigen Raum nachgewiesen und waren nicht selten in der ansonsten so gut wie baumlosen mittelalterlichen Stadt und auch in vielen kleineren Dörfern an prominenter Stelle zu finden. Sie nahmen im öffentlichen Leben der dörflichen bzw. städtischen Bevölkerung eine wichtige Stellung ein, da sie als Versammlungsort und Gerichtsstätte dienten und Mittelpunkt des Maitanzes waren, weshalb sie auch als „Tanzlinden“ bezeichnet werden.

Geleitete Linden entstanden in einem Jahrzehnte bis Jahrhunderte andauernden Prozess kontinuierlicher Pflege, bei dem die Äste junger Bäume mit Hilfe von Gestellen waagrecht geleitet und streng radial nach außen geführt wurden, sodass ein weit ausladendes, dichtes Laubdach entsteht.[25] Da die Äste durch diese Formgebung ihre Eigenschaft verlieren, sich selbst tragen zu können,[26] wurden sie durch Holzpfosten oder steinerne Pfeiler abgestützt. Bei manchen Bäumen ist die gesamte Krone als flacher, tellerförmiger Schirm ausgebildet, bei anderen sitzt ein Astkranz unten am Stamm, über dem die ungeformte Krone ansetzt. Vielfach zog man jedoch

---

[25] Ursprünglich sollte wohl durch das Biegen und Zurechtschneiden der Triebe neben der Verbesserung des Schattenwurfs insbesondere eine „Verschönerung des Baumes“ erreicht werden: „Das Beschneiden und Leiten der Äste wird als ein Akt liebevoller Zuwendung beschrieben, welcher die natürliche Schönheit des Baumes steigern und ihm Beachtung und Bewunderung sichern soll. Durch die künstliche Formgebung soll anscheinend alles Beliebige, Zufällige beseitigt werden, so dass am geleiteten Baum zeichenhaft der Typus, „die schöne Linde“, sichtbar wird.“ Aus symbolischen Gründen wurden daher oft exakt 7 oder 12 Äste waagrecht gezogen. (GRAEFE, R. 1987. Geleitete Linden. *Daidalos. Architektur, Kunst, Kultur,* 23: Baum und Architektur**,** 17-29. S.21f)

[26] Zunahme des Biegemoments durch weites, waagrechtes Auskragen

darüber noch einen weiteren waagrechten Astkranz oder sogar mehrere Astkränze mit stufenförmig nach oben abnehmendem Durchmesser. Zu einer Tanzlinde im engeren Wortsinn wurden diese Bäume dann, indem die unterste Lage der Äste mit Brettern belegt und so zu einem Tanzboden ausgebaut wurde. Der nächsthöhere Astkranz bildete dann das Dach dieses Baumkronen-Raumes, und der Austrieb der unteren Äste wurde oft genutzt, um Wände zu formen. (Graefe, 1987)

Abbildung 11 Tanzlinde Peesten. Links: Historischer Zustand mit kubisch geschnittener Baumkrone, wie er bis 1947 bestand. Rechts: Aktueller Zustand nach Neupflanzung des Baumes in den 1950er Jahren und Rekonstruktion der Holzkonstruktion 2001. (Deutsches Tanzlindenmuseum Limmersdorf)

Im 15. und 16. Jahrhundert waren geleitete Linden mit begehbaren Plattformen unter anderem auch bei Schützengesellschaften in der Schweiz beliebt. So soll auf dem Petersplatz in Basel ein solches Linden-Bauwerk gestanden haben, das direkt aus dem ersten Stock der Schützenwirtschaft über einen schmalen Steg betreten werden konnte (Becker, 1987). Noch heute kann in dem oberfränkischen Dorf Peesten eine Tanzlinde besichtigt werden, die 1858 wie folgt beschrieben wurde:[27] „Auf den weithin ausgebreiteten Ästen befindet sich ein 87 m² großer Baumsaal, zu dem man auf einer 22 Stufen zählenden steinernen Wendeltreppe mit eisernem Geländer hinaufsteigt. Der Boden dieses Lindensaales ist mit Dielen von Eichenholz belegt und die Umfassungswände sind ebenfalls aus grün gestrichenem Eichenholz, an welchem sich die Äste des Baumes hinziehen und eine dichte Laubwand bilden. In den Baumsaal führt eine breite Tür. Aus 11 Fensteröffnungen, von denen jede 90 cm breit und 120 cm hoch ist, genießt man eine freie Aussicht in die sehr anmutige Umgebung und das Maintal.“ (Förderkreis Tanzlinde Peesten, 2003)

1.3.1.5 Spalierobst und Baumskulpturen (Arborsculpture)

In der barocken Gartenkunst werden nicht nur die raumbildenden Möglichkeiten flächig geschnittener Gehölze, sondern auch die ästhetischen Eigenschaften von Obstspalieren geschätzt. Einer der wichtigsten Vordenker landwirtschaftlicher und gärtnerischer Techniken dieser Zeit, Olivier de Serres, drückte seine Begeisterung für diese Form des Baumschnitts folgendermaßen aus: „Diese Anordnung gefällt auch, weil sich die Bäume sehr Mauern und Abgrenzungen an-

[27] Bis auf die steinerne Erschließungstreppe handelt es sich bei dem heutigen Bauwerk um eine Rekonstruktion und der heute vorhandene Baum ist weit weniger kunstvoll „geleitet“ als der ursprünglich vorhandene. Dennoch ist das Bauwerk auch heute bekanntes Wahrzeichen des Ortes und in ihrer streng kubischen Form einzigartig in Europa.

passen, sie mögen gerade, gebogen oder sonst, wie man wünscht, geformt sein, und weil sie einen heiteren und ausdauernden Teppich hervorbringen, der im Frühjahr mit Blüten, im Sommer und Herbst mit Früchten und Laub geziert ist. Selbst im Winter sind diese Bäume nicht bar der Schönheit, wenn ihr nacktes, kunstvoll verschlungenes Geäst seine große Anmut zeigt.“ (zit. nach Wimmer 1989, S. 150f.) Derartige, nach geometrischen Ordnungsprinzipien geformte Pflanzen entsprachen offenbar dem neuzeitlichen, mathematisch-geometrischen Erkenntnisideal, weshalb die „geometrische Kunstkronenbehandlung“ (Köhler et al. 1993,S. 144) nicht zufällig in dieser Zeit ihren Höhepunkt hatte.

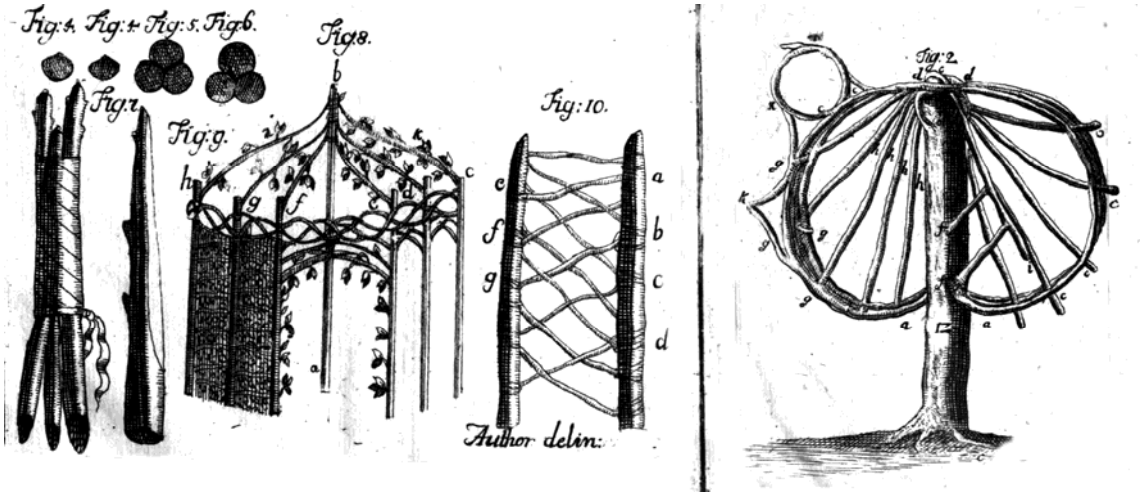


Abbildung 12 Ideen zu lebenden Bauwerken von Friedrich Küffner. Links: Pfropftechniken und Anleitungen zum Bau einer Laube aus Obstbäumen. Rechts: Lebende Sonnenuhr, aus einem einzigen Baum gepfropft, die „in sich selbst die Stunde zeigen“ sollte. (Küffner, 1716, Bildanhang)

In diesem Zusammenhang sind auch die Arbeiten des Pfarrers und Obstliebhabers Friedrich Küffner zu erwähnen, der 1716 das Buch „Neu-Erfundene Bau-Kunst zu Lebendigen Baum-Gebäuden“ veröffentlichte. Im ersten der insgesamt 8 geplanten Bände stellt er detailliert dar, wie mithilfe komplizierter Pfropftechniken gitterartig verwachsene Spalierstrukturen oder auch fruchttragende Gartenlauben mit vielfältigen, gewachsenen Verzierungen gebildet werden können (vgl. Abbildung 12 links). Der zweite Band trägt dann den etwas kryptischen Titel „Derer lebendigen Baum-Gebäuden durch das Pfropfen in die Quere zu lebendig und fruchtbaren Sonnen-Zeigern“. Mit dem „Pfropfen in die Quere“ bezeichnet er ein Verfahren, bei dem die Äste eines Baumes so mit dem Stamm eines anderen verbunden werden, dass sie mit diesem Verwachsen. Unter den „lebendigen Sonnenzeigern“ muss man sich im einfachsten Fall eine Sonnenuhr vorstellen, bei der der schattengebende Stab durch einen geformten Obstbaum gebildet wird und die Ziffern beispielsweise als beschnittene Buchshecken in den Boden gepflanzt sind. Kompliziert und gärtnerisch äußerst anspruchsvoll wird es dann jedoch bei solchen Sonnenuhren „die in einem einigen Baum bestehen und in sich selbst die Stunde zeigen“. Bei diesen Gebilden werden die Äste eines Obstbaums halbkreisförmig nach unten gebogen und derart wieder in den Stamm eingepfropft, dass je nach Sonnenstand immer andere Astbögen vom Hauptstamm beschattet werden (Küffner 1716, S. 150ff; Abbildung 12 rechts). Neben den Sonnenuhren widmet sich Küffner in diesem Band auch ausführlich den „gepfropften Bänken, Stühlen und Tischen“ und kann damit auch als einer der ersten Vertreter der „Arborsculpture“ angesehen werden (s. u.). Er zieht diese gepfropften Möbel den seit dem Mittelalter bekannten Rasenbänken allein deshalb vor, weil sie „kurioser“ seien als diese und weil man bisher „wenig kunstmäßiges davon gesehen“ hätte (ebd. S. 184). Durchaus kurios erscheinen auch die Titel der nie

erschienen Bände 3 bis 8, die erklären, warum der gärtnerisch tätige Pfarrer bereits zu Lebzeiten belächelt und durchaus auch heftig kritisiert worden war.[28] So sollten in Band 4 beispielsweise „Wasser-spritzende Bäume und Wasserwerke“ und in Band 5 gar der „Festungs-Bau mit lebenden Bäumen“ abgehandelt werden.

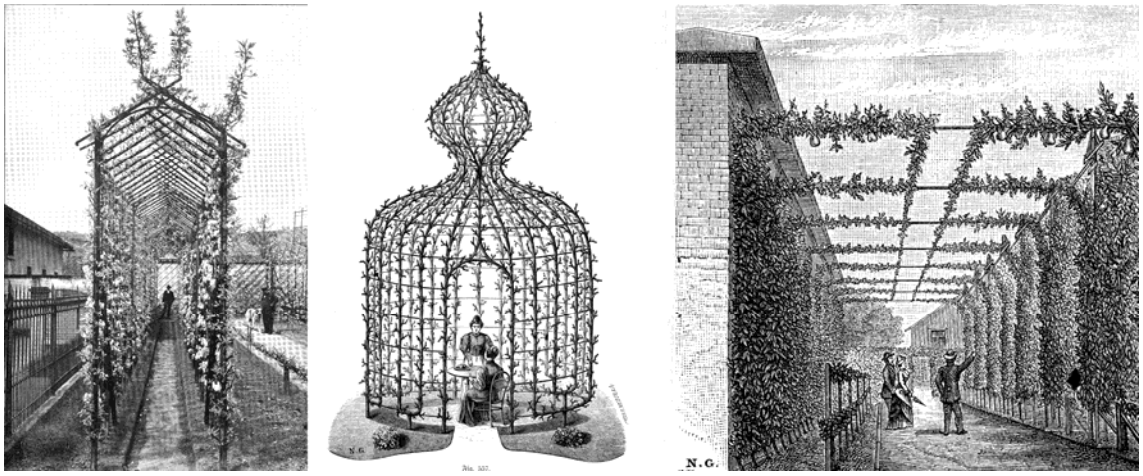


Abbildung 13 Lebende Bauten aus Obstbäumen von Nicolas Gaucher. Links: Spalier-Laubengang mit Apfelbäumen in einem Demonstrationsgarten in Stuttgart-Nord. Mitte: Zeichnung für eine runde Gartenlaube. Rechts: Darstellung einer laubengangartigen Struktur an einer gemauerten Wand. (v.l.n.r.: Gaucher 1908, Bildanhang; Gaucher 1908, S. 835 und 426)

Geformte und an Spalieren gezogene Obstbäume gerieten nach dem Barock – genauso wie alle anderen Formen des Baumschnitts – im Englischen Landschaftsgarten aus der Mode, erlebten jedoch gegen Ende des 19. Jahrhunderts eine Renaissance. Als wichtige Protagonisten können hier die insbesondere in Süddeutschland tätigen Pomologen Eduard Lucas[29] und Nicolas Gaucher genannt werden. Gaucher war von Wilhem II von Württemberg dazu beauftragt worden, Grundlagen des Obstbaus zu erarbeiten und diese Landesweit zu propagieren, nachdem zuvor ein Großteil der Wein- und Obstpflanzungen einem extremen Winter zum Opfer gefallen waren. Dazu betrieb der französischstämmige Gärtner im Raum Stuttgart ausgedehnte Baumschulen und Versuchsgärten und entwickelte dabei nicht nur an der Steigerung des Fruchtertrags, sondern auch an der artifiziellen Formung der Bäume ein ausgeprägtes Interesse. Höhepunkt dieser Aktivitäten war die Präsentation eines Formobstgartens auf der Pariser Weltausstellung 1900, auf der neben den obligatorischen Fächerpalmetten, U-Formen, Pyramiden, Kesseln und Vasen,

---

[28] Beispielsweise warf ihm der Botaniker und Physiker Georg Andreas Agricola, Autor eines seinerzeit sehr einflussreichen Buches über das Veredeln und Vermehren von Pflanzen, unter anderem vor, dass seine Zeichnungen meist keine tatsächlich realisierten Projekte wiedergeben würden, sondern seiner Phantasie entsprungen wären. Auch wären die gepfropften Sonnenuhren zu nichts zu gebrauchen. (AGRICOLA, G. A. & KÜFFNER, F. A. 1718. *Gründliche Wiederlegung An statt der Duplic, Betreffend Die boßhafftige Wieder-Antwort Des Tit. Herrn Friedrich Küffners, Pfarrers zu Lichtenberg, Sammt einer nachdrücklichen Vermahnung,* Regensburg.) Diese Kritik leuchtet unmittelbar ein, wenn man sich vor Augen hält, dass diese „Uhren“ tatsächlich unter dem Manko litten, dass der Laubaustrieb im Sommer jeglichen präzisen Schattenwurf zunichtemachte und Küffner daher empfahl, das Laub regelmäßig zu entfernen.

[29] Lucas gründete 1859/60 in Reutlingen eine private Lehranstalt für Gartenbau, Obstkultur und Pomologie, er war Geschäftsführer des von ihm gegründeten Deutschen Pomologenvereins und veröffentlichte u. a. das Lehrbuch „Lucas Anleitung zum Obstbau“, das noch heute aufgelegt wird und als Standardwerk gilt.

die bis heute das Baumschulangebot prägen, auch der aus Obstbäumen gepfropfte Schriftzug „WILHELM II“ zu bewundern war. In seinem eigenen Garten in Stuttgart präsentierte Gaucher sogar ganze Pavillons und Gartenlauben – komplett aus fruchtragenden Obstbäumen gebildet (Abbildung 13).[30] Einige dieser Gebilde lassen, ähnlich wie bei Friedrich Küffner, ein ausgeprägtes Vergnügen des Gärtners erkennen, den Bäumen möglichst skurrile und dem natürlichen Wachstumsmuster wiedersprechende Wuchsformen aufzuzwingen.

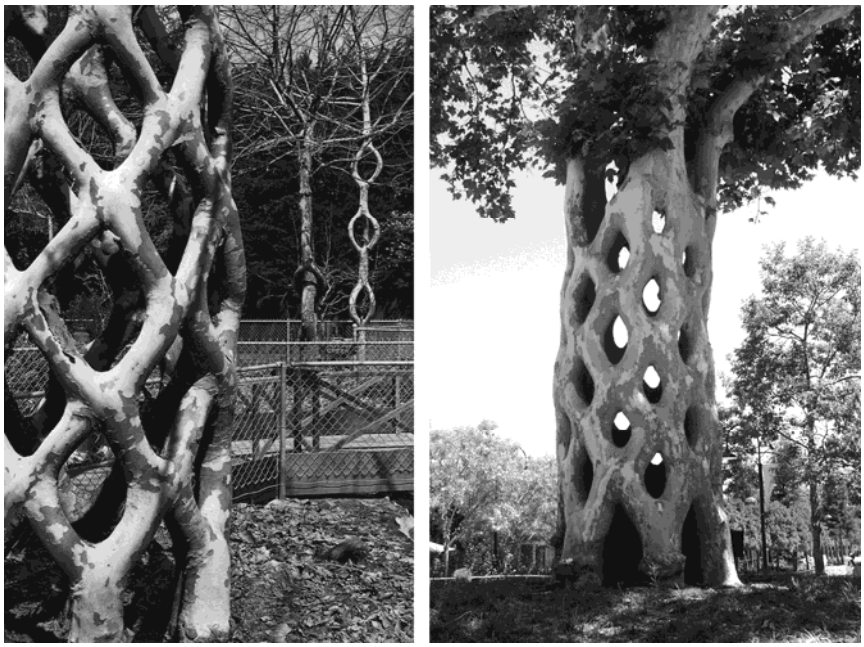


Abbildung 14 Der „Baskettree“ war und ist eine der populärsten Baumskulpturen des Tree Circus, der in den 1940er Jahren von Axel Erlandson angelegt wurde. Links: Zustand 1967; im Hintergrund sind weitere Baumskulpturen erkennbar. Rechts: Zustand im Jahr2004, nach Umpflanzung in den Erlebnispark Bonfant Gardens im Jahr 1984 (Reams 2005, S. 67f.)

Vermutlich ohne die europäischen Tradition des Spalier- und Formobstbaus überhaupt gekannt zu haben, entwickelte in den 1920er bis 40er Jahren der kalifornische Gärtner Axel Erlandsson seine eigene Art der Baummanipulation durch Schneiden, Formen und Verbinden von Trieben. Mit seiner Arbeit wollte er primär etwas Neues, noch nie Dagewesenes und vor allem Skurriles schaffen und eröffnete in den 40er Jahren unter dem Titel „Tree Circus“ eine Art Kuriositätenkabinett skurril geformter Bäume mit zeitweise mehr als 50 Baumskulpturen. Außer einem Eingangsportal und einer turmartigen Struktur weisen die Gebilde in der Regel keine Architekturbezüge auf und erinnern auch nicht an traditionelle Formen des Spalierobstbaus. Erlandson bildete statt dessen meist einfache Formen wie Ringe, Knoten und Herzen nach oder entwickelte eigene, teils recht komplexe Formen. Wie historische Aufnahmen belegen, gelang es ihm dabei in den meisten Fällen, die Bäume sehr präzise nach seinen Vorstellungen zu formen und an definierten Stellen verwachsen zu lassen, ohne dass deren Vitalität darunter litt. Dabei arbeitete der Farmer, der weder eine gärtnerische Ausbildung noch ein Botanikstudium absolviert hatte, mit einfachsten Mitteln. Dennoch schuf er Baumgebilde, die trotz jahrelanger Verwilderung und mehrmaligen Umpflanzen noch heute in ihrer Grundstruktur erhalten sind und vital weiterwachsen (Reams 2005, S. 54 ff; Abbildung 14).Seine Fähigkeiten und Kenntnisse brachten Erlandson

[30] Von diesen Baum-Bauwerken sind heute keine Spuren mehr zu finden, gleichwohl zeugt die „Gaucherstraße“ in Stuttgart Nord nach wie vor vom einstigen Renommee des Pomologen.

viel Beachtung und Bewunderung ein, seine Techniken und Überlegungen zur Formung der Pflanzen hütete er jedoch wie ein Geheimnis und blockte alle Nachfragen mit dem lapidaren Satz ab, dass er „mit den Bäumen rede.“[31]

Trotz (oder vielleicht auch gerade wegen) der Geheimniskrämerei, die Erlandson um seine Kunst machte, ist heute schon fast eine Art Fangemeinde entstanden, die den kalifornischen Farmer zu ihrem Idol erklärt hat und ihm mit großer Begeisterung nacheifert. Als Protagonist ist hier insbesondere der Amerikaner Richard Reams zu nennen, der nicht nur eine Vielzahl eigener Baumskulturen angelegt hat, sondern mit dem Buch „Arborsculpture – Solutions for a small Planet“ einen Versuch unternahm, die auf allen Kontinenten tätigen „Baumplastiker“ zu Wort kommen zu lassen. Diese sehen in ihrer Arbeit häufig nicht nur einen Ansatz skurrile Bäume zu formen, sondern bemühen sich darum, auch nutzbare Objekte wie z.B. Stühle etc. wachsen zu lassen, die teilweise auch „geerntet“ werden. Damit soll insbesondere der ökologische Vorteil erzielt werden, während der Produktion keine Energie zu verbrauchen, sondern CO_2 zu binden. Auch geht Reams davon aus, dass gewachsene Objekte eine höhere Wertschätzung erfahren würden und daher länger und pfleglicher genutzt würden. Mit diesem Anspruch kann die Arborsculpture auch den ökologisch motivierten Ansätzen zugeordnet werden, die in Abschnitt 1.3.3 detaillierter dargestellt werden.

1.3.1.6 Ingenieurbiologie

Von der bislang dargestellten gartenkünstlerischen Transformation der bäuerlichen Techniken des Schneidens, Formens und Verbindens ist der Ansatz der Ingenieurbiologie zu unterschieden, der auf den gleichen Ausgangstechniken aufbaut, jedoch von vorne herein ein baukonstruktiv-technisches Ziel verfolgt. Er knüpft daran an, dass bereits die traditionellen Hecken und Flechtzäune dazu genutzt wurden, landwirtschaftliche Flächen vor Erosion zu Schützen und z. B. die Ufer von Fließgewässern zu stabilisieren. Auch auf diese Art waren lebende Bauwerke seit jeher integraler Bestandteil der Kulturlandschaft, die schon immer mit einem Eingriff des Menschen in die Natur einherging. Als im Zuge der Industrialisierung mit dem Bau von Eisenbahnlinien und Wasserstraßen die Eingriffe in die Landschaft immer größer wurden, mussten auch neue Techniken zur Stabilisierung künstlich geschaffener und natürlicher Hänge, Ufer und Böschungen entwickelt werden, um eine reibungslose und sichere Nutzung der Infrastruktur zu gewährleisten. Lebende Bauwerke spielten dabei jedoch meist eine untergeordnete Rolle, da auf den Baustoffen Stahl und Beton basierende Bauweisen eine größere Leistungsfähigkeit und Schnelligkeit versprachen. Spätestens seit Mitte des 20. Jh. wurden dann jedoch negative Folgen dieser technischen, auf Versiegelung und rein mechanische Sicherung abzielende Form des Landschaftsbaus deutlich: Nicht trotz, sondern gerade wegen dieser Eingriffe nahmen Schäden durch Überflutungen, Hangrutsche usw. zu. Deshalb wurden bereits in den 1930er Jahren im Zusammenhang mit dem Autobahnbau in Deutschland alternative Ansätze entwickelt, bei denen Pflanzen ingenieurtechnisch genutzt wurden, um eine vegetative Stabilisierung z. B. von Böschungen zu erreichen. 1938 prägte Arthur von Kruedener den Begriff „Ingenieurbiologie“ und veröffentliche 1941 mit dem „Atlas der standortkennzeichnenden Pflanzen für Bauingenieure und Landeswirtschafter“ ein erstes Grundlagenwerk der von ihm begründeten Disziplin (Kruedener, 1941). Von Kruederer zielte bereits auf ein Ingenieurwesen ab, das neben technischen Sachverhalten auch biologische und ökologische Zusammenhänge berücksichtigt,[32] und

---

[31] Vgl. die Publikation seiner Tochter Wilma Erlandson: ERLANDSON, W. 2001. *My Father "Talked to Trees"*, W. Erlandson.

[32] Z. B. die positive Beeinflussung des Wasserkreislaufs durch Transpiration oder die Verbesserung des Mikroklimas.

war damit in vielen Aspekten seiner Zeit weit voraus. Heute ist die Ingenieurbiologie als Bauweise im Landschaftsbau normiert (DIN 18918) und wesentlich dadurch gekennzeichnet, dass handwerkliche Techniken, die traditionell auf Basis von Erfahrungswerten angewendet wurden, wissenschaftlich untersucht und bezüglich ihrer Wirkungsweise, ihrer Anwendungsmöglichkeiten, ihrer Herstellung und ihres Unterhalts systematisch weiterentwickelt werden. Laut der deutschen Gesellschaft für Ingenieurbiologie sollen ingenieurbiologische Bauweisen vergleichbaren Bauweisen mit nicht-lebenden Baustoffen häufig überlegen sein. Bereits Kruedener hob hervor, dass ingenieurbiologische Bauten in der Lage wären, kleine Beschädigungen selbstständig auszugleichen oder zu beseitigen, indem sie über die Möglichkeit verfügen, sich selbstständig veränderten Bedingungen bis zu einem gewissen Grad anzupassen. Anders als technische Bauten, die nach ihrer Fertigstellung der Verwitterung und dem Zerfall ausgesetzt sind, sollen ingenieurbiologisch angelegte Strukturen im Laufe ihrer Entwicklung eine zunehmende Stabilität erlangen, „sie bauen selbst weiter“ (Kruedener 1951, S. 10).

Im Kontext pflanzlicher Architektur aus Bäumen sind insbesondere solche ingenieurbiologischen Verfahren von Interesse, bei denen die Wurzeln und Triebe von Holzpflanzen konstruktiv genutzt werden. Typische Konstruktionselemente bzw. Bauweisen sind hier Faschinen und Spreitlagen. Faschinen bestehen in der Regel aus abgeschnittenen Ästen, aus denen mithilfe von Schnüren oder Drahtgittern mehrere Dezimeter dicke Bündel gebildet werden. Diese werden horizontal liegend im Boden eingebaut bzw. teilweise auch in mehreren Lagen übereinander angeordnet, um z. B. eine Stützwand zu bilden (Abbildung 15 rechts). Bei Spreitlagen werden abgeschnittene Äste parallel oder gitterartig gekreuzt auf dem Boden ausgelegt und mit diesem z. B. mit Hilfe von Holzpflöcken „vernagelt“ (Abbildung 15 links und Mitte). In beiden Fällen kommen meist Weidenruten zum Einsatz, die sich durch Adventivwurzelbildung über die gesamte Länge im Boden verwurzeln, wodurch ein dauerhaft stabiler Verbund entsteht (vgl. Abschnitt 1.1.1). Ein Forschungsfeld der Ingenieurbiologie ist die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften (insb. Elastizität und Biegesteifigkeit) pflanzlicher Triebe, da diese u.a. die Fließgeschwindigkeit von Flüssen bei einem lebenden Uferverbau entscheidend beeinflussen. Ebenso wird erforscht, welchen Auszugswiderstand unterschiedliche Gehölze haben und wie die Scherfestigkeit eines Bodens durch die Durchwurzelung beeinflusst wird (Florineth 2004, S. 19ff.)

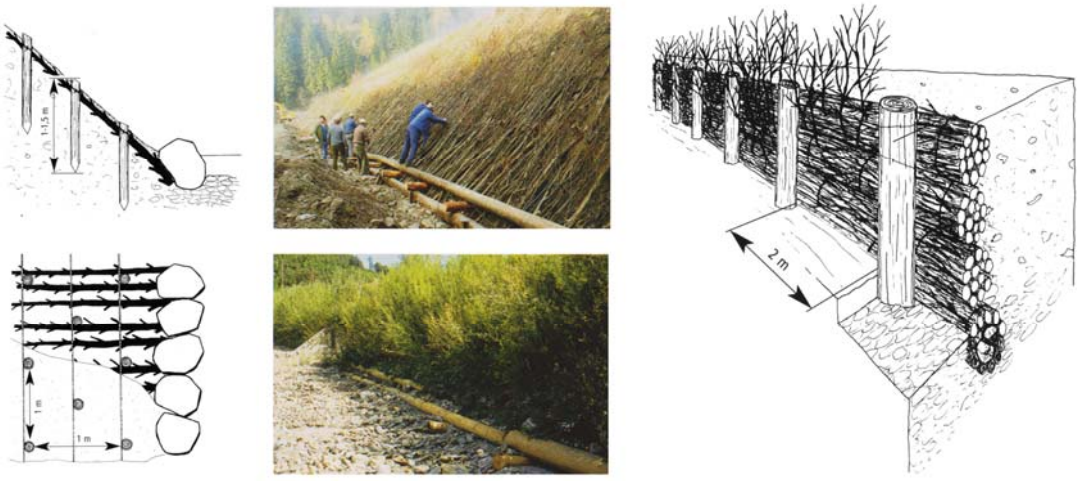


Abbildung 15 Links: Beispiel einer Spreitlage (Schemazeichnung). Mitte: Eine vergleichbare Spreitlage beim Einbau (oben) und nach 2 Jahren (unten). Rechts: Beispiel einer aus Faschinen gebildeten Stützwand. (Florineth 2004, S. 133,134,137)

1.3.1.7 Arthur Wiechulas lebende Holzhäuser

Den Anspruch der Ingenieurbiologie, technische Bauwerke durch solche aus lebenden Pflanzen zu ersetzen, verfolgte Anfang des 20.Jh. auch der Gärtner Arthur Wiechula – allerdings wollte er nicht „nur" bauliche Anlagen zur Sicherung von Hängen, Böschungen und Ufern realisieren, sondern arbeitete an der Vision, komplette Wohn- und Wirtschaftsgebäude wachsen zu lassen. In seinem ca. 1925[33] veröffentlichten Buch „Lebende Häuser aus wachsenden Bäumen entstehend" beschreibt er sein „Naturbauverfahren" wie folgt: „Hier handelt es sich nicht darum, Gebäude aus Laubwerk zu bilden, sondern das Holz selbst in solche Formen hineinwachsen zu lassen, in denen es geschlossene Bauwerke darstellt, Bauwerke, die mit festen Wänden, Türen und Fenstern versehen sind, und die man, wie jedes andere Haus, zu Wirtschaftszwecken jeglicher Art benutzen kann, ohne befürchten zu müssen, dass Schnee und Regen, Wind und Kälte, bzw. Wärme eindringen können." (Wiechula 1925, S. 39)

Um dies zu erreichen, versuchte er, Bäume in engem Abstand zu pflanzen, gitterartig anzuordnen und an den Kreuzungspunkten miteinander zu verbinden, wobei er dazu spezielle gärtnerische Techniken, Verfahren und Werkzeuge entwickelte, die er großteils auch patentieren ließ (vgl. Abschnitt 3.1.3.2; Abbildung 58 links). Im Laufe der Zeit sollten die Pflanzen an diesen Knotenpunkten – genauso wie bei den bereits beschriebenen Gitterzäunen – verwachsen, anschließend jedoch durch ihr Dickenwachstum allmählich zu einer geschlossenen, mit Rinde bekleideten Holzfläche verschmelzen, sodass nicht nur Wände, sondern auch Dachflächen und Geschossdecken entstehen (Abbildung 16).[34]

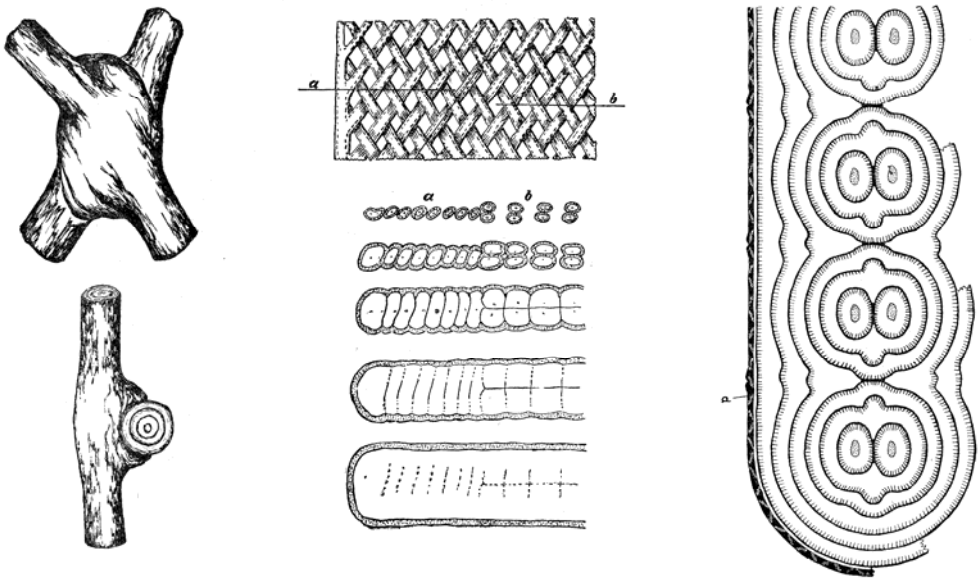


Abbildung 16 Links: Ansicht und Schnitt von kreuzweise verwachsenen Trieben, ohne Rinde. Mitte: Schematische Darstellung, wie die kreuzweise verbundenen Triebe zu einer geschlossenen Wand verwachsen sollen. Rechts: Detail-Querschnitt durch eine derartige Wand (Wiechula 1925, S. 60f; S. 69; S. 90)

[33] Undatierte Veröffentlichung im Selbstverlag; in den meisten Sekundärquellen wird das Jahr 1925 angegeben.

[34] Um Öffnungen zu erzeugen, sollten einfach größere Maschen gebildet werden, in die frühzeitig Rahmen für Fenster oder Türen eingesetzt werden, die dann ebenfalls einwachsen sollten.

Dank seiner „Erfindungen“ sah sich Wiechula förmlich in einem Wunderland, in dem „Bauwerke aller Art wie Bäume aus der Erde wachsen, Bauwerke in Form und Größe, wie der Besitzer sie zu haben wünscht, und an Stellen, an denen sie der Wirtschaft am besten zugutekommen.“ Er war von seinem Ansatz ausgesprochen überzeugt und hielt ihn für praktisch und ökonomisch sinnvoll, ermögliche er es doch, den „Umweg Bäume zu pflanzen, zu fällen, in Bretter zu sägen und wieder zusammenzufügen“ abzukürzen, da ja das Holz von Anfang an die richtige Form aufweisen würde. Und auch während der Benutzung überwogen für ihn die Vorteile gegenüber konventionellen Bauweisen, ging er doch davon aus, dass es sich bei seinen Bauten „um Bauwerke handelt, die bei sehr hohem Lebensalter gleichzeitig wenig Kosten verursacht haben und dabei durch dauernde Holzerzeugung noch Werte schaffen.“ (ebd., S. 40) Den einzigen Nachteil sah er überraschenderweise in der Ästhetik seiner Bauten, die seiner Einschätzung nach eine Wohnnutzung nur dann ermöglichen, wenn die Innenseiten der Wände mit Holz oder Gips verkleidet würden, „um der Wohnungseinrichtung den gewohnten Hintergrund zu geben, und das Auge des Kulturmenschen nicht zu beleidigen, was durch die natürlichen , mit lebender Rinde überzogenen Wände in den meisten Fällen geschehen würde.“ (ebd., S. 179) Neben Wohngebäuden schlug er seine Bauweise – wenig überraschend – für Gartenhäuser, aber auch für Bahnsteigüberdachungen oder landwirtschaftliche Nutzgebäude vor (Abbildung 17).

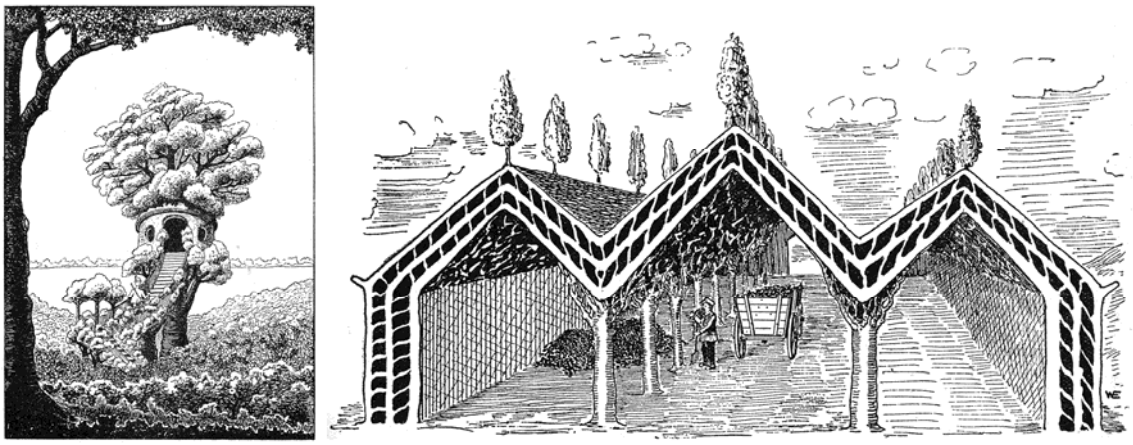


Abbildung 17 Beispiele der von Wiechula angedachten lebenden Bauten. Links: „Ein Hochstand im Jagdgebiet, mit einer bequemen, gewachsenen Treppe.“ Rechts: Ein Wirtschaftsgebäude, bei dem die lebende Holzwand zur besseren Wärmedämmung dreischalig ausgeführt werden sollte. (Wiechula 1925, S. 190; S. 226)

Betrachtet man diesen Anspruch vor dem Hintergrund der bislang vorgestellten Beispiele, so kommen natürlich Zweifel auf, warum nach dem Prinzip der Flechthecken gebildete Strukturen plötzlich zu geschlossenen Wänden verwachsen sollen[35] und warum diese Strukturen, die sowohl bei Gärtnern als auch bei Bauern immer als besonders arbeitsintensiv galten, nun plötzlich arbeitsökonomische Vorteile aufweisen sollen.[36] Nicht verwunderlich ist deshalb, dass bereits das Erscheinen des Buches „Lebende Häuser aus wachsenden Bäumen entstehend“ in den

[35] Wiechula begründet dies damit, dass seine „Hecken“ nicht geschnitten werden sollten – allerdings müssten dann alle nicht mehr gepflegten Hecken zu geschlossenen Holzwänden verwachsen, anstatt zu Baumhecken zu verwildern (was sie tatsächlich tun)

[36] Vgl. hierzu auch die Kritik in: BECKER, H. 1987. Architektur aus gezogenen Bäumen: Wiechulas "Lebende Häuser". *Daidalos. Architektur, Kunst, Kultur,* 23: Baum und Architektur / Tree and Architecture**,** 70-81.

1920er Jahren, in dem Wiechula seine Ideen mit phantasievollen Zeichnungen illustrierte, aber nicht z. B. mit Fotos belegte, kontroverse Reaktionen auslöste. So wurde der Ansatz zwar einerseits als visionär und zukunftsweisend gefeiert, andererseits traten aber auch Kritiker auf den Plan. Dies vor allem deshalb, weil Wiechula selbst bei einfachen Projekten, wie z. B. der Pflanzung eines gitterartigen Schneeschutzzaunes für die Deutsche Reichsbahn, seine Versprechen offensichtlich nicht einlösen konnte. Er selbst betonte zwar immer, dass sich sein Verfahren in der Praxis bewährt hätte und verweist auf eine Vielzahl erfolgreich realisierter Projekte.[37] An anderer Stelle wird dies aber in Zweifel gezogen: „In seinen Werbungen bringt Wiechula heute noch zeichnerische Darstellungen von lebenden Häusern und lebenden Wänden wie vor vielen Jahren, obgleich er noch keine solchen Gebilde heranzuziehen vermocht hat. An Aufträgen hat es nicht gefehlt. Man muss aber die Leute selber hören, was ihnen für das hergegebene Geld geworden ist!“[38] Diese kritische Darstellung deckt sich mit der Tatsache, dass Wiechula mit seinem ökonomisch begründeten Ansatz wirtschaftlich recht bald scheiterte und die von ihm gegründete Naturbaugesellschaft bereits 1929 Konkurs anmelden musste. Sein Ansatz geriet dann in den folgenden Jahren und Jahrzehnten auch mehr und mehr in Vergessenheit, wobei jedoch einige seiner Patente zur Verbindung von Pflanzen noch eine Zeit von einer Baumschule für die Herstellung von Flechthecken genutzt wurden.

Wiechula, der offensichtlich mehr von seiner Phantasie als von funktionalen Argumenten geleitet war, kann man daher wohl nicht als den rational argumentierenden und handelnden Naturbauingenieur ernst nehmen, für den er sich selbst hielt. Seine phantastischen Zeichnungen wurden jedoch zu Ikonen der Pflanzenarchitektur, obwohl (oder gerade weil?) sie ungebaute Architekturvisionen blieben und aller Wahrscheinlichkeit nach auch nie realisiert werden können, da sie den Gesetzen der Botanik fundamental widersprechen (vgl. Abschnitte 1.4.1 und 4.2). Sie wurden und werden jedoch nicht nur immer wieder als skurrile Auswüchse gärtnerischer Techniken zitiert, sondern standen auch Pate für architektonische Ansätze wie z. B. die Naturbauten des Waldgartendorfs von Konstantin Kirsch (vgl. Abschnitt 1.3.3.4) und inspirierten den Architekten Mitchell Joachim am MIT zu seinem Gedankenexperiment „Fab Tree Hab“ (vgl. Abschnitt 1.3.3.4)

1.3.2 Bepflanzte und bewachsene Bauten

Die oben dargestellten, auf den Techniken des Schneidens, Formens und Verbindens basierenden Pflanzenarchitekturen bzw. Bauweisen mit lebenden Pflanzen sind dadurch gekennzeichnet, dass lebende Bauwerke durch eine Manipulation des Pflanzenwachstums gebildet werden. Demgegenüber zeichnen sich bepflanzte und bewachsene Bauten in erster Linie dadurch aus, dass das Wachstum von Pflanzen an bzw. auf Bauwerken ermöglicht wird, indem die dazu notwendigen Bedingungen und Strukturen geschaffen werden. Eine Manipulation des Wachstums kann zwar zusätzlich stattfinden, ist aber nicht Voraussetzung zum Zustandekommen dieser Form von Pflanzenarchitektur. Bei **bepflanzten** Bauten werden die Pflanzen insgesamt, d. h. mitsamt der Wurzeln von einem (technischen) Bauwerk getragen, während bei den **bewachsenen** Bauten nur die oberirdischen Teile von baulichen Strukturen gestützt werden. Demensprechend fallen in die Kategorie der bepflanzten Bauten hauptsächlich die Dachgärten und Hän-

---

[37] Beweise dafür, oder auch nur Reste von Bauwerken wurden jedoch nie gefunden. Lediglich Strukturen im Entwicklungsstand einer Flechthecke konnten dokumentiert werden. Vgl. hierzu KIRSCH, K. 1996. *Naturbauten aus lebenden Gehölzen,* Xanten, Organischer Landbau-Verl. Lau.

[38] Leserbrief in der „Schlesisch-ländlichen Genossenschaftszeitung“ von A. Woll am 19.02.1930, zit. nach Ibid., S. 33

genden Gärten,[39] während bei den bewachsenen Bauten im Wesentlichen Lauben und Pergolen sowie durch Kletterpflanzen begrünte Fassenden zu nennen sind.

Die mit Kletterpflanzen bewachsenen Bauwerke sollen hier nur am Rande erwähnt werden, da die verwendeten Techniken und Konstruktionen sehr spezifisch auf die Bedürfnisse rankender und schlingender Pflanzen ausgerichtet sind und daher im Kontext der vorliegenden Arbeit (Architektur mit baumartig wachsenden Gehölzen) von geringerem Interesse sind. Prinzipiell lässt sich jedoch festhalten, dass auch diese Form der Pflanzenarchitektur auf einen bäuerlichen Ursprung zurückgeführt werden kann. So wurde beispielsweise in Ägypten bereits 4000 v. Chr. Wein auf Rankgerüsten kultiviert, und fast genauso alt sind dann auch erste Darstellungen, bei denen Weinreben zu Girlanden geflochten wurden, um eine Art Laubendach zu schaffen. Derartige Weinlauben, die dann häufig über aufwändig gestaltete steinerne Säulen verfügten, wurden zum Mittelpunkt der Gartenanlagen und waren ein schattiger Zufluchtsort, in dem man die süßen Trauben direkt ernten und genießen konnte. Mit Rosen und Wein bewachsene Laubengänge, Mauern, und Rankwände finden sich dann nicht nur in den Gärten des alten Rom, sondern auch in den Kloster- und Burggärten des Mittelalters. Nachdem als bewachsene Strukturen ausgebildete Laubengänge im Barock großteils durch solche aus geschnittenen und geformten Bäumen verdrängt worden waren, erlebten Kletterpflanzen jedoch gleichzeitig durch die Einfuhr exotischer Sorten aus den Kolonien ab dem späten 17. Jh. eine Blütezeit und wurden im 19. Jh. zunehmend auch als Gestaltungselement an Häusern eingesetzt. (vgl. Bauch-Troschke 1998, S. 11f.)

1.3.2.1 Historische Dachgärten / Hängende Gärten

Dachgärten und Hängende Gärten sind bereits aus den frühen städtischen Hochkulturen bekannt, wobei damals wie heute die in Städten knappe Grundfläche und der Wunsch nach einem Garten in unmittelbarer Nähe und auf gleicher Ebene mit einem Wohnraum in einem Obergeschoss als Gründe für ihre Anlage angeführt wurden (vgl. Ahrendt 2007, S. 10f.). Der Typus des Hängenden Gartens[40] soll auf die Gärten von Babylon zurückgehen, die als eines der sieben Weltwunder der Antike bekannt sind und der Legende nach von Nebukadnezar II. (ca. 605 bis 562 v. Chr.) für seine Frau Amyitis gebaut wurden. Den gängigen Ansichten zufolge ähnelte diese Anlage mit ihren übereinanderliegenden Terrassen den ansteigenden Rängen eines Theaters, wobei die Stufen erheblich höher gewesen sein sollen. Gebildet wurden diese Stufen aus Gewölben, die mit einer derart mächtigen Erdschicht bedeckt worden waren, dass selbst die Wurzeln großer Bäume darin reichlich Platz finden konnten. (Pieper 1987, S. 101; Abbildung 18 links) Die Tradition der hängenden Gärten bzw. Dachgärten fand dann auch in der römischen und griechischen Hochkultur relativ weite Verbreitung, geriet im Mittelalter in Europa jedoch so gut wie in Vergessenheit. Sie lebte erst mit der Renaissance wieder auf, nachdem Filarete mit

---

[39] Zu nennen ist darüber hinaus eine spontane bzw. nicht geplante Besiedlung von Bauwerken durch Pflanzen, die botanisch unter dem Begriff „Mauervegetation“ geführt wird (vgl. KÖHLER, M., BARTH, G. & BRANDWEIN, T. 1993. *Fassaden- und Dachbegrünung,* Stuttgart, Ulmer-Verlag., S. 16)

[40] Der Begriff des Hängenden Gartens wird hier synonym für größere, aufwändige Dachgärten verwendet. Vgl. hierzu die engere Begriffsdefinition in: PIEPER, J. 1987. Die Natur der hängenden Gärten. *Daidalos. Architektur, Kunst, Kultur,* 23: Baum und Architektur / Tree and Architecture**,** 94-109. S. 101: Man kann „von einem Hängenden Garten eigentlich erst dann sprechen, wenn Architektur und Garten gleichermaßen nebeneinander stehen, wenn Substruktion und Bepflanzung in annähernd gleichem Umfang und in vergleichbarer ästhetischer Wichtung zum Gesamtbild beitragen. Eine schlichte Dachterrasse, einen bloßen Altan mit Laubengängen oder einen Dachgarten mit Kleinpflanzen und Blumen wird man nicht als Hängenden Garten bezeichnen.“

seinen phantastischen Beschreibungen der Hängenden Gärten im Schloss des Königs Zagaglia insbesondere in Italien eine regelrechte Dachgarten-Mode ausgelöst hatte (vgl. Ahrendt, 2007)

Dass die tatsächlich realisierten Dachgärten der Renaissance immer deutlich kleiner ausfielen als der phantastische Entwurf Filaretes, kann unter anderem damit erklärt werden, dass das Bepflanzen von Bauwerken mit Bäumen und Sträuchern eine Reihe von technischen Herausforderungen mit sich bringt: Zuallererst muss die Konstruktion des bepflanzten Bauwerks in der Lage sein, die zusätzlichen Lasten zu tragen, die sich dadurch ergeben, dass für die Schaffung eines geeigneten Wurzelraums eine relativ große Menge Erde nötig ist. Diese Wurzelräume müssen des Weiteren so abgedichtet bzw. abgeschlossen werden, dass weder Wurzeln noch Feuchtigkeit in die Unterkonstruktion eindringen können. Zum dritten werden auch technische Einrichtungen benötigt, die eine Be- und Entwässerung des Wurzelraums sowie eine ausreichende Nährstoffversorgung sicherstellen. Da diese Voraussetzungen mit vormodernen Bautechniken nur mit einem enormen technischen und finanziellen Aufwand bewältigt werden können,[41] war ihre Anlage äußerst kostspielig und diente neben dem eigentlichen Nutzen oft der Demonstration von Reichtum und Macht – insbesondere auch von Macht über die Natur. So urteilte beispielsweise Seneca über die Dachgärten in Rom: „Die Bäume haben ihre Wurzeln in einer Höhe, in der ihre Wipfel sein sollten." (zit. nach Pieper, 1987) Die Faszination, ja Absurdität, dass Pflanzen an Orten in der Stadt wachsen, wo man sie zunächst nicht vermutet, ist ein Aspekt historischer Dachgärten, der heute in vergleichbarer Form bei den vertikalen Gärten zu beobachten ist. (vgl. Abschnitt 1.3.4.3)

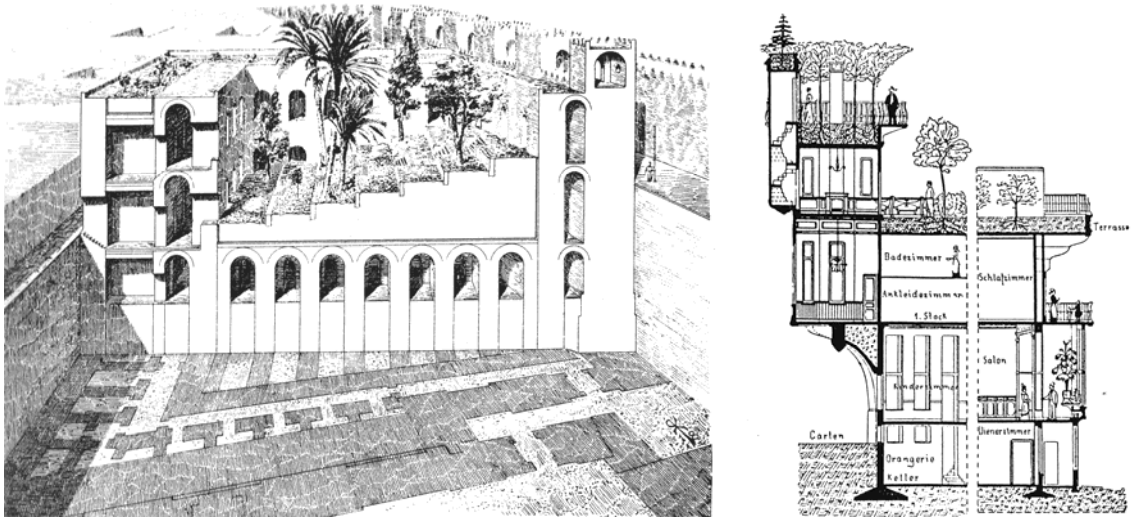


Abbildung 18 Links: Die Hängenden Gärten von Babylon nach einer Rekonstruktion von Robert Koldewey. Die benötigten Erdmassen wurden von massiven Gewölben getragen. (Heinrich 1984, S. 209) Rechts: Entwurf von Hennebique für ein Wohnhaus mit Dachgärten (1901): Die Dachlasten werden von einer vergleichsweise leichten Stahlbetonstruktur aufgenommen. (Polonyi und Brandt 2002, S. 16)

[41] Die meisten der hier beschriebenen Baumbepflanzungen wurden aus technischen Gründen nicht verwirklicht. Die Unterkonstruktionen wären extrem aufwändig gewesen und eine sichere Abdichtung war nur mit den sehr teuren Materialien Blei und Kupfer realisierbar. (vgl. AHRENDT, J. 2007. Historische Gründächer: Ihre Entwicklung bis zur Erfindung des Eisenbetons. (Dissertation) Teil I. Berlin: Technische Universität Berlin.

1.3.2.2 Dachgärten in der Moderne

Im Zuge der Industriellen Revolution ergaben sich für die Anlage von Dachgärten völlig neue Möglichkeiten, da ein großer Teil der oben beschriebenen technischen Probleme durch neue Bautechniken mit relativ geringerem Aufwand gelöst werden konnte. Zu nennen sind hier insbesondere das von dem Berlin Maurermeister Carl Rabitz entwickelte und mit Teer abgedichtete Holzzementdach, das das Problem der Dichtigkeit weitestgehend löste und die Erfindung des Eisenbetons durch Joseph Moniers, der hoch belastbare Konstruktionen ermöglichte, die problemlos in der Lage waren, die Lasten eines Dachgartens aufzunehmen. Der erste, der dieses Potential systematisch nutzte, war der Bauunternehmer Hennebique, der auf allen Balkonen und Dachflächen seines Pariser Wohnhauses Bäume in meterdicke Erdaufschüttungen pflanzte (vgl. Ahrendt, 2007; Abbildung 18 rechts).

Mit den teils unter großen Bäumen stehenden, häufig aber auch bewachsenen und bepflanzten Bauten der „cité industrielle“ von Tony Garnier (vgl. z. B. Giedion 2000, S. 470) und mit den wegweisenden Entwürfen von Le Corbusier findet der Dachgarten seinen Platz in der modernen Architektur. Er wird von Le Corbusier in seinem Manifest *Die Fünf Punkte zu einer neuen Architektur* bereits an zweiter Stelle genannt und soll nicht nur „zum bevorzugtesten Aufenthaltsort des Hauses“ werden, sondern auch „für eine Stadt den Wiedergewinn ihrer ganzen bebauten Fläche“ bedeuten (Roth 1927, S. 6f). Bereits im Jahr 1922 hatte Corbusier den Entwurf eines mehrgeschossigen Villenblocks vorgelegt, bei dem jede Wohnung über eine „grünes Zimmer“ mit üppiger Bepflanzung verfügte (Abbildung 19 rechts). Und 1929 beschreibt er seine Idee, die Stadt Paris nach dem *Plan Voisin* neu zu erbauen und dabei alle Häuser mit Dachgärten auszustatten, folgendermaßen: „Drei aufeinanderfolgende Terrassen – Gärten der Semiramis und Straßen der Erholung – ziehen als entzückende Horizontale niedrig fliehender Linien zwischen den hohen vertikalen Kristallen dahin. …auf den Dachgärten der Wolkenkratzer (wirkliche Gärten, plattenbelegt, mit Spindelbäumen, mit Tuja, Lorbeer, Efeu, Tulpen und Geranium bepflanzt), breitet das elektrische Licht ruhige Freude aus. … In derselben Höhe von zweihundert Metern über dem Boden andere Dachgärten, weiter entfernt, ringsherum wie goldene Teller im Raume schwebend.“ (zit. nach: Ahrendt 2007, S. 133)

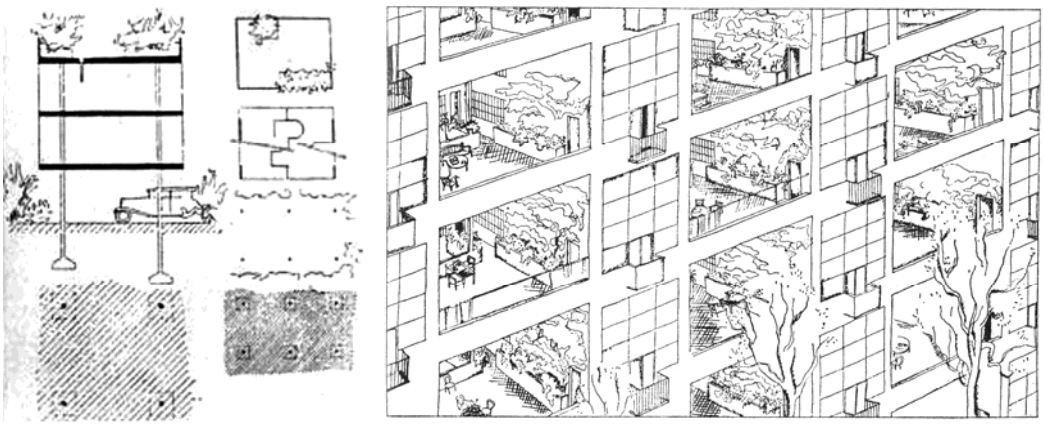


Abbildung 19 Zeichnungen von Le Corbusier. Links: Der Dachgarten als einer der wichtigsten Aspekte der „Fünf Punkte zu einer neuen Architektur“(Curtis 1987, S. 81). Rechts: Darstellung eines „Villen-Blocks“, bei dem jeder Wohnung ein in der Fassade angeordneter „Garten“ zugeordnet ist (Le Corbusier 1922, S. 185)

1.3.3 Pflanzenarchitektur der Ökologiebewegung

Als in den 1960er Jahren die ökologischen Schäden eines ungebremsten Wirtschaftswachstums und einer rasant fortschreitenden Industrialisierung immer deutlicher wurden, geriet auch die technikgläubige moderne Architektur verstärkt in die Kritik. Vor allem die in der Nachkriegszeit entstandenen, dem Credo der autogerechten Stadt folgenden Siedlungen wurden als unwirtliche Orte gemieden und der Wunsch nach einer Begrünung der als monoton und steril verschrienen Bauten wurde in der Bevölkerung immer lauter. Spätestens in den 1980er Jahren hatte sich die Umweltbewegung zu einer gesellschaftlich relevanten Größe entwickelt, in der auch neue, umweltgerechte Formen des Bauens entwickelt wurden. In diesem Kontext wurde die Architektur mit lebenden Pflanzen nicht als Gartenkunst und auch nicht aus architekturästhetischer Perspektive diskutiert, sondern vielmehr als eine Möglichkeit angesehen, eine Form des Bauens zu entwickeln, die ein harmonisches Miteinander von Mensch und Natur ermöglicht, ohne die Umwelt negativ zu beeinträchtigen. Dass diese Ideen durchaus Gehör fanden, belegt nicht nur die Titel-Geschichte des *Spiegel* vom 24. September 1984 („Bauen mit der Natur“, vgl. z. B. Abbildung 20 rechts), sondern auch eine Vielzahl weiterer Publikationen und umgesetzter Projekte, die auf unterschiedliche Weise an die oben beschriebenen historischen Vorläufer anknüpfen.

1.3.3.1 Biotektur

Als ein wichtiger Protagonist der alternativen Architekturbewegung ist der Architekt Rudolph Doernach zu nennen, der nicht nur lebende Bauwerke plante und baute, sondern auch an der Vision der „selbstversorgenden Pflanzenstadt Biopolis“ arbeitete. Im Zentrum dieser Stadt sollten mehrstöckige Pflanzenbauwerke stehen, die sowohl an Tanzlinden, als auch an die Stadtkronen-Entwürfe von Bruno Taut erinnern und als Marktplatz, Bürgertreff oder Spielplatz genutzt werden sollten. Bezüglich der Art und Weise, wie Doernach mit Pflanzen baulich bzw. konstruktiv umgeht, kann man die Bauten als bepflanzte und bewachsene Lauben bezeichnen, die auf einer technischen Grundkonstruktion z.B. aus Holz aufbauen. (vgl. Abbildung 20 links)

Abbildung 20 Links: Vision eines „vertikalen Dorfplatzes“ von Rudolph Doernach, entworfen als „Selbstversorgerhaus aus Lehm und Holz mit eigener Entsorgung.“ (Doernach and Heid 1982, S. 82) Rechts: Bau der Stadt-Laube in Freiburg als eine aus Rundholz gebildete, bepflanzte und bewachsene Struktur. (Der Spiegel 1984, S. 233)

Die „Biotektur“, so nannte Doernach seine Form des Bauens, sollte jedoch langfristig völlig „ohne harte Technik“ rein gärtnerisch entwickelt werden. Technische Systeme sollten nach seiner Vorstellung zuerst in bio-technische bzw. biologisch orientierte konvertiert und dann gänzlich durch lebende ersetzt werden. Letztendlich sollten die Bauwerke der Biotektur vollständig durch Wachstum entstehen, „Häuser, die O_2 produzieren, CO_2 und SO_2 reduzieren, Häuser, die Wärme und auch Feuchtigkeit speichern, Häuser, die – das ist auch nicht neu – Früchte tragen.“ (Doernach and Heid 1982, S. 12) „Überspitzt ausgedrückt ist das Ziel von Biotektur“, so Doernach weiter, „Umweltsysteme zu erzeugen, die so vitalisierend und schadlos wirken wie ein Wald und vielleicht auch – als Stadt – ähnlich aussehen.“ (ebd. S. 14f.) Auf diese Art sollte die Stadt Biopolos „nicht autogerecht, sondern pflanzengerecht und damit menschengerecht“ sein (Doernach 1990, S. 77). Einige Aspekte seiner Vision realisierte Dornach in seinem eigenen Wohnhaus sowie in der Stadt-Laube und der Öko-Station Freiburg, die 1986 im Rahmen einer Gartenschau realisiert wurde (Abbildung 20 rechts). Diese gebauten Beispiele blieben jedoch weit hinter den formulierten Visionen zurück. Der bewusste Verzicht auf den Einsatz von Technik – insbesondere von Vegetationstechnik zur Unterstützung bzw. Beeinflussung des Pflanzenwachstums – stand der Umsetzung vermutlich im Wege.

1.3.3.2 Weidendome und Kathedralen

In die Fußstapfen von Doernach tritt dann in den späten 1980er Jahren das *Atelier Sanfte Strukturen* um den Architekten Marcel Kalberer. Bei der Realisierung ihrer Bauten greift die Gruppe jedoch nicht auf Laubenkonstruktionen zurück, sondern nutzt einen eigenen konstruktiven Ansatz, der sich die Bewurzelungsfähigkeit und Vitalität von Weiden zu Nutze macht (vgl. Abschnitt 1.1.1). Das primäre Konstruktionselement sind Bündel aus lebenden Weidenruten, die an die Faschinen der Ingenieurbiologie erinnern, ursprünglich jedoch durch die traditionelle Mudhifkonstruktion inspiriert sein sollen. Bei dieser Bauweise, die schon in frühgeschichtlicher Zeit im Sumpfgebiet zwischen Euphrat und Tigris entwickelt wurde, werden traditionell aus einzeln kaum belastbaren Schilfrohren Bündel geformt, mit denen beindruckend stabile Bogenstrukturen gebildet werden können. In den Konstruktionen des Ateliers *Sanfte Strukturen* nehmen Weidenruten die Funktion des Schilfrohrs ein, wobei zur Formgebung und zur Verbesserung der Tragfähigkeit teilweise auch Stahlrohre integriert werden. Nach dem Konstruktionsprozess treiben dank der enormen Vitalität der Weide meist alle Ruten aus, jedoch nur die unteren, im Boden beginnenden Pflanzen können sich verwurzeln[42] und bleiben dauerhaft am Leben, verankern die Struktur mit ihren Wurzeln im Boden. Die anderen Pflanzen sterben ab und sollen durch den Austrieb der unteren im Laufe der Zeit ersetzt werden. (Kalberer und Remann 1999, S. 46) Aufbauend auf dieser Vorgehensweise gelang es dem Atelier Sanfte Strukturen bis zu 20 Meter weit spannende Bogenstrukturen zu bilden, in die teilweise auch zeltartige Dächer gespannt wurden. Der Ansatz löste einen regelrechten „WeidenBau-Boom“ (Kalberer und Remann 1999, S. 124) aus, der bis heute anhält und Weidenkuppeln etc. zu einem obligatorischen Bestandteil von Schulhöfen und Kindergärten werden ließ.

[42] Wenn die Rutenbündel länger sind als die einzelnen Ruten, werden im oberen Bereich einfach weitere Ruten eingeführt.

Abbildung 21 Bauten der Gruppe „Sanfte Strukturen“. Links: Weidendom Rostock mit eingespannten Zeltdächern. (User Schiwago/Wikipedia)
Mitte und rechst: Weidenkirche Kaiserslautern. (Immanuel Giel/Wikipedia)

Formal nehmen die Bauten oft Bezüge zu vormodernen Bauformen auf und werden dementsprechend dann auch als „Weidendom“, „Weidenpalast“, oder „Weidenkathedrale“ bezeichnet (vgl. Abbildung 21). Insbesondere Anspielungen auf gotische Formen sind häufig zu finden und werden von Kalberer mit einem Verweis auf den Geologen James Hall begründet, der im 19. Jh. nachzuweisen versuchte, dass gotische Kathedralen mit ihren Spitzbögen und floralen Ornamenten als steinerne Nachbildungen einer ursprünglich pflanzlichen Architektur gelesen werden können (Hall, 1797; Abbildung 22 links). Darüber hinaus finden sich auch Bezüge zur Ornamentik des Jugendstils, die auch die Arbeit des belgischen Architekten Luc Schuiten prägen, der seit den 1960er Jahren an der Vision einer „Baumhaus-Stadt“ (vegetal city) arbeitet. In einer Vielzahl an Zeichnungen und Modellen veranschaulicht Schuiten seine Idee einer pflanzlichen Architektur, für die er den Begriff „Archiborescence“ verwendet. Seine Bauten – die bis heute Architekturvision geblieben sind – können als eine Mischung tatsächlich lebender, insbesondere aber auch durch pflanzliche Formen inspirierter Strukturen angesehen werden (Abbildung 22 Mitte und rechts).

Abbildung 22 Links: Illustration von James Hall zum Ursprung gotischer Formen in Weidenbauten.((Pieper 1989, S. 94) Mitte: Modell einer Weidenarchitektur von Luc Schuiten. Rechts: Zeichnung der „Baumhausstadt“ (vegetal city) von Luc Schuiten in Anlehnung an Motive des Jugendstils. (www.vegetalcity.net)

1.3.3.3 Baummieter und Hochwiesenhäuser

Auch der für seine mit bunten Kacheln geschmückten Bauten bekannt gewordene Künstler Friedensreich Hundertwasser kann zu den Protagonisten einer ökologisch motivierten Pflanzenarchitektur gezählt werden. Sein Ansatz steht in der Tradition der Hängenden Gärten, auf die er sich mit dem Entwurf der „Hochwiesenhäuser" sogar wörtlich bezieht: „Die Wohnungen hängen wie Luftschiffgondeln unter den Wiesen, und man sieht durch das Fenster auf den hängenden Wald darunter – die hängenden Häuser von Babylon." (Hundertwasser 1997, S. 94; Abbildung 23 links) Noch prägnanter kommen die Forderungen und Vorstellungen der Ökologiebewegung in seinem Projekt „Baummieter" zum Ausdruck, das er wie folgt erklärt: „…warum soll nicht ein Baum anstatt eines Menschen in einer Wohnung wohnen, wenn der Sauerstoff rar wird? Man braucht nur ein Fenster einer Wohnung und etwas Raum dahinter. … Dies ist der neue Lebensraum des Baummieters, der eben etwas anderes braucht als ein Mensch-Mieter. … Das Regenwasser muss vom Dach mit einem Rohr eingeleitet werden und der Überschuss durch ein zweites Rohr wieder abgeleitet werden. Die Autos haben die Bäume in die Stockwerke verdrängt. Die senkrechten sterilen Wände der Häuserschluchten, unter deren Aggressivität und Tyrannei wir täglich leiden, werden wie grüne Täler, wo der Mensch frei atmen kann. Der Baummieter zahlt seine Miete mit Sauerstoff, durch seine Staubschluckkapazität, als Anti-Lärmmaschine durch Erzeugung von Ruhe, … durch Reinigung des verseuchten Regenwassers, als Produzent des Glücks und der Gesundheit, als Schmetterlingsbringer und durch Schönheit und mit vielen anderen Valuten. Dies lässt sich alles in Geld umwechseln und ist mehr, als ein Mensch-Mieter mit seinem Scheck zahlen kann." Abgesehen davon, dass wir weniger euphorisch formulieren und tatsächlich „Staubschluckkapazitäten" von Fassadenbegrünungen und Bäumen quantifizieren (vgl. z. B. Reznik und Schmidt, 2009), sind die Argumente genau die gleichen, mit denen heute die Pflanzung von Bäumen oder die Anlage von Grünflächen begründet werden. Und was die Vorstellung eines städtischen ökologischen Kreislaufs betrifft, in den Menschen genauso wie Pflanzen eingebunden sind, waren diese Forderungen für die damalige Zeit visionär (vgl Abbildung 23 rechts).[43]

Dass Hundertwasser gleichzeitig den technischen Errungenschaften seiner Zeit äußerst ablehnend gegenüberstand, wird insbesondere an einem Brief deutlich, in dem er sich bei dem ausführenden Gartenarchitekten über die konkrete Umsetzung seines Baummieter-Konzepts beschwert: „…Der Baummieter soll ein Geber sein. … Ein Stück Natur, das vom Mensch und seiner Technokratie unkontrolliert und unbevormundet wachsen kann. … Leider ist kein Baummieter eingezogen in dieses Haus, sondern es wurde eine Intensivstation um ein falsches Gewächs gebaut. Wie für einen Schwerkranken in einer Spezialklinik wird der Baummieter mit angeschlossenen Rohren und Schläuchen mit Wasser, Nährflüssigkeit und flüssigen Chemikalien künstlich ernährt. Ein automatisches Schaltbrett … dosiert die Versorgung und wacht über das Befinden des Baumes. Ein sündhaft teures Meisterwerk der Technologie. Die gute Absicht wurde ins Gegenteil verkehrt. … Die Technokratie siegte wieder einmal über die Natur. Obwohl am Beispiel Baummieter genau das Gegenteil zu demonstrieren wäre: Der langsame, aber stetige Sieg der Natur über die Technokratie. … Der Baummieter soll doch ein Beispiel sein, ein leicht realisierbares Beispiel der Bewaldung der Städte." (Hundertwasser 1997, S. 84)

---

[43] Zu frühen Ansätzen von Nährstoffkreisläufen in der Bewegung der modernen Architektur siehe auch die Ideen von Leberecht Migge, z. B. in: MIGGE, L. & BURCKHARDT, L. 1981. Leberecht Migge : 1881 - 1935; Gartenkultur des 20. Jahrhunderts. Kassel: Gesamthochschule Kassel / Fachbereich Stadtplanung, Landschaftsplanung.

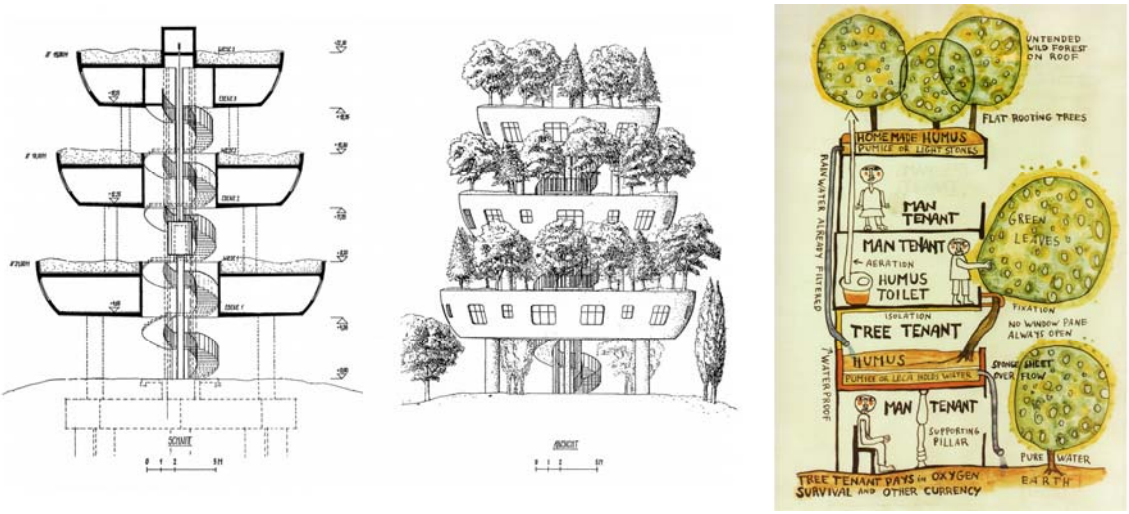


Abbildung 23 Links: Hochwiesenhäuser von Hundertwasser. Rechts: Hundertwassers Konzept der Baummieter, die integraler Bestandteil eines häuslichen Nährstoffkreislaufs sein sollten. (Hundertwasser 1997, S. 94 und 85)

1.3.3.4 Die Naturbauten von Konstantin Kirsch und Herman Block

Die Tradition des Schneidens, Formens und Verbindens von Pflanzen griffen in den 1980er Jahren quasi zeitgleich Konstantin Kirsch, damals Architekturstudent, und der Gärtnermeister Herrmann Fritz Block auf. Sie knüpften unmittelbar an die Ideen von Arthur Wiechula an und legten eine Vielzahl von Bauten an, wobei sie auf den Patenten Wiechulas aufbauend auch eigene Techniken der Pflanzenverbindung entwickelten (vgl. Abschnitt 3.1.2.3).

Abbildung 24 Links: Eine von Kirsch angelegte Gitterwand aus Buchen (angelegt 1997, Zustand 2008). Mitte: Eine vergleichbare Struktur aus Esche (angelegt 1993, Zustand 2008). Rechts: Ausschnitt aus der gleichen Wand mit einem zugewachsenen Feld der Gitterstruktur. (Fotos: Ferdinand Ludwig)

Aus diesen Bauten ist in der Nähe von Kassel mittlerweile ein von Kirsch als „Waldgartendorf" bezeichnetes Gelände hervorgegangen, in dem verschiedene lebende Bauten in unterschiedlichen Entwicklungsstadien besichtigt werden können. Ähnlich wie bei den Tanzlinden sind hier dank jahrelanger gärtnerischer Pflege beeindruckende Bauwerke entstanden, die oft Hunderte

von Verwachsungen aufweisen, wobei neben Linden auch die Baumarten Esche, Ahorn oder Buche verwendet wurden. Bei vielen Bauten sind die Pflanzen mittlerweile so groß, dass nicht nur gitterartige Wandflächen, sondern auch ebenso ausgebildete Dachflächen geformt werden konnten. Dennoch ist das Wachstum insgesamt weitaus geringer als seinerzeit von Wiechula prognostiziert und viele Pflanzen zeigen ein lediglich minimales Dickenwachstum. Von der Bildung einer geschlossenen Wandfläche kann daher in keinem Fall gesprochen werden, auch wenn es Kirsch an einer Stelle gelungen ist, durch wiederholtes einflechten von Trieben ein Feld einer Gitterwand vollständig zu schließen. (Abbildung 24)

1.3.4 Aktuelle Beispiele

Bauwerke, bei denen Pflanzen eine wesentliche konzeptionelle, funktionelle und/oder gestalterische Rolle spielen, erfahren aktuell eine zunehmende Beliebtheit und werden breit diskutiert. Im Folgenden werden exemplarisch einige Projekte vorgestellt, die die aktuellen Tendenzen wiederspiegeln. Dabei ist auffällig, dass alle in den vergangenen Jahren realisierten Projekte in die Rubik der bepflanzten und bewachsenen Bauten einzuordnen sind. Lediglich die Architekturvision „Fab Tree Hab“ des New Yorker Architekten Mitchell Joachim bezieht sich auf die Vorgehensweise von Arthur Wichula und knüpft konzeptionell (Kreislaufgedanke, Subsistenzwirtschaft) an die Biotektur von Rudolph Doernach an – genauso wie diese Ansätze widerspricht das FabTreeHab jedoch im Detail botanischen Gesetzmäßigkeiten und wird deshalb wohl eine Vision bleiben. (Abbildung 25)

Abbildung 25 Visualisierung der Entstehung des „Fab Tree Hab“ von Mitchell Joachim/Terreform 1. Die dargestellte Aufwärtsbewegung der Stammbögen würde mit einem Längenwachstum der verholzten Bereiche einhergehen, die botanisch nicht möglich ist. (Terreform 1 2009, Anhang S.5)

1.3.4.1 Bepflanzte Bauten neuer Dimension

Dachgärten und begrünte Dächer sind heute nicht mehr die Ausnahme, sondern – gerade in deutschen Großstädten – schon fast die Regel. Sie gehören zum Stand der Technik, sind obligatorischer Bestandteil einer ökologisch verantwortungsvollen Architektur und mittlerweile auch ein nennenswertes Marktsegment im Garten- wie im Hochbau.[44] Ermöglicht wird diese breite

[44] Hier sei jedoch darauf hingewiesen, dass es sich bei diesen Begrünungen häufig um sogenannte Extensivbegrünungen handelt, bei denen hauptsächlich trockenresistente Sukkulenten in einer nur wenige cm dicken Substratschicht wurzeln. Von einem Dachgarten kann in diesen Fällen nicht gesprochen werden.

Anwendung einerseits durch eine systematische Entwicklung von Pflanzsubstraten, Drainage- und Wasserspeichersystemen und darauf abgestimmter Pflanzenmischungen und anderseits durch eine immer leistungsfähigere Bautechnik, die Konstruktionen ermöglicht, von denen die Lasten eines Dachgartens problemlos übernommen werden können. Besonders deutlich wird dies bei dem Entwurf des Architekturbüros Emilio Ambasz & Associates für einen Hängenden Garten auf einem Bürogebäude in Fukuoka (Japan). (Abbildung 26 links und Mitte).

Das aktuell bekannteste Beispiel eines mit Kletterpflanzen bewachsenen, teilweise aber auch bepflanzten Bauwerks liefert der „MFO-Park“ im Züricher Stadtteil Neu-Oerlikon. Das von den Architekten[45] als „Park-Haus“ bezeichnete Gebilde kann als ein 17 Meter hohes Rankgerüst bezeichnet werden, das aus einer Stahl-Grundkonstruktion besteht, die mit Edelstahlseilen überspannt ist. Die gesamte Struktur ist auf mehreren Ebenen öffentlich begehbar und entwickelte in den Jahren seit der Fertigstellung (2002) eine üppige „Blattfassade“, die sich jahreszeitenabhängig teils bunt blühend, teils satt grün präsentiert. Mit der zentralen Pflanzenhalle schafft der MFO-Park einen historischen Bezug zu der früher an der gleichen Stelle platzierten Fabrikhalle und steht gleichzeitig in der Tradition der Lauben und Rankgitter – wobei diese jedoch von einem gartenkünstlerischen in einen städtebaulichen Maßstab transferiert werden (Abbildung 26 rechts).

Abbildung 26 Links und Mitte: „Hängende Gärten“ des Acros Buildings (Fukuoka, Japan). (Foto: Hiromi Watanabe) Rechts: Innenansicht des MFO Parks, Zürich. (Foto: Ferdinand Ludwig)

1.3.4.2 Klimatisierung durch Begrünung

Die Motivation, mit der Begrünung von Bauwerken ökologische Ziele zu erreichen, beschränkt sich selbstredend nicht auf die Ansätze der Alternativ- und Ökologiebewegung, sondern ist heute aktueller denn je. So ist beispielsweise beim Institutsgebäude für Physik in Berlin Adlershof[46] die Begrünung der Fassaden mit Kletterpflanzen, die in speziellen Containern auf den umlaufenden Balkonen wurzeln, integraler Bestandteil eines auf der Nutzung von Regenwasser basierenden Konzepts zur Kühlung des Gebäudes. Dabei dienen die Pflanzen im Sommer als aktiver Sonnenschutz, während das Sonnenlicht im Winter die dahinter liegende Glasfassade ungehindert passieren kann. Ein zweiter Effekt ist die Erzeugung von Verdunstungskälte zur Verbesserung des Mikroklimas innerhalb des Gebäudes und im unmittelbaren Gebäudeumfeld. (Abbildung 27 rechts)

[45] Burkhardt + Partner Architekten (Basel) / Raderschall Landschaftsarchitekten (Meilen)

[46] Architekten: Georg Augustin + Ute Frank; Landschaftsarchitekten: Stefan Tischer + Joerg Th. Coqui

Abbildung 27 Links: „Air Trees“ im EcoBoulevard, Madrid (Ecosistema Urbano). Rechts: Die bepflanzte und bewachsene Fassade des Instituts für Physik der Humboldt-Universität in Berlin dient der Klimatisierung des Gebäudes (Foto: Sebastian Timmermann / www.archinoah.com)

Eine vergleichbare Intention liegt dem Projekt „Eco Boulevard“ in Madrid zu Grunde, bei dem ein 500 Meter langer und 50 Meter breiter Straßenzug durch eine Reihe sogenannter „Air Trees“ gestaltet und klimatisiert wird.[47] Diese zylinderförmigen Baukörper bestehen aus einer Grundkonstruktion aus Stahlrohren, die zumeist mit einem Netz bespannt ist, das Kletterpflanzen (Efeu) als Rankhilfe dient (Abbildung 27 links). Auch hier wurzeln die Pflanzen in Containern, die ebenfalls von der Stahlstruktur getragen und von einer Tröpfchenbewässerung automatisch gegossen werden. Der von den Pflanzen ausgehende Effekt derVerdunstungskühlung wird durch Nebeldüsen verstärkt, die genauso wie die Bewässerungsanlage mit Regenwasser und durch photovoltaisch vor Ort produziertem Strom betrieben werden. Den „Air Trees“ liegt neben diesem ökologischen auch ein sozialer Anspruch und ein zeitliches Entwicklungskonzept zu Grunde. So sollen die künstlichen Strukturen ähnlich wie alte Bäume als nachbarschaftliche Treffpunkte im öffentlichen Raum dienen und auf diese Art räumliche und ökologische Aufgaben erfüllen, die gewöhnlich erst dann zustande kommen, wenn Bäume Jahrzehnte nach ihrer Pflanzung ihre volle Größe erreicht haben. In diesem Konzept sind die „Air Trees“ als temporäre Strukturen entworfen, die entfernt werden sollen, sobald die im Straßenraum gepflanzten Bäume so groß geworden sind, dass sie die an sie gestellten Erwartungen erfüllen können. (vgl. Lambertini nd Ciampi 2007, S. 159ff.)

1.3.4.3 Vertikale Gärten

Während der oben erwähnte Entwurf des Architekturbüros Emilio Ambasz & Associates für einen „Hängenden Garten“ an den von Le Corbusier vorgezeichneten Weg anknüpft, Dachgärten neuer Dimension hauptsächlich mithilfe neuer Bautechniken zu realisieren, kann in den aktuell viel diskutierten „vertikalen Gärten“ ein Ansatz gesehen werden, der vor allem botanische Erkenntnisse und moderne gärtnerische Verfahren systematisch nutzt, um eine neue Form der Pflanzenarchitektur zu ermöglichen. Die Idee der vertikalen Gärten oder Pflanzenwände geht maßgeblich auf den Botaniker Patrick Blanc zurück, der in den vergangenen 20 Jahren allein in Paris dutzende seiner Entwürfe an Fassaden, Brückenpfeilern oder den Wänden von Innenhöfen realisiert hat. In seinen botanischen Forschungen im tropischen Regenwald untersuchte Blanc unter anderem die Lebensweise von Epiphyten, die in ihrem natürlichen Habitat

[47] Architekten: Ecosistema Urbano, Madrid

völlig ohne Bodenkontakt leben können, indem sie mit ihren Wurzeln an den Stämmen und Ästen anderer Bäume klammern und ihren Wasser- und Nährstoffbedarf lediglich aus den Überresten abgefallener Blätter und der Luftfeuchte decken. Auf der Basis seiner wissenschaftlichen Arbeiten zu diesen tropischen Wuchsformen entwickelte Blanc ein Verfahren, Pflanzen in einer dünnen, von Düngerlösung durchflossenen Filzmatte an Wänden zu kultivieren. Dabei werden moderne Vegetations- und Düngungstechnoligen (hydroponische Verfahren) genutzt, um die epiphytische Wuchsform auch für natürlicherweise nicht epiphytisch wachsende Arten anwendbar zu machen und in einen urbanen bzw. architektonischen Kontext zu übertragen (vgl. Lambertini und Ciampi 2007, S. 15f.). Die enorme Popularität, die diese Pflanzenwände erfahren, hängt mit Sicherheit damit zusammen, dass plötzlich an Stellen, wo niemand auch nur die kleinste Pflanze vermuten würde und kein einziger Krümel Erde zu finden ist, die üppigsten, grünen und bunt blühenden Pflanzenteppiche gedeihen. Damit lösen die vertikalen Gärten eine ähnle Verwunderung aus, wie sie bereits aus dem antiken Rom von Dachgärten dokumentiert ist (vgl. Seneca-Zitat in Abschnitt 1.3.2.1).

Abbildung 28 Vertikale Gärten von Patrick Blanc. Links: Caixa Forum Madrid (Architekten: Herzog & de Meuron, Foto: Óscar Carnicero/wikimedia commons) Rechts: Musée du quai Branly, Paris (Architekten: Jean Nouvel, Foto: User:Kaldari/wikimedia commons)

1.4 Herleitung und Gliederung des Forschungsansatzes

1.4.1 Schlussfolgerungen aus den historischen Betrachtungen

Der baubotanische Ansatz zeichnet sich, wie eingangs dargestellt, dadurch aus, dass die Triebe bzw. Stämme von Bäumen so geformt und miteinander verbunden werden, dass durch Verwachsungen stabile Konstruktionen entstehen. Damit knüpft die Baubotanik an die Traditionslinie der Pflanzenarchitektur durch „Schneiden, Formen und Verbinden“ von Trieben an.[48] Die dargestellten Beispiele der lebenden Brücken und der Tanzlinden zeigen auf, welche gestalterischen und konstruktiven Möglichkeiten dieser Ansatz bietet und wie diese in der vormodernen Architektur genutzt wurden. Gleichzeitig ist jedoch auffällig, dass bei aktuellen Beispielen

[48] Wenn baubotanische Bauten mit Hilfe des im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten Verfahrens der Pflanzenaddition gebildet werden, kann in der Anfangsphase auch von bepflanzten Konstruktionen gesprochen werden. (vgl. Abschnitt 1.4.4)

pflanzlicher Architektur gerade nicht die Techniken des Schneidens, Formens und Verbindens von Trieben bzw. Wurzeln genutzt werden, sondern fast ausschließlich bepflanzte und bewachsene Bauwerke realisiert werden. Diese Projekte, bei denen man nicht von lebenden, sondern lediglich von begrünten Bauten sprechen kann (vgl. Abschnitt 1.2.2), sind durchwegs dadurch gekennzeichnet, dass wissenschaftliche Erkenntnisse (Botanik, Gartenbauwissenschaften etc.), moderne Bautechniken sowie Verfahren und Methoden aus dem Erwerbsgartenbau gezielt genutzt werden, um neue räumliche Wirkungen und ökologische Potentiale zu erschließen.[49] Ein vergleichbares Vorgehen ist bei den Pflanzenarchitekturen des Schneidens, Formens und Verbindens von Trieben lediglich bei der Ingenieurbiologie gegeben, die als anerkannte Wissenschaft die konstruktiven Potentiale von Pflanzen untersucht. Festzuhalten ist hier jedoch, dass es sich eher um eine Ingenieurtechnik im Landschaftsbau und weniger um Architektur aus Pflanzen handelt, da in der Regel z. B. keine raumbildend-gestalterischen Entwurfsabsichten verfolgt werden und so auch nicht von Bauwerken (im Sinne eines Hauses) aus Pflanzen gesprochen werden kann.[50]

Im Gegensatz dazu sind die Ansätze der Ökologiebewegung, bei denen Bauwerke durch das Schneiden, Formen und Verbinden von Pflanzen gebildet werden, dadurch charakterisiert, dass meist traditionelle Techniken, Methoden und Vorgehensweisen aufgegriffen werden, ohne dass diese beispielsweise vor dem Hintergrund des aktuellen Kenntnisstandes der Botanik hinterfragt oder weiterentwickelt werden. Dies ist umso erstaunlicher, wenn man bedenkt, dass vor allem Strukturen, die durch Verwachsungen entstehen, pflanzenphysiologisch ungleich komplexer sind als solche, bei denen „nur“ ein Bauwerk begrünt wird. [51] In einigen Kreisen der Alternativarchitektur ist eine wissenschaftlich und technisch ausgerichtete Vorgehensweise sogar bis heute verschrien (vgl. Kalberer, 2010), was nicht nur bedeutet, dass die Chancen neuer Techniken verkannt werden, sondern auch dazu führt, dass nicht gesehen wird, welche Möglichkeiten und Grenzen die Verwendung von Pflanzen im Kontext der Architektur prinzipiell mit sich bringt. Dies führt zu einer offensichtlichen Diskrepanz zwischen den in größerer Zahl vorhandenen Architekturvisionen und postulierten Zielen auf der einen und der konkreten Umsetzung auf der anderen Seite, die häufig weit hinter den Visionen zurückbleibt oder in der Umsetzung scheitert.

Deutlich wird dies beispielsweise an der Arborsculture, bei der Techniken der Pflanzenverbindung genutzt werden, die im Barock bzw. im 19. Jh. entwickelt wurden.[52] Diese Techniken setzen in der Regel ein großes handwerkliches Geschick voraussetzen und sind zudem für den Zweck oft nicht adäquat, weshalb die Anwendung von Verwachsungen mindestens genauso zeitaufwändig und kompliziert bleibt wie im Barock. Das Versprechen, die Arborsculpture könne einen Beitrag für die Lösung der ökologischen Probleme unserer Zeit leisten,[53] kann auf diese Art nicht eingelöst werden. Auch bezüglich der Frage, wie die Pflanzen in die gewünschten

---

[49] Dies spiegelt sich u.a. in einer Vielzahl von Fachzeitschriften (z. B. Dach + Grün) und Verbänden (z.B. Fachverband Bauwerksbegrünung) wider.

[50] Die konstruktiven Leistungen ingenieurbiologischer Anlagen sind meist für Laien nicht direkt ablesbar, sie finden im Verborgenen statt (z. B. Wurzelarmierung des Untergrunds).

[51] Vgl. dazu die Ausführungen im Abschnitt 4.2.

[52] Eine Ausnahme im Bereich der Arbosculpture stellt die israelische Firma plantware dar, die für die Produktion geeigneten Pflanzenmaterials moderne airoponische Verfahren nutzt. Die auf dieser Basis umgesetzten Entwürfe erschöpfen sich aber im Wesentlichen darin, Strukturen des Tree Circus von Axel Erlandson nachzubilden oder andere, teils absichtlich skurrile, teils mehr oder weniger nutzbare Dinge wie Klorollenhalter zu formen.

[53] Vgl. Buchtitel von REAMS, R. 2005. *Arborsculpture. Solutions for a small planet,* Williams Oregon, Arborsmith Studios.

Formen zu bringen sind und welche Formen unter welchem Aufwand bzw. überhaupt möglich sind, wird in der Regel gärtnerisches Erfahrungswissen herangezogen oder einfach nach dem „Versuch-und-Irrtum-Prinzip“ vorgegangen. Reams verweist zwar auf botanische Gesetzmäßigkeiten wie apikale Dominanz und Phototropismus und zitiert z. B. auch biomechanische Arbeiten. Konkrete Schlussfolgerungen und eine systematische Darstellung des Forschungstands fehlen aber genauso wie eine Übertragung dieses Wissensstandes in die Praxis (vgl. Reams 2005, S. 163ff.). Die vorliegende Arbeit versucht, genau an dieser Stelle anzusetzen und eine auf wissenschaftlichen Untersuchungen basierende Grundlage für das Entwerfen und Bauen pflanzlicher Strukturen zu schaffen. Dabei wird anders als in der Arborsculpture, die teilweise eine Art Sport darin sieht, Bäumen eine möglichst skurrile und unnatürliche Form abzuringen, das Ziel verfolgt, die Form primär aus der gewünschten konstruktiven Leistung (z. B. Tragwerk) und den natürlichen Wachstumsmustern der Pflanze herzuleiten.

Welche Irrtümer und Fehleinschätzungen aus einer fehlenden botanischen Grundlage resultieren können, wird auch am Beispiel des Ansatzes von Arthur Wiechula deutlich. Ein einfacher Vergleich mit den aus der Forstwissenschaft bekannten Zuwachswerten und dem sich im Verlauf von Jahrzehnten aufbauenden Holzvorrat[54] eines Waldes macht hier bereits deutlich, wie weit Zielsetzung und tatsächlich erreichbares Ziel auseinanderklaffen: Aufgrund der Tatsache, dass Holz ein zwar großteils aus toten Zellen bestehendes, aber dennoch mehr oder weniger stark von lebenden Zellen durchsetztes und vom lebenden Kambium bzw. der teilweise lebenden Rinde umgebenes Gewebe ist, benötigen alle Pflanzenzellen für ihren Selbsterhalt ein Mindestmenge an Energie. Da die Photosyntheseleistung der Blätter, die diese Energie zur Verfügung stellen, begrenzt ist, ist auch das Holzvolumen, das auf einer bestimmten Fläche überleben kann, biologisch limitiert. Beispielsweise beträgt der durchschnittliche Holzvorrat der deutschen Wälder ca. 200 bis 400m^3 Holz (Vfm) je Hektar Fläche (Polley und Kroiher, 2006). Bildlich gesprochen ist dies eine die gesamte Grundfläche des Waldes bedeckende, lediglich zwei bis vier Zentimeter dicke Holzplatte. Mit diesem Volumen ist in der Größenordnung auch das Holzvolumen beschrieben, das in lebenden Konstruktionen entstehen und überleben kann. Es entspricht in etwa dem Volumen, das hoch optimierte Leichtbaukonstruktionen, wie z. B. die von Frei Otto entworfenen Gitterschalen der Multihalle Mannheim, aufweisen.[55] Vollflächig geschlossenen Wände, Decken und Dächer, wie von Wiechula, Kirsch und Block angestrebt, können wohl kaum entstehen.

Daraus lassen sich für die Baubotanik zwei Schlüsse ziehen: Erstens sollten baubotanische Bauten nicht an dem gemessen werden, was massive Häuser statisch und klimatechnisch bieten und auch leisten müssen. Vielmehr sollten die Chancen in den ökologischen und sinnlichen Qualitäten der Bauweise gesehen werden, die als entwurfsprägende Elemente zur Geltung gebracht werden können. Zweites müssen baubotanische Konstruktionen, sofern sie eine hohe mechanische Leistungsfähigkeit erlangen sollen (Tragwerk), nicht nur pflanzengerecht konstruiert, sondern auch entsprechend der Konstruktionsregeln des Leichtbaus entworfen werden. Nur so kann erreicht werden, dass mit dem biologisch limitierten Konstruktionsvolumen auch belastbare Strukturen entstehen.

Leichtbau und Baubotanik scheinen jedoch nicht nur bezüglich der zur Anwendung kommenden Konstruktionsregeln miteinander in Beziehung zu stehen. Vielmehr scheint eine große Parallelität in der Art und Weise zu bestehen, wie historisch tradierte Techniken und Bauformen in

---

[54] Der Holzvorrat eines Waldes ist die Summe der tatsächlich vorhandenen oberirdischen Holzmasse, d. h. inkl. aller Stämme, Zweig und Äste.

[55] Dieses entspricht in etwa einem Holzvolumen von 450m^3/ha (eigene Berechnung)

eine moderne Bauweise übertragen werden. So kann der Ursprung des Leichtbaus in nomadischen Zelten gesehen werden, von denen Freit Otto seinerzeit das Konzept der Zugbeanspruchten Konstruktionen und im Speziellen den Membranbau ableitete, wobei er vergleichbare Muster in natürlichen Strukturen wie Spinnennetzen und in den autonomen Formfindungsprozessen von Seifenblasen erkannte. Den Zelten im Leichtbau entsprechen in der Baubotanik die lebenden Brücken der Khasi, deren archaische Bautechnik abstrahiert, auf andere Baumarten übertragen und in eine moderne Bauweise übersetzt werden soll, wobei die natürlichen Wachstums- und Entwicklungsmuster der Würgfeigen sowie anderer Baumarten untersucht und für den Entstehungsprozess genutzt werden sollen (s. u.). Genauso wie im Leichtbau geht es jedoch nicht um die Rückbesinnung auf eine traditionelle Bauweise, historisierende Formen und Lebensweisen, sondern darum, bestehende Ansätze durch naturwissenschaftliche Untersuchungen und technische Entwicklungen zu transformieren und fruchtbar werden zu lassen.

1.4.2 Botanische Grundlagen

Wenn die Baubotanik als eine Wissenschaft betrieben werden soll, ist es naheliegend, Parallelen zu anderen angewandten, auf botanischer Grundlagenforschung aufbauenden Disziplinen wie z. B. der Forstwissenschaft oder der Gartenbauwissenschaft zu suchen. Diese Disziplinen stellen in der Regel die systemische Betrachtung und Definition der Pflanze als Organismus an den Anfang aller Überlegungen und Modellvorstellungen[56] und verweisen hier auf die Definition des Systemtheoretikers Ludwig von Bertalanffy, der den pflanzliche Organismus als ein hierarchisch gegliedertes und zielgerichtetes System, das sich aufgrund seiner Systembedingungen im Wechsel der Bestandteile selbst erhält, beschreibt (Bertalanffy 1951, S.51f.). Für die Baubotanik bedeutet dies, dass jeder Teil der Konstruktion Teil eines lebenden Organismus und damit Teil eines komplexen, dynamischen und offenen, mit seiner Umwelt interagierenden Systems ist. (vgl. Ludwig, 2009)

Charakteristisch für den pflanzlichen Organismus ist darüber hinaus ein modularer Aufbau und eine hohe phänotypische Plastizität: Pflanzen bestehen aus relativ wenigen, einfachen Grundelementen (Modulen), die durch im Grunde einfache Prozesse generiert werden. Auch Bäume, die mit Abstand größten und langlebigsten Pflanzen der Erde, verfügen im Prinzip über diese wenigen Grundstrukturen und Grundprozesse und erlangen ihre enorme Größe und hohe Komplexität dadurch, dass sich diese Prozesse Jahr für Jahr wiederholen und die Module daher in unglaublicher Anzahl vorliegen und hochgradig untereinander vernetzt sind. Dieser Bauplan ermöglicht es Pflanzen, die nie ausgewachsen sind sondern zeitlebens weiterwachsen, in viel größerem Maße als z. B. Tieren, ihre Strukturen an ihre Umwelt anzupassen. Sie sind beispielsweise in der Lage, verletzte oder abgestorbene Organe an ähnlicher oder auch an ganz anderer Stelle zu ersetzen. Botanische Grundlage dieser Regenerationsfähigkeit ist die Tatsache, dass in Pflanzen alle lebenden und teilungsfähigen Zellen im Prinzip alle Arten an Organen hervorbringen können, sodass sich prinzipiell aus jeder lebenden Zelle ein neuer, vollständiger Organismus regenerieren kann. (vgl. Wilson, 1984 und Thomas, 2000)

Als funktionale Einheiten erfüllen die Module bzw. Grundorgane der Pflanzen im Organismus jeweils spezifische Aufgaben, die vor dem Hintergrund einer baubotanischen Transformation des Baumes in eine mehr oder weniger artifizielle Struktur wie folgt dargestellt werden können: Die **Wurzeln** und **Blätter** können als Interaktionsorgane der Pflanze mit der Umwelt betrachtet werden, denn sie dienen im Prinzip dazu, die Umwelt „auszubeuten“. Sie sind mit **maximaler Oberfläche** ausgestattet und ein wichtiges Ziel pflanzlichen Wachstums ist, sie in einem mög-

[56] Vgl. z. B. PRETZSCH, H. 2002. *Grundlagen der Waldwachstumsforschung,* Berlin, Parey.

lichst großen Raum möglichst effizient zu verteilen. Die Blätter sind der Ort des wichtigsten pflanzlichen Prozesses, der Photosynthese. Indem hier die auftreffende Lichtenergie der Sonne in chemische Energie umgewandelt wird, entstehen aus dem CO_2 der Luft und Wasser Kohlehydrate – die wesentlichen molekularen Bausteine aller pflanzlichen Strukturen. So selbstverständlich dies klingen mag, für die Baubotanik bedeutet es, dass jegliche Konstruktionsmasse und die gesamte, für alle Lebens- und Wachstumsprozesse notwendige Energie durch die Blätter bereitgestellt werden müssen. Im Austausch mit dem aufgenommenen CO_2 geben die Blätter den bei der Photosynthese anfallenden Sauerstoff und in großen Mengen Wasserdampf an ihre Umwelt ab. Dieses Wasser und alle weiteren für das Wachstum notwendigen Elemente werden von den Wurzeln im Boden aufgenommen. Blätter und Wurzeln sind durch das **Achsensystem** (Stämme, Äste und Zweige) miteinander verbunden, das als diesen beiden Organen dienend angesehen und als ein **Minimalwegesystem** charakterisiert werden kann (vgl. Otto und Klenk 1998, S. 117). In den Achsen fließen die von den Wurzeln aufgenommenen Stoffe zu den Blättern und die in den Blättern erzeugten Photosyntheseprodukte werden zu den Orten des Verbrauchs transportiert. Ebenso dient das Achsensystem dazu, die Blätter für eine optimale Photosyntheseleistung im Raum zu verteilen – es muss daher dem Eigengewicht der Blätter und den angreifenden Kräften (Wind, Schnee) standhalten können. Pflanzenachsen erfüllen also hauptsächlich Trag- und Transportfunktionen. (vgl. Wilson, 1984 und Thomas, 2000)

Wenn in dieses hoch optimierte Achsensystems, das bei natürlicher Entwicklung auf der Basis eines genetischen Programms entsteht, durch Schneiden, Formen und Verbinden der Triebe eingegriffen wird, ist dabei zu berücksichtigen, dass die der natürlichen Entwicklung zugrundeliegenden Wachstumsmuster innerhalb eines ca. 300 Millionen Jahre andauernden Evolutionsprozesses entstanden sind und dabei insbesondere der Konkurrenzkampf um Raum und Licht ein entscheidender Selektionsfaktor war. Deshalb folgen alle Wachstumsprozesse dem in der belebten Natur allgemein gültigen **Prinzip der Effizienz**: Die zur Verfügung stehenden „Baustoffe“ werden so investiert, dass für den Gesamtorganismus der größtmögliche Vorteil erzielt wird (Wilson 1984, S. 13). Diese Grundregel des Wachstums bleibt natürlich in baubotanischen Strukturen bestehen, denn auch in einer artifiziell gefügten Achsenstruktur wird der Organismus Baum tendenziell nur die Bereiche fördern und erhalten, die für seine weitere Entwicklung und sein Überleben am sinnvollsten sind.

1.4.3 Strategien der Raumeroberung in der Natur

Bei der Realisierung baubotanischer Strukturen wird die Grundstruktur des Achsensystems und damit indirekt auch die Anordnung der Blätter im Raum durch den Entwurf vorgegeben und durch den Konstruktionsprozess umgesetzt. Es erscheint daher sinnvoll, zunächst genauer zu betrachten, welche Strategien der Raumeroberung, d. h. der Besetzung des Luftraums mit Blättern, Zweigen und Ästen, Holzpflanzen unter natürlichen Bedingungen zeigen. Dabei kann zunächst zwischen selbsttragenden und nicht selbsttragenden Wuchsformen unterschieden werden: Selbsttragende Bäume und Büsche erobern mit anfangs relativ flexiblen Trieben durch ausgeprägtes Längenwachstum den Luftraum und stabilisieren diesen Zustand anschließend durch sekundäres Dickenwachstum. Im Gegensatz dazu nutzen nicht selbsttragende Pflanzen wie Lianen die Statik eines Wirtsbaumes, um auf dessen Kosten schnellstmöglich zum Licht zu gelangen. Dabei folgt auf eine anfängliche Wuchsphase, bei der sich die Pflanze selbst trägt und sehr steife „Suchertriebe“ bildet,[57] eine nicht selbsttragende Phase, bei der die Statik des Trä-

[57] In dieser Phase wird gewissermaßen ein Trägerbaum gesucht, z. B. durch spezifische Wachstumsbewegungen.

gerbaums genutzt wird und die Lianenachsen zunehmend biege- und torsionsflexibel werden (Speck, 1994; Speck und Rowe, 1999; Speck und Rowe, 2003; Speck et al., 2003)

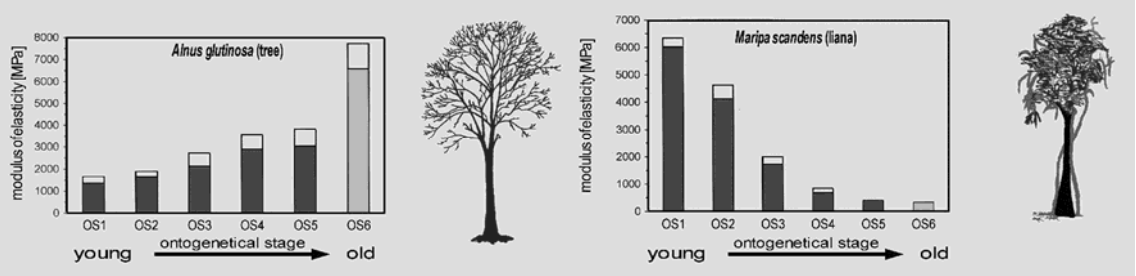


Abbildung 29 Entwicklung der E-Moduln von selbsttragend wachsenden Bäumen (links) und nicht selbstratend wachsenden Lianen (rechts) im Verlauf der Ontogenie. (Speck 2009, S. 68)

Wie Untersuchungen der Plant Biomechanics Group Freiburg zeigen, kommt es bei selbsttragenden Bäumen und Sträuchern im Verlauf der Ontogenie zu einer Zunahme der Biegeelastizitätsmoduli auf das fünf- bis sechsfache, während bei nicht-selbsttragenden Lianen eine Abnahme der Biegeelastizitätsmoduln bis auf ca. 5% der bei jungen Achsen gefundenen Werte gemessen wird (Abbildung 29). Diese drastischen Änderungen der mechanischen Eigenschaften werden ausgelöst durch Veränderungen des Achsenaufbaus, die auf mindestens fünf hierarchisch organisierten strukturellen Ebenen stattfinden können. Sie werden bei selbsttragenden Wuchsformen darauf zurückgeführt, dass Bäume und Sträucher mit zunehmender Höhe vor allem wegen der stark zunehmenden Windbelastung immer größeren Belastungen ausgesetzt sind. Für sie scheint es von Selektionsvorteil zu sein, wenn ihre mechanische Stabilität nicht nur durch Zunahme des Holzvolumens, sondern auch durch eine interne Optimierung der Strukturen erreicht wird. Gleichzeitig ist es für sie von Vorteil, wenn die jungen Zweige und Äste biegsam sind, wodurch bei Windbelastung die Segelfläche der Krone und damit die mechanische Beanspruchung verringert wird. (Speck, 1994; Speck und Rowe, 1999; Speck und Rowe, 2003; Speck et al., 2003, Rowe et al., 2004; Rowe and Speck, 2005)

Eine besondere Strategie der Raumeroberung findet sich bei Würgefeigen (z. B. *Ficus benghalensis*), die als sogenannte Hemiepiphyten typischerweise direkt in der Krone eines Wirtsbaums keimen und so im Vergleich zur Bodenkeimung den Vorteil nutzen, sofort ein hohes Maß an Sonneneinstrahlung genießen zu können. Von der Baumkrone des Wirtsbaums aus senden sie sehr dünne, hängende Luftwurzeln zum Boden, die sich bei Bodenkontakt verkürzen. Durch diese Art der Abspannung wird zunächst die Statik des Wirtsbaum-Feige-Verbunds verbessert und die bis zu diesem Zeitpunkt epiphytisch wachsenden Pflanzen können sich die Nährstoff- und Wasservorräte des Bodens erschließen und gehen damit zu einer terrestrischen Lebensform über. Anschließend bilden sich zwischen den Vertikalwurzeln Querverbindungen aus, die miteinander fusionieren und ein dichtes Netzwerk um den Stamm des Wirtsbaums bilden. Der Wirtsbaum drückt durch sein Dickenwachstum auf die umfassende Struktur der Würgefeige, wird dadurch in seinem Wachstum zunehmend behindert (Strangulation) und stirbt letztendlich durch den zunehmenden Wurzel- und Kronenkonkurrenz der immer stärker dominierenden Würgefeige ab. Allmählich geht dann durch Fäulnisprozesse die statische Stabilität des Wirtsbaum-Stammes verloren und die Würgefeige wird sukzessive autostabil. Dabei wandeln sich die anfänglich auf Zug belasteten und flexiblen Luftwurzeln in eine druckstabile Struktur um. (vgl. (Thomas, 2000) S. 108f.) (Abbildung 30)

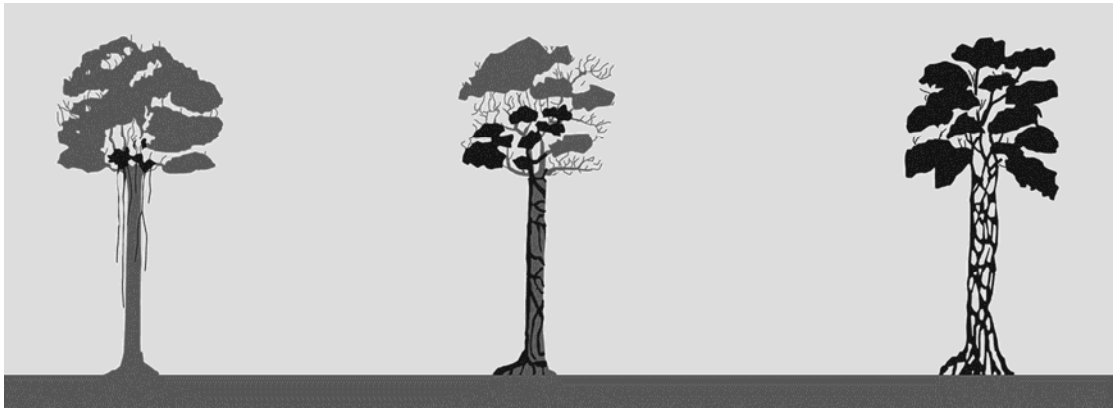


Abbildung 30 Wachstumsmuster von Würgfeigen. Links: Keimung in der Baumkrone und Wachstum der Luftwurzeln. Mitte: Entstehung einer verwachsenden Struktur um den Stamm des Wirtsbaums und Übergang zu terrestrischer Lebensweise. Rechts: Selbstragende, fachwerkartige Stammstruktur. (nach Corner, 1998 (verändert))

1.4.4 Grundidee der Pflanzenaddition

Die bemerkenswerte Strategie der Raumeroberung von Würgefeigen, die sich durch eine große Schnelligkeit und Effektivität auszeichnet, wird in gewissem Sinne bereits bei den lebenden Brücken der Khasi genutzt (vgl. Abschnitt 1.3.1.2), indem Luftwurzeln so um eine temporäre Struktur geleitet werden, dass langfristig ein stabiles Pflanzentragwerk entsteht. Mit der vorliegenden Arbeit wird versucht, das Wachstumsmuster der Würgefeigen als ein **abstrahiertes Modell** zu verwenden, um diese Strategie der Raumeroberung zur Bildung baubotanischer Strukturen unmittelbar in der Dimension ausgewachsener Bäume anwendbar zu machen. Zum Einsatz kommen sollen jedoch nicht Ficusarten, die aufgrund mangelnder Frostfestigkeit in Mitteleuropa nicht gedeihen können, sondern heimische bzw. in Mitteleuropa verbreitete Baumarten. Deren ontogenetische Entwicklungsprozesse sowie deren Fähigkeit, ihre Morphologie und ihre Anatomie an unterschiedliche Wachstumsbedingungen anzupassen, soll dabei systematisch genutzt werden.

Die Wachstumsstrategie von Würgefeigen zeichnet sich wie dargestellt dadurch aus, dass die Pflanzen durch die Nutzung einer Gerüststruktur (Stamm des Wirtsbaum) sehr schnell das Licht eines Kronenraums ausnutzen können, den sie sich aufgrund eigenen Wachstums so nicht selbst erschließen könnten. Dabei nutzen sie temporär die in diesem Kronenraum vorhandenen Wasser- und Nährstoffvorkommen sowie die Tragfähigkeit des Gerüsts, sodass die Luftwurzeln, die dann die Nährstoffvorräte des Bodens erschließen, zunächst keine mechanischen Aufgaben erfüllen müssen und deshalb äußerst schlank, lang, dünn und flexibel (d. h. seilartig) wachsen können. Erst anschließend entsteht durch das dann einsetzende Dickenwachstum und durch das Verwachsen der einzelnen Elemente zu einem fachwerkartigen Tragwerk eine autostabile Struktur.

Aus diesem Wachstumsmuster wurde das baubotanische Verfahren der **Pflanzenaddition** abgeleitet, bei dem pflanzlich-technische Tragstrukturen wie folgt entstehen sollen: Junge Bäume werden so vorkultiviert, dass sie über einen einzigen, möglichst langen, geraden, dünnen und unverzweigten Trieb verfügen, der sich problemlos biegen und damit zu fachwerkartigen Strukturen formen lässt. Diese Pflanzen werden an bzw. auf einer temporären Gerüststruktur angeordnet, wobei nur die untersten in den Erdboden gepflanzt werden, während alle anderen in speziellen Pflanzcontainern wurzeln und kontinuierlich mit Wasser und Nährstoffen versorgt

werden – also quasi epiphytisch wachsen. Dadurch entsteht aus einer Vielzahl an Jungpflanzen ein photosynthetisch aktives Kronenvolumen, über das sonst nur alte Bäume vergleichbarer Größe verfügen. Anschließend werden die Pflanzen mithilfe spezieller Verbindungstechniken so verbunden, dass sie untereinander verwachsen. Dadurch soll aus den Einzelpflanzen eine physiologische Einheit gebildet werden, in der Wasser, Nährstoffe und Assimilate genauso wie Pflanzenhormone ausgetauscht und über ursprüngliche Individuengrenzen hinweg transportiert werden können. Während anfänglich jede einzelne Pflanze über alle lebensnotwendigen Organe selbst verfügen muss, können nach erfolgter Verwachsung an einem Verwachsungspartner absterbende oder entfernte Wurzeln und Blätter an einem anderen Verwachsungspartner neu gebildet werden. Sobald die untersten Pflanzen im Erdreich ein leistungsfähiges Wurzelsystem entwickelt haben, sollen die Pflanzcontainer und damit die im Kronenraum angeordneten Wurzel entfernt werden – die künstlich gebildete Pflanzenstruktur nimmt eine terrestrische Wuchsform an. Wenn diese Struktur dann stabil genug geworden ist, soll in Analogie zu dem sukzessive verfaulenden Stamm des Wirtsbaums der Würgefeige die Gerüststruktur entfernt werden. (Abbildung 31)

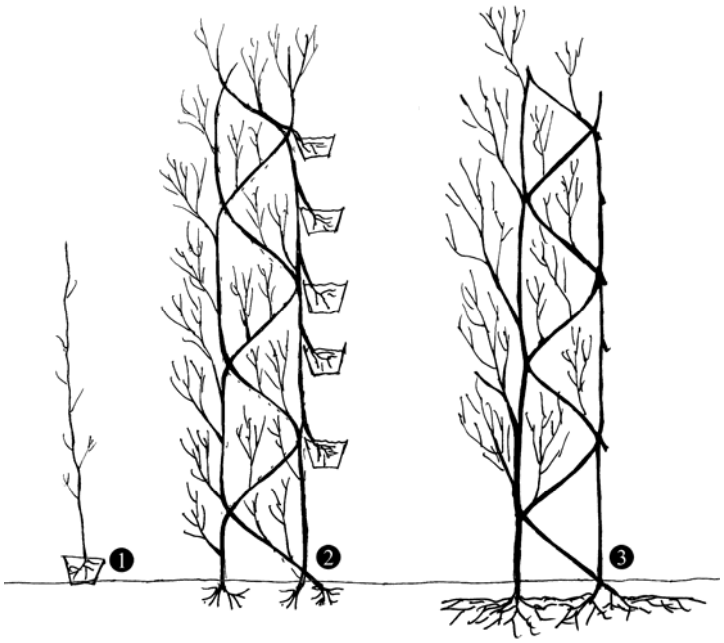


Abbildung 31 Erste Ideenskizze zur Pflanzenaddition: Junge Pflanzen mit biegsamen Trieben (1) werden vertikal übereinander angeordnet und zu einer fachwerkartigen Struktur verbunden (2). Durch Verwachsungsprozesse und Dickenwachstum entstehe eine physiologische Einheit und eine selbsttragende Struktur, sodass die im Luftraum angeordneten Wurzelbereiche und anfangs notwendige Gerüststrukturen entfernt werden können (3).

1.4.5 Vorgehensweise

Aus dem Konzept der Pflanzenaddition ergibt sich ein Entstehungsprozess baubotanischer Bauten, der durch drei Phasen charakterisiert ist: Zunächst müssen in einer ersten Wachstumsphase die notwendigen Pflanzen entstehen bzw. gärtnerisch produziert werden. Aus diesen wird dann in der zweiten Phase durch Formen und Verbinden der Triebe die Grundstruktur der Pflanzen-

konstruktion gebildet, die bereits die endgültige Geometrie und Größe aufweist, jedoch noch nicht belastbar ist. An diese Konstruktionsphase schließt sich die dritte Phase an, die wiederum durch Wachstum, aber auch durch die Steuerung der Entwicklung (Pflege) charakterisiert ist. Nun entwickelt sich eine autostabile und autark lebensfähige Pflanzenstruktur, wobei die wesentlichen Wachstumsfaktoren bereits in der zweiten Phase durch die Grundgeometrie der Achsenstruktur festgelegt werden. Aus botanischer Perspektive betrachtet kann dieser dreiphasige Prozess als ein zeitliches Auftrennen normalerweise gleichzeitig ablaufender Wachstumsprozesse beschrieben werden: In der ersten Phase wird hauptsächlich das Längenwachstum gefördert, während Verzweigung und Dickenwachstum unterdrückt werden. Nachdem die Pflanzen zu einer baubotanischen Struktur verbunden wurden (2. Phase), wird in der dritten Phase dann Verzweigung, Dickenwachstum und Verholzung gefördert, sodass es zu einer Versteifung der baubotanischen Struktur kommt.

Ziel der im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen und Experimente, die in den folgenden drei Kapiteln dargestellt werden, war es, für jede dieser drei Phasen Schlüsseltechniken, Methoden und Verfahren zu erarbeiten, die die Realisierung baubotanischer Bauten nach dem Verfahren der Pflanzenaddition ermöglichen. Dazu wurde in Anzuchtversuchen und biomechanischen Experimenten untersucht, wie Pflanzen für die baubotanische Verwendung produziert werden können, und wie deren biomechanische und morphologische Eigenschaften durch die Steuerung von Wachstumsfaktoren beeinflusst werden können (Kapitel 2). Parallel wurden anhand von Verwachsungsversuchen sowohl für baubotanische Zwecke geeignete Verbindungstechniken entwickelt als auch unterschiedliche Baumarten bezüglich ihrer Verwachsungseigenschaften untersucht (Kapitel 3). Neben diesen Techniken und praktischen Verfahren, die notwendige Voraussetzungen für die Realisierung baubotanischer Bauten schaffen, gilt es jedoch auch, Entwurfsmethoden zu entwickeln, die gewährleisten, dass die künstlich gebildeten Pflanzenstrukturen langfristig (über)lebensfähig sind und die beabsichtigte Zielsetzung mit der tatsächlich eintretenden Entwicklung übereinstimmt. Dieser Aspekt wurde anhand des Entwurfs und der Realisierung eines prototypischen Bauwerks, des Projekts „baubotanischer Turm“, untersucht. Dabei wurde zum einen versucht, auf botanischen Wachstumsregeln basierende Entwurfsregeln zu erarbeiten, zum anderen sollte das Projekt aber auch dazu dienen, die entwickelten Techniken und Verfahren in der Praxis anzuwenden und die prinzipielle Machbarkeit des Ansatzes zu demonstrieren (Kapitel 4).

2 Produktion und biomechanische Charakterisierung von Pflanzen als lebendes Konstruktionsmaterial

2.1 Einleitung

Wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, werden baubotanische Konstruktionen aus Pflanzen bzw. Pflanzenteilen und technischen Bauteilen (z. B. Stahlprofilen) gebildet, die derart zusammengefügt werden, dass durch Verwachsungsprozesse mechanisch und physiologisch leistungsfähige Strukturen entstehen. Dabei werden die Pflanzen als eine Art „lebendes Halbzeug“ aufgefasst und eingesetzt: Es werden unverzweigte Pflanzen bzw. Triebe genutzt, die so gebogen und miteinander verbunden werden, dass die gewünschten Formen bzw. Strukturen entstehen. Dieser Ansatz leitet sich wie beschrieben aus dem Wachstumsmuster tropischer Würgefeigen ab (vgl. Abschnitt 1.4.3) und ist darüber hinaus darin begründet, dass die pflanzlichen Konstruktionselemente jederzeit verfügbar sein sollten. Daher erscheint es sinnvoller, mit möglichst jungen Standardelementen zu konstruieren, und nicht mit älteren, speziell geformten oder spezifisch verzweigten Pflanzen, da deren Form bereits Jahre im Voraus bekannt sein müsste, um das Wachstum währen der Anzuchtzeit entsprechen beeinflussen zu können.[58]

2.1.1 Anforderungsprofil und Zielsetzung

Damit aus einfachen und standardisierten pflanzlichen Grundelementen vielfältige und komplexe Formen gebildet werden können, müssen diese eine Reihe von Anforderungen erfüllen. Sie sollten insbesondere über einen einzigen, möglichst geraden und unverzweigten Hauptrieb verfügen, der bei einer möglichst großen Gesamtlänge in engen Radien gebogen werden kann. Pflanzen, die diesem Ziel entsprechen, sind jedoch in Baumschulen bei den meisten Arten nicht erhältlich, da das übliche Produktionsziel in der Regel der typische Hochstamm ist, d. h. ein möglichst standfester Baum mit geradem Stamm und verzweigter Krone. Das für die Baubotanik notwendige Pflanzenmaterial muss also eigens produziert werden und es sind entsprechende Produktions- bzw. Kulturverfahren zu entwickeln.

Dementsprechend wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersucht, inwiefern mithilfe spezieller Anzuchtmethoden möglichst lange und biegsame Triebe erzeugt werden können. In einem zweiten Schritt wurden die so erzeugten Triebe morphologisch, biomechanisch und anatomisch möglichst exakt beschrieben, um so Eigenschaften, die für die baubotanische Verwendung wichtige sind, erfassen und deren Zustandekommen erklären zu können. Eine der wichtigsten Eigenschaften ist dabei, dass die Triebe sowohl möglichst leicht (d. h. mit geringem Kraftaufwand), als auch möglichst weit (d. h. in kleinen Radien) gebogen werden können. Um sich leicht biegen zu lassen, müssen die Triebe eine möglichst geringe Biegesteifigkeit aufweisen, und daher in erster Linie einen geringen Durchmesser, aber auch ein geringes E-Modul

---

[58] Vgl. hierzu Arborsculpture und den Ansatz von Arthur Wiechula, der die Vorproduktion speziell geformter Bauteile propagierte (WIECHULA, A. 1925. *Wachsende Häuser aus lebenden Bäumen entstehend,* Berlin-Fridenau, Naturbau-Gesellschaft. S. 139f.). Darüber hinaus erscheint die Verwendung junger Triebe auch deshalb sinnvoll, weil diese leichter bzw. schneller und besser verwachsen (vgl. Kapitel 3).

besitzen.[59] Entsprechend wurden in den Untersuchungen die Durchmesser bzw. Flächenträgheitsmomente und E-Moduln der Achsen bestimmt, um die Biegsamkeit zu beschreiben. Der mögliche Biegeradius wiederum hängt neben der Steifigkeit von weiteren biomechanischen Eigenschaften wie der Zugfestigkeit der Achse und dem plastischen Verformungsverhalten ab. Da der kleinstmögliche Biegeradius, der pflanzenphysiologisch möglich ist, für das baubotanische Entwerfen bzw. Konstruieren eine äußerst kritische Größe ist,[60] während andere biomechanische Eigenschaften zunächst von geringerem Interesse sind, wurden die Triebe in speziellen Biege-Bruchversuchen getestet, um deren Bruchverhalten zu beschreiben und den möglichen Biegeradius unmittelbar zu messen.

2.1.2 Pflanzenphysiologischer Hintergrund

Die durchgeführten Versuche zielen darauf ab, das Wachstum der Pflanzen insbesondere durch gezielte Veränderungen der Lichtbedingungen zu beeinflussen, da aus der Pflanzenphysiologie seit langem bekannt ist, dass die morphologischen Größen Trieblänge und Triebdurchmesser u. a. stark von bestimmten Lichtqualitäten abhängig sind. So bilden die meisten Pflanzenarten dünne, lange und unverzweigte Triebe, wenn sie unter sehr starkem Konkurrenzdruck (d.h. bei hoher Pflanzendichte) wachsen. Als Ursache für diese als Schattenfluchtreaktion bezeichnete Veränderung des Wachstumsmusters – die dem angestrebten Produktionsziel bereits recht nahe kommt – werden insbesondere Veränderungen in der spektralen Zusammensetzung des Lichts angesehen.[61] Diese kommen zustande, weil benachbarte Pflanzen mit ihren photosynthetisch aktiven Organen (Blätter und grüne Triebe) einen großen Teil des Sonnenlichts absorbieren, bestimmte Anteile jedoch reflektieren oder transmittieren. Insbesondere die Strahlung in einem Wellenlängenbereich um 735 nm (far red; FR) kann Blätter fast ungehindert passieren oder wird von diesen und anderen grünen Organen reflektiert, während rotes Licht (Wellenlängenbereich um 660 nm; R) großteils absorbiert wird (sog. Grünschatten). Das sich daraus ergebende, sehr niedrige Verhältnis von roter (R) zu dunkelroter (FR) Strahlung wird von den Pflanzen als Hinweis auf möglicherweise konkurrierende Nachbarpflanzen interpretiert (Casal und Smith, 1989; Gilbert et al., 1995).[62] Insbesondere die reflektierte FR-Strahlung benachbarter Pflanzen stellt ein frühes Signal der Konkurrenzerkennung dar, das es Pflanzen ermöglicht, die ihnen zur Verfügung stehenden Ressourcen in eine Steigerung des Längenwachstums zu investieren, bevor sie von ihren Konkurrenten beschattet werden (Ballare et al., 1989; Ballare and Scopel, 1990; Abbildung 32).

Ausgehend von diesen Ergebnissen wurden in den Versuchen spezielle Lichtfilterfolien genutzt, um künstlich Konkurrenzsituationen zu simulieren und die Pflanzen zu einer möglichst starken Schattenfluchtreaktion anzuregen, während ihnen gleichzeitig für eine vitale Gesamtentwicklung eine möglichst hohe photosynthetisch aktive Strahlung zur Verfügung steht. Damit wurde angestrebt, die Grenzen der morphologischen Plastizität auszutesten und Triebe mit maximaler Länge und minimalem Durchmesser zu erzeugen. Vergleichbare Untersuchungen wurden bislang hauptsächlich mit krautigen Pflanzen durchgeführt, sodass in der vorliegenden Arbeit

---

[59] Die Biegesteifigkeit (EI) ist proportional zum Elastiziätsmodul (E) und zur vierten Potenz des Durchmessers bzw. Radius (R): $EI = E*\pi/4*R^4$ (einen kreisförmigen Querschnitt vorausgesetzt).

[60] Viele Detail- und Knotenpunkte können nur gelöst werden, wenn die Pflanzen in sehr engen Radien ($R < 10$ cm) gebogen werden (vgl. z. B. Abbildung 120)

[61] Und nicht – wie man leicht meinen könnte – Veränderungen in der Beleuchtungsstärke.

[62] Die Unterschiede in der relativen Flussrate von roter (R) und dunkelroter (far red, FR) Strahlung werden von der Pflanzen auf biochemischer Ebene mithilfe signalübertragende Photorezeptoren aus der Familie der Phytochrome rezipiert.

erstmals der Einfluss veränderter Lichtqualitäten auf Morphologie, Anatomie und Biomechanik bei mehrjährigen Holzpflanzen unter kontrollierten Gewächshausbedingungen untersucht wurde (vgl. u. a. Gilbert et al., 2001). [63]

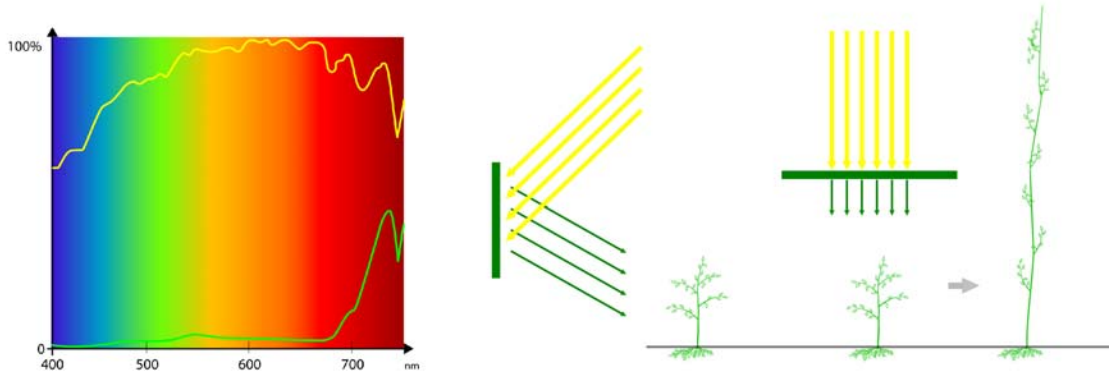


Abbildung 32 Links: Spektrale Zusammensetzung des Sonnenlichts (gelb) und des Grünschattens (grün). Rechts: Steigerung des Längenwachstums durch in der spektralen Zusammensetzung modifiziertes, von Blättern reflektiertes oder gefiltertes Licht. (nach Taiz and Zeiger, 1998 (ergänzt und verändert)

2.2 Material und Methoden

Die Versuche wurden mit gewöhnlicher Platane (*Platanus acerifolia)* durchgeführt, da bei dieser Art im Vorfeld angenommen wurde, dass sie sich für baubotanische Anwendungen besonders gut eignen müsste.[64] Der Versuchszeitraum (Wachstumsdauer) betrug eine Vegetationsperiode, wobei die Versuche dreimal wiederholt wurden. Die erste Wiederholung (2007) diente dazu, das Versuchsdesign zu entwickeln und zu testen. 2008 wurden die Versuche dann mit dem so erarbeiteten Versuchsdesign durchgeführt und die Pflanzen morphologisch, anatomisch und biomechanisch untersucht. 2009 wurden die Versuche nochmals – teilweise mit leicht veränderten Bedingungen – wiederholt, um einige offene Fragen zu klären, wobei Entwicklung und Ergebnis hier nur morphologisch dokumentiert wurden. Neben den Trieben aus der Versuchsreihe 2008 wurden bereits im Winter 2007 vergleichbare, im Freiland gewachsene Triebe[65] geerntet und anatomisch sowie biomechanisch untersucht.

---

[63] Der Einsatz ähnlicher Folien wird bereits für gartenbauliche Anwendungen untersucht, in allen Fällen jedoch mit dem gegenteiligen Produktionsziel, d. h. mit Folien, die wenig FR-Strahlung transmittieren, um möglichst gedrungene Pflanzen zu erzeugen (KRUMFOLZ, L. A. & WILSON, S. B. Growth Control of Salvia x "Indigo Spires" by photselecitive Plastic Films. Annual Meeting of the Florida State Horticultural Society, 2001 Florida. Florida State Horticultural Society, 241 - 242.; DAVILA, J. H., TORRES, V. R., MENDOZA, A. B., RODRIGEZ, H. R., VILLA, V. Z., VELAZQUEZ, J. F. & MAITI, R. K. 2004. Use of photoselective plastic covers for the control of photomorphogenesis in transplanted horticultural crops. *Crop Research,* 28**,** 50 - 59.).

[64] Erfahrungen von Axel Erlandson, (REAMS, R. 2005. *Arborsculpture. Solutions for a small planet,* Williams Oregon, Arborsmith Studios., p. 54 f.); die Annahmen wurden in den Verwachsungsversuchen bestätigt (vgl. Kapitel 3)

[65] Austriebe von auf Kopf geschnittenen Platanen, Königstraße Stuttgart.

2.2.1 Praktische Umsetzung

Um die Lichtbedingungen gezielt Steuern zu können, wurde ein spezielles Gewächshaus mit neun Anzuchtkammern konstruiert (Abbildung 33).[66] Die Kammern (Abmessungen LxBxH ca. 120x85x550 cm) sind voneinander durch lichtdichte Wände (weiß lackierte Holzplatten) getrennt und verfügen an den Außenseiten über Folientüren,[67] sodass alle Kammern von zwei Seiten belichtet werden. Der Gewächshausboden besteht aus einem aufgeständerten Holz-Lattenrost, die Dachflächen wurden ebenfalls aus weiß lackierten Holzplatten konstruiert, wobei oberhalb jeder Pflanze ein mit Gewächshausfolie bespanntes Loch mit 35 cm Durchmesser angeordnet wurde. Das Gewächshaus wurde so aufgestellt, dass es in Längsrichtung annähernd Ost-West ausgerichtet ist (Standort: Stuttgart, Innerer Nordbahnhof 1). Die Pflanzen wurden ca. alle 30 cm an Bambusstäben angebunden, sodass sie keinen mechanischen Reizungen (z. B. Windschwingung) ausgesetzt waren.[68]

Abbildung 33 Längs- und Queransicht des Anzuchtgewächshauses (Versuchsdesign 2008).

In jeder Kammer wurden sechs Pflanzen in 2 Reihen zu jeweils 3 Pflanzen aufgestellt.[69] In beiden ausgewerteten Versuchsreihen (2008 und 2009) wurde mit einjährig bewurzelten Steckhölzern der Sortierung 50-80 gearbeitet,[70] die vor dem Pflanzen auf zwei bis drei Augen (Knospen)

---

66 2007 wurden 6 Kammern realisiert, 2008 wurden 3 weitere ergänzt.

67 2 übereinander angeordnete Türen mit insgesamt ca. 4 m Höhe; transparente Gewächshausfolie (folitec UV5, folitec, Deutschland) auf Holzrahmen gespannt.

68 Jegliche Form mechanischer Reizungen, z.B. das Biegen Schütteln oder auch Berühren der Pflanzen führt in der Regel zu einer Steigerung des Dickenwachstums und/oder zu einer Reduktion des Längenwachstums. Einen umfassenden Überblick hierzu gibt: MITCHELL, C. A. & MYERS, P. N. 1995. Mechanical Stress Regulation of Plant Growth and Development. *Horticultural Reviews,* 17**,** 1 - 42.

69 Aufgrund dieser relativ dichten Aufstellung herrschen in allen Kammern natürliche Konkurrenzbedingungen, die durch das Versuchsdesging durch Filterfolien etc. künstlich gesteigert wurden.

70 D. h. einjährige, als Stecklinge vermehrte Jungpflanzen mit einer Trieblänge von 50 bis 80cm (Bezugsquelle: Baumschule Schlegel, Riedlingen.

zurückgeschnitten wurden. Die Pflanzen wurden ca. Mitte März gepflanzt[71] und zunächst in einem gesonderten, auf min. 15°C temperierten Gewächshaus vorgezogen und erst am 08.06. (2008) bzw. 14.06. (2009) in dem Versuchsgewächshaus aufgestellt. Dabei wurden kräftig und möglichst gleich entwickelte Pflanzen ausgewählt und alle Triebe bis auf den kräftigsten Haupttrieb entfernt. Im Verlauf der Vegetationsperioden wurden alle Pflanzen wöchentlich mit Universal Pilzfrei (Bayer) und bei sichtbarem Schädlingsbefall mit CAREO Schädlingsfrei (Celaflor) behandelt, da aufgrund relativ hoher Luftfeuchte und geringer Luftwechselrate ein erhöhte Gefahr durch Pilzbefall bestand (Vorversuche 2007). Sofern im Verlauf Seitenknospen austrieben, wurden diese Seitentriebe bei den wöchentlichen Kontrollen entfernt.

Um in den Anzuchtkammern zu starke Temperaturschwankungen (insbesondere übermäßige Temperaturspitzen) zu vermeiden und eine ausreichende Luftwechselrate zu gewährleisten, wurden eine technische Lüftung und ein einfaches Sprühnebel-Kühlsystem installiert.[72] Die Lüftung erfolgte über 9 einfache Abluftventilatoren, die im Dachbereich jeder Kammer installiert wurden (Leistung: 180m^3/h; Dauerbetrieb). Die Kühlung erfolgte über Sprühnebeldüsen (DAN fogger, 7 l/h), die ebenfalls im Dachbereich jeder Kammer angebracht und zentral über ein Magnetventil gesteuert wurden. Als Steuergröße diente das arithmetische Mittel der über Funksensoren[73] in jeder Kammer gemessenen Temperatur. Beginnend mit einem Sprühintervall von 15sec/min bei 22°C wurde die Intervalllänge mit zunehmender Temperatur schrittweise auf 60sec/min (Dauerbetrieb) bei 28°C gesteigert.[74] Dadurch konnte die Temperatur fast immer unter 30°C gehalten werden und es traten keine nennenswerten Temperaturunterschiede zwischen den Kammern auf. Die Bewässerung der Pflanzen erfolgte bedarfsweise über eine Tropfbewässerung, wobei eine Wässerung aufgrund der Befeuchtung durch die Sprühnebeldüsen nur äußerst selten nötig war.

Die Veränderung der Lichtqualität erfolgte auf zwei unterschiedliche Arten. Bei der ersten Variante wurden die Gewächshaustüren (und tlw. auch die Dachöffnungen) mit Lichtfilterfolien bespannt, um die spektrale Zusammensetzung der Strahlung insgesamt zu verändern. Bei der zweiten wurden nur die Achsen der Pflanzen mit Filterfolien umhüllt, sodass die Blätter dem ungefilterten Sonnenlicht ausgesetzt waren. (Abbildung 34) In beiden Fällen wurden Lichtfilterfolien aus der Beleuchtungstechnik verwendet (Lee-Filters, UK), die über spezifische, vom Hersteller angegebene Transmissionskurven verfügen.[75]

2.2.2 Versuchsdesign 2008

Bei der Versuchsreihe 2008 wurde die erste Variante (Bespannung der Gewächshaustüren) in den Kammern 1, 3, 4 und 6 untersucht, die zweite (Umhüllung der Achsen) in den Kammern 2, 5, 7 und 8. Kammer 9 diente als Kontrolle. [76] In den Anzuchtkammern 1 und 6 wurden die Türen

---

[71] Pflanzsubstrat: Lignoplant Containersubstrat, vorgedüngt mit 4kg Horngries und 3kg Basakote (8 – 9 M)/m³, Firma Hauke Erden. Topf: 35-Liter-Gewebcontainern (plantinbag PIB35, Firma Bosse, Wirnsheim). Vor dem Topfen wurden die Pflanzen zur Verbesserung des Anwurzelns in Bio-Algihum Wurzelflott K (Firma Aqua Terra) entsprechend Herstellerangaben getaucht.

[72] Da die Türen der Lichtfilterung dienen, konnte nicht wie sonst üblich gelüftet werden.

[73] FS20 HMS 100TF, ELV Elektrotechnik

[74] Die Temperaturmessung erfolgte alle fünf Minuten. Die Datenerfassung und Verarbeitung erfolgte über einen Steuer-PC mittels der Software fs20 Studio (ELV Elektronik) und eines einfachen Steuerskrips in der softwareeigenen Programmiersprache.

[75] Die Herstellerangaben wurden in eigenen Laboruntersuchungen überprüft und bestätigt.

[76] Nummerierung der Kammern siehe Abbildung 33; die Anordnung/Verteilung der Anzuchtkammern wurde zufällig bestimmt.

mit einer Folie bespannt, die für FR-Licht relativ durchlässig ist, während rotes Licht großteils absorbiert wird (Lee #707, Abbildung 35), sodass ein sehr geringes R/FR-Verhältnis erzeugt wird (vgl. Abschnitt 2.1.2). Obwohl die Folie einen großen Anteil des für die Photosynthese wichtigen blauen Lichts durchlässt, wird die photosynthetisch aktive Strahlung durch die Lichtfilterung insgesamt reduziert. Um den Einfluss der veränderten spektralen Zusammensetzung des Lichts getrennt von der Veränderung der Beleuchtungsstärke beurteilen zu können, wurden die Türen der Anzuchtkammer 4 mit einem Schattiernetz[77] bespannt, das zu einer vergleichbaren Reduktion der Lichtstärke führt, ohne die spektrale Zusammensetzung spezifisch zu beeinflussen.[78] In Abbildung 35 sind die Beleuchtungsstärken relativ zur Kontrollkammer angegeben, wobei die Beleuchtungsstärke in der Kontrollkammer je nach Wetter und Sonnenstand bereits 25% bis 55% geringer war als im Freiland.[79]

In Kammer 3 wurden die Türen zweilagig mit Lichtfilterfolie bespannt, und zwar mit der beschriebenen Folie Lee #707 und zusätzlich mit der Folie Lee #179, die sich insbesondere dadurch auszeichnet, dass im blauen Bereich relativ wenig Licht transmittiert wird. Diese Folienkombination wurde gewählt, da das Längenwachstum eventuell auch über die Menge des blauen Lichts bzw. das Verhältnis zwischen blauem und rotem Licht beeinflusst wird. (vgl. z.B. Schopfer et al., 2010)

Abbildung 34 Umhüllung der Pflanzenachsen mit Filterfolie. In der Mitte Filterfolie zur Demonstration des Aufbaus einseitig entfernt. Rechts ist die Austrittsöffnung eines Blattstils erkennbar.

Auch zur Umhüllung der Pflanzenachsen mit Lichtfilterfolien (Kammern 2 und 7) wurde eine Kombination der Folien Lee #707 und Lee #179 verwendet, sodass fast ausschließlich FR-Licht an die Oberfläche der Stängel gelangt. Hintergrund dieses Versuchsdesigns ist, dass das Längenwachstum bei gleicher photosynthetisch aktiver Strahlung (PAR) gut mit dem R/FR-Verhältnis des Lichtes parallel zum Boden korreliert, das im Wesentlichen von den (grünen)

---

77 shadow 150, Schattierwert 72%, Firma DM-Folien, Deutschland

78 Die Messungen der photosynthetisch aktiven Strahlung erfolgte in allen Anzuchtkammern mittels eines Quantum Meters (Apogee Instruments Model QMSS-ELEC, Cosinuskorrigierter Sensor, waagrecht und mittig auf Höhe OK Pflanzkübel platziert) Repräsentative Messungen erfolgten sowohl bei voller Sonne (21.03.2009) als auch bei gleichmäßiger Bewölkung (01.04. 2009; jeweils ca. 12:00 Uhr MESZ).

79 In Kontrollmessungen im Verlauf der Vegetationsperiode 2009 wurden keine größeren Veränderungen dieser relativen Werte festgestellt. Zum Messen wurden die Pflanzen kurzfristig aus den Kammern entfernt.

Trieben und weniger von den horizontal ausgerichteten Blättern absorbiert wird (Ballare und Scopel, 1990; Ballare et al., 1989). Daraus wurde die Hypothese abgeleitet, dass sich das Längenwachstum steigern lassen müsste, indem ausschließlich das auf die Achsen treffende Licht gefiltert und so nur hier das R/FR-Verhältnis verringert wird. Bei der praktischen Umsetzung wurden ca. 4 cm breite Streifen der beiden Lichtfilterfolien an den Rändern mit dünnen Streifen doppelseitigen Klebebands aufeinander geklebt und mit ca. 6mm breitem selbstklebendem Klettband versehen. Mit jeweils zwei solcher doppellagiger Streifen wurden dann die Pflanzenachsen umhüllt, indem die Klettstreifen fest aufeinander gedrückt wurden. An den Bereichen der Blattstile wurden die Klettbänder nicht zusammengedrückt, sodass eine kleine Öffnung für den Blattstil frei blieb (Abbildung 34). Die Streifen wiesen eine Länge von ca. 60 cm auf und wurden auch an den Enden mittels Klettbändern verbunden. An der Triebspitze wurden die Streifen nach unten umgebogen, sodass die oberen 2 bis 5 cm des Triebes nicht umhüllt waren. Im oberen Bereich der Triebe , in dem sich die Internodien noch strecken und sich daher die Abstände der Blätter mit der Zeit vergrößern, wurden größere Abschnitte der Klettbänder im Bereich des Blattansatzes nicht zusammengedrückt, sodass eine schlitzartige Öffnung frei blieb, in der sich der Blattstil mit dem Längenwachstum verschieben konnte. Während der Haupt-Wachstumszeit wurde der korrekte Sitz der Filterstreifen zweimal wöchentlich kontrolliert und im oberen Achsenbereich dem Längenwachstum angepasst.

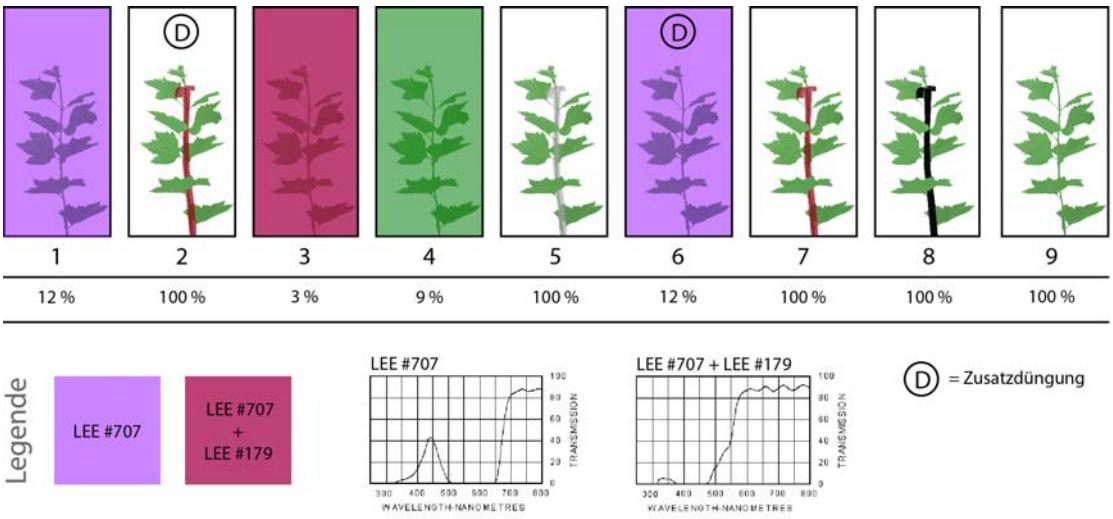


Abbildung 35 Übersicht Versuchsdesign 2008. Erklärung siehe Text.

Durch die Lichtfilterfolien wird an den Achsen die Beleuchtungsstärke reduziert und es kommt zu weiteren Nebeneffekten wie z. B. einer Veränderung des Mikroklimas und einer mechanischen Reizung. Um die Auswirkungen dieser Einflussfaktoren möglichst getrennt voneinander beurteilen zu können, wurden vergleichbare Versuche mit transparenter und schwarzer (lichtdichter) PVC-Folie angelegt.[80] (Kammern 5 und 8)

Zusätzlich zur Veränderung der Lichtqualitäten wurde in zwei Kammern der Einfluss der Nährstoffversorgung (Düngung) untersucht. Die Pflanzen in den Kammern 2 und 6 wurden zusätz-

[80] Bei Umhüllung mit transparenter Folie kommt es zu keiner wesentlichen Veränderung der Lichtfaktoren, es treten aber ähnliche Nebeneffekte auf. Bei lichtdichter Umhüllung kommt es zu einer starken Reduktion der Beleuchtungsstärke an der Achse ohne spezifische Veränderung der spektralen Zusammensetzung des Lichts.

lich zu der im Substrat enthaltenen Grunddüngung mit 100g/Container Blaukorn Entec (Compo) nachgedüngt.[81]

2.2.3 Versuchsdesign 2009

Wie beschrieben wurden die Versuche 2009 nochmals wiederholt, wobei einige Änderungen im Versuchsdesign vorgenommen wurden. Aufgrund der sehr geringen Beleuchtungsstärke und dem entsprechend geringem Wachstum wurde die Variante in Kammer 3 nicht wiederholt. Auch wurden keine weiteren Düngungsversuche durchgeführt. Da in den Kammern 1, 3 und 6 durch die Dachöffnungen ungefiltertes Licht in den Wachstumsraum gelangen konnte, kann aus den Transmissionsspektren nicht auf die spektrale Zusammensetzung des Lichts im Wachstumsraum rückgeschlossen werden.[82] Um einen Einfluss des von oben eindringenden Lichts ausschließen zu können, wurden 2009 in Kammer 1 auch die Dachöffnungen mit der Folie #707 bespannt. Im Wachstumsraum der Pflanzen[83] kam es dadurch nicht zu Veränderungen der Beleuchtungsstärke.

Die gemessene Beleuchtungsstärke in Kammer 4 (Schattiergewebe) war 2008 etwas geringer als in den Kammern 1 und 6 (Folien #707), weshalb sich Kammer 4 nur bedingt als Kontrolle zu den beiden Kammern mit Filterfolie eignet. Um eine direkte Vergleichbarkeit zu ermöglich, wurde 2009 daher in Kammer 3 die Beleuchtungsstärke an die Kammern 1 und 6 angeglichen, indem so viele Lagen gering schattierender Vliese angebracht wurden, bis exakt die gleiche Beleuchtungsstärke wie in den mit Lichtfilterfolie ausgestatteten Kammern gemessen wurde (vgl. Abbildung 36).

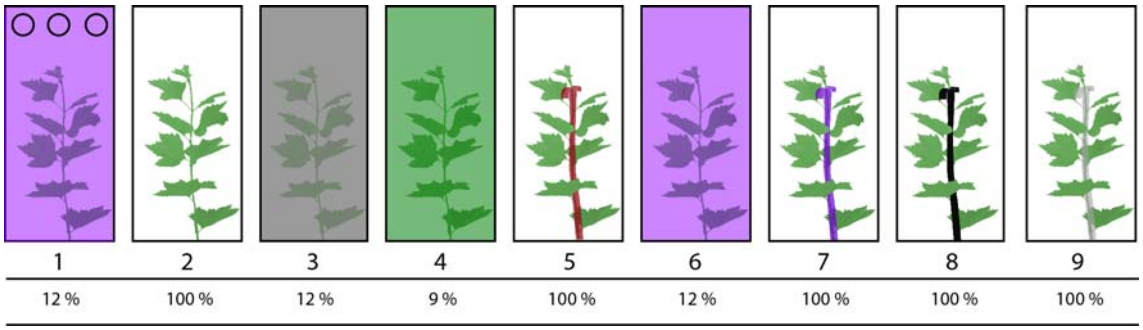


Abbildung 36 Übersicht Versuchsdesign 2009. Legende siehe Abbildung 35, Erklärung siehe Text.

Bei den Versuchen mit dunkler Umhüllung der Triebe (schwarze Folie und Filterfolie) kam es 2008 zu Hitzeschäden im oberen Triebbereich. Daher wurde 2009 eine innen schwarze und außen weiße Folie verwendet, um die Sonnenstrahlung möglichst zu reflektieren. Bei der Umhüllung mit Filterfolie wurde 2009 eine Variante angelegt, bei der nur die Folie #707 verwendet wurde, um den Einfluss eines geringen R/FR-Verhältnisses bei etwas größerer Beleuchtungsstärke an der Achse beurteilen zu können.

---

[81] Das Versuchsdesign in diesen Kammern wurde für die Düngungsversuche ausgewählt, da aufgrund der Vorversuche (2007) bei diesen Varianten mit einer großen Trieblänge bei relativ geringem Durchmesser gerechnet wurde. Mit der Düngung wurde hier untersucht, inwieweit diese Parameter durch Maximierung der Nährstoffversorgung weiter gesteigert werden können. Die Düngergabe wurde auf 6 Zeitpunkte im Verlauf der Vegetationsperiode verteilt.

[82] Es erfolgte keine Messung der spektralen Zusammensetzung des Lichts in den Kammern.

[83] D. h. in diesem Fall bis maximal 2 m Höhe, vgl. Abschnitt 2.3

2.2.4 Untersuchungen

Zur Dokumentation der morphologischen Entwicklung wurden die Längen und die Basisdurchmesser der Triebe während der Wachstumszeit ca. alle drei Wochen gemessen.[84] Aus den am Ende der Vegetationsperiode gemessenen Werten wurde der Schlankheitsgrad berechnet, der als Verhältnis von Trieblänge und Basisdurchmesser eine wichtige Kenngröße für die baubotanische Eignung darstellt und den Vergleich unterschiedlich stark gewachsener Pflanzen ermöglicht.[85] Darüber hinaus wurden am Ende der Vegetationsperiode die Achsendurchmesser im Abstand von 30cm gemessen, um Aufschluss über den Verlauf der Durchmesser entlang der Achsen (Taper) zu erhalten.[86]

Im Winter 2008/09 wurden die Triebe der Versuchsreihe 2008 geerntet und biomechanisch sowie anatomisch untersucht. Die Triebe wurden an unterschiedlichen Zeitpunkten im Dezember und Januar in zufälliger Reihenfolge entnommen und bis zur biomechanischen Untersuchung eingeschlagen in feuchten Tüchern in einem Kühlschrank gelagert. Die biomechanischen Messungen wurden binnen maximal 5 Tagen nach dem Ernten durchgeführt, um Beeinträchtigungen der Eigenschaften durch die Lagerung möglichst zu vermeiden. Für die Untersuchungen wurden die Triebe in 6 bis 10 Abschnitte geeigneter Länge unterteilt, wobei die Schnittflächen mit Baumwachs versiegelt wurden, um eine Austrocknung zu vermeiden.[87] Für die meisten dieser Abschnitte wurden die Beigesteifigkeit ermittelt und das strukturelle E-Modul (vgl. Speck, 1990) berechnet. Die Biegesteifigkeit wurde mit Hilfe eines Versuchsaufbaus zur 4-Punkt-Biegung mit außen aufliegender Schaukel zur symmetrischen Massenapplikation durchgeführt.. Bei dieser Apparatur werden die Achsenabschnitte auf zwei Auflagepunkten (Rundstahl) aufgelegt und die Schaukel zur Massenapplikation an den seitlich auskragenden Enden der Achsenabschnitte eingehängt. Auf die Schaukel werden anschließend Gewichte aufgelegt und die Auslenkung der Achsen mittig zwischen den beiden Auflagerpunkten mit einem Mikroskop mit Mikroskala gemessen (siehe: Speck, 1990; Hlawatsch et al., 1988/89; Speck und Rowe, 1999). In der Regel wurden 5 bis 7 Gewichte aufgelegt und die Auslenkung wurde 30 Sekunden nach Massenapplikation gemessen. Mit Hilfe der Steigung b (Trendlinie) des so ermittelten Kraft-Weg-Diagramms wurde die Steifigkeit nach der Formel $EI=(l^2*a)/(16*b)$ berechnet, wobei l und a die Schaukelbreite bzw. den Abstand zwischen Schaukel und Auflagerpunkt (mm) bezeichnen. (Abbildung 37 rechts)

Die für die Berechnung des E-Moduls notwendige Ermittlung der Flächenträgheitsmomente erfolgte durch Mittelung von je 3 Durchmessern unter der Annahme eines elliptischen Querschnitts. Gemessen wurde an den Auflagern der Belastungsschaukel (Biegeapparatur) sowie mittig zwischen diesen beiden Punkten, und zwar immer in Belastungsrichtung (Hauptachse der Ellipse D_1) sowie 90° versetzt dazu (D_2). Die drei in eine Richtung gemessenen Werte wurden arithmetisch gemittelt.

---

[84] Gemessen wurde mit einer Schieblehre ca. 3 cm über der Triebbasis, dabei wurden zwei Durchmesser (90° gegeneinander versetzt) erfasst und das arithmetische Mittel dieser Werte als Basisdurchmesser notiert.

[85] Hierbei wurden die Messwerte vom 21.09.2008 bzw. 15.09.2009 verwendet, da die Triebe zu diesem Zeitpunkt ihre maximale Länge und Dicke erreicht hatten (vgl. Abbildung 39).

[86] 2008 erfolgten diese Messungen ebenfalls alle 3 Wochen während der Vegetationsperiode; Daten nicht dargestellt. Bei allen Messungen wurden bei der Berechnung des arithmetischen Mittels jeweils die Standardabweichung berechnet, vgl. hierzu Abschnitt 3.2.7.1 bzw. Fußnote 184.

[87] Die Achsenabschnitte sollten für die E-Modul-Messung ein Länge/Durchmesser-Verhältnis von mindestens 20:1 aufweisen.

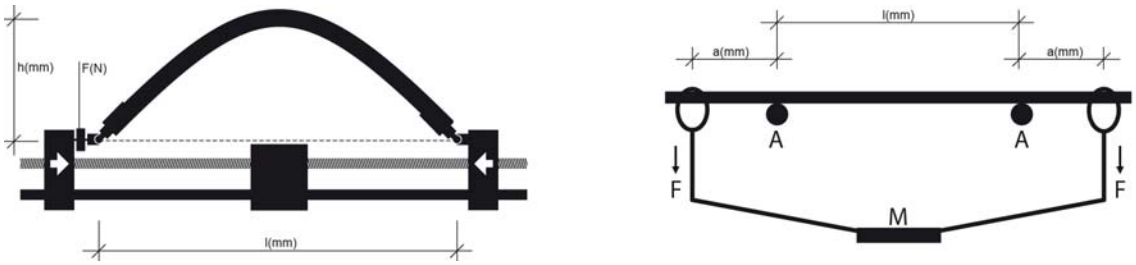


Abbildung 37 Links: 2-Punkt Biege-Bruchapparatur; Rechts: Apparatur zur 4-Punkt-Biegung (nach Speck, 1990); Erklärung siehe Text.

Dieses manuelle, relativ zeitaufwändige Verfahren hat den Vorteil, dass die Steifigkeit mit einfachen Mitteln relativ präzise ermittelt werden kann. Allerdings besteht bei krummen Achsenabschnitten die Gefahr, dass sich die Proben beim Auflegen der Gewichte verdrehen und so das Messergebnis verfälscht wird. In den durchgeführten Untersuchungen war dies insbesondere in den basalen Achsenabschnitten der Fall, die häufig eine deutliche Krümmung aufwiesen. Gleichzeitig hängt die Qualität der Messergebnisse entscheidend von der Ermittlung des Flächenträgheitsmoments ab. Da hier die Durchmesser insgesamt in der vierten Potenz eingehen ($D_1^3 * D_2$), ist die korrekte Ermittlung der Durchmesser eine äußerst kritische Größe und die tatsächliche Querschnittsform sollte von der Annahme konstant elliptischer Querschnitte möglichst nicht abweichen. Insbesondere in den obersten (apikalen) Achsenabschnitten wiesen die Proben jedoch nicht nur eine stark elliptische Querschnittsform auf, auch veränderte sich die Ausrichtung der Ellipsen-Hauptdurchmesser bei jedem Nodium. Und da meist Abschnitte mit zwei bis vier Internodien gemessen wurden, hat die Berechnung des Flächenträgheitsmoments für die apikalen Abschnitte hier eine relativ große Ungenauigkeit.

Aufgrund dieser Umstände zeigten die ermittelten E-Module im basalen und apikalen Bereich eine sehr große Streuung und es traten häufiger unrealistische Ausreißer in den Werten auf. Da sich einige basale Abschnitte nicht für die Messung eigneten (stark gekrümmt etc.), lagen in diesen Bereichen teils auch relativ wenige Messergebnisse vor. Daher werden im Ergebnisteil nur die E-Module des mittleren Drittels der Triebe dargestellt.[88] Dies erscheint auch für die Beschreibung der Pflanzen aus baubotanischer Sicht ausreichend.[89]

Nach den Biegeversuchen zur Ermittlung der E-Moduln mittels Vierpunktbiegung wurden alle Achsenabschnitte soweit dies möglich war[90] auf einer speziellen 2-Punkt-Biegeappartur bis zum Bruch gebogen (Eulersches Knicken), um die größtmögliche Krümmung zu ermitteln und das Bruchverhalten zu beschreiben. Bei dieser Biegeapparatur wird die Probe zwischen zwei gelenkig gelagerten Auflagerpunkten mit leichter Vorkrümmung eingespannt. Mittels eines Schneckengetriebes wird der Abstand zwischen diesen Punkten kontinuierlich verkürzt[91] und die Achse beult immer weiter aus (Abbildung 37 Links). Die dabei entstehende horizontale Aufla-

---

88 In diesem Achsenabschnitt/Bereich lagen in der Regel je Anzuchtvariante 12 bis 15 (mindestens 10) E-Modul-Messungen vor. Die Durchmesserabnahme war in diesem Bereich relativ gering (vgl. Abbildung 41), sodass die Annahme konstant elliptischer bzw. runder Querschnitte zutreffend ist.

89 Aus Sicht biomechanischer Grundlagenforschung erscheint darüber hinaus eine eingehendere Untersuchung der Verteilung der E-Modul-Werte entlang der Achsen von größerem Interesse. Aufgrund der Datenlage scheinen derartige Untersuchungen zwar prinzipiell möglich, bedürfen jedoch umfangreicherer statistischer Analysen, die im weiteren Untersuchungen bzw. Auswertungen in Zusammenarbeit mit der PBMG Freiburg durchgeführt werden sollen.

90 Auch hier müssen die Achsenabschnitte möglichst gerade sein.

91 Vorschubgeschwindigkeit (Verkürzung) ca. 40 mm/min

gerkraft F wird an einem Auflagerpunkt gemessen. Aus der Auslenkung h (gemessen über Cameratracking) und der Kraft F wird das Biegemoment berechnet (M=F*h). Aus der Länge l (Abstand der Auflagerpunkte) und der Auslenkung h wird die Krümmung K bzw. der Biegeradius r errechnet, wobei eine Splinefunktion zugrunde gelegt wird.[92] Die Versagenspunkte wurden durch visuelle Beurteilung (sichtbarer Knick bzw. Bruch) und anhand von Biegemoment-Krümmungs-Diagrammen bestimmt. Alle Bruchvorgänge wurden auf Video aufgezeichnet (Webcam) und es wurden nur solche Versagensereignisse in die Auswertung aufgenommen, bei denen das Versagen visuell erkennbar war und gleichzeitig ein signifikanter Abfall des Biegemoments auftrat.[93]

Anschließend wurden die Achsen für die anatomischen Untersuchungen unmittelbar neben der Versagensstelle mit einer Zugsäge senkrecht durchtrennt. Die Schnittflächen wurden mit einer Rasierklinge glattgeschnitten und mit Phloroglucin-Salzsäure angefärbt, um die Gewebe(gruppen) Cortex (Rinde), Xylem (Holz) und Mark exakt identifizieren zu können. Die Proben wurden mit der Schnittfläche (zusammen mit einem Tropfen Wasser) auf einen Flachbettscanner aufgelegt und mit 2400dpi gescannt (vgl. Abschnitt 3.2.7.3). Der Anteil der oben genannten Gewebe an der Querschnittsfläche wurde bestimmt, indem die entsprechenden Bereiche in der Software Optimas 6.5 möglichst exakt umfahren wurden (Wacom-Zeichenboard). Der Anteil der einzelnen Gewebe am Flächenträgheitsmoment wurde berechnet, wobei als Nullpunkt der Schwerpunkt der gesamten Achse angenommen wurde.[94]

---

[92] $K=12*h/l^2$; $r=1/K$

[93] Dieser zeigt deutlich an, dass Teile der Gewebe mechanisch versagen und damit weniger Kraft aufnehmen können. Es ist anzunehmen, dass es dadurch auch zu deutlichen Beeinträchtigungen des Stofftransports (Xylemstrom) kommt, die in der baubotanischen Praxis bzw. Anwendung vermieden werden sollte. Die Pflanzen werden beim baubotanischen Formen nicht unbedingt nur im elastischen Bereich gebogen. Ziel ist ja nicht, dass sie sich im Prinzip wieder unbeschadet in die Ausgangslage zurückbiegen können. Vielmehr können sie so weit gebogen werden, dass sie physiologisch nicht beeinträchtigt werden.

[94] Berechnung basierend auf einem Script von Tancrède Alméras (LMGC, Montpellier)

2.3 Ergebnisse

2.3.1 Versuchsreihe 2008

2.3.1.1 Allgemeine Entwicklung

In der Versuchsreihe 2008 zeigten so gut wie alle Pflanzen eine vitale und insgesamt arttypische Entwicklung. Bei einigen Pflanzen trat vorübergehend leichter Pilzbefall auf, der die Entwicklung jedoch kaum beeinträchtigte.[95] Bei zwei Pflanzen mit lichtdichter Umhüllung der Achsen und bei einer Pflanze mit Filterfolienumhüllung starben bzw. brachen die Triebspitzen gegen Ende der Vegetationsperiode ab, nachdem es zu Hitzeschäden im obersten Bereich der Umhüllung gekommen war. Diese Pflanzen wurden in der Auswertung nicht berücksichtigt. Des Weiteren entwickelte sich in Kammer 9 (Kontrolle) eine Pflanze langsamer als die anderen, ohne dass hierfür Gründe erkennbar waren. Die Pflanze wurde in der Auswertung berücksichtigt. Bei allen Pflanzen, bei denen die Blätter der vollen Beleuchtungsstärke ausgesetzt waren (Kammern 2, 5, 7, 8 und 9) traten regelmäßig Seitentriebe auf, die wie beschrieben entfernt wurden. Bei den meisten mit Folie umhüllten Achsen wurde ein grünlich bis grünlich-brauner Algenbelag auf der Rinde festgestellt, bei vielen der mit Lichtfilterfolie oder schwarzer PVC-Folie umhüllten Pflanzenachsen kam es teilweise auch zu hellgrüner bis weißlicher Verfärbung der Rinde (Ausbleichen) und bei einigen dieser Pflanzen insbesondere an den Nodien im unteren Achsenabschnitt zur Bildung von Adventivwurzeln.

Abbildung 38 Entwicklungszustand Mitte September 2008 exemplarisch in einigen Anzuchtkammern.

2.3.1.2 Morphologie

Die gemessenen Längen und Durchmesser der Triebe unterscheiden sich am Ende der Vegetationsperiode in den einzelnen Kammern deutlich (Abbildung 38; Abbildung 39 rechts oben). Die Pflanzen in den Kammern 3 (Filterfolie lee707 + lee179) und 4 (Schattiergewebe) zeigten mit einer durchschnittlichen Trieblänge von ca. 110 bzw. ca. 84 cm das mit Abstand geringste

[95] Prophylaktische Behandlung mit Fungiziden, siehe Abschnitt 2.2.1; stärker befallene Blätter entfernt.

Längenwachstum, wobei die Werte in Kammer 3 etwas höher lagen. Damit erreichten diese Triebe nicht einmal die Hälfte der Trieblänge der Kontrollpflanzen, die eine Trieblänge von ca. 233 cm aufwiesen. Auch die Trieblängen der Pflanzen in den Kammern 1 und 6 (Filterfolie Lee #707) blieben mit 183 bzw. 194 cm hinter den Kontrollen zurück, wobei die zusätzlich gedüngten Pflanzen geringfügig länger wurden als die nicht nachgedüngten.

Demgegenüber wurden die mit lichtdichter oder filternder Folie umhüllten Triebe durchschnittlich 25 cm länger als die der Kontrollpflanzen, wobei zwischen diesen beiden Varianten so gut wie keine Unterschiede festgestellt wurden (Kammern 7 und 8). Bei Umhüllung mit Filterfolien und zusätzlicher Düngung (Kammer 2) ergab sich sogar eine Steigerung der Trieblänge von ca. 50 cm gegenüber den Kontrollpflanzen. Demgegenüber kam es bei transparenter Umhüllung zu einer geringfügigen Reduktion der Trieblänge um ca. 15 cm (Kammer 5).

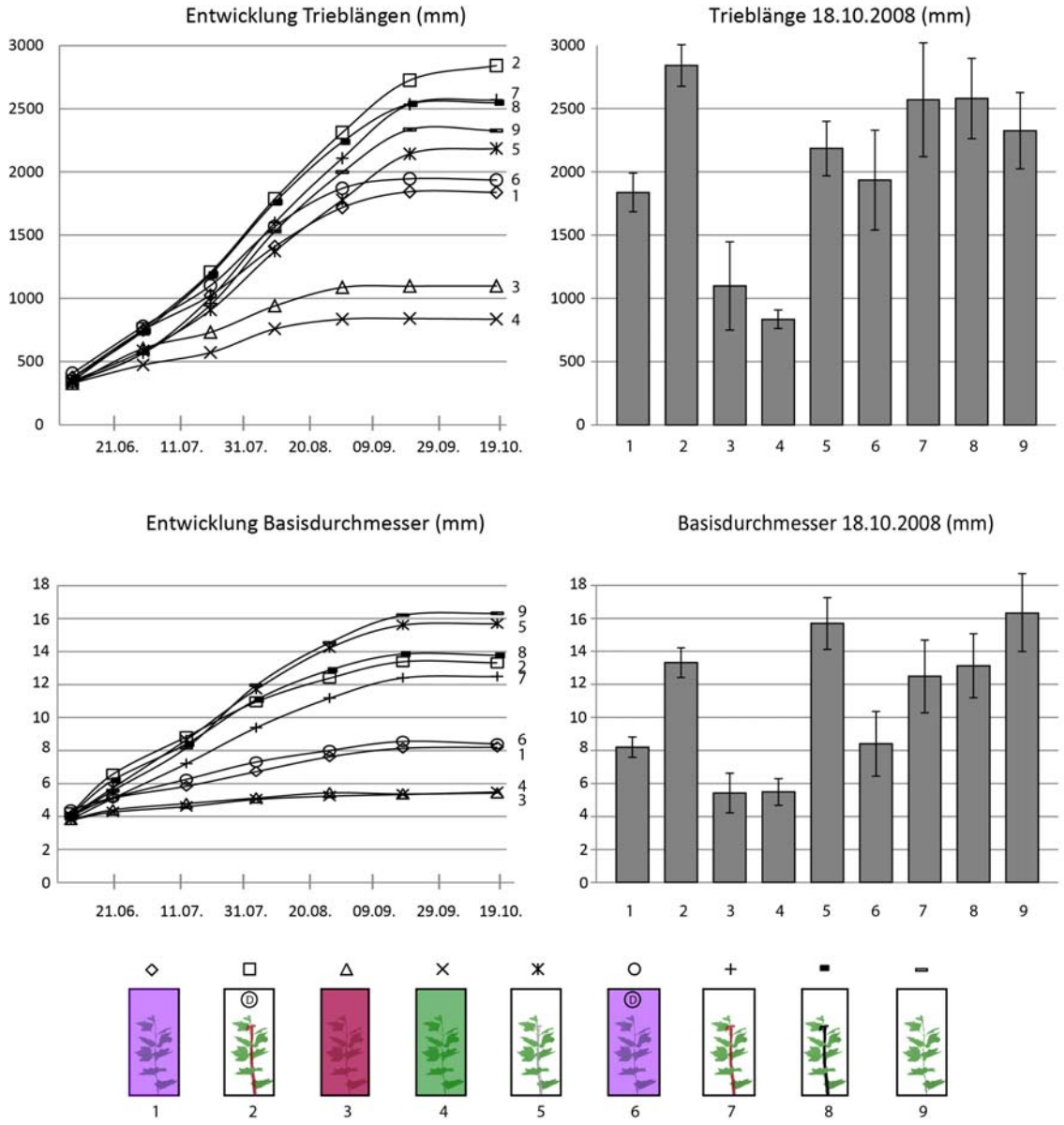


Abbildung 39 Entwicklung von Trieblängen und Basisdurchmessern (links) sowie die jeweiligen Ergebnisse am Ende der Vegetationsperiode (rechts).

Im Verlauf der Vegetationsperiode zeigten sich in allen Kammern wie nicht anders zu erwarten ähnliche Entwicklungen der Trieblängen (Abbildung 39 oben links). Auffallend ist jedoch, dass das Längenwachstum in den Kammern 1 und 6 bereits Ende August stark zurückging oder ganz zum Erliegen kam, während dies in den anderen Kammern erst gegen Ende September zu beobachten war. Die Pflanzen der Kammern 3 und 4 zeigten bereits frühzeitig ein deutlich geringeres Wachstum. Bereits zu dem Zeitpunkt, als die Pflanzen in das Versuchsgewächshaus gestellt wurden, wiesen die Trieblängen eine große Streubreite (8,2 bis 22,8% relative Abweichung vom arithmetischen Mittel) auf, die in ähnlicher Größenordnung (6,6 bis 27,2%) auch am Ende der Vegetationsperiode festzustellen war. Die in einigen Kammern gegen Ende der Vegetationsperiode abnehmende Trieblänge lässt sich durch ein arttypisches Absterben und Abfallen des letzten Internodiums mit dem Blattfall erklären.

Ein ähnlicher Entwicklungsverlauf wurde auch bei den Basisdurchmessern der Triebe dokumentiert. Hier wurden am Ende der Vegetationsperiode Werte zwischen 5,4 mm (Kammern 3 und 4) und 16,3 mm (Kontrolle / Kammer 9) erreicht. Die mit filternder bzw. lichtdichter Folie umhüllten Achsen blieben mit Durchmessern von 12,5 bzw. 13,1 mm etwas dünner (Kammern 2, 7 und 8) als die Kontrollen. Zwischen den transparent umhüllten Achsen und den Kontrollen ergaben sich nur geringe Unterschiede (Kammer 5: 15,7 mm). Die Pflanzen in den Kammern 1 und 6 (Lee 707) erreichten Durchmesser von durchschnittlich 8,2 bzw. 8,4 mm. In den Kammern 2 und 6 wurden im Vergleich zu den nicht nachgedüngten Varianten (Kammern 1 bzw. 7) geringfügig größere Durchmesser erreicht (Abbildung 39 unten rechts).

In Abbildung 40 sind die Schlankheitsgrade (H/D-Verhältnisse) und deren Entwicklung dargestellt, die sich aus den Trieblängen und Basisdurchmessern ergeben. In allen Kammern kam es in der Haupt-Wachstumszeit zu einer mehr oder weniger konstanten Zunahme der Schlankheit, die jedoch unterschiedlich lang anhielt. In den Kammern 1, 6, 3 und 4 wurde ab Ende August keine weitere Zunahme der Schlankheit mehr verzeichnet, teilweise wurde ab diesem Zeitpunkt sogar eine Abnahme festgestellt. Eine ähnliche Tendenz zeigten die Pflanzen in den Kammern 9, 5 und 7, wobei die Schlankheit etwas länger zunahm (bis ca. Mitte September). In den Kammern 2 und 8 wurde bis zum Ende der Vegetationsperiode eine Zunahme der Schlankheit verzeichnet.

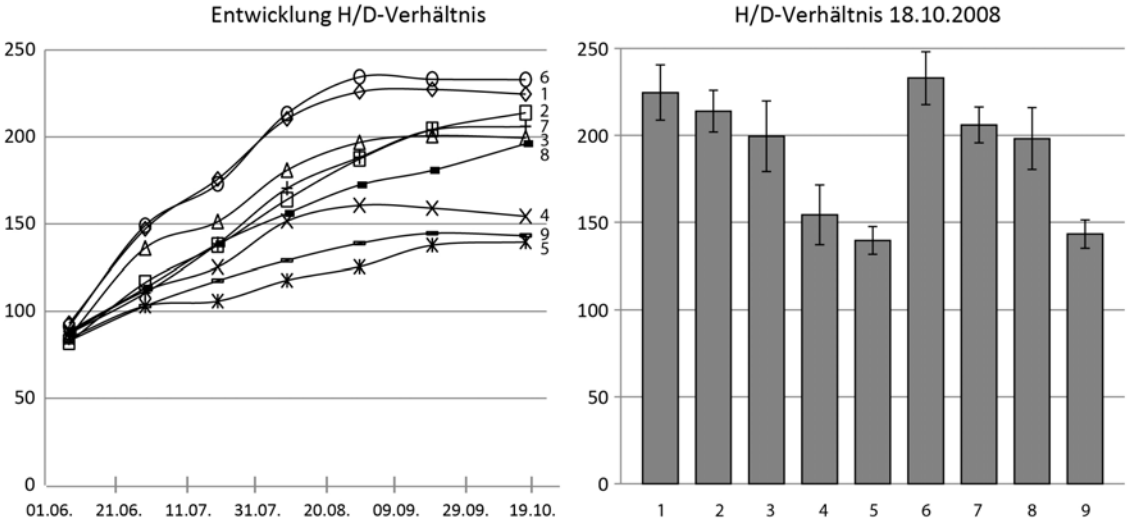


Abbildung 40 Entwicklung der Schlankheitsgrade (links) und Ergebnis am Ende der Vegetationsperiode (rechts), Legende siehe Abbildung 39.

Bei den Kontrollen (Kammer 9) lag der durchschnittliche Schlankheitsgrad am Ende der Vegetationsperiode in einem Wertebereich um 143. Die Pflanzen in Box 4 (Schattiergewebe) wurden etwas schlanker (H/D = 154) während die mit transparenter PVC-Folie umhüllten Pflanzen (Kammer 5) etwas weniger schlank wurden (H/D = 140). Mit durchschnittlichen Schlankheitsgraden von 225 bzw. 232 zeigten die Pflanzen in den Kammern 1 und 6 (Lee #707) die größten Werte und die mit lichtdichter Folie oder Filterfolie umhüllten Achsen zeigten Werte in einem mittleren Bereich um 200, wobei sich bei den beiden nachgedüngten Varianten eine leichte Steigerungen der Schlankheit ergab (im Vergleich zu der entsprechenden, nicht zusätzlich gedüngten Variante).

Die am Ende der Vegetationsperiode entlang der Achse (alle 30 cm) gemessen Durchmesser (Taper) sind in Abbildung 41 dargestellt. Die Kammern 1 und 6 bzw. 3 und 4 bilden jeweils eine Gruppe relativ geringer Durchmesser, die entlang der Achse fast identische Entwicklungen zeigen. Die an der Basis deutlichen Unterschiede zwischen den Kontrollen bzw. transparent umhüllten Pflanzen (Kammern 5 und 9) und den dunkel oder filternd umhüllten Pflanzen (Kammern 2, 7 und 8) nehmen im zweiten Achsendrittel ab und im apikalen Bereich sind keine systematischen Unterschiede zwischen diesen mehr auszumachen. Damit zeigen insbesondere die Pflanzen der Kammern 2, 7 und 8 in der mittleren Hälfte eine sehr geringe Abnahme des Durchmessers.

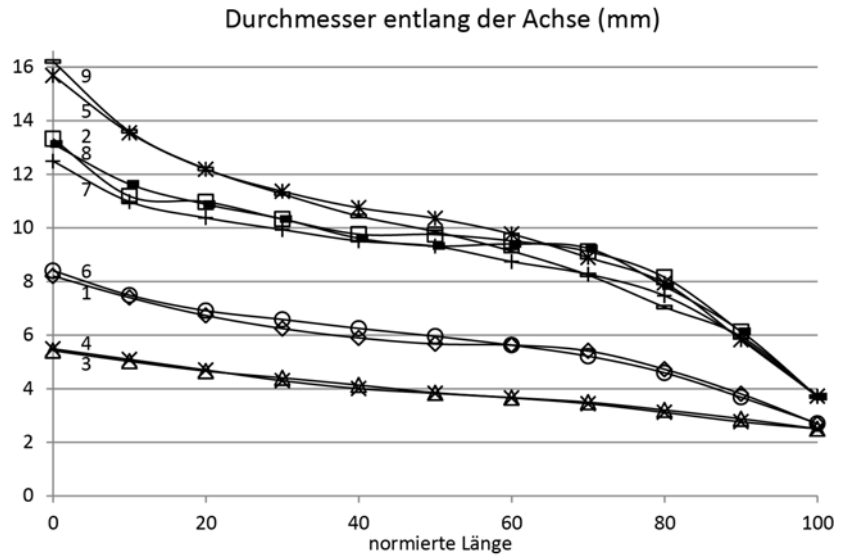


Abbildung 41 Durchmesserentwicklung (mm) entlang der Achsen (normierte Länge); Legende siehe Abbildung 39; Berechnungsmethode: Lineare Interpolation der gemessenen Werte in 10%-Intervallen, basierend auf der für jede einzelne Pflanze berechneten normierten Länge.

2.3.1.3 Biomechanik

Die anhand von Vierpunktbiegungen ermittelten strukturellen E-Moduln im mittleren Achsendrittel sind in Abbildung 42 dargestellt. Die je Kammer bzw. Anzuchtvariante berechneten Durchschnittswerte liegen zwischen 5.000 und 10.000 MPa, einzelne Werte im Bereich zwischen 3.000 und 13.000 MPa. Wie bereits erwähnt, wurden auch im Freiland gewachsene Triebe in die Untersuchung einbezogen (F).

Die bei den Kontrollpflanzen (Kammer 9) ermittelten Werte lagen mit durchschnittlich 8.000 MPa (+/- 1.500 MPa) fast 2.000 MPa unter den Werten der im Freiland gewachsenen Triebe,

bei denen jedoch eine besonders große Streuung zu verzeichnen ist (10.000 MPa +/- 2.500 MPa). Die in Kammer 4 (Schattiergewebe) ermittelten Werte waren mit den Kontrollen so gut wie identisch, diejenigen der mit transparenter Folie umhüllten Pflanzen (Kammer 5) lagen mit 9.400 MPa (+/-1.800 MPa) zwischen den Kontrollen und den Freilandpflanzen. In allen anderen Kammern lagen die Werte durchschnittlich unter denjenigen der Kontrollen. Bei Umhüllung der Achsen mit lichtdichter Folie ergaben sich Werte von 5.000 MPa (+/- 1.400 MPa), bei Umhüllung mit Filterfolien (Kammern 2 und 7) unabhängig von der Düngung Werte von 6.000 MPa (+/- 1.700 MPa). Die bei insgesamt gefiltertem Licht gewachsenen Pflanzen zeigten Werte um 7.000 MPa (Kammer 1 / Lee #707) bzw. 6.400 MPa (Kammer 6 / Lee #707 zus. Düngung; jeweils ca. +/- 1.400 MPa) bzw. 6.000 MPa (Lee #707 + #179 / Kammer 3).

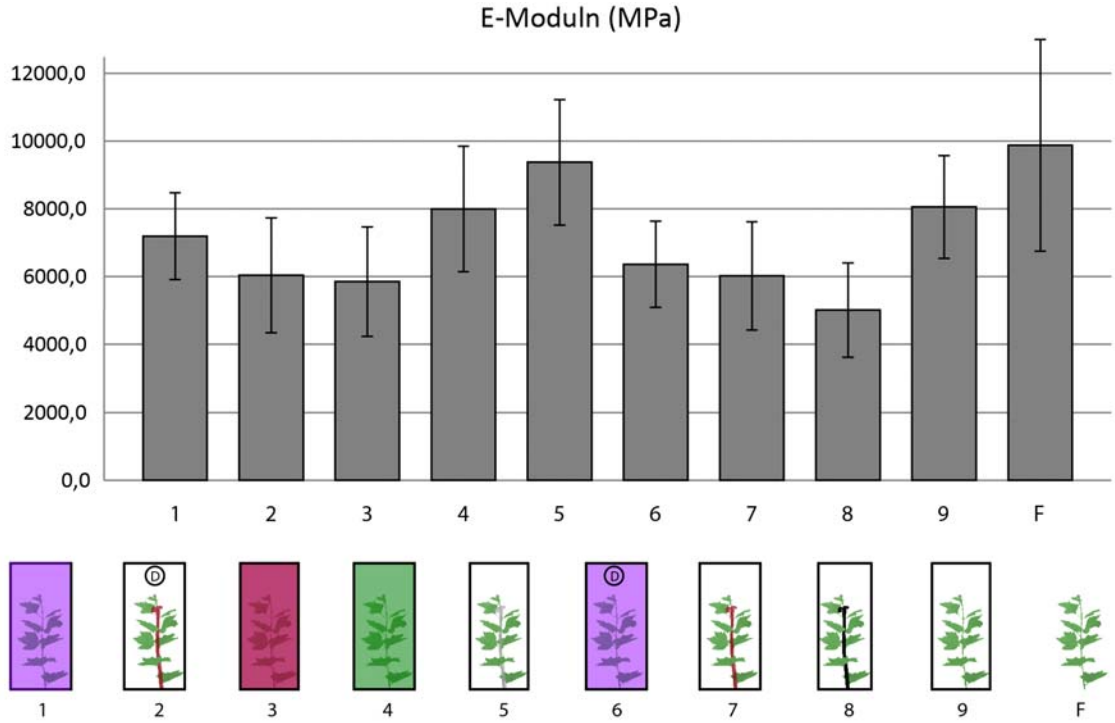


Abbildung 42 E-Moduln im mittleren Achsenabschnitt (F = im Freiland gewachsene Triebe).

Bei den Bruchversuchen mit 2-Punkt-Biegung ergaben sich drei unterschiedliche Versagensmuster. Vor allem in den basalen Bereichen trat häufig ein zähes Brechen auf, dass sich durch Vorversagensereignisse (Riss einzelner Fasern) ankündigte (Abbildung 43 links). In den apikalen Bereichen kam es häufiger zu einem plötzlichen Bruch, bei dem die Achse bis zur Mitte quer einriss und unmittelbar darauf folgend längs aufspaltete. Das Biegemoment-Krümmungs-Diagramm zeigt hier einen plötzlichen Abfall (Abbildung 43 Mitte). Zum Dritten trat bei einigen Pflanzen als Versagen kein Brechen sondern ein Abknicken auf. Bei diesem Versagenstyp lässt sich der Versagenspunkt nicht immer eindeutig bestimmen, da das Biegemoment-Krümmungs-Diagramm keinen eindeutigen Punkt erkennen lässt, sondern einen kontinuierlichen Verlauf zeigt. Daher wurde hier der Wendepunkt der Kurve als Versagenspunkt festgelegt (Abbildung 43 rechts).

In Abbildung 44 sind die beim Bruch gemessenen Krümmungen gegen die normierte Länge für die meisten Anzuchtvarianten aufgetragen.[96] Die zum Zeitpunkt des Versagens gemessenen Krümmungen lagen in einem Bereich zwischen 8 und 150 m^{-1}. Für die baubotanische Eignung einer Pflanze bzw. eines Triebes interessiert hier nicht die maximal mögliche oder durchschnittliche Krümmung, sondern vielmehr die Krümmung, ab der mit einem Versagen – auch in Einzelfällen – gerechnet werden muss.[97] Dieser Wert ist in den Grafiken der Abbildung 44 jeweils als gestrichelte Linie eingetragen.

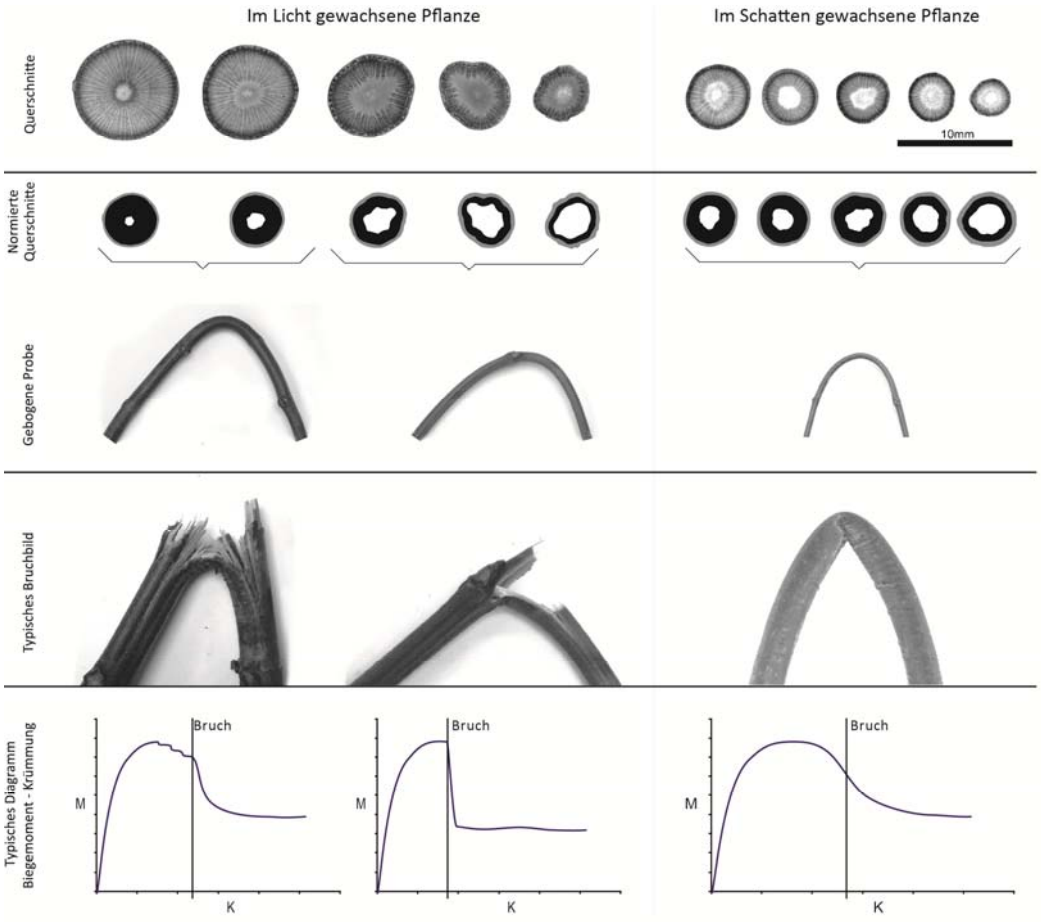


Abbildung 43 Oben: Querschnitte einer im Licht gewachsenen (Kontrolle, Kammer 9) und einer im Schatten gewachsenen Pflanze (Kammer 4). Darunter die gleichen Querschnitte mit normierten Durchmesser (vgl. hierzu Abbildung 45, Abbildung 46). Versagenstypen und Bruchverhalten. Darunter: Gebogene, gebrochene, bzw. genickte Proben der jeweiligen Achsenabschnitte. Ganz unten: zugehöriges Biegemoment-Krümmungs-Diagramm.

[96] Die Kammern 3 und 4 sind nicht dargestellt, da die Triebe hier nur eine sehr geringe Länge erreichten.

[97] In der Praxis können die Triebe nur so weit gebogen werden, dass ein Brechen ausgeschlossen werden kann.

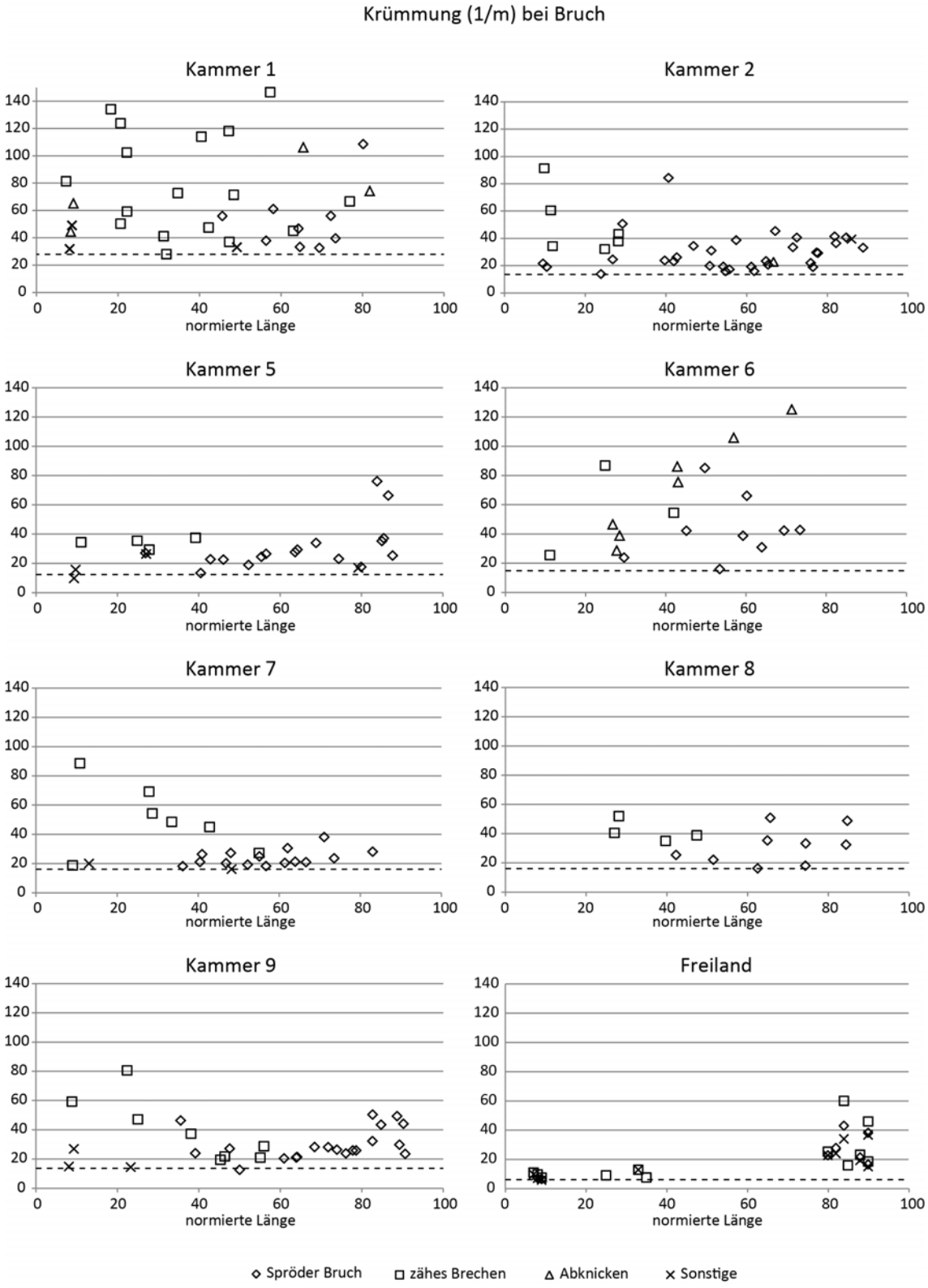


Abbildung 44 Krümmung zum Zeitpunkt des Versagens für einige Anzuchtkammern und Freilandpflanzen; Erklärung siehe Text.

Alle im Gewächshaus bei voller Sonneneinstrahlung gewachsenen Triebe (Kammern 2, 5, 7, 8 und 9) zeigten ein vergleichbares Bruchverhalten. Im unteren Drittel kam es hier fast ausschließlich zu einem zähen Brechen, wobei sich die Triebe teilweise extrem stark biegen ließen. Die Krümmung lag teilweise über 80 m^{-1}, d. h. es wurde rechnerisch ein Biegeradius von ca.

1,25 cm erreicht.[98] Die Achsen konnten in einigen Fällen also praktisch 180° umgebogen werden, ohne dass äußerlich größere Schäden (Rindenrisse) erkennbar waren oder ein Abfall im Biegemoment-Krümmungs-Diagramm auftrat – sie ließen sich damit fast gummieartig biegen. In einigen Fällen kam es aber in diesen Achsenabschnitten auch deutlich früher (ab einer Krümmung von 18 m^{-1}) zum Versagen,[99] sodass diese Pflanzen in der Praxis bis zu einem Radius von ca. 5,5 cm gebogen werden können. Im mittleren und oberen Achsenabschnitt kam es dann bei diesen Pflanzen sehr häufig bzw. ausschließlich zu einem plötzlichen Brechen, meist bei Krümmungen zwischen 18 und 60 (40) m^{-1}.

Bei den Anzuchtvarianten mit gefiltertem Licht (Lee #707, Kammern 1 und 6) ist das bei den anderen Kammern beschriebene Verteilungsmuster der Versagensereignisse zwar auch erkennbar, jedoch weit weniger deutlich ausgeprägt. Insbesondere in Kammer 1 trat auch in den oberen Achsenabschnitten teilweise ein zähes Brechen auf, während es andererseits auch in den unteren Abschnitten in einigen Fällen zu einem plötzlichen Bruch kam. In Kammer 6 (zus. Düngung) kam es ähnlich wie bei den Varianten ohne Lichtfilterung ab einer Krümmung von 18 m^{-1} zu ersten Versagensereignissen. Bei der Variante mit gefiltertem Licht ohne Zusatzdüngung (Kammer 1) war dies erst ab Krümmungen von ca. 28 m^{-1} (Biegeradius ca. 3,5 cm) der Fall. Bei beiden Varianten kam es in allen Achsenabschnitten auch häufiger zum Abknicken der Achsen, was bei den im Licht gewachsenen Pflanzen so gut wie nie zu beobachten war. Ein solches Abknicken (Abbildung 43 rechts) wurde darüber hinaus auch in den Kammern 3 und 4 sehr häufig beobachtet (Daten nicht dargestellt).

Das bei den im Freiland gewachsen Trieben erkennbare Verteilungsmuster der Versagensereignisse (Abbildung 44 unten rechts) unterscheidet sich deutlich von allen Anzuchtvarianten im Gewächshaus. Ein zähes Brechen trat hier auch in den apikalen Bereichen auf. Vor allem kam es jedoch insbesondere in den basalen Bereichen bereits ab einer Krümmung von 5 bis 7 m^{-1} (Biegeradius 14 bis 20 cm) zu ersten Versagensereignissen und es ließ sich hier keine Probe sehr viel stärker biegen.

2.3.1.4 Anatomie

In Abbildung 45 ist exemplarisch der prozentuale Anteil der Gewebe Cortex, Xylem und Mark am Flächenträgheitsmoment für die Kammern 1, 4 und 9 dargestellt.[100] Bei allen Anzuchtvarianten überwiegt im basalen Bereich der Anteil des Xylems, der bei den im Licht gewachsenen Kontrollen (Kammer 9) ca. 75% ausmacht und bei den Anzuchtvarianten mit Filterfolie (Kammer 6) bzw. Schattiergewebe (Kammer 4) mit 65 bzw. 58% etwas geringer ist. Aufgrund seiner zentralen Lage und seiner in diesem Bereich relativ geringen Durchmessers trägt das Mark im basalen Bereich kaum zum Flächenträgheitsmoment bei (vgl. Abbildung 46). Trotzdem erreicht das Mark im apikalen Bereich Werte von ca. 20% (Kammern 1 und 4) bzw. sogar knapp 30% (Kammer 9). Gleichzeitig nimmt der Anteil des Xylems am Flächenträgheitsmo-

---

[98] Bei derart engen Biegeradien ist die der Berechnung der Krümmung zugrunde liegende Splinefunktion nicht mehr zutreffend (der Biegeradius wird überschätzt, was für die Schlussfolgerungen jedoch keine Bedeutung hat).

[99] Die Achsen rissen dabei häufig an einem Nodium auf (in den Diagrammen als sonstige Versagensfälle gekennzeichnet)

[100] Die Entwicklungstendenz der anderen im Licht gewachsenen Pflanzen (Kammern 2, 5, 7, 8 und Freilandpflanzen) entspricht weitestgehend den Ergebnissen von Kammer 9. Kammer 3 ist zwischen Kammer 1 und Kammer 4 einzuordnen und Kammer 6 entspricht weitestgehend Kammer 1 (vgl. dazu auch Abbildung 47). Der Anteil der einzelnen Gewebe am Flächenträgheitsmoment ist in den meiten Fällen von größerem Interesse als der Anteil eines Gewebes an der Querschnittsfläche, da damit angegeben wird, wie große der Einfluss eines Gewebes z. B. auf die Steifigkeit ist.

ment entlang der Achse stark ab. Bei den im Licht gewachsenen Pflanzen ist dieser Trend besonders stark ausgeprägt, sodass der Anteil des Xylems im Bereich der Triebspitze mit ca. 20% deutlich unter dem Anteil des Marks liegt. Demgegenüber bleibt der Anteil des Xylems bei den Kammern 1 und 4 mit 25 bis 30% auch im apikalen Bereich größer als der des Xylems. Bei allen Proben ist im Bereich der Triebspitze der Anteil des Cortex dominierend, der hier bei allen Varianten Werte von 50% annimmt.

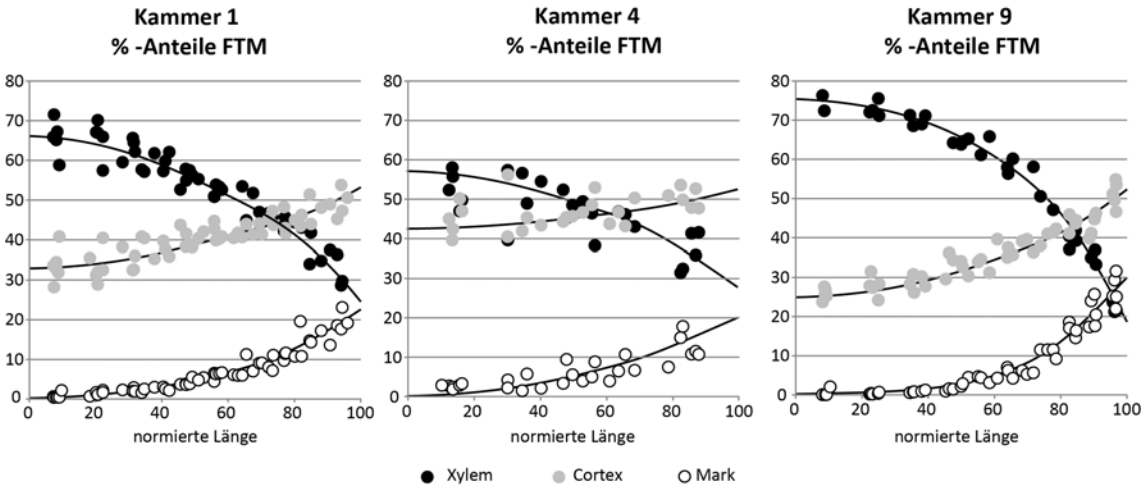


Abbildung 45 Anteil der Gewebe Xylem, Cortex und Mark am Flächenträgheitsmoment bezogen auf die normierte Länge der Triebe; exemplarisch für die Kammern 1, 4 und 9.

Diese unterschiedlichen Verteilungsmuster lassen sich teilweise durch die unterschiedlichen Durchmesser der Achsen erklären (vgl. Diskussion). Darüber hinaus zeigen sich zwischen den Varianten deutliche Unterschiede in der absoluten Querschnittsfläche des Marks, die in Abbildung 46 wieder exemplarisch für die Kammern 1, 4 und 9 dargestellt ist.[101] Ausgehend von durchschnittlich ca. 2 mm² (bei allen Varianten) werden bei den im Hellen gewachsenen Pflanzen (Kammer 9) im oberen Drittel Durchschnittswerte von 17mm² erreicht, wobei der Durchmesser bzw. die Querschnittsfläche zur Spitze hin wieder abnimmt. Demgegenüber nimmt die Querschnittsfläche des Marks bei den in Kammer 4 gewachsenen Pflanzen (Schattiergewebe) entlang der Achse nicht zu, sondern lediglich im Bereich der Triebspitze leicht ab. Die in Kammer 1 (Filterfilie Lee 707) zu erkennende Tendenz liegt zwischen den beiden beschriebenen Entwicklungen. Ergänzend zu den in Abbildung 45 dargestellten Verteilungsmustern entlang der Achse sind in Abbildung 47 die durchschnittlichen Anteile der wichtigen Gewebe Xylem und Cortex am Flächenträgheitsmoment für das mittlere Achsendrittel dargestellt (vgl. die entsprechende Darstellung der E-Moduln in Abbildung 42). Die Werte für das Mark sind nicht wiedergegeben, da sie im mittleren Achsendrittel meist im Bereich zwischen 3 und 7% liegen und damit vernachlässigbar sind.[102]

[101] Die Veränderung des Markdurchmessers entlang der Achse wird als Apoxogenese bezeichnet, vgl. MASSELTER, T., SPECK, T. & ROWE, N. P. 2006. Ontogenetic Reconstruction o the corboniferous Seed Plant *Lyginopteris Oldhamia*. *International Journal of Plant Science,* 167**,** 147-166.

[102] Lediglich in Kammer 3 lagen die Werte etwas höher.

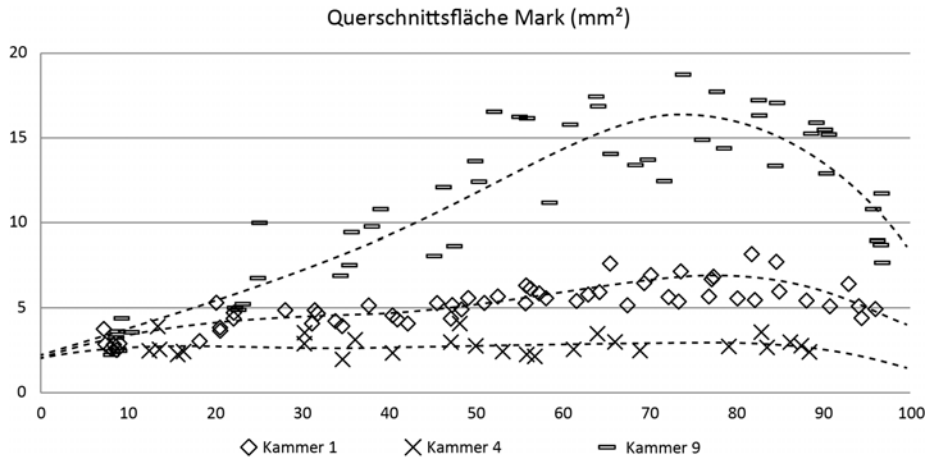


Abbildung 46 Querschnittsfläche des Marks in den Kammern 1, 4 und 9. Mit größerem primären Wachstum (Längenwachstum) nimmt die Querschnittsfläche zu. Zur Veranschaulichung siehe auch die normierten Querschnitte in Abbildung 43 oben.

Zwischen den Kammern 5 (transparente Umhüllung) und 9 (Kontrollen) sowie den Freilandpflanzen sind so gut wie keine Unterschiede erkennbar. Bei den lichtdicht bzw. filternd umhüllten Achsen (Kammern 2, 7 und 8) ist der Xylemanteil etwas geringer und der Cortexanteil etwas höher. Deutlich Unterschiede zu den Kontrollen sind hauptsächlich bei den Kammern 3 (Lee #707 + #179) und 4 (Schattiergewebe) erkennbar. Hier ist der Xylemanteil 16 bzw. 10% geringer als bei den Kontrollen und der Anteil des Cortex in etwa gleichem Umfang erhöht. Die Werte für die Kammern mit Filterfolie Lee 707 liegen wieder zwischen den Kontrollen und den Werten von Kammer 4.

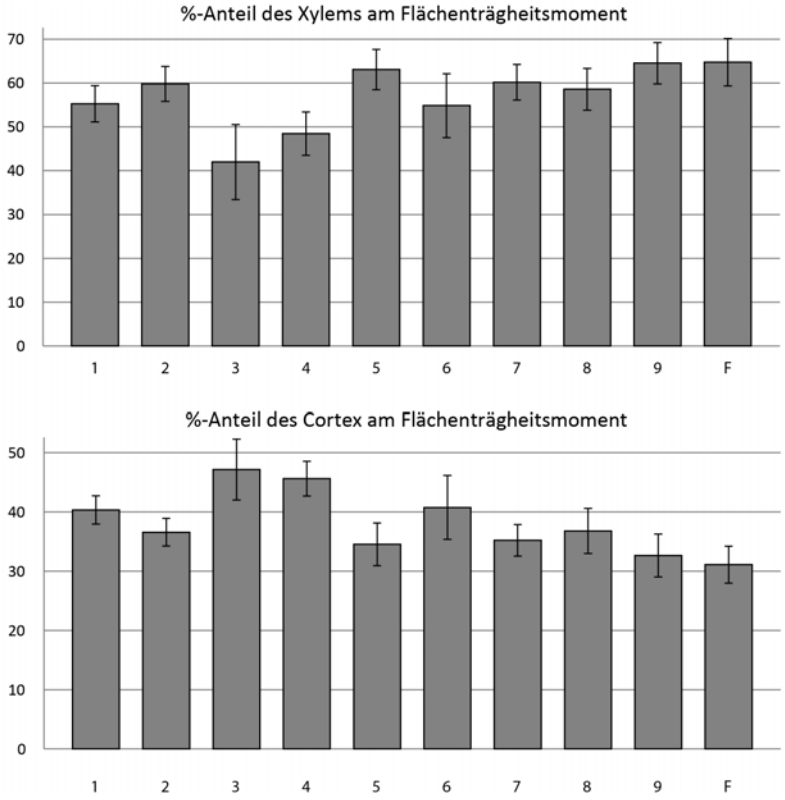


Abbildung 47 Prozentualer Anteil von Xylem und Cortex am Flächenträgheitsmoment im mittleren Achsendrittel (Legende siehe Abbildung 39)

2.3.2 Versuchsreihe 2009

2.3.2.1 Allgemeine Entwicklung

2009 kam es, insbesondere durch stärkeren Pilzbefall und/oder durch mechanische Verletzungen bei einigen Pflanzen zu einer stärkeren Beeinträchtigung des Wachstums, teilweise sogar zum Absterben der Triebspitzen oder der gesamten Pflanze. Daher konnte in den Kammern 1, 3 und 7 jeweils eine Pflanze nicht in der Auswertung berücksichtigt werden. In Kammer 6 vielen 3 Pflanzen und in Kammer 9 sogar 4 Pflanzen ganz oder teilweise (Absterben der Triebspitze) aus. In Kammer 4 konnte ebenfalls eine Pflanze nicht in der Auswertung berücksichtigt werden, die bereits zu Beginn schwächer entwickelt war (insb. kleinere Blätter) und in der Entwicklung insgesamt zurückblieb. Damit verbleiben in den Kammern 6 und 9 nur 3 bzw. 2 Pflanzen, weshalb die Anzahl der Wiederholungen so gering ist, dass beide Kammern in der Auswertung insgesamt nicht berücksichtigt werden können. Damit fehlen in den Ergebnissen der Versuchsreihe 2009 die Varianten mit transparenter Umhüllung der Achsen und mit Lichtfilterung ausschließlich in den Türen (Folie #707).

2.3.2.2 Morphologie

Das Triebwachstum war insgesamt etwas geringer als in der Versuchsreihe 2008 (vgl. Abbildung 48 links mit Abbildung 39 oben). So erreichten beispielsweise die Kontrollen (Kammer 2)[103] durchschnittlich eine Länge von nur 192 cm (2008: 233 cm). Die mit ein bzw. zwei Lagen Filterfolie oder lichtdichter Folie umhüllten Triebe (Kammer 5, 7 und 8) wurden gut 30 cm länger als die Kontrollen (Trieblängen um 225 cm). Die bei gefiltertem Licht gewachsenen Pflanzen (Kammer 1) blieben wieder etwas kleiner (160 cm) und die bei unterschiedlich starker Schattierung gewachsenen Pflanzen zeigten mit 87 cm bzw. 55 cm Trieblänge ein sehr geringes Wachstum.

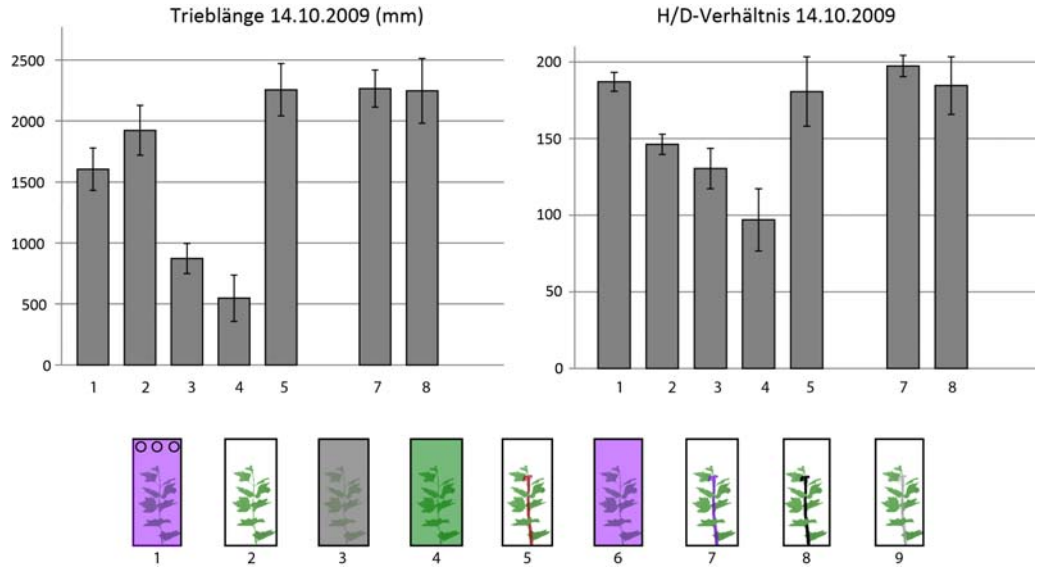


Abbildung 48 Trieblängen und Schlankheitsgrade am Ende der Versuchsreihe 2009.

[103] Zu beachten ist die im Vergleich zur Versuchsreihe 2008 andere Zuordnung der Anzuchtvarianten zu den Kammern, vgl. Legende in Abbildung 48.

Der Schlankheitsgrad der Kontrollen entsprach mit einem Wert von ca. 146 ziemlich genau dem Vorjahresversuch (144). Bei den lichtdicht bzw. filternd umhüllten Achsen (Kammern 5, 7 und 8) lagen die Werte wieder deutlich höher (zwischen 175 und knapp 200) und auch die bei insgesamt gefiltertem Licht gewachsenen Pflanzen erreichten ähnliche Werte (Kammer 1). Während im Vorjahresversuch die Schlankheit der schattierten Pflanzen etwas größer war als bei den Kontrollen, zeigten diese Pflanzen in der Versuchsreihe 2009 mit Werten um 100 eine deutlich geringere Schlankheit. Die etwas weniger schattierten Pflanzen (Kammer 3) lagen zwischen diesen Werten und den Kontrollen (um 130).

2.4 Diskussion

2.4.1 Morphologische Reaktionen (2008/2009)

2.4.1.1 Schattierung und Lichtfilterung

Die gesamte Wachstumsleistung der Pflanzen (Längen- und Dickenwachstum) war – wie nicht anders zu erwarten – zunächst eindeutig durch die Beleuchtungsstärke bestimmt: Die Pflanzen, bei denen die Blätter dem „vollen“ Sonnenlicht ausgesetzt waren, zeigten insgesamt das größte Längen- und Dickenwachstum. Mit abnehmender Beleuchtungsstärke (Lichtfilterfolien, Schattiergewebe) nahm das Wachstum insgesamt ab. Die Unterschiede zwischen den bei reduzierter Beleuchtungsstärke ohne Lichtfilterung gewachsenen Pflanzen (Schattiergewebe) und den bei ebenfalls reduzierter Beleuchtungsstärke aber deutlich reduzierten R/DR-Verhältnis gewachsenen Pflanzen (Filterfolie Lee #707 bzw. Lee #707 + #179) belegen jedoch eindeutig den Einfluss der spektralen Zusammensetzung des Lichts und entsprechen der erwarteten Schattenfluchtreaktion: Bei der Versuchsreihe 2008 war die Trieblänge der bei gefiltertem Licht gewachsenen Pflanzen (Lee #707, Kammer 1) annähernd doppelt so groß wie die der bei lediglich reduzierter Lichtstärke gewachsenen Pflanzen (Schattiergewebe grün, Kammer 4) und auch die Schlankheit lag um ca. 50% höher (Abbildung 39, Abbildung 40). Vergleichbare Unterschiede ergaben sich auch in der Versuchsreihe 2009 zwischen den Kammern 1 (Lee 707) und 3 (Schattiergewebe grau). Die Unterschiede zwischen Kammer 1 und Kammer 4 (Schattiergewebe grün) waren in dieser Versuchsreihe noch größer. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die morphologischen Unterschiede großteils durch Unterschiede in R/DR-Verhältnis und nicht durch die teilweise vorhandenen Unterschiede in der PAR-Beleuchtungsstärke (Kammer 1 vs. Kammer 4) begründet sind.[104] Das sehr geringe Längenwachstum bei Lichtfilterung mit zwei Folien (Lee 707 + 179, Kammer 3 (2008)) kann auf die geringe Beleuchtungsstärke zurückgeführt werden, die bei dieser Anzuchtvariante ebenfalls relativ hohe Schlankheit auf das kleine R/DR-Verhältnis. Das Ausfiltern weiterer Blauanteile führt jedoch zu keiner weiteren Steigerung des Schlankheitsgrades.

Gegenüber den Kontrollen war der Schlankheitsgrad bei Schattierung in der Versuchsreihe 2008 leicht erhöht, in der Versuchsreihe 2009 bei beiden Schattierungsvarianten jedoch deutlich reduziert. Der Schlankheitsgrad der bei geringem R/DR-Verhältnis gewachsenen Pflanzen lag immer deutlich über dem der Kontrollen. Auch dies kann als ein Beleg für die Wirkung des hohen DR/R-Verhältnisses gewertet werden.

Die Veränderung des Versuchsdesigns in Kammer 1 (2008: Lichtfilterfolie Lee 707 nur an den Türen, 2009 auch in den Dachöffnungen) führte wie bereits dargestellt zu keiner Veränderung

[104] Die PAR-Messung berücksichtigt die spektrale Zusammensetzung des Lichts nicht ausreichend.

der PAR-Helligkeit im Wachstumsraum der Pflanzen. Das heißt, dass das von oben eindringende Licht die Wachstumsbedingungen kaum beeinflusst haben kann. Daher kann davon ausgegangen werden, dass in den Kammern, bei denen die Türen mit Filterfolie bekleidet waren, in etwa ein DR/R-Verhältnis vorherrschte, das dem Transmissionsspektrum der jeweiligen Folie bzw. Folienkombination entspricht. Dennoch war der Schlankheitsgrad der Pflanzen in Kammer 1 in der Versuchsreihe 2009 deutlich geringer als im Vorjahresversuch (bei praktisch identischen Werten der Kontrollen). 2009 wiesen jedoch alle Pflanzen durchschnittlich eine geringere Trieblänge auf und alle bei reduzierter Beleuchtungsstärke gewachsenen Pflanze hatten eine deutlich geringere Schlankheit. Dies hängt möglicherweise mit den leicht unterschiedlichen Ausgangs- bzw. Randbedingungen der Versuchsreihen zusammen (Pflanzenqualität, Befallsdruck mit Schadorganismen etc.) und muss nicht unbedingt Ursachen in der Variation des Versuchsdesigns haben.

2.4.1.2 Umhüllung der Achsen

Dass die mit transparenter Folie umhüllten Pflanzenachsen im Vergleich zu den Kontrollen etwas geringere Trieblängen und eine geringere Schlankheit aufwiesen (Kammer 5 in VR 2008), kann damit erklärt werden, dass diese Pflanzen durch das Anbringen der Folie mechanisch gereizt wurden (Thigmomorphogenese; vgl. Mitchell and Myers, 1995) und es durch die Folienumhüllung zu einer Beeinträchtigung der Achsenatmung kam, die sich ggf. insgesamt negativ auf die Entwicklung auswirkte. Diese Faktoren wirkten in ähnlicher Weise auch bei den mit Filterfolie oder lichtdichter Folie umhüllten Pflanzen, bei denen darüber hinaus noch mit höheren Spitzentemperaturen unter der Folie gerechnet werden muss. Dennoch zeigten alle mit lichtdichter Folie oder Filterfolie(n) umhüllten Pflanzen Im Vergleich zu den Kontrollen in beiden Versuchsreihen ein stärkeres Längenwachstum und eine teils deutlich größere Schlankheit.

Dabei wurden keine (reproduzierbaren) Unterschiede zwischen Umhüllung mit lichtdichter Folie, mit Folie Lee #707 und mit der Folienkombination Lee #707 + #179 festgestellt. Vielmehr kam es sowohl durch lichtdichte als auch durch lichtfilternde Umhüllung zu einer Steigerung des Längenwachstums bei gleichzeitiger Reduktion des Basisdurchmessers. Die daraus folgende Steigerung des Schlankheitsgrades fiel in der Versuchsreihe 2008 (+ 41%) zwar etwas stärker aus als 2009 (+ 28%), war in beiden Jahren jedoch sehr deutlich.

Daraus lässt sich schließen, dass sowohl eine Reduktion der Beleuchtungsstärke als auch eine Reduktion des R/DR-Verhältnisses unmittelbar an der Achse – bei unveränderter Belichtung der Blätter – zu einer Art „Schattenfluchtreaktion“ führt.[105] Diese Ergebnisse stehen in einem gewissen Widerspruch zu den in der Einleitung zitierten Untersuchungen zur Schattenfluchtreaktion (Abschnitt 2.1.2) und sind vor dem Hintergrund der Versuche mit Schattiergewebe (z. B. Kammer 4) überraschend: Während durch eine Reduktion der PAR-Helligkeit, die auch die Blätter betrifft, keine Schattenfluchtreaktion ausgelöst wird (keine Steigerung der Schlankheit), ist dies bei einer Reduktion der Helligkeit ausschließlich an der Achse durchaus der Fall. Gleichzeitig entwickelten sich bei allen Pflanzen mit umhüllten Achsen genauso wie bei den Kontrollen Seitentriebe, während alle bei reduzierter Helligkeit gewachsenen Pflanzen (unabhängig von R/DR-Verhältnis) keine Seitentriebe bildeten. Bei einer Schattenfluchtreaktion kommt es definitionsgemäß jedoch zu einer Unterdrückung der Verzweigung bei gleichzeitiger Steigerung des Längenwachstums (Schopfer et al. 2010, S. 467f.). Diese Ergebnisse können

[105] Die hervorgerufene Steigerung der Schlankheit und des Längenwachstums überkompensieren die gegenteilig wirkenden thigmomorphogenetischen Reizungen der Umhüllung (vgl. Kammer 5 VR 2008).

dahingehend interpretiert werden, dass durch die lichtdichte oder filternde Umhüllung der Achsen nur Teilaspekte der Schattenfluchtreaktion ausgelöst werden.

2.4.1.3 Düngung

Bei den Versuchen mit zusätzlicher Düngung wurde das Triebwachstum insgesamt leicht gesteigert, wobei die Steigerung des Längenwachstums etwas größer war als die des Dickenwachstums, sodass sich eine geringfügige Steigerung der Schlankheitsgrade ergab. Dies liegt in etwa im Bereich der Erwartungen, da bereits im Substrat eine relativ hohe Menge Depotdünger enthalten war und eine verbesserte Nährstoffversorgung tendenziell nicht nur zu stärker, sondern auch zu schlanker wachsenden Pflanzen führt, wohingegen unter Nährstoffmangel leidende Pflanzen gewöhnlich eine eher gedrungene Wuchsform zeigen.

2.4.2 Zusammenhänge zwischen anatomischen und biomechanischen Eigenschaften

2.4.2.1 E-Modul

Wie die Ergebnisse zeigen, ist die Gewebeverteilung bei allen im Hellen gewachsenen Pflanzen sehr ähnlich. Leichte Unterschiede ergaben sich lediglich bei den mit lichtdichter oder lichtfilternder Folie umhüllten Pflanzen, bei denen gegenüber den Kontrollen der Anteil des Xylems am Flächenträgheitsmoment etwas geringer und der des Cortex etwas höher war. (Abbildung 47).[106] Gleichzeitig sind die E-Moduln dieser Pflanzen jedoch deutlich geringer als bei den Kontrollen (-30%), währen die der Freilandpflanzen und auch die der transparent umhüllten Pflanzen (bei gleicher Anatomie) etwas größer sind (Abbildung 42). Dies deutet darauf hin, dass die einzelnen Gewebe der bei unterschiedlichen Anzuchtbedingungen gewachsenen Pflanzen unterschiedliche biomechanische Eigenschaften aufweisen. Wären die Eigenschaften der einzelnen Gewebe bei den unterschiedlichen Proben identisch, müsste das E-Modul mit dem Anteil des Xylems am Flächenträgheitsmoment korrelieren.[107] Da dies nicht bzw. nur ansatzweise der Fall ist[108], kann davon ausgegangen werden, dass insbesondere das Holz (ggf. auch die Rinde) der lichtdicht oder filternd umhüllten Pflanzen weniger steif ist als bei den Kontrollen. Demgegenüber ist das Holz der Freilandpflanzen und der transparent umhüllten Pflanzen wahrscheinlich steifer als das der Kontrollen.

Diese Zusammenhänge erscheinen relativ plausibel, da Pflanzenachsen nach Abschluss des Längen- und Dickenwachstums im Herbst insbesondere unter dem Einfluss von UV Licht und Wind „aushärten“, d. h. versteifen (Lignifizierung/Verholzung; vgl. Krüssmann et al. 1997, S. 154 ff.) Daher sind die Triebe im Freiland gewachsener Pflanzen gewöhnlich etwas steifer als vergleichbare, im Gewächshaus gewachsene Triebe (kein Wind, kein UV-Licht). Durch die dunkle Umhüllung wird die Aushärtung vermutlich noch stärker unterbunden. Möglich ist aber

---

[106] Diese Unterschiede können durch Unterschiede im Durchmesser (geringerer Gesamtdurchmesser bei ähnlicher Rindendicke) erklärt werden.

[107] Dabei wird davon ausgegangen, dass das Xylem als das steifste Gewebe die Steifigkeit bzw. das E-Modul am stärksten beeinflusst. Vgl.: HLAWATSCH, S., ARNO, B. & SPECK, T. 1988/89. Funktionsanatomie und Biomechanik der Grau-Erle (Alnus incana): Vergleich von Pflanzen aus unterschiedlichen Höhenlagen im südlichen Schwarzwald. *Naturf. Ges. Freiburg i. Br.,* 88/89**,** 249-276.

[108] Bei den mit lichtdichter bzw. lichtfilternder Folie umhüllten Pflanzen kommt es sowohl zu einer Reduktion des Xylemanteils am Flächenträgheitsmoment als auch zu einer Reduktion des E-Moduls. Die Abnahme des E-Moduls ist jedoch viel größer.

auch, dass die Pflanze im Zuge der durch die dunkle Umhüllung ausgelösten (partiellen) Schattenfluchtreaktion die ihnen zur Verfügung stehenden Assimilate auf Kosten des Dickenwachstums und an der Versteifung in Längenwachstum investieren.

Dass die transparent umhüllten Achsen etwas steifer sind als die Kontrollen, kann demgegenüber nur mit der mechanischen Reizung dieser Achsen zusammenhängen, da auch die transparenten Folien zu einer geringfügigen Reduktion der Lichtstärke beitragen. Damit führen die mechanischen Reizungen nicht nur zu einer Reduktion der Schlankheit (Abbildung 40), sondern auch zur Bildung steiferer Gewebe. Da vergleichbare Reizungen auch bei den dunkel umhüllten Pflanzen auftreten, werden vermutlich auch hier die mechanischen Wirkungen durch die Lichtwirkungen überkompensiert. (vgl. Abschnitt 2.4.1.2)

Auch bei den anderen Anzuchtvarianten ergibt sich kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Gewebeverteilung und E-Modul. So nimmt in den Kammern 1 und 6 (Filterfolie Lee #707) das E-Modul in etwa genauso stark ab wie der Anteil des Xylems am Flächenträgheitsmoment (-11,5 bzw. -14% im Vergleich zur Kontrolle). Allerdings kommt es bei den Varianten mit Schattiergewebe zu einer deutlichen Reduktion des Anteils des Xylems am Flächenträgheitsmoment (-25%), ohne dass dies eine Veränderung des E-Moduls zur Folge hätte. Hier muss also davon ausgegangen werden, dass das Holz steifer ist als bei den Kontrollen.

2.4.2.2 Bruchverhalten und Biegsamkeit

Anders als die Unterschiede im strukturellen E-Modul lassen sich die Unterschiede im Bruchverhalten teilweise anhand anatomischer Unterschiede erklären, einige Aspekte lassen sich jedoch auch hier wieder nur auf Veränderungen in den biomechanischen Eigenschaften der Einzelgewebe zurückführen. So verhalten sich die bei unveränderter Beleuchtungsstärke gewachsenen Pflanzen in allen Achsenabschnitten wie Vollmaterialien (zäher Bruch bzw. Sprödbruch), während die bei reduzierter Beleuchtungsstärke gewachsenen Achsen teilweise wie Rohre bzw. Halme abknicken. Letzteres kann anatomisch erklärt werden, da diese Pflanzen aufgrund ihres geringen Dickenwachstums einen im Verhältnis zum Durchmesser des Marks dünnen Xylemmantel bilden. Das poröse Mark trägt so gut wie nicht zur Stabilisierung bzw. Festigkeit bei, sodass sie wie Hohlrohre versagen. Demgegenüber können die basalen Abschnitte der im Licht gewachsenen Pflanzen vereinfacht als Holz-Vollzylinder betrachtet werden, da der Durchmesser des Marks im Vergleich zum Gesamtdurchmesser minimal ist. Sie brechen aufgrund des offensichtlich relativ biegeweichen aber zugfesten Holzes wie beschrieben mit vielen Vorversagensereignissen zäh. Überraschend ist, dass die apikalen Abschnitte dieser Pflanzen nicht wie Rohre abknicken, sondern spröde brechen. Aufgrund des sehr großen primären Wachstums (Längenwachstum) ist der Querschnitt des Marks in diesen Bereichen besonders groß, während sich gleichzeitig noch kaum Xylem gebildet hat (vgl. Abbildung 45, Abbildung 46). Das Bruchverhalten (Sprödbruch; Abbildung 43 Mitte) deutet darauf hin, dass Xylem und Mark eine sehr geringe Zugfestigkeit haben. Sobald die (wenigen) Fasern des Cortex (Bastfasern) reißen, versagt die gesamte Achse. Das Mark scheint jedoch aufgrund einer gewissen Druckfestigkeit die Achsen gegen Knicken zu stabilisieren. (vgl. Speck und Spatz, 2003; Beismann et al., 2000)

Überraschend ist insgesamt, dass sich die Pflanzen meist am basalen Ende in etwa genauso stark krümmen lassen wie am apikalen, obwohl im oberen Bereich der Durchmesser und damit die Steifigkeit sehr viel geringer ist. Eine mögliche Erklärung liegt auch hier in der vermutlich geringen Zugfestigkeit des Xylems im apikalen Bereich und dem daraus resultierenden Sprödbruch in diesen Abschnitten. Die dunkel umhüllten, weniger steifen Pflanzen (geringeres E-Modul, geringer Durchmesser) zeigen ein Bruchverhalten, das mit den Kontrollen fast identisch ist. Vermutlich ist nicht nur die Steifigkeit, sondern auch die (Zug)Festigkeit dieser Achsen

bzw. des Xylems geringer.[109] Im Gegensatz dazu werden die Freilandpflanzen durch die Aushärtung steifer, sodass bei gleicher Krümmung größere Biegemomente auftreten. Unter Umständen werden die Achsen/das Xylem auch zugfester, die Steifigkeit nimmt dem Anschein nach jedoch stärker zu als die Festigkeit, denn die Achsen brechen bei geringerer Krümmung als die im Gewächshaus gewachsenen Kontrollen. Diese Folgerungen bzw. Annahmen sind in weiterführenden Forschungsprojekten, in denen die einzelnen Gewebe biomechanisch untersucht werden, noch zu überprüfen

2.4.3 Schlussfolgerungen für die baubotanische Praxis

Wie in Abschnitt 2.4.1 dargestellt, ergaben sich in den Versuchen aus pflanzenphysiologischer Sicht sehr interessante Unterschiede in den Trieblängen und Schlankheitsgraden. Aus baubotanisch-praktischer Perspektive ist jedoch die durch lichtdichte oder lichtfilternde Umhüllung erreichte Steigerung des Längenwachstums insbesondere im Verhältnis zu dem beträchtlichen Arbeits- und Kontrollaufwand nicht überzeugend. Im Vorfeld der Versuche war hier mit deutlich größeren Steigerungen gerechnet worden. Allerdings sind die Eigenschaften der erzeugten Pflanzen insgesamt bzw. in ihrer Kombination auch für die praktische Anwendung sehr interessant.

So ist die Biegsamkeit aller im Versuchsgewächshaus erzeugten Triebe – vor allem in den basalen Bereichen – überraschend hoch (möglicher Biegeradius im Bereich von 5,5 cm). Da für die meisten baubotanischen Anwendungen vermutlich Biegeradien von ca. 10 cm ausreichend sind (vgl. z. B. Abbildung 120), liegen die Biegeradien insgesamt im angestrebten Bereich. Dies ist insbesondere deshalb beachtenswert, weil die im Freiland gewachsenen Triebe mit möglichen Biegeradien von 20 bis maximal 15 cm diese Anforderungen nicht erfüllen.

Damit erfüllen bereits die Kontrollpflanzen bezülich der Biegsamkeit die gestellten Mindestanforderungen. Durch die dunkle Umhüllung ergeben sich über die geringfügige Steigerung des Längenwachstums hinaus jedoch noch weitere Vorteile. So zeigen die Ergebnisse, dass das Dickenwachstum unter günstigen Bedingungen[110] insbesondere im basalen Bereich bei dunkler Umhüllung deutlich reduziert werden kann.[111] Allein daraus ergibt sich eine Reduktion der Steifigkeit um mehr als 60% gegenüber den Kontrollen. Gleichzeitig zeigen die biomechanischen Untersuchungen wie dargestellt, dass die E-Moduln durch dunkle/filternde Umhüllung ebenfalls deutlich (ca. 30%) reduziert werden (Abbildung 42).[112] Daraus ergibt sich eine weitere Reduktion der Steifigkeit um 30%, sodass die Steifigkeit an der Basis insgesamt um ca. 70% reduziert wird. Damit wird das notwendige Biegemomente bzw. damit auch die notwendige Kraft (bei gleichem Hebelarm/Ansatzpunkt), die nötig ist, um eine Achse an der Basis zu biegen, mehr als gedrittelt. Darin liegt ein deutlicher praktischer Vorteil, da die für das Biegen notwendigen Kräfte über die (druckempfindliche) Rinde in die Pflanzen eingeleitet werden müssen, ohne dass es dabei zu Verletzungen bzw. Quetschungen der Gewebe kommt (vgl. Abschnitt 3.1.3.3). Das Biegen der Pflanzen in eine bestimmete Form ist damit deutlich einfacher und pflanzenschonender. Da sich durch die dunkle Umhüllung gleichzeitig keine Nachteile im Biege- bzw.

---

[109] So müsste die mögliche Krümmung größer sein, da bei gleichem Biegeradius kleinere Momente auftreten

[110] Vitales Pflanzenmaterial, keine Störung durch Erkrankungen, lange Wachstumszeit

[111] Durchschnittlicher Basisdurchmesser in den Kammern 7 und 8 im 22% geringer als bei den Kontrollen (VR 2008). (vgl. Abbildung 39)

[112] Sofern die in den mittleren Achsenabschnitten ermittelten Unterschiede in den E-Moduln auch für den basalen Bereich bestehen, was anzunehmen ist.

Bruchverhalten ergeben, scheinen die dunkel bzw. filternd umhüllten Pflanzen für baubotanische Anwendungen deutlich besser geeignet als die Kontrollen. Es ist jedoch noch zu untersuchen, ob sich in der weiteren Entwicklung, insbesondere auch beim Verbinden/Verwachsen Unterschiede ergeben (z. B. Robustheit).

Einschränkend sei jedoch erwähnt, dass das Bruchverhalten der im Hellen gewachsenen Pflanzen im apikalen Bereich (Sprödburch) in der Praxis kritisch zu sehen ist, da es hier unmittelbar (ohne Vorversagensereignisse o. ä.) zum Versagen kommt, wobei zumindest der halbe Leitungsquerschnitt zerstört wird und großflächige Wunden entstehen, sodass die Pflanze schwer beeinträchtigt wird und eine Regeneration kaum zu erwarten ist. Demgegenüber kann sowohl das allmähliche Versagen im unteren Bereich der im Licht gewachsenen Pflanzen (Reißen einzelner Fasern) als auch das Abknicken der „Schattenpflanzen“ als ein gutmütiges Versagen betrachtet werden, das in der baubotanischen Praxis Vorteile bietet: Werden solche Achsenabschnitte zu stark gebogen, kommt es nicht gleich zum Totalversagen, die Pflanze gibt nach und es entstehen keine größeren Verletzungen, sodass sich die Pflanze wieder regenerieren kann.

Die bei insgesamt reduziertem R/DR-Verhältnis gewachsenen Pflanzen (VR 2008: Kammern 1 und 6) lassen sich zwar teilweise in noch engeren Radien biegen als die dunkel umhüllten und müssten sich aufgrund ihres geringen Durchmessers sehr leicht biegen lassen,[113] weisen aber den großen Nachteil einer reduzierten Trieblänge auf. Sie könnten bei Anwendungen, bei denen eine sehr große Flexibilität (sehr kleine Biegeradien) gefordert ist, zur Anwendung kommen.[114]

2.4.4 Weiteres Vorgehen

Ausgehend von den vorliegenden Ergebnissen ergeben sich zwei Aufgabenstellungen. Zum einen gilt es, schnellstmöglich mit einer praktikablen Produktion von Pflanzen für baubotanische Anwendungen zu beginnen, und zum anderen stellt sich die Frage, wie die aufgezeigten Ansätze weiterentwickelt werden können, um Pflanzen mit optimalen Eigenschaften möglichst effizient produzieren zu können.

Da, wie dargestellt, bereits die im Gewächshaus gewachsenen Kontrollen die Mindestanforderungen an die Biegsamkeit erfüllen, erscheint es sinnvoll, für eine sofortige Umsetzung eine relativ konventionelle Produktionsweise in Gewächshäusern zu etablieren, bei der insbesondere natürliche Konkurrenzbedingungen (dichter Stand) genutzt werden.[115] Auf dieser Grundlage konnte im Zuge der Realisierung des baubotanischen Turms (Kapitel 4) und weiterer Projekte ab der Vegetationsperiode 2010 ein Anzuchtverfahren in einer Größenordnung von 2500 Pflanzen pro Jahr etabliert werden.[116] Dabei werden Jungpflanzen der gleichen Qualität wie in den Versuchsreihen verwendet, die in 4-Liter-Containern gepflanzt werden. Diese werden in (unbeheizten) Produktionsgewächshäusern für Bodendecker entlang der Seitenwände in engen Reihen (Pflanzenabstand ca. 17 cm) aufgestellt (Abbildung 49). Dadurch wird eine optimale Belichtung bei gleichzeitiger Konkurrenzwirkung durch die Nachbarpflanzen erreicht. Darüber hinaus wer-

---

[113] Halbierung des Durchmessers und leichte Reduktion des E-Moduls führt zu einer Reduktion der Steifigkeit von mehr als 90%

[114] Alle weiteren Anzuchtvarianten (Lee #707 + #179; Schattiergewebe) dienten dem wissenschaftlichen Vergleich; die erzeugten Pflanzen sind für die Praxis nicht geeignet. Zu den Düngungsversuchen siehe Abschnitt 2.4.4

[115] Hier sei darauf hingewiesen, dass eine Gewächshausproduktion von langen und dünnen Trieben mit bis zu drei Metern Länge für Baumschuler keineswegs konventionell ist, sondern vielmehr als absolut exotisch angesehen wird.

[116] Firma Helix-Pflanzen, Leipzig.

den die Pflanzen mittels eines Gießwagens optimal mit Wasser und Dünger versorgt.[117] Die so erzeugten Pflanzen erreichten Trieblängen von bis zu 3 Metern, im Durchschnitt ca. 2,3 Meter und erwiesen sich in der praktischen Verwendung als ausreichend biegsam. Diese Anzuchtvariante hat sich unter anderem auch deshalb als sinnvoll herausgestellt, weil für die Baubotanik geeignete Triebe im Überschuss produziert werden können und nicht verwendete Pflanzen an Baumschulen weiterverkauft werden. Dadurch kann eine wichtige Voraussetzung für baubotanisches Entwerfen und Bauen – die ständige Verfügbarkeit geeigneten Pflanzenmaterials – zumindest für eine Baumart und bestimmte Eigenschaften (Minimalanforderungen) gelöst werden.

Abbildung 49 Halbkommerzielle Produktion von Platanen für baubotanische Anwendungen im Gewächshaus. Links: Aufstellung in einer Bodendeckerkultur. Rechts: Ausschnitt. Durchschnittliche Trieblänge ca. 2,3 m. (Fa. Helix Pflanzen, Leipzig)

Aus Gründen der wissenschaftlichen Vergleichbarkeit (Verfügbarkeit und Homogenität des Pflanzenmaterials) wurde in den Versuchen eine einjährige Wurzelbasis gewählt. Es ist anzunehmen, dass mit einer zwei- oder mehrjährigen Wurzelbasis größere Trieblängen erreicht werden können.[118] Zusätzlich könnte das Triebwachstum durch eine Verlängerung der täglichen Belichtungsdauer (Tagverlängerung) oder durch eine Verlängerung der Vegetationsperiode (künstliche Belichtung und Temperierung) erreicht werden. Ferner wäre es interessant zu untersuchen, inwiefern das (Längen-)Wachstum durch die Anwendung von Phytohormonen gesteigert werden könnte.

Die Übertragung weiterer Versuchsergebnisse in die Praxis war bislang nicht möglich, da mit den untersuchten Ansätzen ein relativ hoher Zeit- und Kostenaufwand verbunden ist. So ist das Anbringen und Kontrollieren der Umhüllungen im Bereich der Blätter extrem aufwändig und die zur Lichtfilterung eingesetzten Folien sind mit Preisen von ca. 10 EUR/m² relativ teuer. [119]

---

[117] Entsprechend der Versuchsergebnisse scheint eine Maximalversorgung mit Dünger zumindest bei voller Belichtung das Längenwachstum in ähnlicher Weise zu steigern wie eine dunkle Umhüllung (25 cm mehr Zuwachs in Kammer 2 im Vergleich zu Kammer 7); die biomechanischen Eigenschaften werden zumindest nicht nachteilig beeinflusst.

[118] Je besser das Wurzelwerk entwickelt ist, umso besser ist die Wasser- und Nährstoffaufnahme, sodass das Wachstum gefördert wird. Stark zurückgeschnittene, regenerationsfähige Gehölze bilden sogenannte Stockausschläge, die einen sehr großen Jahreszuwachs erreichen können. Dabei wird das Triebwachstum (zumindest anfangs) auch durch in der Wurzelmasse eingelagerte Reservestoffe gefördert. (ROLOFF, A. 2004. *Bäume. Phänomene der Anpassung und Optimierung,* Landsberg am Lech, ecomed verlagsgesellschaft. S. 166)

[119] Gewächshausfolie ab 0,50 EUR/m²

Gleichzeitig wirkt sich die Lichtfilterung negativ auf die Gesamtwachstumsleistung aus. Hier wäre ein Ansatz denkbar, direkt bei der Herstellung der Gewächshausfolie spezielle Pigmente einzuarbeiten, die photosynthetisch nicht bzw. wenig aktives Licht (z. B. grüner Bereich) in FR-Strahlung umwandeln, um so das R/FR-Verhältnis zu reduzieren, ohne die phytosynthetisch aktive Strahlung zu verringern. Wie in Abschnitt 2.2.1 (Fußnote 63) dargestellt, werden vergleichbare Folien, jedoch mit gegenteiliger Zielsetzung, bereits getestet. Dabei ist jedoch zu bedenken, dass derartige Folien immer im großindustriellen Maßstab, d. h. aber einer Größenordnung von mehreren 100.000 m² ökonomisch hergestellt werden können.

Abbildung 50 Gewächshausbeleuchtung mit blauen und roten LEDs. Rechts eine Art Lichtvorhang, bei dem die Lichtquelle sehr nah an den photosynthetisch aktiven Organen platziert werden können. (Fotos: Osram)

Anstatt Sonnenlicht zu filtern, wäre auch eine künstliche Beleuchtung bzw. Zusatzbeleuchtung mit einem kleinen R/FR-Verhältnis möglich. Hier scheinen zunächst gewöhnliche Glühlampen geeignet zu sein, die in erheblichem Umfang FR-Strahlung emittieren. Aufgrund ihres sehr geringen Wirkungsgrades (Wärmeverlust etc.) werden sie jedoch im Gartenbau kaum eingesetzt und sollten auch aus ökologischen Gründen nicht genutzt werden. Interessant wäre der Einsatz von LEDs unterschiedlicher Transmissionsspektren, wie sie mittlerweile in wissenschaftlichen Wachstumskammern und testweise auch im Gartenbau eingesetzt bzw. getestet werden (Abbildung 50). Durch den Einsatz von blauen und roten LEDs kann das Wachstum bei relativ geringem Energieeinsatz insgesamt gesteigert werden (photosynthetisch aktiver Strahlungsbereich) und durch FR-emittierende LEDs, die unmittelbar im Bereich der (grünen) Triebe platziert werden, könnte zusätzlich eine künstliche Schattenfluchtreaktion hervorgerufen werden.[120]

2.5 Zusammenfassung

Mit den durchgeführten Untersuchungen zur Produktion von Pflanzen als baubotanisches Konstruktionsmaterial wurde versucht, durch die gezielte Steuerung von Umweltfaktoren möglichst lange und dünne Triebe zu erzeugen, die sich leicht und in engen Radien biegen lasen und so in der Baubotanik universell einsetzbar sind. Dazu wurde in einem speziellen Anzuchtgewächshaus die spektrale Zusammensetzung des Lichts durch Filterfolien gezielt verändert, um die Pflanzen bei größtmöglicher Gesamt-Wachstumsleistung zu einer starken Schattenfluchtreakti-

[120] Allerdings sind LEDs, die im FR-Bereich (735 nm) emittieren, nach wie vor sehr teuer, da sie nicht in großen Stückzahlen gefertigt werden.

on anzuregen.[121] Als Baumart wurde *Platanus acerifolia* gewählt, da diese Art insgesamt für baubotanische Projekte gut geeignet ist. Als besonders effektiv stellte sich eine Umhüllung der Achsen mit lichtfilternder oder lichtdichter Folie heraus. Die so behandelten Triebe wurden ca. 25 cm länger als die vergleichbarer Kontrollpflanzen und erreichten Längen von ca. 260 cm (Jahreszuwachs). Da es gleichzeitig zu einer deutlichen Reduktion der Durchmesser kam, ergab sich gegenüber den Kontrollen eine Steigerung des Schlankheitsgrades[122] um ca. 41 % (H/D = ca. 200). Durch zusätzliche Düngung konnte das Längenwachstum der Triebe um weitere 25 cm gesteigert werden (bei vergleichbarem H/D-Verhältnis).

In einem zweiten Schritt wurden die so erzeugten Triebe anatomisch[123] und biomechanisch[124] untersucht. Durch Anzucht in gefiltertem Licht (sehr kleines Verhältnis von rotem zu dunkelrotem Licht) und insbesondere durch Umhüllung der Achsen mit lichtdichten oder lichtfilternden Folien konnte eine Reduktion des E-Moduls um bis zu 3.000 MPa erreicht werden (E-Modul der Kontrollen um 8.000 MPa). In Kombination mit der oben beschriebenen Reduktion der Durchmesser ergab sich dadurch bei den lichtdicht oder lichtfilternd umhüllten Achsen eine Reduktion der Steifigkeit von ca. 70%. Damit lassen sich die so produzierten Pflanzen sehr viel leichter Biegen und sind damit weitaus besser für baubotanische Anwendungen geeignet als die unbehandelten, im Gewächshaus gewachsenen Kontrollen. Dabei ist anzumerken, dass eine transparente Umhüllung der Achsen – vermutlich aufgrund des Berührungsreizes – zu einem verminderten Längenwachstum und zu einem geringfügig erhöhten E-Modul führte. Ursache für diese deutlichen Unterschiede sind nicht – wie die anatomischen Untersuchungen zeigten – Unterschiede in der Gewebeverteilung. Vielmehr ist davon auszugehen, dass durch eine dunkle Umhüllung die Versteifung der Achsen bzw. des Holzes unterbunden wird.

Bei Biege-Bruchversuchen zeigten die meisten Triebe insbesondere im basalen Bereich ein gutmütiges Bruchverhalten (zähes Brechen), während die oberen Triebabschnitte häufig plötzlich versagten und spröde brachen. Alle im Versuchsgewächshaus gewachsenen Pflanzen ließen sich in sehr engen Radien biegen ($R < 5{,}5$ cm) und erfüllen daher in diesem Aspekt die gesteckten Mindestanforderungen ($R < 10$cm). Zu Kontrollzwecken gemessene, im Freiland gewachsene Triebe erfüllen diese Anforderungen jedoch nicht und konnten nur bis zu einem Radius von 20 bzw. 15 cm gebogen werden.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen konnte eine halbkommerzielle Produktion von Platanen in einer Größenordnung von 2.500 Pflanzen pro Jahr begonnen werden. Dabei werden die Pflanzen in einem Produktionsgewächshaus in engen Reihen aufgestellt, um die positiven Wirkungen des Gewächshausanbaus und natürliche Konkurrenzeffekte nutzen zu können. Weitere Versuchsergebnisse (z. B. Umhüllung) konnten noch nicht in die Praxis übertragen werden, da mit diesen Ansätzen ein nicht unerheblicher Zeitaufwand und Investitionsbedarf verbunden ist. Inwiefern sich neue Beleuchtungstechniken (LED-Technik) gezielt zur Steigerung des Längenwachstums in der gartenbaulichen Praxis einsetzen lassen, soll in weiterführenden Untersuchungen erprobt werden.

---

[121] Pflanzen reagieren auf ein niedriges Verhältnis von roter zu dunkelroter Strahlung im Licht mit einer reduzierten Verzweigung und einer Steigerung des Längenwachstums auf Kosten des Dickenwachstums.

[122] Verhältnis von Trieblänge zu Triebdurchmesser.

[123] Verteilung der Gewebe Mark, Xylem (Holz) und Cortex (Rinde) und deren Anteil am Flächenträgheitsmoment wurden ermittelt.

[124] Ermittlung des strukturellen E-Moduls mittels 4-Punkt-Biegung und des möglichen Biegeradius mittels 2-Punkt-Biegung; Beschreibung des Bruchverhaltens.

3 Verwachsungsversuche: Entwicklung baubotanischer Verbindungstechniken

3.1 Einleitung

Verwachsungen spielen in der Baubotanik – wie bereits im ersten Kapitel mehrfach erwähnt – eine zentrale Rolle, da sie konstruktiv, pflanzenphysiologisch und ästhetisch von Bedeutung sind: Konstruktiv, weil sie als „Holzverschweißungen“ eine große mechanische Belastbarkeit entwickeln können und damit die Tragfähigkeit baubotanischer Strukturen gewährleisten. Pflanzenphysiologisch, weil durch sie die Möglichkeit gegeben ist, viele kleine Pflanzen zu einer größeren physiologischen Einheit und damit zu einem künstlich geformten, jedoch selbstständig lebensfähigen Gesamtorganismus zu verbinden (vgl. Pflanzenaddition). Und ästhetisch, weil an verwachsenen Knotenpunkten das Zusammenspiel technischen Fügens und pflanzlichen Wachsens besonders gut ablesbar ist: Die Verbindungen entstehen ausschließlich durch Wachstumsprozesse – sie kommen aber nur zustande, weil die Pflanzen technisch miteinander verbunden wurden.

Aus diesem Grund sind Techniken, mit deren Hilfe Pflanzenachsen so verbunden werden können, dass Verwachsungen entstehen, die wichtigsten Bautechniken der Baubotanik. Denn nur wenn es gelingt, Verwachsungen auf verlässliche, praktikable und bezahlbare Art und Weise zu erzeugen, können baubotanische Projekte in der Dimension von Bauwerken oder parkartigen Anlagen realisiert werden. Im Folgenden werden die biologischen Grundlagen natürlicher Verwachsungen sowie bereits etablierte Techniken zur Erzeugung von Verwachsungen kurz vorgestellt.[125] Aus diesem Stand der Forschung und der Technik leitet sich ein Forschungs- und Entwicklungsbedarf ab, der die Zielsetzung der anschließend ausführlich dargestellten Versuchsreihen vorgibt. Im Rahmen dieser Versuche wurde die Eignung unterschiedlicher – teils bekannter, teils neu entwickelter – Verbindungstechniken an 10 verschiedenen Baumarten untersucht.

3.1.1 Natürliche Verwachsungen

3.1.1.1 Vorkommen und ökophysiologische Bedeutung

Verwachsungen werden in unseren Breiten häufig als etwas Kurioses, gar Exotisches angesehen, da sie bei europäischen Baumarten nur selten beobachtet werden können. Dies ist zunächst der einfachen Tatsache geschuldet, dass sich Äste und Stämme aufgrund ihres Verzweigungsmusters und des Phototropismus[126] meist nicht berühren und sie allein schon deshalb nicht verwachsen. Nur aufgrund eher unwahrscheinlicher, meist zufälliger Ereignisse kommen sie überhaupt miteinander in Kontakt und verkeilen sich beispielsweise derart ineinander, dass sie dauerhaft und fest aufeinander gedrückt werden – eine wesentlich Voraussetzung für das Zustandekommen von Verwachsungen (Abbildung 51 links). Diese Voraussetzung ist bei den unterirdischen Pflanzenteilen, die unserer unmittelbaren Anschauung entzogen sind, meiste sehr viel häufiger gegeben, da sich Wurzeln im Erdboden oft nicht frei entwickeln können, sondern vor-

[125] Das Verbinden von Pflanzen mit technischen Bauteilen wird in dieser Arbeit nicht näher untersucht. Siehe dazu das aktuell laufende Promotionsvorhaben von Oliver Storz (ITKE/Universität Stuttgart).

[126] Aufgrund des Wachstums hin zum Licht weichen die Triebe einander aus.

handene Hohlräume etc. als „Wachstumspfade“ nutzen. Dadurch ist die Wahrscheinlichkeit recht hoch, dass sie sich kreuzen und somit berühren, wobei sie gleichzeitig durch die umgebende Erde aneinander gedrückt werden und deshalb nicht selten verwachsen. So zeigen verschiedene Untersuchungen, dass Wurzelverwachsungen für viele Baumarten typisch sind und in einigen Waldbeständen konnte durch Freilegung der Wurzelsysteme nachgewiesen werden, dass ein Großteil der Bäume unterirdisch durch Verwachsungen miteinander verbunden ist (Abbildung 51 rechts). Die ökophysiologische Rolle bzw. Bedeutung dieser Verwachsungen ist meist jedoch nicht geklärt, in einigen Fällen konnte allerdings nachgewiesen werden, dass Wasser und Assimilate zwischen den Bäumen ausgetauscht werden und dass beispielsweise durch den Wurzelverbund im Boden die Gefahr des Windwurfs verringert wird.[127] Insofern erfüllen Verwachsungen durchaus auch in gewöhnlichen Waldbeständen physiologische und mechanische Funktionen, sie sind weit weniger selten als gemeinhin angenommen wird und die im ersten Teil der Arbeit beschriebenen tropischen Würgefeigen stellen nur insofern eine Ausnahme dar, als dass die Verwachsungen hier oberirdisch und sehr viel häufiger auftreten und damit zum Habitus der Art erkennbar beitragen.

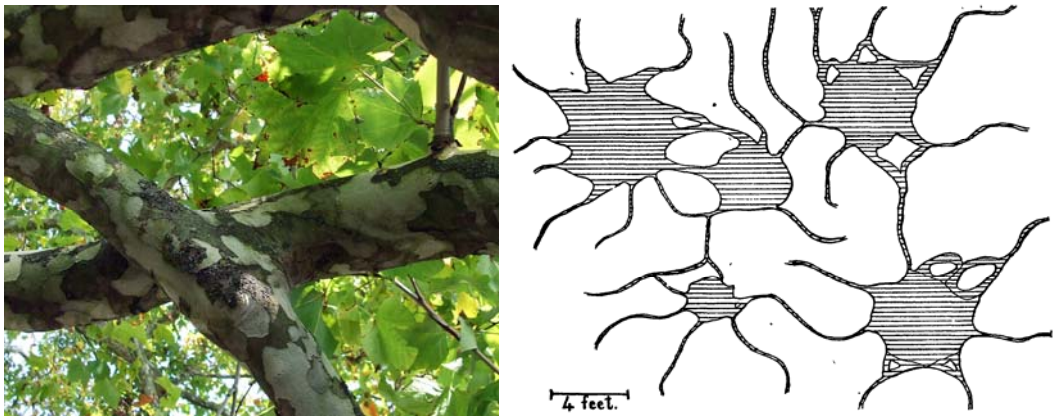


Abbildung 51 Links: Natürliche Verwachsung von Platanenästen.(Foto: Ferdinand Ludwig) Rechts: Grundrissdarstellung durch Wurzelverwachsungen miteinander verbundener Bäume (Beddie, 1942).

3.1.1.2 Verwachsungsprozess

Die bei der Entstehung natürlicher Verwachsungen zu beobachtenden Wachstums- und Entwicklungsvorgänge sind für die Entwicklung baubotanischer Verbindungstechniken von größtem Interesse, da vergleichbare Prozesse initiiert werden sollen. Die zu beobachtenden Prozesse werden im Folgenden anhand der Arbeit von Millner (1932) dargestellt, der unterschiedliche Entwicklungsstadien am Beispiel von *Hedera helix* (gemeiner Efeu) im Detail untersuchte und dokumentierte. Bei Efeu sind Verwachsungen häufig zu beobachten, da sich die kletternden Triebe oft kreuzen und dank ihrer Verankerung mit dem Untergrund (Haftwurzeln) relativ fest aufeinander gedrückt werden. Nach Millner kann der Verwachsungsprozess in zwei Hauptphasen unterteilt werden, wobei dem eigentlichen Verwachsen einige Entwicklungsschritte

[127] vgl. z. B. LYR, H. (ed.) 1992. *Physiologie und Ökologie der Gehölze*, Jena; Stuttgart: Fischer. S. 432; MUDGE, K., JANICK, J., SCOFIELD, S. & GOLDSCHMIDT, E. E. 2009. *A History of Grafting*, Wiley & Sons. S. 445f.

vorausgehen und sich eine finale Entwicklungsstufe anschließt. Die Einteilung in die zwei Entwicklungsphasen bezieht sich auf die nacheinander ablaufende Fusion unterschiedlicher Gewebe: Zunächst verbinden sich die Rinden-, anschließend die Holzgewebe. Erst wenn auch der zweite Entwicklungsschritt vollzogen wurde, kann von einer vollständigen Verwachsung gesprochen werden, die dann auch mechanisch und physiologisch leistungsfähig ist. [128]

Bevor es zu ersten Anzeichen des Verwachsens kommt, sind Folgen und Wachstumsreaktionen erkennbar, die unmittelbar aus dem Druck an der Kontaktstelle resultieren. Dort werden die Rindengewebe zusammengedrückt und nach außen hin abgelenkt. Dabei kommt es auch zu einem Aufreißen der Festigungsgewebe in der Rinde und zu einer Zerstörung der abschließenden Korkschichten bzw. der Epidermis. In diesen Bereichen bildet das Kork-Kambium nach außen hin mehrere Lagen dünnwandiger Zellen von Wundkork und sondert nach innen kleinere, dünnwandige Zellen ab (Abbildung 52).

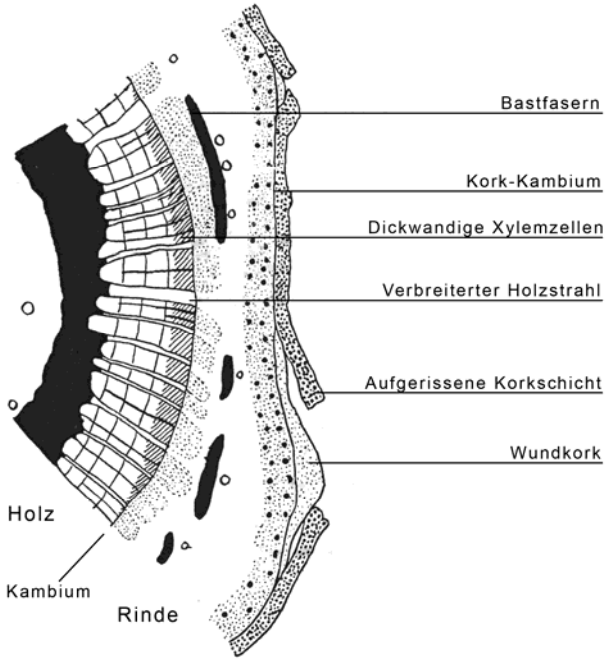


Abbildung 52 *Abgeflachter Bereich einer Kontaktstelle (Hedera helix) vor Einsetzen des ersten Verwachsungsschritts (Millner, 1932)*

Die Gewebe des Xylems werden durch den Druck an der Kontaktstelle nicht unmittelbar deformiert, die unter dem Einfluss des Druckes entstehenden Zellen sind jedoch kleiner und dickwandiger. Gleichzeitig nimmt die Breite eines oder mehrerer mittig in der Kontaktzone liegender Holzstrahlen deutlich zu, während die anderen Strahlen nach außen hin abgelenkt werden. Aufgrund dieser Reaktionen erscheinen die Stämme im Querschnitt an der Kontaktstelle abge-

[128] Die Untersuchung natürlicher Verwachsungen ist eindeutig ein Randgebiet der botanischen Forschung. Die vorliegende Literatur ist nicht sehr umfangreich und das Thema scheint in den vergangenen Jahrzehnten kaum Beachtung gefunden zu haben, weshalb hier auf die Arbeit von 1932 zurückgegriffen wird. Weitere Untersuchungen und Beschreibungen von Verwachsungen finden sich unter anderem bei: LOEHLE, C. & JONES, R. H. 1990. Adaptive significance of root grafting in trees. *Functional ecology,* 4. BORMANN, F. H. 1962. Root grafting and non-competitive relationships between trees. *In:* KOZLOWSKI, T. T. (ed.) *Tree Growth.* New York: Ronald Press Company. Anatomische Darstellungen von Verwachsungen finden sich darüber hinaus auch in: SCHWEINGRUBER, F. H. 2007. *Wood Structure and Environment,* New York, Springer-Verlag.

flacht, während sie an den Rändern wulstartig verdickt sind. Diese Entwicklung kann als ein gegenseitiges Überwallen der Verwachsungspartner angesehen werden, das mit dem Umwallen eines technischen Teils bzw. Fremdkörpers durch eine Pflanze vergleichbar ist.

Diese Situation ist der Ausgangspunkt des ersten Verwachsungsschritts: An den Stellen, an denen die Korkschicht aufgebrochen ist – meist im Bereich eines verdickten Holzstrahls – nehmen die dünnwandigen Zellen innerhalb des Korkkambiums deutlich an Größe zu, sodass sich das Korkkambium nach außen wölbt. Durch weitere Zellteilungen des Korkkambiums entwickelt sich eine Art Höcker, der weiter wächst und sich durch die teils beschädigten bzw. deformierten Rindengewebe hindurchdrückt.[129] Den vorher gebildeten, aufliegenden Wundkork gewissermaßen vor sich her schiebend wächst dieser Höcker einem gegenüberliegenden Höcker entgegen, der zeitgleich dem Korkkambium des anderen Stammes entspringt (Abbildung 53 links). Sobald die Höcker aufeinander treffen, durchbrechen sie die trennenden Schichten des Wundkorks und fusionieren. Es entsteht ein zunächst dünnes, beide Stämme verbindendes Gewebeband, das sich durch Zellteilung rasch verbreitert. Die neu gebildeten Zellen vergrößern sich und nehmen die Form gewöhnlicher Rindenzellen (Grundgewebe) an, wobei keine neuen Festigungsgewebe gebildet werden. Durch dieses Wachstum des verbindenden Gewebebandes werden das alte Periderm und der Wundkork nach außen weggedrückt. Die Rindengewebe der beiden Stämme sind nun verwachsen, während die Gewebe des Xylems noch voneinander getrennt sind. Zu diesem Zeitpunkt besteht bereits die Möglichkeit, dass die Pflanzen Assimilate und auch Pflanzenhormone austauschen, die in der Rinde transportiert werden. Es findet jedoch noch kein beide Individuen übergreifender Transport von Wasser und Nährstoffen statt und die Verwachsung verfügt noch nicht über eine nennenswerte mechanische Festigkeit.

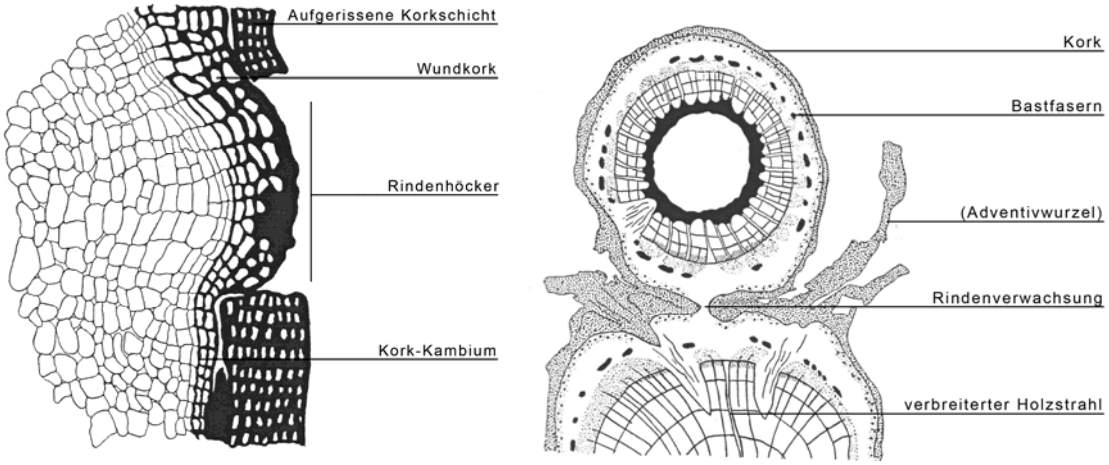


Abbildung 53 Entstehung einer Rindenverwachsung (Hedera helix). Links: Im Korkkambium entstehender Rindenhöcker. Rechts: Rindenhöcker, die punktuelle zu einem Gewebekontinuum verwachsen sind.(Millner, 1932)

Die noch anstehende Fusion der Holzkörper erfolgt im zweiten Verwachsungsschritt. Hierbei kommt es zunächst im Bereich eines verbreiterten Holzstrahls zu einer verstärkten Zellteilungsaktivität des Kambiums, das sich dadurch lokal nach außen wölbt. Es entsteht auch hier eine Art Höcker, der innerhalb des zuvor entstandenen verbindenden Rindengewebes auf einen vergleichbaren Höcker zu wächst, welcher vom anderen Stamm an entsprechender Stelle gebil-

[129] Wie diese Wachstumsprozesse gesteuert werden ist im Detail nicht bekannt. Phytohormone spielen aber wahrscheinlich eine wesentliche Rolle, vgl. Abschnitt 3.4.1.1.

det wird. [130] Durch das Wachstum dieser Höcker werden die umgebenden Gewebe beiseitegeschoben und zusammengedrückt. Sobald die Höcker miteinander in Kontakt kommen, fusionieren die Gewebe, indem sich die zusammentreffenden Kambiumzellen in gewöhnliche Parenchymzellen (Holz-Grundgewebe) ausdifferenzieren und ihr Wachstum einstellen (Abbildung 54). Dadurch entwickelt sich ein beide Stämme umfassender, durchgehender Kambiummantel und durch die nun einsetzende Wachstumsaktivität des Kambiums entsteht an der Verwachsungsstelle ein gemeinsamer Jahresring mit durchgehenden Xylem- und Phloemgeweben. Die Verwachsung ist nun vollständig, da alle wichtigen Gewebe zu einem Kontinuum verwachsen sind (Abbildung 55 links). Diese Phase der Xylemverwachsung folgt nach Millner meist unmittelbar auf das Verwachsen der Rinde und beide Prozesse finden in der Regel innerhalb einer Vegetationsperiode statt.

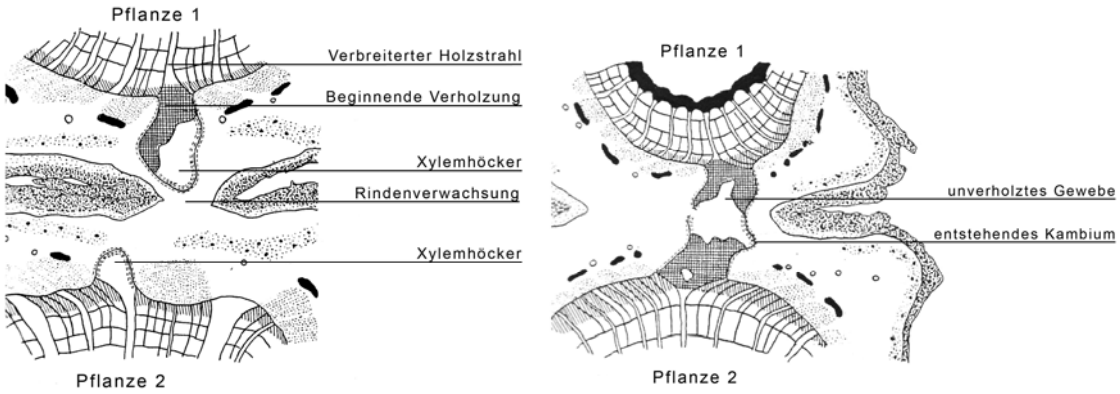


Abbildung 54 Entstehung einer Xylemverwachsung (Hedera helix). Links: Aufeinander zu wachsende Xylemhöcker, dem Kambium entspringend. Rechts: Fusion der Xylemhöcker, Entstehung eines durchgehenden Kambiummantels. (Millner, 1932)

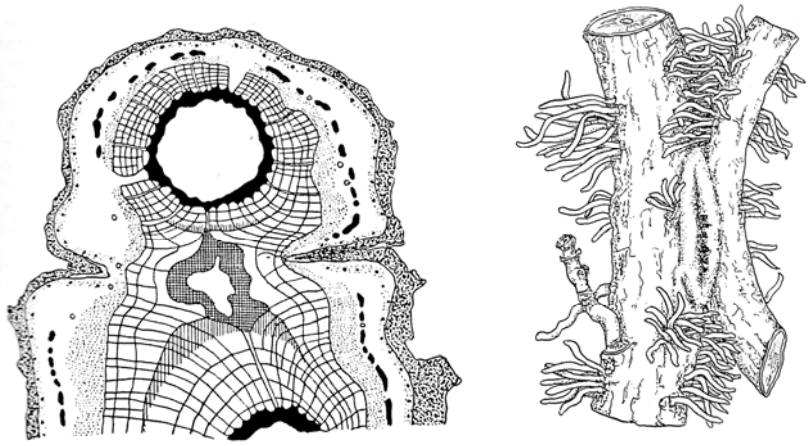


Abbildung 55 Vollständige Verwachsung. Links: Im Querschnitt ist ein gemeinsamerer Jahrring zu erkennen und an der Verwachsungsstelle ein Bereich unverholzter Gewebe (weiß). Rechts: In der Ansicht sind kallusartige Gewebe und nach außen gedrückte Rindenreste zu erkennen. (Millner, 1932)

[130] Im Unterschied zu den erstgenannten Höckern, die dem Rindengewebe entspringen, gehen diese nun vom Xylem aus.

Der weitere Entwicklungsverlauf ist dann dadurch gekennzeichnet, dass die Zellteilungsaktivität des Kambiums im Bereich der Verwachsung größer ist als in anderen Bereichen und der zusammengewachsene Holzkörper so allmählich eine gleichmäßige, mehr oder weniger kreisförmig Kontur annimmt. Die anfangs vorhandene Fuge zwischen den verwachsenen Stämmen verschwindet dadurch allmählich, wobei in diesem Bereich die nach außen gedrückten Gewebereste oft über Jahre anhaften, wodurch die Verwachsungsstelle als solche erkennbar bleibt (Abbildung 55 rechts).

3.1.2 Techniken der Pflanzenveredelung

3.1.2.1 Ziele und Anwendung

Die Tatsache, dass Pflanzen miteinander verwachsen können, machen sich Gärtner seit je her zu Nutze. Sie entwickelten im Laufe der Zeit ausgeklügelte Techniken, um Verwachsungen künstlich zu erzeugen, insbesondere mit dem Ziel der Pflanzenveredelung. Aber auch in anderen Bereichen werden die Techniken angewendet, beispielsweise um geschädigte Bäume zu „reparieren“, indem verletzte Rindenbereiche durch Bypass-Pfropfungen überbrückt werden.[131] Darüber hinaus kamen und kommen sie zum Einsatz, um bestimmte Wuchsformen und Pflanzenstrukturen zu erzeugen (s. u.).

Mit dem Veredeln, das als eine Methode der Pflanzenvermehrung gilt, wird meist das Ziel verfolgt, Pflanzen mit gewünschten, möglichst exakt identischen Eigenschaften zu erzeugen, indem genetisch identische Edelreiser auf generativ[132] vermehrte Unterlagen gepfropft werden. Genutzt wird das Verfahren aber auch, um Pflanzen zu erzeugen, deren Eigenschaften durch die genetischen Unterschiede der Verwachsungspartner zustande kommen. So werden beispielsweise oft ertragreiche Obstsorten auf schwachwüchsige Unterlagen gepfropft, sodass kleinwüchsige Bäume entstehen, die bei Pflege und Ernte Vorteile bieten. Diese Überlagerung der Eigenschaften von Reis und Unterlage kommt jedoch nicht wie bei einer Kreuzung (generativen Vermehrung) durch Mischung der Erbinformationen zustande, sondern entsteht durch korrelative Beeinflussung der verwachsenen Pflanzenteile.

3.1.2.2 Vorgehensweise und Verwachsungsprozess

Während bei den oben beschriebenen natürlichen Verwachsungen die zusammenwachsenden Pflanzen trotz der physiologischen Verschmelzung im Prinzip als selbstständig lebensfähige Einzelpflanzen erhalten bleiben, entsteht beim Veredeln aus den Verwachsungspartnern ein pflanzlicher Organismus, der über nur ein Wurzelsystem und ein Sprosssystem verfügt. Das Wurzelsystem geht dabei aus dem einen Verwachsungspartner hervor, der als Unterlage bezeichnet wird, während das Sprosssystem aus dem anderen hervorgeht, den man als „Reis“ oder auch „Edelreis“ bezeichnet. Reis und Unterlage können unterschiedlicher Art sein, müssen aber der gleichen Gattung angehören.[133]

Bei den meisten Veredelungsarten werden nicht ganze Pflanzen, sondern oft nur Pflanzenteile verwendet (Abbildung 56 links). Lediglich bei dem Verfahren des Ablaktierens sind sowohl

---

[131] Siehe hierzu u. a. GARNER, R. J. 1988. *The grafter´s handbook,* London, Cassell. S. 273f.

[132] D. h. mittels Samen.

[133] Btr. Pflanzenaddition vgl. Fußnote 141.

Reis als auch Unterlage mehr oder weniger gleichartig und vollständig entwickelte Pflanzen (Abbildung 56). Meist ist jedoch nur die Unterlage eine voll entwickelte Pflanze, deren Zweige und Blätter während oder nach dem Veredelungsprozess entfernt werden. Das Edelreis hingegen ist häufig ein sehr kleiner Abschnitt einer Pflanzenachse, im Extremfall eine einzige Knospe, die in die Rinde der Unterlage eingesetzt wird (Okulation). Die zur Anwendung kommenden Veredelungstechniken unterscheiden sich in der Praxis stark, da für unterschiedliche Entwicklungsstadien bzw. Beschaffenheiten von Reis und Unterlage sowie für verschiedene Pflanzenarten jeweils spezielle Techniken entwickelt wurden. Jedoch ist all diesen Techniken gemein, dass die Pflanzenteile, die miteinander verwachsen sollen, an der Verbindungsstelle so angeschnitten und zusammengefügt werden, dass gleichartige Gewebe zur Deckung gebracht werden.[134] Die Gewebe, die miteinander verwachsen sollen, sind also nicht wie bei natürlichen Verwachsungen durch Abschlussgewebe oder andere Gewebeschichten voneinander getrennt. Vielmehr werden die Pflanzen durch das Anschneiden verletzt, sodass sich zwei Wundflächen gegenüberstehen bzw. berühren (Abbildung 57). Daher kann das Verwachsen hier auch als „gemeinsames Verheilen von Wunden“ bezeichnet werden und der Verwachsungsprozess läuft deutlich anders ab, als bei natürlichen Verwachsungen.

Abbildung 56 Links: Typische Veredelungsmethoden (Pfropfen und Kopulation), bei denen das Reis ein kleiner Pflanzenabschnitt ist, während die Unterlage eine vollständige Pflanze darstellt. Rechts: Methode das Ablaktierens, bei der in der Regel sowohl Reis als auch Unterlage vollständige Pflanzen sind. (Jansen et al. 1998, S. 268)

Ausgehend vom Kambium, dem Korkambium oder anderen teilungsfähiger Zellen bilden sich an den Wundzonen beider Verwachsungspartner Wundgewebe (Kallus), die zunächst an der Verbindungsstelle bestehende Hohlräume ausfüllen und fusionieren, sobald sie in Kontakt miteinander kommen. In Bereichen, in denen sich Kambiumzellen der Verwachsungspartner gegenüberstehen, differenzieren einige Kalluszellen zu Kambiumzellen und es entsteht eine sogenannte kambiale Brücke (Abbildung 57). Dieses neu entstandene Kambium bildet nun Xylemzellen nach innen und Phloemzellen nach außen, sodass eine Leitbündelverbindung zwischen den Verwachsungspartnern entsteht. An den äußeren Wundrändern entwickelt sich ein Periderm als neues Abschlussgewebe.(Jansen et al. 1998, S. 266)

Der geschilderte Verwachsungsprozess läuft meist innerhalb von wenigen Wochen ab und ist damit deutlich schneller als der natürlicher Verwachsungen. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die Verwachsung scheitert, wenn in dieser relativ kurzen Zeit keine (insbesondere Wasser

[134] D.h., dass angeschnittene Rinden- bzw. Holzflächen und Kambiumschichten einander gegenüberstehen bzw. sich berühren.

leitende) Verbindung zustande kommt. Denn dann trocknen die Edelreiser aus und sterben ab, da diese ohne eigenes Wurzelsystem selbst kein Wasser aufnehmen können. Zu einer erfolgreichen Veredelung kommt es also nur dann, wenn die Verwachsungsprozesse rasch einsetzen und schnell zu einer vollständigen, physiologisch funktionsfähigen Verwachsung führen. Dafür müssen drei wesentliche Bedingungen erfüllt sein: Die Veredelungspartner müssen präzise an- bzw. zugeschnitten und anschließend genau platziert werden. Sie müssen dann fest und unbeweglich aufeinander gedrückt werden und die Verbindungsstelle muss luftdicht verschlossen werden, damit ein Austrocknen der Wunde und das Eindringen von Krankheitserregern verhindert wird. In einigen Fällen muss auch das Edelreis selbst vor Austrocknung geschützt werden. (vgl. Garner, 1988)

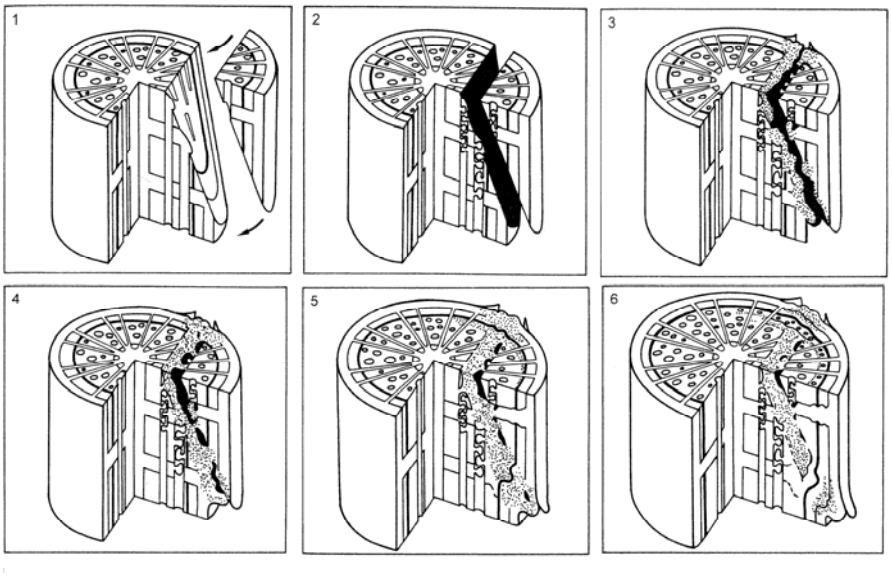


Abbildung 57 Schematische Darstellung des Verwachsungsprozesses bei Veredelungen. 1+2: An der Verbindungsstelle stehen sich zwei Wundflächen gegenüber. 3+4: Zwischen den Wundflächen bestehende Hohlräume werden durch Wundgewebe (Kallus) gefüllt. 5: Zwischen den sich gegenüberstehenden Kambien entstehet eine „kambiale Brücke" (schwarze Linie). 6: Verbindender Kambiummantel, der einen gemeinsamen Jahrring hervorbringt.(Fink 1999, S. 321)

3.1.2.3 Stand der Technik und der Forschung

Aufgrund der oben beschriebenen Anforderungen müssen Veredelungen mit äußerster Sorgfalt ausgeführt werden, was ein großes gärtnerisches Können voraussetzt. Um die Veredelungspartner miteinander zu verbinden, werden traditionell Bastfasern und andere Bänder eingesetzt, die anschließend mit Baumwachs verstrichen werden, um die Verbindungsstelle zu versiegeln. Die eingesetzten Verbindungsmittel müssen einem Wachstumsdruck, der sich an der Verbindungsstelle durch die entstehenden Gewebe aufbaut, einen ausreichend großen Widerstand entgegensetzen, da die Verbindung ansonsten wieder auseinandergedrückt wird.[135] Nachdem die Pflanzen verwachsen sind, müssen die Bänder dann rechtzeitig entfernt werden, da es sonst durch das weitere Dickenwachstum zu negativen Folgen wie Saftstau, Strangulationen und mechanischer Schwächung kommt (s. u.); ein vorzeitiges Entfernen kann jedoch andererseits dazu führen, dass die Verwachsung wieder aufbricht. Dieser Umstand erfordert regelmäßige Kontrol-

[135] Vgl. Abschnitt 3.1.3.3.

len und bedeutet einen großen Zeitaufwand. Deshalb werden heute vermehrt dehnbare Bänder eingesetzt, die steif genug sind, um dem Wachstumsdruck während des Verwachsens genüg Gegendruck zu liefern, anschließend jedoch dem Dickenwachstum nachgeben und/oder nach einer gewissen Zeit durch die Einwirkung von Sonnenlicht aufreißen. Gleichzeitig dienen diese Bänder als Versiegelung, sodass ein Verstreichen mit Baumwachs o. ä. überflüssig wird.[136]

Trotz dieser technischen Entwicklungen und einiger Automatisierungsansätze, die das Anschneiden und Verbinden der Pflanzen betreffen[137], muss jedoch insgesamt festgehalten werden, dass das Veredeln in den meisten Fällen eine handwerkliche und zeitaufwändige Tätigkeit geblieben ist, die großes gärtnerisches Geschick voraussetzt. Die hohen Anforderungen an eine präzise Ausführung bei dem gleichzeitig „heterogenen Werkstoff" Pflanze lassen wenig Spielraum für Automatisierungen und bedeutende Vereinfachungen. Gleichzeitig sind die Verwachsungsprozesse beim Veredeln aufgrund ihrer großen gartenbaulichen Bedeutung weitaus besser untersucht und dokumentiert als die natürlicher Verwachsungen.

3.1.3 Verwachsungen und Verbindungstechniken in der Baubotanik

3.1.3.1 Ausgangsbedingungen

Genauso wie beim Veredeln wird auch in der Baubotanik versucht, Verwachsungen künstlich zu erzeugen. Während beim Veredeln jedoch das Ziel verfolgt wird, Pflanzen eines bestimmten Genotyps zu vermehren oder Pflanzen mit bestimmten Eigenschaften durch die Kombination unterschiedlicher Genotypen zu erzeugen, werden in der Baubotanik Verwachsungen genutzt, um pflanzliche Strukturen einer bestimmten Form und Größe zu erzeugen. Gleiches gilt für die im ersten Kapitel vorgestellten gartenkünstlerischen Ansätze[138] und die erwähnten Beispiele des Bauens mit Pflanzen.[139]

Dieser Unterschied in der Zielsetzung wirkt sich unter anderem darin aus, dass die in der Baubotanik zum Einsatz kommenden Pflanzen eine bestimmte Form und Größe aufweisen müssen, um als strukturbildende Elemente in Frage zu kommen. Deshalb sind die verwendeten Pflanzen(teile) meist deutlich größer als die beim Veredeln genutzten – dafür sind sie in der Regel genetisch identisch oder zumindest artgleich. Demgegenüber werden beim Veredeln Reis und Unterlage aus praktischen Gründen meist möglichst klein gewählt, da Form und Größe hier keine entscheidenden Kriterien sind – das Augenmerk liegt ja darauf, Pflanzenteile unterschiedlichen Genotyps miteinander zu verbinden.

In der weiteren Konsequenz scheint es in der Baubotanik zweckmäßig zu sein, mit ganzen Pflanzen und nicht mit Pflanzenteilen zu arbeiten. Denn wenn die Pflanzenteile (z. B. einzelne Triebe) die notwendige Größe aufweisen, ist auch ihr Wasserbedarf entsprechend hoch, weshalb

---

[136] Z. B. „Buddy Tape", siehe Abschnitt 3.2.6.1.

[137] Beispielsweise werden heute Veredelungszangen eingesetzt, mit denen Ω-förmige Schnitte ausgeführt werden können, um Reis und Unterlage so anzuschneiden, dass sie wie zwei Puzzleteile zusammengesteckt werden können. Im Weinbau und vor allem bei der Veredelung von Gemüsepflanzen werden teils Veredelungsautomaten eingesetzt, die vergleichbar arbeiten und alle Arbeitsgänge vollautomatisch ausführen.

[138] Z. B. die „grünen Paläste von Crescenci oder die Arborsculpture. (vgl. Abschnitt 1.3.1.3 und 1.3.1.5)

[139] Z. B. Wiechulas wachsende Häuser sowie die „Nachfolgearbeiten" von Kirsch und Block. (vgl. Abschnitt 1.3.1.7 und 1.3.3.4)

sie schneller austrocknen.[140] Im Umkehrschluss bedeutet die Entscheidung, mit ganzen, zumindest mittelfristig eigenständig lebensfähigen Pflanzen zu arbeiten, dass der Verwachsungserfolg nicht davon abhängig ist, dass in sehr kurzer Zeit (innerhalb weniger Wochen) eine physiologisch funktionsfähige Verwachsung zustande kommt.

Ein weiterer Unterschied zwischen dem Veredeln und baubotanischen Verbindungstechniken ist darin zu sehen, dass beim Veredeln aus Reis und Unterlage eine „neue Einzelpflanze" mit nur einem Wurzel- und einem Sprosssystem entsteht, während in der Baubotanik pflanzliche Verbundstrukturen mit einer Vielzahl von Wurzelbereichen und netzartig aufgebauten Achsenstrukturen gebildet werden. Gleichwohl liegt z. B. bei der baubotanischen Pflanzenaddition die Situation vor, dass (langfristig) einige wenige Pflanzen das Wurzelsystem der entstehenden Pflanzenstruktur bilden, während alle anderen zum Aufbau des (artifiziell geformten) Sprosssystems beitragen. Insofern erfüllen einige Pflanzen die Funktion der „Unterlage", während andere als „Reis" dienen – die Verwachsung muss also genau wie beim Veredeln physiologisch voll funktionsfähig sein, damit die entstehende Pflanzenstruktur insgesamt lebensfähig ist.[141]

Aufgrund dieser Unterschiede sind Verbindungstechniken in der Baubotanik vor dem Hintergrund anderer Ausgangsbedingungen zu entwickeln und müssen im Detail andere Anforderungen erfüllen: Weil die oft sehr langen Pflanzenachsen häufig an mehreren Stellen miteinander verbunden werden und dazu in eine bestimmte Form gebogen werden müssen, ist es fast nicht möglich, sie wie beim Veredeln so anzuschneiden und zu verbinden, dass gleichartige Gewebe präzise aufeinander zu liegen kommen. Dieser Aufwand ist andererseits aber auch nicht nötig, da die Pflanzen nicht zwingend innerhalb kürzester Zeit verwachsen müssen – es ist völlig ausreichend, wenn dies beispielsweise innerhalb von einer Vegetationsperiode geschieht.

3.1.3.2 Stand der Technik und der Forschung

Die obigen Ausführungen zeigen, dass die beim Veredeln etablierten Verbindungstechniken in der Baubotanik eher ungeeignet sind. Vielmehr scheint es sinnvoller zu sein, die Pflanzen derart zu verbinden, dass Verwachsungsprozesse initiiert werden, die denen natürlicher Verwachsungen gleichen. Zu einem ähnlichen Schluss kam bereits Anfang des 20. Jh. der Gärtner Arthur Wiechula, der für die von ihm beabsichtigte Wandbildung spezielle Verbindungstechniken entwickelte. Obwohl seine Zielsetzung außerhalb des botanisch Möglichen liegt (vgl. Abschnitt 1.4.1), entwickelte er ein ausgeklügeltes und durchaus praktikables Verbindungsverfahren, das er sogar erfolgreich patentieren ließ.[142] Dies ist auch insofern erwähnenswert, als dass bei den allermeisten gartenkünstlerischen Ansätzen (Arborsculpture usw.) trotz vergleichbarer Zielset-

---

[140] Der Pomologe Nocolaus Gaucher berichtet zwar, ihm sei es gelungen, bis zu zwei Meter lange „Reiser" zu verpfropfen. Dies ist aber nicht belegt und setzt vermutlich einen großen Aufwand und enormes gärtnerisches Geschick voraus. Vgl. GAUCHER, N. 1908. Handbuch der Obstkultur : aus der Praxis für die Praxis bearbeitet. 3 ed. Berlin: Parey.

[141] Die Methode der Pflanzenaddition ist der Veredelungsmethode des Ablaktierens sehr ähnlich. Reis und Unterlage bestehen hier in der Regel aus zwei vollständigen Pflanzen, die an einer Stelle parallel miteinander verbunden werden. Nach erfolgter Verwachsung wird bei der einen Pflanze („Reis") das basale Ende, und bei der anderen („Unterlage") das apikale Ende entfernt (Abbildung 56 links). Das Verfahren wird auch zum Umveredeln älterer Bäume verwendet, wobei die Nähe zur Pflanzenaddition noch deutlicher wird. Dazu werden in der Baumkrone des als Unterlage dienenden Baumes Pflanzen in Töpfen angeordnet und mit einem Zweig verbunden. Nach dem Verwachsen wird wie oben beschrieben verfahren und der Topf entfernt. Bei der Pflanzenaddition wird im Prinzip genauso vorgegangen, nur dass mehrere Pflanzen vertikal übereinander angeordnet und verbunden werden.

[142] Ausführlich dargestellt in: KIRSCH, K. 1996. *Naturbauten aus lebenden Gehölzen,* Xanten, Organischer Landbau-Verl. Lau.

zungen (Bildung von Pflanzenstrukturen) meist auf traditionelle Pfropftechniken zurückgegriffen wird (vgl. Reams, 2005).

Die Grundidee des von Wiechula entwickelten Verfahrens besteht darin, dass durch zwei sich kreuzende Pflanzenachsen ein Nagel getrieben wird, auf den an der Austrittsseite eine spezielle, selbstsichernde Gegenplatte geschoben wird. Dadurch sollen die Pflanzen aneinander gedrückt und so ein Verwachsungsprozess initiiert werden. Wiechula geht dabei auch davon aus, dass das Verwachsen auch dadurch angeregt bzw. gefördert wird, dass die Pflanzen durch den Nagel verletzt (gespalten) werden (Abbildung 58 links).[143]

Konstantin Kirsch und Herman Block, die die Ideen von Wiechula Ende der 1980er Jahre aufgriffen (vgl. Kapitel 1), setzen bei der Verbindungstechnik am gleichen Punkt an. Sie nutzen teils die von Wiechula patentierte Methode der Nagelverbindung und entwickelten darüber hinaus eigene Methoden und Techniken. Im einfachsten Fall bilden sie Gitterwände, indem sie die Pflanzen derart miteinander verflechten, dass sie an der Kontaktstelle gegenseitig aneinander gedrückt werden.[144] Als Alternative zu den Nagelverbindern von Wiechula nutzen sie u. a. Edelstahlschrauben („Spax“) und experimentierten mit Federstahlbügeln, wie sie in Baumschulen zum Verbinden von Bambusstäben genutzt werden (Abbildung 58 rechts). Während die Verbindungsmittel von Wiechula und auch die Edelstahlschrauben immer in der Verbindung verbleiben und einwachsen, empfiehlt Block, die Federstahlbügel wieder zu entfernen, bevor sie einwachsen. Er weist aber darauf hin, dass sie auch belassen werden können und dann vollständig einwachsen ohne dass es dabei zu negativen Folgen käme.[145] Genutzt werden des weiteren Schnüre, Bänder, Drähte und Kabelbinder, wobei Block hier darauf hinweist, dass diese Verbindungsmittel unbedingt entfernt werden sollten, bevor sie einwachsen, da es ansonsten zu einer deutlichen Schwächung der Verbindungsstelle käme (Block 2008, S.42f.). Zum Fixieren der Triebe werden ferner spezielle Gummibänder eingesetzt, die dem Dickenwachstum nachgeben, nach Angaben von Block jedoch nicht dazu dienen, Verwachsungen zu initiieren. Darüber hinaus experimentiert Kirsch auch mit japanischen Holznägeln, um die Pflanzen an der Kreuzungsstelle miteinander zu verbinden (Kirsch, 2009).

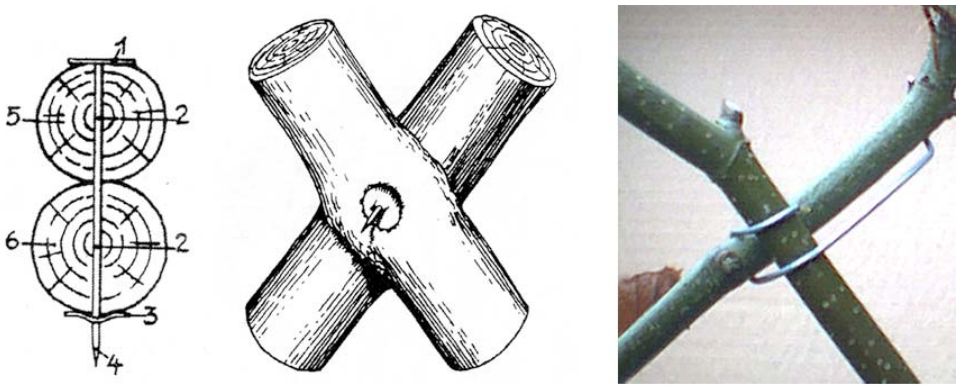


Abbildung 58 Links: Nagelverbindung von A. Wiechula. Rechts: Verbindung mit Federstahlbügel nach K. Kirsch.(Kirsch, 1996)

[143] Nach Kirsch (1996) patentierte Wiechula noch weitere Verbindungstechniken, darunter eine Technik, bei der zwei Pflanzen mit einem Federstahlbügel zusammengehalten werden und eine, bei der die Pflanzen mit Draht verbunden werden.

[144] Ein derartiges Verflechten kommt für die Baubotanik nicht in Frage, da die Abstände der Pflanzen hierfür in der Regel zu groß sind und die Pflanzen daher nicht fest genug aneinander gedrückt werden.

[145] Auf Abbildungen sind jedoch deutliche Folgen von Saftstau etc. zu erkennen.

Block weist recht allgemein darauf hin, dass einige Arten, z. B. Buche und Hainbuche, recht rasch verwachsen würden, während sich andere Arten, wie beispielsweise Ahorn, „mehr Zeit lassen“ würden (Block 2008, S.12). Diese Beobachtungen decken sich mit Literaturangaben über die Häufigkeit bzw. das Auftreten von natürlichen Verwachsungen[146] und werden meist mit der unterschiedlich dicken Rinde der Baumarten erklärt.

Im Gegensatz zum Veredeln liegen im Fall der hier vorgestellten Verbindungstechniken jedoch keine wissenschaftlichen Arbeiten vor, in denen die Verwachsungsprozesse, die Eignung der Verbindungstechniken oder die zwischen den Baumarten zu beobachtenden Unterschiede näher untersuchen würden. Damit fehlen wichtige Voraussetzungen, um die Techniken gezielt weiterzuentwickeln und Erkenntnisse auf die Baubotanik und auf andere Baumarten übertragen zu können.

3.1.3.3 Problemstellung

Baubotanische Verbindungstechniken müssen gewährleisten, dass die Pflanzen an den Verbindungsstellen verlässlich miteinander verwachsen. Dazu müssen die Triebe dauerhaft so aneinandergedrückt werden, dass eine „natürliche Verwachsung“ initiiert wird. Unabhängig davon, wie stark die Pflanzen beim Verbinden aneinandergedrückt werden (Anpressdruck), baut sich im Laufe der Zeit an der Verbindungsstelle ein Wachstumsdruck auf, der aus der Wachstumsaktivität der beiden, durch die Rindenschichten getrennten Kambien resultiert und Werte um 0,7 N/mm² annimmt.[147] Die aus diesem Druck resultierende Kraft, durch die die Pflanzenachsen an der Verbindungsstelle voneinander weg gedrückt werden, ist proportional zu der Kontaktfläche. Bei einer Kontaktfläche von einem Quadratzentimeter ergibt sich beispielsweise eine Kraft in einer Größenordnung von ca. 70 N. Mit dem Dickenwachstum (und der voranschreitenden gegenseitigen Überwallung) nehmen die Kontaktflächen und die daraus resultierende Kraft so lange zu, bis sich die Holzkörper der Verwachsungspartner miteinander verbinden. An den Stellen, an denen es zu einer Xylemverwachsung kommt, sind dann keine Druck erzeugenden Kambien mehr vorhanden und gleichzeitig entsteht eine Verbindung, die selbst Kraft aufnehmen kann und dem Wachstumsdruck einen Widerstand entgegen setzt.[148]

Bis zu diesem Zeitpunkt müssen die aus dem Wachstumsdruck resultierenden Kräfte von den zum Einsatz kommenden Verbindungsmitteln aufgenommen werden, die entsprechend dimensioniert werden müssen. Die Kräfte müssen aber auch von den Pflanzenachsen auf die Verbindungsmittel übertragen werden bzw. dann wiederum von diesen an bestimmten Stellen in die Pflanzenachsen eingeleitet werden. Die Frage, wie diese Kraftübertragung konstruktiv gelöst wird, ist äußerst kritisch, da die Gefahr besteht, dass die Pflanzen in ihrem weiteren Wachstum und in ihrer physiologischen Funktionsfähigkeit negativ beeinträchtigt werden. Im Extremfall kann es zu Schädigungen kommen, die ein Absterben der Pflanzen bewirken oder die Verbindung mittel- und langfristig mechanisch schwächen.

---

[146] Vgl. die entsprechenden Hinweise in WEISGERBER, H., LANG, U. M., ROLOFF, A. & STIMM, B. (eds.) 2006. *Enzyclopädie der Holzgewächse,* Landsberg am Lech: ecomed.

[147] Gemessen an Pappelwurzeln; Angabe nach: BRUDER, G. R. 1998. Finite-Elemente-Simulation und Festigkeitsanalysen von Wurzelverankerungen. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe. S. 100; vgl. auch: MASSELTER, T. & SPECK, T. 2008. Quantitative and qualitative changes in primary and secondary stem organization of *Aristolochia macrophylla* during ontogeny: functional growth analysis and experiments. *Journal of Experimental Botany,* 59**,** 2955-2967.

[148] Der von Kontaktflächen ausgeht, an denen es (noch) nicht zu einer Verwachsung der Xylemgewebe kam.

Prinzipiell bieten sich zwei Möglichkeiten an, die Kräfte in die Pflanzen einzuleiten, nämlich erstens von außen, d. h. über die Rinde, und zweitens direkt in das (belastbarere) Holz. Die erste Variante hat den Vorteil, das beim Verbinden keine unmittelbaren Verletzungen entstehen, es besteht jedoch die Gefahr, dass die lebenden Gewebe der Rinde und des Kambiums an der Kontaktstelle zerdrückt bzw. gequetscht werden. Geben die außen angebrachten Verbindungsmittel dem Wachstumsdruck nicht nach, kann es ferner dazu kommen, dass der Assimilattransport im Phloem beeinträchtigt wird (Saftstau). Geschieht dies über längere Zeit und betrifft einen die gesamte Achse umfassenden Bereich, können die sich unterhalb der Verbindungsstelle befindlichen Gewebe nicht mehr ausreichend versorgt werden und sterben ab (Strangulation). Im zweiten Fall (Einleiten der Kraft in das Holz) werden beim Verbinden zwangsläufig die Rindengewebe, meist auch die Gewebe des Xylems verletzt, beispielsweise wenn eine Schraube in das Holz eingedreht wird. Auch wenn Bäume über sehr effektive Wundheilungs- und Abschottungsmechanismen verfügen (vgl. Shigo, 1994), besteht dennoch – vor allem bei größeren und/oder weit in das Xylem reichenden Verletzungen – immer die Gefahr der Infektion durch Fäulnisbakterien.

Jegliche Form der Gewebeverletzung führt zu einer mechanischen Schwächung und Behinderungen im Stofftransport (Saftstau) führen zu ungleichem Wachstum und damit zu einem Durchmessersprung, der eine Sollbruchstelle darstellt (vgl. Ergebnisteil). Diese Schwachpunkte werden durch adaptives Wachstum und Wundheilung im Laufe der Zeit zwar ausgeglichen bzw. reapariert, aber es besteht zumindest vorübergehend die Gefahr, dass die Pflanzenachsen mechanisch versagen, z. B. indem sie an der Verbindungsstelle abknicken. In der Folge von Strangulationen/Saftstau kann es ferner dazu kommen, dass Rinde einwächst und dadurch eine auch längerfristig bestehende Schwachstelle entsteht (siehe Ergebnisbeschreibung und Diskussion). Es gilt also, Verbindungstechniken zu entwickeln, die den oben beschriebenen mechanischen Anforderungen (Wachstumsdruck) genügen und gleichzeitig möglichst keine der hier beschriebenen negativen Folgen verursachen.

Neben diesen physiologischen[149] und (bio)mechanischen Anforderungen müssen die Verbindungstechniken auch eine Reihe praktischer Anforderungen erfüllen: Da in einem einzigen baubotanischen Bauwerk Hunderte oder gar Tausende von Verbindungsstellen auftreten können, ist es unbedingt notwendig, dass das Verbinden möglichst ökonomisch erfolgt: Die Verbindungsmittel sollten möglichst günstig sein und das Verbinden sollte möglichst wenig Zeit in Anspruch nehmen. Die Techniken sollten eine weitgehende Mechanisierung/Automatisierung erlauben, wobei ebenfalls zu beachten ist, dass das Verbinden in den meisten Fällen auf der Baustelle, d. h. auch unter Baustellenbedingungen erfolgt. Die Techniken dürfen ferner keine regelmäßige Nachsorge/Kontrolle erfordern,[150] da die Stellen nach dem Verbinden oft unzugänglich sind und sich daher nur schwer kontrollieren bzw. nachbearbeiten lassen.

3.1.4 Fragestellung und Zielsetzung der Versuche

Die durchgeführten Versuche wurden vor dem Hintergrund von zwei längerfristig angelegten Zielsetzungen konzipiert. Erstens wird das Ziel verfolgt, Verbindungstechniken zu entwickeln, die den oben dargestellten Anforderungen gerecht werden, d.h. verlässlich zu Verwachsungen führen, praktikabel sind und die Entwicklung der Pflanzen nicht negativ beeinträchtigen. Dabei

---

[149] Zu denen auch gehört, dass als Verbindungsmittel keine für die Pflanze toxischen Substanzen verwendet werden dürfen.

[150] Z. B. Entfernen der Verbindungsmittel wie dies bei den traditionellen Verbindungsmitteln beim Veredeln und bei einigen von Kirsch und Block genannten Techniken der Fall ist.

zeichnet sich bereits ab, dass – genauso wie beim Veredeln – für unterschiedliche Beschaffenheiten der Pflanzenachsen (Dicke, Alter, Entwicklungszustand) und für verschiede Baumarten unterschiedliche Techniken zu entwickeln sind. Langfristig soll eine Art Konstruktionsatlas entstehen, in dem für die jeweilige praktische Anwendung und unterschiedliche Ausgangsbedingungen geeignete Verbindungstechniken angegeben sind.

Zum Zweiten wird das langfristige Ziel eines baubotanischen Artenkatalogs verfolgt, d. h. eines Nachschlagewerks, in dem für die Baubotanik geeignete Arten und deren relevante Eigenschaften gelistet sind. Aufgrund der großen Bedeutung von Verwachsungen sind insbesondere solche Arten geeignet, bei denen es möglich ist, mit einfachen Mitteln innerhalb möglichst kurzer Zeit gute Verwachsungen zu erzeugen. Eher ungeeignet sind solche Arten, bei denen dies nicht oder nur mit einem größeren Aufwand gelingt.

Mit den im Folgenden dargestellten Versuchen wird das Ziel verfolgt, die Reaktion verschiedener Baumarten auf unterschiedliche Verbindungstechniken zu untersuchen, wobei die Untersuchungen sowohl das Verwachsungsergebnis als auch die unmittelbare Reaktion auf das Verbindungsmittel bzw. die Verbindungstechnik selbst (Strangulation, Wundreaktion etc.) betreffen. Dazu wurde die Entwicklung der Verbindungsstellen nicht nur morphologisch, sondern auch anatomisch dokumentiert. Erstmals wurden in größerem Umfang (bzw. systematisch) Quer-, Längs- und Serienschnitte durch Verwachsungen angefertigt, die vergleichende Aussagen sowohl über den Einfluss der Baumart als auch der angewendeten Techniken zulassen. Ziel ist dabei, die zu beobachtenden Unterschiede u. a. holz- und rindenanatomisch erklären und die Eignung einer Verbindungstechnik im Detail bewerten zu können. Damit soll auch eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf andere Arten bzw. Techniken ermöglicht werden – eine wesentliche Voraussetzung sowohl für die gezielte Weiterentwicklung der Techniken als auch für die Erstellung eines baubotanischen Artenkatalogs.

Gleichzeitig ist darauf hinzuweisen, dass die Ergebnisse aufgrund der geringen Wachstumsgeschwindigkeit von Bäumen sowie der Vielzahl an Anforderungen und möglichen Baumarten keine abschließende Bewertung darstellen, sondern nur einen Zwischenstand wiedergeben. Aufgrund dieser Einschränkungen und wegen des geringen Stands der Technik und der Forschung wurden die Versuche als ein Screening prinzipiell geeigneter Baumarten und Verbindungstechniken konzipiert, wobei die Beschreibung bzw. Bewertung der Ergebnisse bei den meisten Aspekten rein qualitativ erfolgt.

3.2 Material und Methoden

3.2.1 Zeitliche Gliederung der Versuche

Die durchgeführten Untersuchungen gliedern sich in drei Versuchsreihen, die in den Jahren 2007, 2008 und 2009 angelegt wurden. Die 2007 angelegten Versuche wurden als Vorversuche konzipiert, um mit Hilfe der dort gewonnenen Erkenntnisse die Versuchsreihe 2008 im Detail entwickeln zu können.[151] Mit ca. 560 Einzelpflanzen und 660 Verbindungstellen wurde die Versuchsreihe 2008 am breitesten angelegt und steht im Mittelpunkt der Untersuchungen. Ziel war hier, die Reaktion unterschiedlicher Baumarten auf eine (bzw. zwei) standardisierte Verbindungstechniken zu untersuchen, sowie weitere Verbindungstechniken und unterschiedliche Kreuzungsgeometrien an mehreren Baumarten zu testen. Diese Versuchsreihe wird durch die 2009 angelegten Versuche dahingehend ergänzt, dass einige Verbindungstechniken leicht modifiziert wurden, um offensichtliche Schwachpunkte der Verbindungstechniken zu korrigieren und entstandene Unklarheiten bzw. offene Fragen zu klären. Darüber hinaus wurden 2009 einige weitere, 2008 nicht berücksichtigte Verbindungstechniken untersucht.

3.2.2 Baumarten

3.2.2.1 Relevante Arteigenschaften

Um für die Versuche eine geeignete Auswahl an Baumarten zu treffen, wurde versucht, im Vorfeld Arteigenschaften zu identifizieren, die sich maßgeblich auf das Verwachsen auswirken bzw. bei der Reaktion der Pflanze auf unterschiedliche Verbindungstechniken eine wichtige Rolle spielen. Als relevant wurden insbesondere zwei Eigenschaften angesehen, und zwar erstens der anatomische Aufbau von Holz und Rinde und zweitens die Wachstumsgeschwindigkeit bzw. „Wüchsigkeit“ einer Baumart. Es wurde versucht, die Arten so auszuwählen, dass ein möglichst breites Spektrum dieser Eigenschaften abgedeckt ist. Ferner wurden nur solche Arten gewählt, die in Mitteleuropa als Wald- oder Parkbäume verbreitet sind. Für die Verwendung einer Art in der Baubotanik sind natürlich noch viele weitere Eigenschaften von großem Interesse, wie z. B. Stressresistenz, Regenerationsvermögen und insbesondere auch gestalterische Aspekte (z. B. Lichtwirkung der Blätter, Struktur der Rinde usw.). Eine Darstellung und Berücksichtigung all dieser Aspekte würde jedoch den Rahmen dieser Arbeit sprengen und bleibt einem baubotanischen Artenkatalog (s. o.) vorbehalten.

Dass holz- und rindenanatomische Aspekte für das Verwachsen relevant sind, legt der in Abschnitt 3.1.1.2 dargestellte Entstehungsprozess natürlicher Verwachsungen nahe. So müssen für das Verwachsen der Rindengewebe (erster Verwachsungsschritt) die Abschluss- und Festigungsgewebe der Rinde aufreißen, weshalb anzunehmen ist, das Umfang und Aufbau dieser Gewebe hier eine entscheidende Rolle spielen. Ähnliches gilt dann für die Entstehung und Entwicklung der beschriebenen Rindenhöcker, die vom Korkkambium bzw. von parenchymatischen (teilungsfähigen) Geweben der Rinde ausgehen: Umfang und Lage dieser Gewebe in der Rinde sind von Art zu Art unterschiedlich.

---

[151] Diese Versuche werden nicht im Detail dargestellt. Die Ergebnisse werden soweit erforderlich bei der Begründung der 2008 gewählten Methoden angeführt.

Und auch beim zweiten Verwachsungsschritt, dem Verwachsen der Holzkörper, ist anzunehmen, dass rinden- aber auch holzanatomische Eigenschaften eine wichtige Rolle spielen. So haben die aufeinander zu wachsenden Xylemhöcker ihren Ursprung meist in Holzstrahlen, weshalb Größe und Verteilung der Holzstrahlen für das Verwachsen relevant sein können. Und da sich die Xylemhöcker vor dem Verschmelzen der Holzkörper durch die trennenden Rindenschichten hindurchdrücken müssen, spielt vermutlich auch hier die Rindenanatomie, insbesondere wieder Umfang, Anordnung und Art der Festigungsgewebe, eine Rolle.

Die Wachstumsgeschwindigkeit einer Baumart ist für die Versuche schon insofern relevant, als dass innerhalb des begrenzten Beobachtungszeitraums je nach Wüchsigkeit ganz andere Reaktionen beobachtet werden können. Vor allem ist anzunehmen, dass es bei schnellwüchsigen Arten nicht nur zu einer viel stärkeren Durchmesserzunahme, sondern damit verbunden auch zu einer größeren Zunahme der Kontaktflächen kommt. Je nach dem, wann die Verwachsung der Xylemkörper einsetzt, nimmt dann auch der Wachstumsdruck, der vom Verbindungsmittel aufgenommen werden muss, stärker bzw. schneller zu. (vgl. Abschnitt 3.1.3.3)

3.2.2.2 Gewählte Baumarten

Vor diesem Hintergrund wurden für die Versuchsreihen 2008 die Arten Silberweide (*Salix alba*), Schwarzerle (*Alnus glutinosa*), gemeine Birke (*Betula pendula*), gewöhnliche Robinie (*Robinia pseudoacacia*), gewöhnliche Platane (*Platanus acerifolia*), Spitzahorn (*Acer platanoides*), gemeine Esche (*Fraxinus excelsior*), Stieleiche (*Quercus robur*), Hainbuche (*Carpinus betulus*) und Rotbuche (*Fagus sylvatica*) ausgewählt.[152]

Eine umfassende Beschreibung der Arten ist wie bereits erwähnt Aufgabe eines baubotanischen Artenkatalogs. Um die Diskussion relevanter Arteigenschaft auf das Verwachsungsergebnis innerhalb dieser Arbeit zu ermöglichen, werden wichtige holz- und rindenanatomische Eigenschaften der verwendeten Arten im Anhang dargestellt und die Arten hier in aller Kürze vorgestellt. Unter den gewählten Arten zeigen vier ein schnelles bis sehr schnelles Wachstum, nämlich die Pionierbaumarten Weide, Schwarzerle, Birke und Robinie. Die drei Arten Platane, Ahorn und Esche zeigen eine etwas geringere Wachstumsgeschwindigkeit, gelten aber vor allem in der Jugend noch als starkwüchsig. Auch Eiche gilt teils noch als in der Jugend starkwüchsig[153], während Hainbuche und Buche vor allem in der Jugend als langsamwüchsig zu bezeichnen sind.[154]

3.2.2.3 Holzanatomische Eigenschaften

Bezüglich der Holzanatomie wird meist zunächst zwischen Zerstreut- und Ringporern unterschieden. Bei Zerstreutporern sind die Gefäße kleiner und mehr oder weniger gleichmäßig innerhalb der Jahrringe verteilt. Ringporer verfügen meist über Gefäße mit größerem Durchmesser, die sich hauptsächlich im Frühholz befinden. Entsprechend sind Ringporer meist anatomisch insgesamt etwas gröber strukturiert, was teilweise auch Größe und Verteilung der Holzstrahlen betrifft. Funktionell unterscheiden sich die beiden Gruppen dahingehend, dass die wasserleitenden Gewebe bei Zerstreutporern Jahre bis Jahrzehnte aktiv bleiben, während die die

---

[152] Im Folgenden werden die Baumarten der Einfachheit halber mit ihrem deutschen Namen angeführt, und zwar verkürzt auf den übergeordneten Artbegriff, d. h. z. B. Weide, Platane, Buche usw. Gemeint sind jeweils die hier beschriebenen Arten.

[153] Die Art zeigte in den Versuchen jedoch ein sehr geringes Wachstum,.

[154] Alle Angaben aus: WEISGERBER, H., LANG, U. M., ROLOFF, A. & STIMM, B. (eds.) 2006. *Enzyclopädie der Holzgewächse,* Landsberg am Lech: ecomed.

Gefäße der Ringporer teils schon nach einer Vegetationsperiode inaktiv werden und der Wassertransport dann fast ausschließlich im jüngsten Jahrring erfolgt. Unter den gewählten Arten befinden sich drei Ringporer (Robinie, Esche, Eiche), alle anderen sind Zerstreutporer. Trotz dieser ungleichen Verteilung sind bei beiden Typen schnell- mittel- und (eher) langsam wachsende Arten vorhanden. Ferner zeichnen sich insbesondere die Hölzer von Platane und Buche durch einen hohen Anteil an Strahlen aus, während vor allem Eichen über wenige, dafür aber breite Strahlen verfügen.[155]

3.2.2.4 Rindenanatomische Eigenschaften

Auch betreffs der Rinde lassen sich bei den gewählten Arten unterschiedliche Typen unterscheiden, die – zumindest bei älteren Bäumen – bereits äußerlich erkennbar sind. Denn mit voranschreitendem Alter und Dickenwachstum verändert sich der Aufbau der Rinde sehr stark und es entstehen artabhängig unterschiedliche Abschlussgewebe. Bei allen Arten reist das primäre Abschlussgewebe mit einsetzendem Dickenwachstum auf und es entwickelt sich im äußeren Bereich eine teilungsfähige Zellschicht, das Korkkambium, welches ein sekundäres Abschlussgewebe, das Periderm, hervorbringt. Bei den gewählten Arten Hainbuche und Buche bleibt das Korkkambium dauerhaft erhalten, es erweitert sich tangential und passt sich so dem zunehmenden Stammumfang an. An der Oberfläche absterbende und abgeriebene bzw.abgefallene Korkzellen werden so kontinuierlich ersetzt.[156]

Bei den anderen 8 Baumarten stellt das zunächst entstandene Korkkambium nach gewisser Zeit seine Zellteilungsaktivität ein und es entsteht in weiter innen liegenden Rindenschichten ein neues Korkkambium, während die weiter außen liegenden Zellen schützende Substanzen (Suberin) einlagern und absterben. Durch die ständige Wiederholung dieses Vorgangs entsteht eine immer dicker werdende, schützende Borke. Aufgrund ihres Entstehungsmusters, ihrer Struktur und Dicke können mehrere Borkentypen unterschieden werden, von denen bei den mitteleuropäischen Laubbaumarten die Schuppen-Faser-Borke und die Schuppen-Steinzellborke am verbreitetsten sind. Insbesondere Schuppen-Faser-Borken können eine große Dicke erreichen und sind durch eine stark längsrissige Struktur geprägt. Unter den gewählten Arten weisen Ahorn, Esche, Eiche, Robinie und Weide diesen Borkentyp auf. Bei Schuppen-Steinzellborken entstehen rechteckige bis polygonale Platten, die an der Rinde dauerhaft anhaften können oder von Zeit zu Zeit abfallen. Letzteres ist unter den gewählten Arten bei Platane der Fall, die dadurch eine dauerhaft dünn bleibende und sich ständig regenerierende Borke entwickelt. Demgegenüber weisen die Arten Erle und Birke eine Schuppen-Steinzellborke mit anhaftenden Schuppen auf.

Die Borkenbildung setzt meist erst nach einigen Jahren ein und hat damit bei den verwendeten Arten zum Zeitpunkt des Verbindens in der Regel noch nicht bzw. kaum begonnen. Dennoch können die Arten durch den Borkentyp charakterisiert werden, da die Art der Borkenbildung maßgeblich durch den anatomischen Aufbau der inneren Rindenschichten determiniert ist, die zum Zeitpunkt des Verbindens bereits vorhanden sind und sich so potentiell auf das Verwachsen auswirken. Wie die Namen der unterschiedlichen Borkentypen bereits vermuten lassen weisen Arten mit Schuppen-Faserborken viele, meist axial ausgerichtet Fasern in der Rinde auf, während die Rinde von Arten mit Schuppen-Steinzellborken stärker durch Steinzellen geprägt ist, die eine eher polygonale Form aufweisen.

---

[155] Alle Angaben aus: WAGENFÜHR, R. 1996. *Holzatlas,* Leipzig, Fachbuchverlag.

[156] Alle Angaben zu Entwicklung und Anatomie der Rinden aus: VAUCHER, H. 1997. *Baumrinden : Aussehen, Struktur, Funktion, Eigenschaften,* Augsburg, Naturbuch-Verlag.

3.2.3 Pflanzenmaterial

Bei der Wahl des Pflanzenmaterials (d. h. der verwendeten Jungpflanzen) wurde versucht, bei allen Arten möglichst gleiche Anfangsbedingungen zu schaffen. Die Pflanzen sollten also möglichst gleich groß und gleich alt sein und vergleichbare Achsendurchmesser aufweisen. Aufgrund der unterschiedlichen Wachstumsgeschwindigkeiten und Wachstumsmuster lassen sich diese Forderungen jedoch nicht vereinbaren, sodass letztendlich als Auswahlkriterium lediglich die Trieblänge herangezogen wurde. Bei fast allen Arten wurde auf wurzelnackte Jungpflanzen der Baumschulsortierung 80/120 zurückgegriffen[157], lediglich bei Platane musste aufgrund von Lieferengpässen die Sortierung 50/80 verwendet werden.[158] Soweit möglich wurden einjährige Triebe aus Stecklings- oder Sämlingsvermehrung genutzt, bei Arten mit langsamem Wachstum (Eiche, Hainbuche und Buche) musste jedoch auf zwei- bis dreijährige Pflanzen zurückgegriffen werden. Bei den Wiederholungsversuchen 2009 wurde bei Birke die nächstgrößere Sortierung, der leichte Heister[159] mit 125-150 cm Trieblänge, gewählt, da die 2008 verwendeten Pflanzen viel dünnere Achsendurchmesser aufwiesen als die verwendeten Pflanzen der anderen Baumarten.

3.2.4 Praktische Umsetzung

Für die Versuche (Versuchsreihen 2008 und 2009) stand eine in etwa quadratische Fläche von ca. 100 m² in Stuttgart, Innerer Nordbahhof 1, zur Verfügung. Die Fläche war annähernd voll und gleichmäßig besonnt, lediglich in den frühen Morgenstunden kurzfristig leicht beschattet (benachbarte Baumreihe). Die Pflanzen wurden in speziellen Großcontainern gepflanzt, die aus gebrauchten Kunststoffpaletten gefertigt wurden.[160] Diese wurden mit gelochter Noppenfolie (Grundmauerschutzfolie) ausgekleidet und längs mit einer Folie in zwei gleich große Hälften unterteilt. In jede Containerhälfte wurden im Normalfall 8 Pflanzen der gleichen Art gesetzt, wobei in einem Container immer ähnlich wüchsige Arten zusammengefasst wurden. Diese recht dichte Aufstellung der Pflanzen wurde gewählt, weil angenommen wurde, dass in baubotanischen Strukturen vergleichbare Pflanzendichten und damit Konkurrenzbedingungen vorherrschen.

Jeweils 8 Container wurden in 4 ca. Südwest-Nordost orientierten Reihen in zufälliger Reihenfolge aufgestellt (Abbildung 59). Als Pflanzsubstrat wurde Lignoplant Containersubstrat, vorgedüngt mit 4kg Horngries und 3kg Basakote 8-9M je m³, verwendet. In den Jahren 2009 und 2010 wurde je Pflanze mit 33g Triabon und 17g Floranid N32 nachgedüngt. Pflanzenschutzmaßnahmen (insb. Behandlung von Pilzinfektionen) wurden nach Bedarf ausgeführt[161]. Die Bewässerung wurde über Zeitschaltuhren gesteuert und erfolgte über Perlschläuche (zwei je Containerhälfte).[162]

---

[157] D. h. die Haupttriebe wiesen Längen von ca. 80 cm bis 120 cm auf.

[158] Dies bezieht sich sowohl auf die 2008 als auch auf die 2009 angelegten Versuche, bei letzteren wurden die Pflanzen jedoch bereits im März zum Vortreiben in einem Gewächshaus aufgestellt (gepflanzt in 4L-Containern), um die Unterschiede auszugleichen. Alle Pflanzen wurden über die Baumschule Schlegel, Riedlingen, bezogen.

[159] Zweimal verpflanzte Jungpflanze mit verzweigten Seitentrieben.

[160] Innenabmessungen LxBxH ca. 100x110x33 cm; Substratvolumen je Pflanze: 20 – 25 Liter (bei Standardbedingungen von 8 Pflanzen je Containerhälfte)

[161] Dabei wurde das Präparat Bayer Universal Pilzfrei entsprechend Herstellerangaben eingesetzt; stark befallene Triebe wurden regelmäßig entfernt.

[162] Die Gießintervalle wurden regelmäßig an Wetter und Jahreszeit angepasst, um eine optimale Wasserversorgung zu gewährleisten.

Die Pflanzen der Versuchsreihe 2008 wurden am 15.03.08 gepflanzt[163], die Verbindungen wurden zwischen dem 28.05 und dem 16.06. in zufälliger Reihenfolge angelegt, wobei die Triebe an einem einfachen Bambusgerüst fixiert wurden. Um gegenseitige Beschattung zwischen den unterschiedlichen Arten in vertretbaren Grenzen zu halten, wurden insb. die starkwüchsigen Arten zwei- bis dreimal im Jahr zurückgeschnitten.

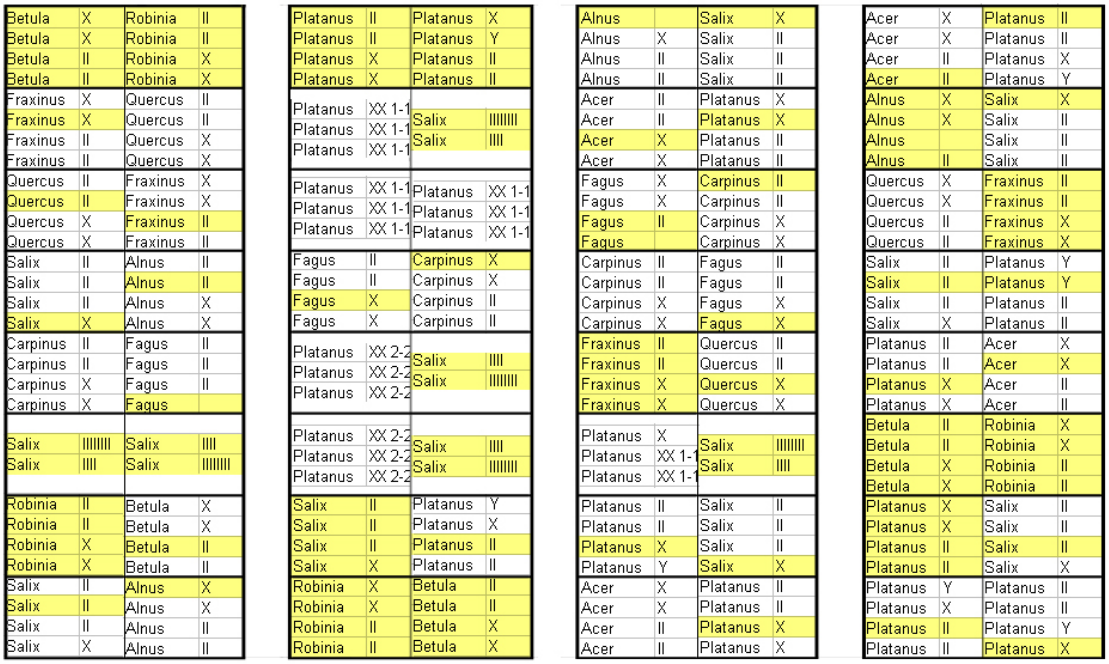


Abbildung 59 Aufstellplan der Pflanzen in der Versuchsreihe 2008. Die gelben Felder markieren Entnahmen nach der ersten Vegetationsperiode. Wo alle Pflanzen einer Containerhälfte entnommen wurden, wurde 2009 neu gepflanzt. Erklärung der Abkürzungen siehe Abschnitt 3.2.5 (X = Kreuzverbindung; II = Parallelverbindung; Y = Tangentialverbindung)

Am Ende der ersten Vegetationsperiode wurden einige Pflanzen bzw. Verbindungen zu Dokumentationszwecken entnommen und solche Verbindungen bzw. Pflanzen entfernt, bei denen offensichtlich war, dass keine Verwachsung (mehr) eintreten würde. Auch wurden alle Verbindungen entfernt, bei denen mindestens eine Pflanze abgestorben war. In der Regel wurde so je Containerhälfte ein Pflanzenpaar entnommen. Darüber hinaus wurden komplette Containerhälften abgeerntet, die dann im Folgejahr (2009) für die Anlage weiterer Versuche zur Verfügung standen. Bei diesen 2009 angelegten Versuchen wurde im Prinzip genauso vorgegangen wie 2008, gepflanzt wurde jedoch zwischen dem 01. und 03.04. Die Verbindungen wurden gute vier Wochen später als im Vorjahr, zwischen dem 17.07. und 19.07.09, angelegt. Ferner ist darauf hinzuweisen, dass die Wachstumsbedingungen insofern andere waren, als dass durch die vorhandenen Pflanzen der Versuchsreihe 2008 das Lichtangebot und der Kronenraum deutlich eingeschränkt waren.

[163] Die Pflanzen wurden vor dem Topfen zur Verbesserung des Anwurzelns in Bio-Algihum Wurzelflott K (Firma Aqua Terra) entsprechend Herstellerangaben getaucht.

3.2.5 Anordnung der Pflanzen, Verbindungsgeometrie

Bei den Versuchen wurden nicht nur unterschiedliche Verbindungstechniken, sondern auch unterschiedliche Pflanzenanordnungen bzw. Verbindungsgeometrien untersucht, die in baubotanischen Strukturen vorkommen (können). Als Standardverbindungen wurden einfache Kreuzungen sowie Parallelverbindungen gewählt. Bei den Kreuzungen (X-Verbindungen) wurden zwei Pflanzen in einem Abstand von knapp 25 cm gepflanzt und um ca. 67° geneigt, sodass sie sich in einem Winkel von ca. 46° (unterer und oberer Winkel) bzw. 134° (Seitenwinkel) kreuzen. Bei den Parallelverbindungen (II-Verbindungen) wurden zwei Pflanzen direkt senkrecht nebeneinander gepflanzt und an vier Stellen übereinander verbunden (ca. 3, 18, 33 und 48 cm über der Triebbasis).

Diese Geometrien wurden bei allen Arten untersucht. Weitere Varianten wurden bei den Arten Weide und Platane untersucht, bei denen aufgrund der Vorversuche bekannt war, dass sie in der Regel recht rasch verwachsen. Diese beiden Baumarten nehmen in den Versuchen insgesamt eine Sonderstellung ein, sie werden im Ergebnisteil auch zu Anfang und am ausführlichsten dargestellt.[164] Bei Weide wurden neben der parallelen Verbindung von zwei Pflanzen auch Verbindungen angelegt, bei denen vier (II-4er-Verbindungen) bzw. acht Pflanzen (II-8er-Verbindung) parallel miteinander verbunden wurden, um die Auswirkungen einer größeren Anzahl an Pflanzenachsen auf das Verwachsungsergebnis zu untersuchen. Bei Platane wurden zwei Varianten von Kreuzungen untersucht, bei denen sich nicht einzelne Pflanzen, sondern Pflanzenpaare kreuzen.[165] Bei der einen Variante dieser Paar-Kreuzungen wurden die Paare miteinander verbunden (Abbildung 60 unten rechts), bei der anderen kreuzen sich die Pflanzen einzeln, sodass sich die Paare am Kreuzungspunkt gegenseitig durchdringen (Abbildung 60 unten Mitte). Bei diesen zusätzlichen Versuchen war die Anzahl der Pflanzen je Containerhälfte[166] und damit auch die Pflanzendichte deutlich höher als bei den Standardversuchen. Des Weiteren wurde bei Platane alternativ zu den Kreuzungen auch eine Variante getestet, bei der die Achsen an der Verbindungsstelle so gebogen wurden, dass sie sich über eine kurze Strecke parallel berührten (Tangentialverbindung).

3.2.6 Verbindungstechniken

3.2.6.1 Versuchsreihe 2008

In den Vorversuchen konnte die Annahme, dass in der Baubotanik Verwachsungen sinnvollerweise durch das Initiieren natürlicher Verwachsungen und nicht durch Methoden des Veredelns erzeugt werden sollten, zunächst bestätigt werden. Bei einfachen Kreuzverbindungen wurden nach einer Vegetationsperiode zwischen an der Kontaktstelle angeschnittenen und nicht-angeschnittenen Exemplaren kaum äußerlich erkennbare Unterschiede festgestellt. Bei allen 2008 und 2009 durchgeführten Versuchen wurden daher die Pflanzen an der Verbindungsstelle nicht angeschnitten.[167]

---

[164] Die Ergebnisse der anderen Arten werden dann in Bezug zu diesen „Leitbaumarten“ abgehandelt.

[165] Die gekreuzten Pflanzenpaare wurden zweimal unterhalb und zweimal oberhalb der Kreuzungsstelle miteinander verbunden. Der Abstand der Verbindungsstellen war hier etwas geringer als bei den Standard-Parallelverbindungen und betrug ca. 10cm. Vgl. Ergebnisteil.

[166] 12 statt 8 Stück je Halbcontainer

[167] D. h. es wurden keine Techniken der Pflanzenveredelung bzw. des Pfropfens genutzt.

Abbildung 60 Verbindungsvarianten (vlnr) oben: Parallelverbindung mit Drahtseil (Robinie), Parallelverbindung mit Buddy-Tape (Weide), Parallelverbindung mit Gewebeband (Weide), Parallelverbindung mit vier Pflanzen (Drahtseil, Weide). Unten: einfache Kreuzverbindung mit Drahtseil (Esche), Paar-Kreuzverbindung durchdringend (1-1-1) (Platane, Drahtseil), Paar-Kreuzverbindung (2-2) (Platane, Drahtseil)

Bei den 2008 angelegten Versuchen wurde von der Hypothese ausgegangen, dass es, u. a. durch Zuhilfenahme neuer Materialen und Verbindungstechniken, möglich seine müsste, die Pflanzen ohne direktes Verletzen der Achsen zu verbinden, indem die auftretenden Kräfte über die Rinde in die Achsen eingeleitet werden (vgl. Abschnitt 3.1.3.3). Dabei kamen zwei prinzipiell unterschiedliche Arten von Verbindungsmitteln zum Einsatz, nämlich erstens einwachsende und zweitens dem Dickenwachstum nachgebende. (vgl. Abbildung 60)

Bei der ersten Methode wurden die Pflanzen mit beide Achsen umschließenden Seilen verbunden. Dabei besteht immer die Gefahr der Strangulation (vgl. Abschnitt 3.1.3.3) weshalb versucht wurde, mit möglichst dünnen, hochfesten Seile zu arbeiten, bei denen angenommen wurde, dass sie einwachsen, bevor es zu einer kritischen Strangulation kommt.[168] Verwendet wurden Edelstahl-Feinstseile mit einem Durchmesser von 0,24 mm (7 verseilte Feindrähte; Bruchfestigkeit laut Hersteller: 58,0 N; AS-Feinstseile GmbH). Die Seile wurden mit einem speziellen Knoten („Konstriktor“) verbunden, der es erlaubt, dass die Achsen fest miteinander verzurrt werden können. Bei diesem Knoten, der mit einem zusätzlichen Kreuzknoten gesichert wurde, werden die Pflanzenachsen durch zwei parallele Seilschlingen zusammengehalten, die direkt aufeinander zu liegen kommen (vgl. Abbildung 60). In einigen Fällen schnitten die Seile bereits beim Verbinden der Pflanzenachsen in die (äußeren) Rindenschichten ein. Dies lässt sich u. a. auf die raue Oberfläche der Drahtseile und damit auf eine Art Sägeeffekt beim Anziehen des Knotens zurückführen.[169] Mechanische Voruntersuchungen dieser Verbindungen ergaben, dass

[168] Ansatz basierend auf Ergebnissen der Vorversuche.

[169] Damit kann diese Technik in der Praxis nur bedingt als verletzungsfrei angesehen werden.

die Seile bei Verbindung mittels des beschriebenen Zurrknotens ab einer Belastung von knapp 200N aufreißen, und zwar so gut wie immer am Knoten.

Bei der zweiten Methode wurden die Pflanzen mit breiten, großflächig auf der Rinde aufliegenden Verbindungsmitteln verbunden, wobei zwei Varianten mit unterschiedlichen Materialien getestet wurden. Bei der ersten Variante wurden handelsübliche Gewebe-Klebebänder verwendet.[170] Beim Verbinden wurden die (parallel angeordneten) Pflanzen von Hand zusammengehalten und an den Verbindungsstellen mit ca. 4 bis 6 Lagen dieses Materials umwickelt. Beim Dickenwachstum der Pflanzen gibt der Klebstoff allmählich nach und die einzelnen Lagen „kriechen gegeneinander", die Bänder selbst sind nicht dehnbar. Welche Kraft die Bänder dabei aufnehmen, scheint stark von der Wachstumsgeschwindigkeit, der Temperatur und weiteren Umweltfaktoren, die sich auf die Klebstoffkonsistenz auswirken, abhängig zu sein. Bei der zweiten Variante wurde ein spezielles Veredelungsband verwendet, das ein teils plastisches, teils elastisches Dehnverhalten zeigt.[171] Es lässt sich ungefähr auf die vierfache Ausgangslänge dehnen (bevor es beginnt aufzureißen) und haftet in gedehntem Zustand auf sich selbst (vergleichbar mit handelsüblicher Frischhaltefolie). Das Material ist nicht UV-stabil und beginnt laut Herstellerangaben bei Sonneneinstrahlung nach ca. 5 Monaten zu zerfallen. Beim Verbinden wurden die (parallel angeordneten) Pflanzen ebenfalls von Hand zusammengehalten und mit ca. 4 bis 6 Lagen des Materials über eine Länge von ca. 45 cm umwickelt.[172] Auch bei dieser Variante muss angenommen werden, dass die vom Verbindungsmittel aufgenommene Kraft abhängig von der Wachstumsgeschwindigkeit und verschiedenen Umweltfaktoren variiert.[173]

Die Verbindungstechnik mit Drahtseil wurde als „Standardtechnik" gewählt und bei allen Arten bei den Kreuz- und Parallelverbindungen eingesetzt, da aufgrund eines vergleichbaren Versuchsdesigns der Vorversuche bereits Vorerfahrungen vorlagen, die Technik bei allen Verbindungsgeometrien einfach angewendet werden kann und die Entwicklung der Verwachsungen immer einsehbar ist. In der Regel wurden 8 Kreuzverbindungen und 24 Parallelverbindungen (6 Pflanzenpaare) angelegt. Die Technik wurde auch für die weiteren, bei Weide und Platane angelegten Verbindungsgeometrien genutzt (siehe Tabelle 1)

Die anderen Methoden bzw. Varianten wurden als ergänzende Untersuchungen in geringerem Umfang durchgeführt. Aus den Vorversuchen war bekannt, dass die Verwendung breiter Bänder bei Kreuzverbindungen häufig dazu führt, dass die Verbindungsmittel durch das Dickenwachstum eingeklemmt werden und so unbeabsichtigter Weise einwachsen (Strangulationsgefahr, mechanische Schwächung). Daher wurden die Verbindungstechniken mit Gewebeband und Buddy-Tape nur bei den Parallelverbindungen eingesetzt. Bei den Baumarten Weide und Platane wurden jeweils 24 dieser Verbindungen angelegt (6 Pflanzenpaare). Darüber hinaus wurde die Verbindungsmethode mit Gewebeband auch bei allen anderen Baumarten in geringerem Umfang getestet (8 Verbindungen / 2 Pflanzenpaare).

Durch das vollständige Umhüllen der Achsen bei der Variante mit Buddy-Tape treten verschiedene Nebeneffekte auf. Insbesondere kommt es zu einer Behinderung des Gaswechsels und so zu einer Beeinträchtigung der Rindenatmung. Auch sind innerhalb der Umhüllung vermutlich

---

[170] 19 mm breit, UV-stabilisiert, schwarz, Fa. TESA.

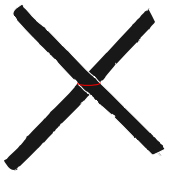
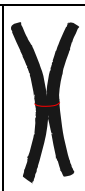
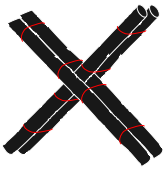
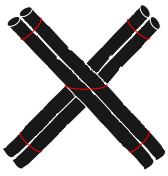
[171] Buddy-Tape", Fa. Aglis & Co., Japan. Der Name bezieht sich auf das englische Wort für Knospe „bud" und verweist darauf, dass mit dem Band umwickelte Knospen dieses beim Austreiben durchbrechen.

[172] Das Material wurde dabei bereits auf ca. die doppelte Ausgangslänge gestreckt.

[173] Bei diesen Verbindungen kann nicht mehr von 4 Einzelverbindungen gesprochen werden, vielmehr erstreckt sich eine einzige Verbindung über die gesamte Länge des Pflanzenpaars.

Temperatur und Luftfeuchtigkeit deutlich erhöht.[174] Um einen möglichen Einfluss dieser Effekte auf das Verwachsungsergebnis zu untersuchen, wurden bei Weide und Platane zusätzlich Versuche angelegt, bei denen Parallelverbindungen mit Drahtseil zusätzlich mit Buddy-Tape umwickelt wurden. Da die Drahtseile deutlich steifer sind als das Tape, wurde angenommen, dass der Wachstumsdruck hauptsächlich von den Drahtseilen aufgenommen wird. Damit wurde versucht, den Einfluss der Nebeneffekte des Buddy-Tapes bei Drahtseilverbindungen getrennt von der mechanischen bzw. verbindenden Wirkung des Buddy-Tapes zu untersuchen.

Tabelle 1 Übersicht Varianten und Wiederholungen Versuchsreihe 2008. Legende: Rot = Drahtseil; Hellgrün = Gewebeband; Gelb = Buddy-Tape. Die Zahlen in Klammern geben die Anzahl der Paare bzw. Bündel an. Weitere Erklärung siehe Text.

										
Weide	24(6)	24(6)	6	24(6)	8	0	0	0	24(6)	24(6)
Platane	23(6)	24(6)	6	24(6)	17	8	11	6	0	0
Esche	24(6)	8(2)	0	0	8	0	0	0	0	0
Birke	24(6)	8(2)	0	0	8	0	0	0	0	0
Erle	24(6)	8(2)	0	0	8	0	0	0	0	0
Ahorn	24(6)	8(2)	0	0	8	0	0	0	0	0
Robinie	24(6)	8(2)	0	0	8	0	0	0	0	0
Eiche	24(6)	8(2)	0	0	8	0	0	0	0	0
Hain-buche	24(6)	8(2)	0	0	8	0	0	0	0	0
Buche	24(6)	8(2)	0	0	8	0	0	0	0	0

3.2.6.2 Versuchsreihe 2009

Bei den 2008 angelegten Versuchen konnten mit den gewählten Verbindungsmethoden häufig keine zufriedenstellenden Verwachsungsergebnisse erzielt werden. In vielen Fällen versagten die Drahtseile, indem sie bereits im Verlauf der ersten Vegetationsperiode am Knoten aufrissen. In der Folge wurden die Pflanzen nicht wie geplant starr zusammengehalten, sondern konnten dem Wachstumsdruck an der Verbindungsstelle mehr oder weniger stark ausweichen bzw. klafften sogar völlig auseinander (siehe Ergebnisteil). Insbesondere aufgrund der Schwachstelle am Knoten des Drahtseils waren die Verbindungsmittel hier also häufig zu schwach dimensioniert, um den gewünschten Effekt zu erzielen.

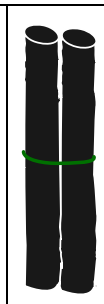
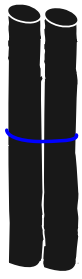
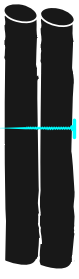
Aus diesem Grund wurde das Versuchsdesign der Seilverbindungen überarbeitet und die Versuche bei einigen Arten wiederholt. Anstatt der Drahtseile wurden zwei unterschiedliche Typen

[174] An der Innenseite des Tapes waren häufig Wassertropfen zu erkennen; Messungen zu Temperatur und Luftfeuchte wurden jedoch nicht durchgeführt.

geflochtener Dyneema-Seile eingesetzt, die insgesamt etwas stärker dimensioniert wurden. Dyneema-Seile zeichnen sich durch eine extrem hohe Reisfestigkeit aus und lassen sich aufgrund ihrer geringeren Steifigkeit besser knoten als Drahtseile. Verwendet wurden das Produkt „Spiderwire Ultracast“[175] (im Folgenden Dyneema 1 genannt) und „Dyneema Dynasty Extreme“[176] (im Folgenden Dyneem 2 genannt). Dyneema Dynasty Extreme weist einen etwas größeren Durchmesser auf und hat eine etwas rauere Oberfläche als „Spiderwire Ultracast“. Die Knotentechnik wurde beibehalten, bei „Spiderwire Ultracast“ musste der Konstriktor-Knoten aufgrund der sehr glatten Seiloberfläche jedoch mit 4 weiteren Kreuzknoten gesichert werden.[177]

Auch bei den Verbindungen mit Gewebeband und Buddy-Tape waren die Zwischenergebnisse nach der ersten Vegetationsperiode häufig nicht befriedigend. Damit konnte die Anfangshypothese nicht bestätigt werden, nach der Verwachsungen durch Verbindungstechniken erzeugt werden können, bei denen die auftretenden Kräfte über die Rinde (d. h. ohne direkte Gewebeverletzungen) in die Achsen geleitet werden. Aus diesem Grund wurden 2009 weitere Versuche angelegt, bei denen versucht wurde, die Pflanzen sicherer miteinander zu verbinden, indem die Kräfte mittels Schraubverbindungen direkt in die Holzkörper der Pflanzenachsen eingeleitet werden. Wie im Abschnitt 3.1.3.3 dargelegt kommt es hierbei zwangsläufig zu Verletzungen der Holz- und Rindengewebe.

Tabelle 2 Übersicht Varianten und Wiederholungen Versuchsreihe 2009. Legende: Grün = Dyneema 1 (dünnere Variante); Blau = Dyneema 2 (stärkere Variante); Hellblau = Schraube; Magenta = Gewindestange. Weitere Erklärung siehe Text.

				
Weide	10	10	9	9
Platane	10	10	11	0
Esche	8	0	8	0
Birke	9	0	9	0

Dabei kamen zum einen Edelstahlschrauben („Spanplattenschrauben“)[178], und zum anderen Edelstahl-Gewindestangen und Muttern (Durchmesser D = 2 mm) zum Einsatz.[179] Die Schrau-

[175] Tragkraft laut Hersteller: 365 N; Durchmesser ca. 0,30 mm, Farbe gelb

[176] Typ 2002-031; Tragkraft laut Hersteller: 500N; Durchmesser ca. 0,7mm, Farbe grün

[177] Auch bei diesen Verbindungen konnte teilweise ein Einschneiden des Seil in die Rinde unmittelbar beim Verbinden beobachtet werden (häufiger bei den dünneren Seilen und insgesamt seltener als bei den 2008 angelegten Drahtseilverbindungen, vermutlich aufgrund der glatteren Oberfläche und des damit geringeren „Sägeeffekts“ beim Anziehen des Knotens)

[178] Linsenkopf, Vollgewinde, 3mm Durchmesser, Länge je nach Achsendurchmesser ca. zwischen 20 mm und 30 mm Standardausführung, Material: Edelstahl (V2A).

benköpfe bzw. Muttern wurden mit Edelstahlscheiben (D = 7 mm) unterlegt. Bei den Verbindungen mit Spanplattenschrauben werden die Kräfte über die gesamte Gewindelänge in das Holz eingeleitet, bei der Verwendung von Gewindestangen und Muttern ausschließlich im Kambiumbereich über die Unterlegscheiben.

Beim Verbinden wurden die Pflanzen von Hand zusammengehalten und die Schrauben bzw. Muttern so lange angezogen, bis die Rinden an der Kontaktstelle leicht zusammengedrückt wurden. Die Schrauben wurden ohne Vorbohren mit einem Akkuschrauber möglichst mittig durch beide Achsen eingedreht. Die Länge der Schrauben wurde in der Regel größer gewählt als die Summe der beiden Achsendurchmesser, sodass die Schraubenspitzen einige Millimeter herausstanden. Bei der Montage der Gewindestangen wurde mit einem Holzbohrer ein Loch (D = 2,5 mm) möglichst mittig durch beide Achsen gebohrt, die Gewindestange durchgesteckt und dann die Muttern und Unterlegscheiben aufgezogen.

Aus Platzgründen (vgl. Abschnitt 3.2.4) konnte bei den 2009 angelegten Versuchen nicht mit allen 2008 untersuchten Arten gearbeitet werden und die Zahl der Wiederholungen musste reduziert werden. Die Versuche 2009 wurden mit den relativ schnell wachsenden Baumarten Weide, Platane, Esche und Birke ausgeführt. Weide und Platane wurden wieder ausgewählt, weil bei diesen Arten standardmäßig alle Verbindungsvarianten getestet wurden. Bei Esche entstanden in der Versuchsreihe 2008 fast immer Verwachsungsansätze, die jedoch sehr häufig wegen Versagen der Seilverbindung wieder aufbrachen. Bei Birke konnten die Ergebnisse aufgrund einer sehr heterogenen Entwicklung der Pflanzen nur bedingt beurteilt werden, sodass sich eine Wiederholung generell anbot. Eine Übersicht über die durchgeführten Varianten und Wiederholungen gibt Tabelle 2. Im Unterschied zu den 2008 angelegten Verbindungen wurde bei den Parallelverbindungen nicht je Pflanzenpaar viermal die gleiche Technik eingesetzt. Vielmehr wurden die Verbindungsmethoden zufällig auf unterschiedliche Pflanzenpaare verteilt, wodurch erreicht werden sollte, dass sich Unterschiede im Wachstum weniger stark auf das Ergebnis auswirken.[180]

Ergänzend zu diesen neu angelegten Versuchen wurden bei einigen Baumarten der 2008 gepflanzten Pflanzen zusätzliche Verbindungen angelegt. Bei den Parallelverbindungen der schnellwüchsigeren Baumarten Ahorn, Erle, Esche, Platane und Weide entwickelten sich teils ausreichend lange und gerade Leittriebe, um oberhalb der bereits bestehenden Verbindungen bis zu drei weitere Parallelverbindungen anzulegen.[181] Hierbei kamen die oben beschriebenen Verbindungstypen mit Schrauben bzw. Gewindestangen zum Einsatz.[182] Ziel dieser zusätzlichen Versuche, die aufgrund des unterschiedlichen Entwicklungszustands der Pflanzen beim Verbinden nicht direkt mit den anderen Versuchen vergleichbar sind, war u. a., die Auswirkungen der beim Verschrauben auftretenden Verletzungen an der Verbindungsstelle genauer zu untersuchen.

---

[179] Damit wurden bei diesen Versuchen Techniken untersucht, die von Kirsch und Block bereits mit gewissem Erfolg eingesetzt werden, deren Wirkmechanismus bislang aber nicht im Detail untersucht und verstanden ist und deren ggf. vorhandene negative Auswirkungen (z. B. Fäulnis) bislang auch nicht untersucht wurden.

[180] 2008 wurde wie beschrieben vorgegangen, weil von einer gegenseitigen Beeinflussung der Verbindungsstellen ausgegangen wurde. Beabsichtig war, dass die Pflanzen über die ganze Länge miteinander verwachsen, de facto kam es aber nur zu punktuellen Verwachsungen an den Verbindungsstellen, ohne dass eine Beeinflussung des einen Verwachsungsergebnisses auf das andere unmittelbar erkennbar gewesen wäre.

[181] Abstand zwischen den Verbindungsstellen hier zwischen 15 und 20 cm.

[182] Aufgrund der größeren Achsendurchmessern wurden hier Gewindestangen mit 3 mm und Schrauben von bis zu 3,5 mm Durchmesser verwendet.

3.2.7 Dokumentation und Untersuchungen

3.2.7.1 Morphologische Beschreibung

Die Entwicklung der Pflanzen und der Verbindungsstellen wurde in den Jahren 2008 und 2009 systematisch dokumentiert. Die allgemeine Entwicklung wurde bei regelmäßigen Kontrollgängen (während der Vegetationsperiode ca. alle drei Wochen) protokolliert, wobei insbesondere Auffälligkeiten (Krankheiten, ein deutliches Zurückbleiben im Wachstum o. ä.) festgehalten wurden. Unmittelbar nach dem Verbinden wurde der Zustand der Verbindungsstellen stichprobenartig fotografisch dokumentiert. Besondere Auffälligkeiten bei der Entwicklung der Verbindungsstellen im Verlauf der Vegetationsperioden (z. B. Aufreißen der Seile) wurden ebenfalls bei den Kontrollgängen protokolliert. Jeweils nach den beiden Vegetationsperioden[183] wurde der Zustand der Verbindungen umfassend dokumentiert, indem die Verbindungen aus zwei bis drei Richtungen fotografiert und Besonderheiten schriftlich festgehalten wurden (insg. ca. 3400 Fotos). Jede Verbindung wurde dann qualitativ beschrieben, wobei der Zustand des Verbindungsmittels, die Reaktion auf das Verbindungsmittel (z. B. Strangulation, Rindenverfärbungen) und der Zustand der Verwachsung getrennt aufgeführt wurden. Im Ergebnisteil werden die Verbindungsvarianten teils einzeln, teils zusammenfassend beschrieben, je nachdem ob bzw. welche Unterschiede festgestellt werden konnten. Die Baumarten Weide und Platane, bei denen die meisten Varianten untersucht wurden, werden zu Beginn und am ausführlichsten dargestellt.

Zur Interpretation der Ergebnisse ist wichtig, in welchem Zusammenhang die beschriebenen Entwicklungen zum Dickenwachstum der Pflanzen stehen. Daher wurden die Durchmesser der Pflanzen unmittelbar beim Verbinden und am Ende der Vegetationsperiode 2008 und 2009 dokumentiert. Gemessen wurde mit einer Schieblehre ca. 3 cm über der Triebbasis, bei Parallelverbindungen mittig zwischen Triebbasis und unterster Verbindungsstelle. Dabei wurden zwei Durchmesser (90° gegeneinander versetzt) erfasst und das arithmetische Mittel dieser Werte als Basisdurchmesser notiert. Aufgrund der großen Pflanzenzahl der Versuchsreihe 2008 wurden hier nicht alle Pflanzen, sondern ca. jede zweite Pflanze gemessen; bei den 2009 angelegten Versuchen wurden alle Pflanzen gemessen. Aus allen so ermittelten Durchmessern einer Baumart wurde das arithmetische Mittel gebildet, das im Ergebnisteil jeweils als Referenzwert angegeben ist und durch die Standardabweichung[184] ergänzt wird, die Aussagen über die Streuung der Werte erlaubt.

Die Durchmesserentwicklung, die stichwortartige, qualitative Beschreibung, und die Abbildungen aller Verbindungen wurden in eine Tabelle eingepflegt, sodass die Ergebnisse nach unterschiedlichen Kriterien (Art, Geometrie, Verbindungsmittel) geordnet und die Beschreibung jederzeit anhand der Fotos nachvollzogen werden konnte.

Während die 2008 angelegten Versuche auf diese Art über zwei Vegetationsperioden dokumentiert wurden, ist dies bei den 2009 angelegten nur für eine Vegetationsperiode der Fall. Beide Beobachtungszeiträume sind, vor allem bei langsam wachsenden Arten, als sehr kurz zu bezeichnen. Daher wurde die Ergebnisbeschreibung bei den langsam wachsenden Arten der Versuchsreihe 2008 und der gesamten Versuchsreihe 2009 um stichprobenartige Beobachtungen im Verlauf der Vegetationsperiode 2010 ergänzt.

---

[183] d. h. Winter 08/09 und Winter 09/10.

[184] Berechnet nach der Formel $\sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{(n-1)}}$ (Dabei ist x der Stichprobenmittelwert und n der Stichprobenumfang).

3.2.7.2 Beurteilung anhand von Schnitten

Bei der bislang beschriebenen Art der Dokumentation werden die Verbindungen nur äußerlich beschrieben. Viele Merkmale, die für die Beurteilung des Verwachsungsergebnisses und der Eignung der Verbindungstechnik wichtige sind, können jedoch nur in Schnitten eindeutig erkannt werden. Daher wurden bei so gut wie allen Varianten repräsentative Querschnitte, wo es sinnvoll erschien auch Längs- und Serienschnitte, angefertigt. Die ausgeführten Schnitte ermöglichten es, die Verwachsungen von außen besser beurteilen zu können und anhand äußerlich sichtbarer Merkmale auf nicht sichtbare Merkmale relativ sicher rückschließen zu können.[185] Dies betrifft insbesondere die wichtige Frage, ob an einer Verbindungsstelle eine vollständige Verwachsung vorliegt – ob also nur die Rindengewebe, oder auch die Holzkörper miteinander verwachsen sind.

Als ein relativ sicherer, äußerlich erkennbarer Hinweis auf eine Xylemverwachsung wurde ein leichtes Ausbeulen direkt an der Kontaktstelle erkannt. Dieses kommt zustande, indem sich die anfangs sehr schmalen, beide Pflanzen verbindenden Xylemstreifen verbreitern und dabei Rindengewebe nach außen drücken. Sobald die verwachsenen Pflanzenachsen eine insgesamt konvexe Querschnittskontur angenommen haben, kann mit großer Sicherheit angenommen werden, dass ein durchgehender gemeinsamer Jahrring entstanden ist. Ein Umkehrschluss dieser Erkenntnisse ist jedoch nicht möglich: Wenn keine Ausbeulen an der Verbindungsstelle zu erkennen ist, bedeutet dies nicht, dass keine Rinden- oder Xylemverwachsungen vorhanden sind. So kann der Verwachsungszustand trotz der Möglichkeit gewisser Rückschlüsse von der Morphologie auf die Anatomie häufig nur in Querschnitten sicher bestimmt werden, da beispielsweise erste Ansätze von Rindenverwachsungen ausschließlich an den Kontaktflächen der Pflanzen vorhanden sind und so von außen nicht sichtbar sind. Genauso lässt sich die Frage, inwiefern an einer Verwachsungsstelle Rindengewebe eingeschlossen wurden oder ob sich andere trennende Gewebe gebildet haben, nur anhand von Schnitten sicher beantworten.[186]

3.2.7.3 Anfertigung von Schnitten

Zur Anfertigung der Schnitte wurden die Verwachsungen an repräsentativen Stellen mit einer Japansäge (Zugsäge) durchtrennt. Dadurch konnten bereits recht glatte Schnittflächen erzeugt werden, die wenn nötig mit einer Rasierklinge zusätzlich geglättet wurden. Nach der Vegetationsperiode 2008 wurden stichprobenartig einige Schnitte ausgeführt, die meisten jedoch erst nach der Vegetationsperiode 2009 (teilweise erst im Frühjahr und Sommer 2010). Bei der ersten Schnittserie (2008) wurden die Schnittflächen leicht angefeuchtet mit einer Digitalkamera abfotografiert. Bei der zweiten Schnittserie (2009/2010) wurden die Proben eingescannt, um eine höhere Auflösung und eine exakt maßhaltige Wiedergabe zu ermöglichen. Dazu wurden die Proben mit der Schnittfläche auf das Auflageglas eines Flachbettscanner[187] gelegt und mit einer Auflösung von 2400 bzw. 1200 dpi gescannt. In den meisten Fällen wurden auf dem Auflageglas einige Tropfen Wasser ausgebracht und die Probe dann so aufgelegt, dass zwischen Schnittfläche und Glas ein geschlossener Wasserfilm entstand. Dadurch konnten Reflexionen vermieden und schärfere Bilder erzeugt werden. Die Proben wurden teilweise mit

---

[185] Vergleichbar der Methode des „Visual Tree Assessment“, siehe: MATTHECK, C. & HÖTZEL, H.-J. 1997. *Baumkontrollen mit VTA,* Freiburg, Rombach.

[186] Dies sind entscheidende Kriterien, um die Qualität einer Verwachsung, also ihre auch langfristige pflanzenphysiologische und mechanische Leistungsfähigkeit, beurteilen zu können (siehe Diskussion).

[187] Epson V100 Photo.

Phloroglucin-Salzsäure angefärbt, um an der Verwachsungsstelle besser beurteilen zu können, ob eine Xylemverwachsung vorliegt.[188]

Insbesondere bei den Verbindungen mit Schrauben und Gewindestangen wurden Serienschnitte angefertigt, um die Ausbreitung der durch die Verbindungstechnik hervorgerufenen Holzverfärbungen (bzw. Fäulnis) beurteilen und berechnen zu können. Dazu wurden ausgehend von der Verbindungsstelle so viele Schnitte im Abstand von 5 bis 10 mm angefertigt, bis keine Verfärbungen mehr zu erkennen waren. Der arithmetisch gemittelte Abstand des letzten (d. h. unverfärbten) und vorletzten (d. h. noch verfärbten) Schnitts zur Verbindungsstelle wurde als axiale Ausdehnung der Verfärbungen in eine Richtung definiert.

Die nach der Vegetationsperiode 2008 ausgeführten makroskopischen Schnitte wurden um mikroskopische Untersuchungen ergänzt. Bei Weide und Platane wurden die Verwachsungsstellen näher untersucht, um den Verwachsungsprozess mit dem von Millner (1932) zu vergleichen und um Zusammenhänge zwischen dem anatomischen Aufbau und dem Verwachsungsergebnis zu erhalten (vgl. Abschnitt 3.1.1.2). Darüber hinaus wurden bei allen Arten Standardschnitte angefertigt (Querschnitte nicht verwachsener Achsen, siehe Anhang). Diese Schnitte wurden als möglichst dünne Handschnitte (Rasierklinge) ausgeführt und zur Identifikation der Gewebe mit Safranin-Astrablau oder Fuchsin-Chrysoidin-Astrablau (FCA nach Etzold) angefärbt und unter einem Auflichtmikroskop digital abfotografiert.[189]

[188] Durch Phloroglucin-Salzsäure-Lösung werden verholzte Gewebe stark violett angefärbt, während unverholzte ungefärbt bleiben. Dazu wurden 2g Phloroglucinol in 150 ml Ethanol (96%) gelöst und anschließend wurde mitSalzsäure (25%) verdünnt (Menge wurde an Baumart etc. angepasst). Alle Schnitte wurden entlang der Schnitt-Außenkante der Rinde in Photoshop freigestellt, da es durch den Wasserfilm zu irritierenden Verzerrungen im Randbereich kam.

[189] Stereomikroskop Olympus SZX7; Kamera: Olympus Altra 20.

3.3 Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt nach Baumarten und Verbindungstechniken gegliedert. Bei der Beschreibung wird sofern möglich auf vergleichbare Ergebnisse anderer Arten/Varianten verwiesen, um unnötige Dopplungen zu vermeiden. Wie bereits erwähnt nehmen die Arten Weide und Platane eine Sonderstellung ein, da bei diesen die meisten Varianten untersucht wurden. Daher werden diese Arten zu Beginn und am ausführlichsten beschrieben und bei den anderen Arten insbesondere Unterschiede zu diesen Ergebnissen dargestellt.

3.3.1 Silberweide (*Salix alba*)

3.3.1.1 Versuchsreihe 2008

3.3.1.1.1 Allgemeine Entwicklung der Pflanzen

Die Pflanzen entwickelten sich sehr vital und zeigten ein entsprechend starkes Dickenwachstum. [190] Die Entwicklung war insgesamt recht homogen, wobei sich bereits zu Anfang bestehende Unterschiede in den Achsendurchmessern insofern auf die Entwicklung auswirkten, als dass sich die Unterschiede im Verlauf der Entwicklung verstärkten. Die Durchmesser der Triebe an der Basis nahmen, ausgehend von durchschnittlich 11,1 mm (+/-2,2 mm) am Anfang der ersten Vegetationsperiode, im ersten Jahr um 9 mm und im zweiten Jahr um weitere 15 mm zu, sodass am Ende des Beobachtungszeitraums durchschnittlich 34,9 mm (+/-8,1 mm) gemessen wurden.[191] Ein nennenswerter Befall durch Schadorganismen trat insgesamt nicht auf, in einem Pflanzbehälter wurden jedoch im Verlauf der zweiten Vegetationsperiode schwarzbraune Verfärbungen der gesamten Rinde festgestellt (vermutlich Pilzinfektion). Während des Beobachtungszeitraums wurden keine gravierenden Einflüsse dieses Befalls auf die Entwicklung der Verwachsungen registriert, sodass alle Pflanzen bzw. Verbindungen in die Auswertung einbezogen werden konnten.

3.3.1.1.2 Parallelverbindungen mit Drahtseil[192]

- Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik; Zustand der Verbindungsmittel

Die Seile schnitten häufig mit Einsetzen des Dickenwachstums (Zunahme der Seilspannung) oder wie beschrieben bereits beim Verbinden in die Rinde ein(vgl. Abschnitt 3.2.6.1). In beiden Fällen verheilte die so entstandene Verletzung rasch, sodass die Seile von Wundgewebe eingeschlossen wurden (Abbildung 61 Mitte). Bei Verbindungen, bei denen es zu keinem Einschneiden der Seile in die Rinde kam, konnte temporär ein Saftstau und in der Folge ein leichtes Anschwellen der Achsen oberhalb der Verbindungsstelle beobachtet werden. Die Drahtseile wur-

[190] Lediglich zwei von insgesamt 132 Pflanzen wuchsen nicht an und wurden unmittelbar vor dem Verbinden ersetzt. (Sofern möglich wurden bei allen Arten Ersatzpflanzen in kleineren Containern getopft, um ggf. Ausfälle ersetzen zu können; dies geschah immer vor dem Anlegen der Verbindungen.

[191] Die Parallelverbindungen mit 4 bzw. 8 Pflanzen sind in dieser Auswertung nicht berücksichtigt, da hier andere Pflanzendichten vorliegen.

[192] 24 Verbindungen angelegt (6 Pflanzenpaare), 8 (2 Paare) nach erster Vegetationsperiode zu Dokumentationszwecken (Schnitte) entnommen, d. h. 16 Verbindungen (4 Pflanzenpaare) in zweiter Vegetationsperiode vorhanden.

den dann von oben her überwallt und wuchsen im weiteren Verlauf der Entwicklung (in den allermeisten Fällen noch im Verlauf der ersten Vegetationsperiode) ein (Abbildung 61 links, rechte Pflanze). In einigen Fällen wurden darüber hinaus braune Verfärbungen der Rinde im Bereich des Drahtseils beobachtet (Abbildung 63 ganz links).

Bei fast allen Verbindungen wurden die Drahtseile im Verlauf des Beobachtungszeitraums (häufig bereits während der ersten Vegetationsperiode) durch das Dickenwachstum aufgesprengt.[193] Die Verbindungen gaben in vielen Fällen dem Wachstumsdruck dennoch nicht vollständig nach, da die Pflanzen in der Regel noch durch die eingewachsenen Seilenden zusammengehalten wurden.

- Morphologie und Anatomie der Verwachsungen

Bei vielen Verbindungsstellen waren die von Millner[194] beschriebenen, dem Korkkambium entspringenden „Höcker“ gut erkennbar (mit bloßem Auge) und es kam zu einem deutlich sichtbaren Verwachsen der Rindengewebe. Die Rindenhöcker entstanden jedoch nicht nur an Stellen, an denen sich die Achsen direkt berührten (wie von Millner beschrieben), sondern auch im Umfeld der Verbindungsstellen, sodass bereits innerhalb der ersten Vegetationsperiode Rindenverwachsungen in einem teils recht weiten Bereich um die Verbindungsstellen entstanden . Die Achsen wiesen häufig einen deutlichen Abstand zueinander auf und waren durch die Verwachsungen lokal brückenartig verbunden. (Abbildung 61)

Abbildung 61 Typischer Zustand nach der ersten Vegetationsperiode. Links: Brückenartige Verwachsung. Mitte: Umfangreiche Bildung miteinander fusionierender Rindenhöcker. Rechts: Nahaufnahme der fusionierten Rindenhöcker.

[193] Oft war nicht unmittelbar erkennbar, ob die Seile gerissen waren, da sie schon weitgehend eigewachsen waren. Als sicher gerissen können die Seile solcher Verbindungen angesehen werden, bei denen die Pflanzen offensichtlich auseinandergedrückt wurden. Dies wurde in den Schnitten verifiziert.

[194] Siehe Abschnitt 3.1.1.

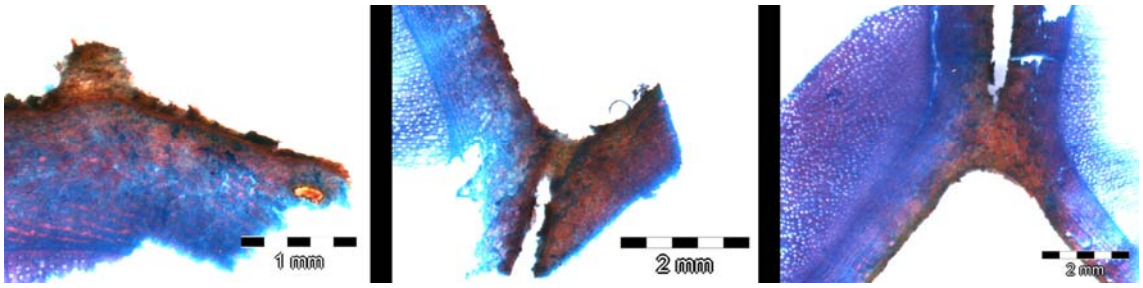


Abbildung 62 Links: Entstehung eines Rindenhöckers. Mitte: Miteinander fusionierte Rindenhöcker. Rechts: Verwachsene Rindengewebe. Färbung: Safranin-Astrablau

Im Gegensatz zu den bislang beschriebenen mehr oder weniger lokal begrenzten Verwachsungen kam es bei einem Pflanzenpaar (4 Verbindungsstellen) dazu, dass die Pflanzen fast auf der gesamten Länge verwuchsen (Abbildung 63 rechts). In diesem Fall war beim Verbinden eine etwas dünnere Achse (zufälligerweise) leicht spiralig um eine etwas dickere gewunden worden. Bei einem weiteren Pflanzenpaar brachen die in der ersten Vegetationsperiode entstanden Verwachsungen im zweiten Jahr großteils wieder auf, die Pflanzen wurden aber durch die Seilreste nach wie vor lose zusammengehalten. An den Verbindungsstellen entstand hier ein Spalt, der mit grob strukturierten, abgestorbenen Rindengeweben (Borke) angefüllt war (Abbildung 63 links).[195] Hier sei allgemein darauf hingewiesen, dass bei den Parallelverbindungen alle vier Verbindungsstellen häufig ähnliche Ergebnisse zeigten.

Abbildung 63 Links: Nach der zweiten Vegetationsperiode wieder aufgebrochene Verbindung. Rechts: Überdie gesamte Länge verwachsene Verbindung. Jeweils Winter 08/09 und Winter 09/10 aufgenommen.

Die nach der ersten Vegetationsperiode angefertigten Querschnitte zeigten, dass bis zu diesem Zeitpunkt meist nur punktuelle Verwachsungen der Holzkörper (verwachsene Xylemhöcker) entstanden waren. Aus diesen Ansätzen entwickelten sich dann in Verlauf der zweiten Vegetationsperiode häufig größere Bereiche eines verbindenden Xylems und ein durchgehender Kambiummantel, wobei jedoch teilweise auch eingewachsener Rinde und/oder ein trennender Streifen unverholzter Gewebe zu erkennen waren (Abbildung 64).

[195] Im Folgenden werden vergleichbare Strukturen als „borkiger Spalt“ bezeichnet.

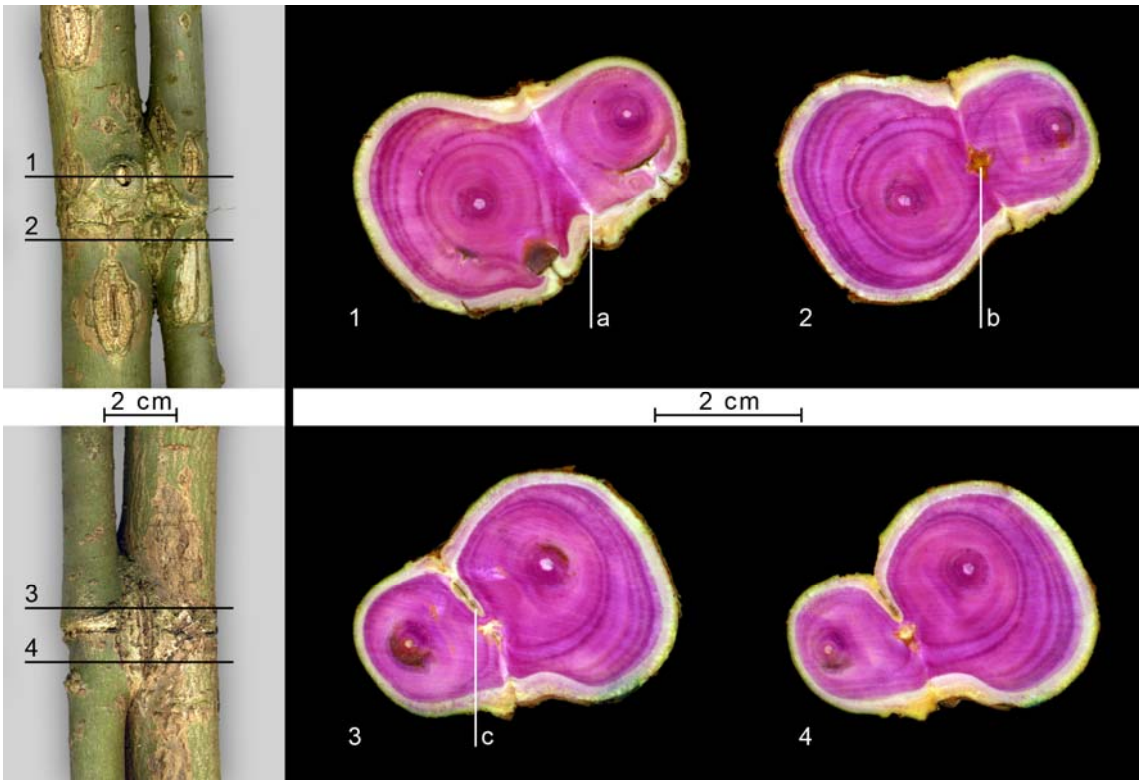


Abbildung 64 Querschnitte durch typische Verwachsungen. a. Trennender Streifen unverholzter Gewebe. b. unverholzte, braun verfärbte Gewebe an der Verwachsungsstelle. c. Eingewachsene bzw. einwachsende Rinde.(Phloroglucin-Färbung)

3.3.1.1.3 Kreuzverbindungen mit Drahtseil[196]

- Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik; Zustand der Verbindungsmittel

Die Reaktionen der Pflanzen auf die Drahtseile sind insgesamt mit den Parallelverbindungen vergleichbar und auch das Aufsprengen der Seile wurde in vergleichbarem Umfang beobachtet. Bei der Hälfte der angelegten Verbindungen (4 von 8) führte dies dazu, dass die Pflanzen bereits während der ersten Vegetationsperiode nicht mehr aneinandergedrückt wurden und keine Verwachsungen entstanden (Abbildung 65 links). Bei den anderen Verbindungen wurden die Achsen trotz des aufgerissenen Seils wieder durch die eingewachsenen Seilenden zusammengehalten.

- Morphologie und Anatomie der Verwachsungen

Im Verlauf der ersten Vegetationsperiode kam es bei den Pflanzen, die durch die Seile bzw. eingewachsenen Seilenden dauerhaft zusammengehalten wurden, zu einem ausgeprägten gegenseitigen Überwallen der Achsen und zu einem offensichtlichen Verschmelzen der Rindengewebe mit einer häufig so gut wie umlaufenden, recht gleichmäßig ausgeprägten „Naht“ kallusartiger Gewebe (Abbildung 65 Mitte). In einem Fall knickte eine Achse an der Verbindungsstelle leicht ab, im weiteren Entwicklungsverlauf verheilte die dabei entstandene Wunde und es kam

[196] 8 Verbindungen wurden angelegt, davon wurden 4 nach der ersten Vegetationsperiode entfernt (3 wegen Versagen des Verbindungsmittels und eine zur Anfertigung von Schnitten. In der zweiten Vegetationsperiode waren daher 4 Verbindungen vorhanden.

zu einer Verwachsung, bei der jedoch eine starke Kallusbildung beobachtet wurde (vgl. Abbildung 65 Mitte und rechts). Weiterhin fiel bei mindestens einer Verbindung ein Durchmessersprung der Achsen auf, der auch bei anderen Kreuzverbindungen (z. B. auch bei Platane) beobachtet werden konnte.

Im Quer- bzw. Horizontalschnit (nicht abgebildet, Verbindung Abbildung 65 rechts) zeigte sich, dass es (bei den durch die Seile bzw. Seilenden dauerhaft zusammengehaltenen Verbindungen) bereits in der ersten Vegetationsperiode zu einem Verschmelzen der Xylemkörper kam, wobei die beiden Pflanzen noch durch einen dünnen Streifen unverholzten Gewebes getrennt waren. Im zweiten Jahr entwickelte sich dann ein durchgehender Kambiummantel und es entstand ein breiter, beide Achsen umfassender Jahrring. Da die anderen verwachsenen Pflanzen meist eine vergleichbare Morphologie der Verwachsungsstelle aufwiesen,[197] kann auch bei diesen davon ausgegangen werden, dass am Ende der zweiten Vegetationsperiode eine vollständige Verwachsungen (gemeinsame Jahrringe) vorlagen und bereits in im ersten Jahr Ansätze von Xylemverwachsungen vorhanden waren.

Abbildung 65 Links: Aufgebrochene Verbindung nach Versagen der Seilverbindung. Mitte: Typisches bis gutes Beispiel einer Verwachsung am Ende der 1. VP. Zu erkennen ist ein Knick der Achsen an der Verbindungsstell. Rechts: Detail der gleichen Verbindung am Ende der 1. VP

3.3.1.1.4 Parallelverbindungen mit Gewebeband[198]

- Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik; Zustand der Verbindungsmittel

Die Gewebebänder gaben dem Dickenwachstum der Achsen meist nach, indem sich die Klebeflächen gegeneinander verschoben (vgl. Abschnitt 3.2.6.1), teilweise rissen aber auch die Fasern des Gewebes. Die meisten Bänder fielen im Verlauf der zweiten Vegetationsperiode ab oder wurden entfernt, nachdem sich die Klebeflächen voneinander gelöst hatten. Dabei blieben Klebstoffreste auf der Pflanze zurück und die Rinde war unter den Bändern häufig deutlich heller. Folgen von Saftstau oder Strangulation konnten an den Verbindungsstellen so gut wie nicht beobachtet werden, teilweise war der Durchmesser bzw. die Durchmesserzunahme unmittelbar unter dem Gewebeband (Klebeflächen) jedoch etwas geringer (Abbildung 66 rechts).

---

[197] Konvexe Querschnittskontur von außen erkennbar, vgl. Abschnitt 3.2.7.2.

[198] 24 Verbindungen (6 Pflanzenpaare) angelegt; 4 (ein Pflanzenpaar) zu Dokumentationszwecken nach erster Vegetationsperiode entnommen, d. h. 20 (5 Paare) in zweiter Vegetationsperiode vorhanden.

- Morphologie und Anatomie der Verwachsungen

Am Ende der ersten Vegetationsperiode wurden bei etwa einem Drittel der Verbindungsstellen deutliche Verwachsungsreaktionen dokumentiert.[199] Teils kam es zu einer sichtbaren Verwachsung der Rindengewebe wie oben (Parallelverbindungen mit Drahtseil) beschrieben (Abbildung 66, 2. v. links), teils entwickelten die Pflanzen aber auch abgeflachte, sich in der Kontaktzone verbreiternde Kontaktflächen („gegenseitiges Überwallen"), ohne dass dabei sichtbare Rindenverwachsungen in größerem Umfang zu erkennen waren (Abbildung 66 links). Bei einigen Verbindungen trat ein borkiger Spalt auf, wie er bei Drahtseilverbindungen nach dem Aufreißen der Seile teils beobachtet werden konnte. Bei einem weiteren Drittel der Verbindungstellen wurden lediglich leichte Ansätze von Rindenverwachsungen gefunden (Rindenhöcker wie oben beschrieben, kein gegenseitiges Überwallen), und bei allen anderen Verbindungen konnten keine Verwachsungsreaktionen beobachtet werden.

Abbildung 66 Links: Gegenseitiges Überwallen ohne sichtbare Rindenverwachsung (1. VP). 2. v. links: Deutliche, brückenartige Rindenverwachsung (1. VP). 3. v. links: Einseitige Überwallung mit leichtem Spalt. Das Gewebeband gab hier nicht, wie bei den anderen Verbindungen, nur an der Klebefläche nach, sondern es rissen auch die Fasern. (2. VP) Rechts: Verwachsungsstelle nach Entfernen der des Gewebebandes. Deutlich erkennbar sind die Rindenverfärbungen und Klebstoffreste sowie ein leicht reduziertes Dickenwachstum (2. VP).

Die Querschnitte zeigten, dass auch hier, ähnlich wie bei den Parallelverbindungen mit Drahtseil, in der ersten Vegetationsperiode Xylemverwachsungen nur punktuell auftraten und (erst) im zweiten Jahr breitere, verbindende Gewebebereiche und ein gemeinsamer Kambiummantel entstanden. Dabei fielen recht häufig dünne Streifen unverholzter Gewebe an der Verwachsungsstelle auf (vgl. Abbildung 64a). Am Ende der zweiten Vegetationsperiode konnte aus den Querschnitten und der Morphologie der Verbindungsstellen (konvexe Auswölbungen) geschlossen werden, dass bei gut einem Drittel der vorhandenen Verbindungen Xylemverwachsungen vorlagen. Diese vollständigen Verwachsungen entstanden fast immer dort, wo bereits im Vorjahr weit entwickelte Verwachsungsansätze zu erkennen waren. An den Stellen, an denen im ersten Jahr keine Verwachsungsreaktionen zu beobachten waren, entwickelten sich auch im zweiten Jahr keinerlei Verwachsungen (Abbildung 66 3. v. links).

[199] In einigen wenigen Fällen befanden sich diese nicht unmittelbar an einer Verbindungsstelle, sondern im Zwischenbereich von zwei Verbindungsstellen.

3.3.1.1.5 Parallelverbindungen mit Buddy-Tape[200]

- Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik; Zustand der Verbindungsmittel

Das Buddy-Tape riss bereits während der ersten Vegetationsperiode großteils, oft sogar vollständig auf. Darunter war die Rinde meist etwas heller und gelblich-grün, es kam jedoch nicht zu einer Beeinträchtigung des Dickenwachstums. (Abbildung 67 links)

Abbildung 67 Links: Typischer Zustand das Buddy-Tapes nach der ersten Vegetationsperiode. (Alle weiteren Abbildungen am Ende der zweiten Vegetationsperiode) 2. v. links: Gut entwickelte Verwachsung. 3. v. links: schwach entwickelte und nach Reißen des Buddy-Tapes wieder aufgebrochene Verwachsung. Rechts: Über die gesamte Verbindungslänge verwachsenes Pflanzenpaar.

- Morphologie und Anatomie der Verwachsungen

Bei der Hälfte der Pflanzenpaare waren während der ersten Vegetationsperiode nur wenige, kaum entwickelte Rindenverwachsungen zu erkennen. Dabei traten wieder häufig die beschriebenen Rindenhöcker auf. Ein gegenseitiges Überwallen bzw. Abflachen an der Verbindungsstelle wurde bei diesen Verbindungen jedoch so gut wie nicht beobachtet. Bei zwei Pflanzenpaaren entstanden an jeweils einer Stelle weiter fortgeschrittenen Verwachsung mit einer verbreiterten Kontaktfläche bzw. gegenseitiger Überwallung und deutlich erkennbarer Rindenverwachsung. Aus diesen Verwachsungsansätzen entstanden im zweiten Jahr vollständige Verwachsungen, die sich insbesondere durch eine große axiale Ausdehnung auszeichneten[201] (Abbildung 67, 2. v. links). Vergleichbares gilt für ein Pflanzenpaar, bei dem in der ersten Vegetationsperiode mehrere solcher Verwachsungsstellen gefunden wurden. Hier entstand im zweiten Jahr eine annähernd über die gesamte Verbindungslänge durchgehende Verwachsung[202]

---

[200] 6 Pflanzenpaare verbunden, eines zu Dokumentationszwecken nach erster Vegetationsperiode entnommen, d.h. 5 Paare in zweiter Vegetationsperiode vorhanden. Bei diesem Verbindungstyp kann je Pflanzenpaar nicht zwischen mehreren Verbindungsstellen unterschieden werden, da die Achsen über die gesamte Verbindungslänge verbunden wurden.

[201] Verglichen mit Drahtseilverbindungen gleicher Geometrie.

[202] Diese Pflanzenpaar zeigte ein besonders starkes Dickenwachstum.

(Abbildung 67 rechts). Die Querschnitte bestätigen hier eine vollständige Verwachsung in weiten Bereichen und zeigen einen in diesen Abschnitten kontinuierlich durchgehenden Jahresring. Die beiden Holzkörper blieben jedoch über weite Strecken durch einen nicht verholzten Gewebestreifen getrennt (nicht abgebildet).

Ganz anders entwickelten sich die Pflanzenpaare, bei denen in der ersten Vegetationsperiode nur wenige, schwach entwickelte Verwachsungsansätze vorhanden waren. Diese Stellen verwuchsen nicht weiter, sondern brachen oft wieder auf, sodass die Pflanzen teils auseinander klafften (Abbildung 67, 3. v. links).

3.3.1.1.6 Parallelverbindungen mit Drahtseil und Buddy-Tape[203]

- Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik; Zustand der Verbindungsmittel

Der Zustand der Verbindungsmittel entsprach sowohl nach der ersten wie auch nach der zweiten Vegetationsperiode im Prinzip demjenigen der Varianten, bei denen Buddy-Tape und Drahtseil einzeln eingesetzt wurden. Bei den Drahtseilen wurde jedoch häufiger ein Saftstau und ein Überwallen des Seils von oben beobachtet. Dabei wurde in einigen Fällen ein Streifen des Buddy Tapes mit überwallt, wodurch das Einwachsen des Drahtseils weiter verzögert oder vollständig verhindert wurde.

- Morphologie und Anatomie der Verwachsungen

Im Vergleich mit Drahtseilverbindungen (Parallelverbindungen, ohne Buddy-Tape) kam es in der ersten Vegetationsperiode etwas seltener zu den dort beschriebenen Verwachsungen. Bei einem Pflanzenpaar wurde insgesamt wenig Verwachsungsreaktionen registriert[204] und bei einem weiteren führte das Aufreißen der Seile an zwei Verbindungsstellen bereits früh zum Aufbrechen der Verwachsungsansätze, sodass ein borkiger Spalt entstand. Bei mindestens zwei Verbindungsstellen war die axiale Ausdehnung der auftretenden Rindenverwachsungen deutlich größer als bei den Varianten mit Drahtseil ohne Buddy-Tape. Darüber hinaus kam es an zwei Stellen zu Verwachsungen im Zwischenbereich von zwei Drahtseilverbindungen.

Die weitere Entwicklung entsprach dann den bereits bei den Versuchen mit Drahtseil und Buddy-Tape einzeln dargestellten Beobachtungen: Aus Verwachsungsansätzen, die am Ende der ersten Vegetationsperiode weiter entwickelt waren, entstanden im zweiten Jahr meist vollständige Verwachsungen, weniger weit entwickelte Ansätze brachen häufig wieder auf bzw. es entstanden keine (weiteren) Verwachsungen.

---

[203] 24 Verbindungen (6 Pflanzenpaare) angelegt; 8 (zwei Pflanzenpaare) zu Dokumentationszwecken nach erster Vegetationsperiode entnommen, d. h. 16 (4 Paare) in zweiter Vegetationsperiode vorhanden.

[204] Eine der beiden Pflanzen zeigte ein sehr geringes Dickenwachstum.

3.3.1.1.7 Parallelverbindungen mit Drahtseil und 4 bzw. 8 Pflanzen[205]

- Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik; Zustand der Verbindungsmittel

Sowohl bei den Verbindungen mit vier als auch mit acht Pflanzen wurden fast alle Drahtseile in kürzester Zeit aufgesprengt (wenige Wochen). Um die Pflanzen nach wie vor zusammenzuhalten, wurden die Drahtseile durch stärkere mit einem Durchmesser von 0,3 mm ersetzt (Juli 2008). Auch diese Drahtseile wurden meist im weiteren Verlauf der ersten Vegetationsperiode aufgesprengt, sie wuchsen meist nicht vollständig ein und es kam häufig zu Saftstau und zur Bildung von Wundgeweben mit einer rauen, borkigen Oberfläche (Abbildung 68 links).

- Morphologie und Anatomie der Verwachsungen

Verwachsungen, wie sie bei den Standard-Parallelverbindungen mit Drahtseil (2 Pflanzen) beobachtet wurden, traten nur vereinzelt auf (Abbildung 68 rechts). Lediglich an einer Verbindungsstelle verwuchsen so gut wie alle Pflanzen miteinander. Ansonsten klafften die Pflanzen am Ende des ersten Jahres meist auseinander (gerissene Seile ohne eingewachsene Seilenden, Abbildung 68 Mitte). In der weiteren Entwicklung war daher nicht mit weiteren Verwachsungsreaktionen zu rechnen, weshalb alle Pflanzen nach der ersten Vegetationsperiode entfernt wurden.

Abbildung 68 Links: Saftstau und partielles Einwachsen bei einer II-4er-Verbindung. Mitte: Aufgebrochene II-8er-Verbindung. Rechts: Querschnitt durch eine II-8er-Verbindung mit überdurchschnittlich guter Verwachsung. 5 Pflanzen sind hier miteinander verwachsen, 3 bzw. 4 deutlich im Wachstum zurückgeblieben.

[205] Jeweils 24 Verbindungen (6 „Bündel) angelegt, alle nach erster Vegetationsperiode entfernt.

3.3.1.2 Versuchsreihe 2009

3.3.1.2.1 Allgemeine Entwicklung der Pflanzen

Verglichen mit der Versuchsreihe 2008 zeigten die Pflanzen der 2009 angelegten Versuche eine deutlich andere Entwicklung. Viele Pflanzen blieben im Wachstum stark zurück, zeigten kaum Dickenwachstum oder starben sogar ab. So nahmen die Durchmesser, ausgehend von 12,6 mm (+/-2,1 mm), in der Vegetationsperiode 2009 lediglich um durchschnittlich 2,4mm zu und erreichten Werte von 15mm (+/-3,4 mm). Damit war die Durchmesserzunahme über 70% geringer als im vergleichbaren Zeitraum der 2008 angelegten Versuche. Die größere Standardabweichung ist darüber hinaus ein Indiz für die sehr heterogene Entwicklung. Damit können die Ergebnisse der beiden Versuchsreihen nur bedingt miteinander verglichen werden. [206]

Im Ergebnis zeigte sich, dass es meist nur bei Pflanzen zu erkennbaren Verwachsungsreaktionen kam, die eine Durchmesserzunahme von mehr als 3 mm aufwiesen.[207] In der Ergebnisbeschreibung wird daher zwischen schwächer wachsenden und diesen stärker wachsenden Pflanzenpaaren unterschieden. Da nur letztere zumindest in Ansätzen einen Vergleich mit den 2008 angelegten Versuchen ermöglichen, werden in der folgenden Ergebnisdarstellung auch nur diese stärker gewachsenen Verbindungen berücksichtigt.[208] Wie bereits dargestellt (vgl. Abschnitt 3.2.7.1) wurde die Dokumentation der Ergebnisse der Versuchsreihe 2009 noch um einige Beobachtungen ergänzt, die im Verlauf der Vegetationsperiode 2010 gemacht wurden.

3.3.1.2.2 Parallelverbindungen mit Dyneema-Seilen (1 + 2)[209]

- Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik; Zustand der Verbindungsmittel

Ein Einschneiden der Seile in die Rinde wie bei den Verbindungen mit Drahtseil wurde eher selten beobachtet. Meist kam es an der Verbindungsstelle zu Saftstau und damit zu einem sehr deutlichen Anschwellen der Achsen oberhalb der Seile, die von oben her überwallt wurden, jedoch im Verlauf der Vegetationsperiode 2009 meist nicht vollständig einwuchsen.[210] Während der Vegetationsperiode 2009 (offizieller Beobachtungszeitraum) wurde keines der Seile durch das Wachstum aufgesprengt, dazu kam es jedoch im weiteren Verlauf der Entwicklung (Frühsommer 2010) in einem Fall bei der Variante mit dem dünneren Seil. Ansonsten wurden keine Unterschiede zwischen den Varianten (Seilstärken) festgestellt.

---

[206] Vgl. 3.2.4 → Wachstumsbedingungen der Versuchsreihe 2009.

[207] Durchschnittswert der beiden miteinander verwachsenden Pflanzen.

[208] Da sowohl bei den mit Schrauben als auch bei den mit Dyneema-Seilen verbundenen Kreuzverbindungen so gut wie keine Pflanzen vorhanden waren, die ein entsprechendes Dickenwachstum aufweisen, wird auf die Darstellung der Ergebnisse hier vollständig verzichtet.

[209] Bei beiden Varianten (Seilstärken) wurden jeweils 10 Verbindungen angelegt. Beidem dünneren Seil (Dyneema 1) konnten zwei Verbindungen nicht gewertet werden, da jeweils eine Pflanze abstarb. Drei weitere zeigten ein sehr geringes Dickenwachstum, sodass sich die Ergebnisdarstellung auf fünf Verbindungen bezieht (eine Verbindung einbezogen, bei der weniger als 3mm Dickenwachstum beobachtet wurde, die aber sehr deutliche Verwachsungsreaktionen zeigte; vermutlich Messfehler). Bei der Variante mit dem stärkeren Seil (Dyneema 2) wiesen sechs ein ausreichend großes Dickenwachstum (> 3 mm) auf, vier entwickelten sich nur schwach und werden daher in der Darstellung nicht berücksichtig.

[210] D. h. es kam nicht zu einer Xylemverwachsung und zu einem durchgehendem Kambium außerhalb des Seils. (vgl. Längsschnitt Abbildung 69 rechts)

Abbildung 69 Links Typische Verbindung (Dyneema 2) am Ender der ersten Vegetationsperiode (2009). Mitte: Eine vergleichbare Verbindung Mitte 2010. Rechts: Quer- und Längsschnitte im Bereich der Verwachsung. Im Bereich der Anschwellung (oben) ist das Gewebe in weiten Bereichen nicht verholzt (helle Bereiche). Im Längsschnitt ist rechts zu erkennen, dass das Seil noch nicht überall vollständig eingewachsen ist.(Quershnitte: Phloroglucin-Färbung)

- Morphologie und Anatomie der Verwachsungen

Verwachsungen der Rindengewebe waren im Verlauf der Vegetationsperiode 2009 äußerlich nur sehr selten zu sehen und die für die Versuche 2008 typischen Rindenhöcker konnten nicht beobachtet werden. Vor allem in den stark angeschwollenen Bereichen oberhalb der Seile entwickelten die Pflanzen eine mehr oder weniger elliptische, an den Kontaktflächen abgeflachte Kontur. Ein verstärktes Dickenwachstum in den unmittelbaren Randbereichen der Kontaktflächen („gegenseitige Überwallung“) wurde jedoch meist nicht beobachtet, vielmehr schien das Dickenwachstum an den Kontaktflächen durch die starre Seilverbindung unterbunden worden zu sein, ohne dass es zu aktiven Wachstumsreaktionen an anderer Stelle kam. (Abbildung 69 links)

Bei einigen Verbindungen war darüber hinaus im Kontaktbereich ein deutlicher Spalt zu erkennenden, der mit einer Art Wundgewebe mit rauer/borkiger Oberfläche angefüllt war. Im Gegensatz zu ähnlichen Strukturen bei den 2008 angelegten Drahtseilverbindungen waren die Seile hier augenscheinlich nicht gerissen.

Die Querschnitte zeigten, dass vermutlich bei allen Verbindungen bis zum Ende der Vegetationsperiode 2009 im unmittelbaren Kontaktbereich Rindenverwachsungen entstanden waren, und dass bei der Hälfte der Verbindungen zu diesem Zeitpunkt ggf. auch schon erste Ansätze von Xylemverwachsungen vorlagen. Bis Juni 2010 (Anfertigung der Schnitte) waren bei allen Verbindungen Xylemverwachsungen entstanden. Zu diesem Zeitpunkt waren bei den meisten

Verbindungen aber auch äußerlich erkennbare Rindenverwachsungen vorhanden und die Seile waren an einigen Stellen eingewachsen (Abbildung 69 Mitte und rechts).[211]

3.3.1.2.3 Parallelverbindungen mit Edelstahlschrauben und Gewindestangen[212]

- Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik; Zustand der Verbindungsmittel

Die Schrauben wurden bei den stärker wachsenden Pflanzen so gut wie vollständig überwallt bzw. waren am Ende der Vegetationsperiode 2009 bereits komplett eingewachsen. Vor allem am Austrittspunkt der Schraubenspitzen, aber auch im Bereich der Schraubenköpfe bzw. Unterlegscheiben, waren meist Risse in der Rinde zu erkennen, die sich in der Regel rasch durch Wundgewebe schlossen[213] (Abbildung 70 links). In allen Fällen kam es ausgehend von der Schraube zu ausgeprägten Verfärbungen des Xylems, die sich durchschnittlich 27 mm (+/- 5,2 mm) nach oben und unten ausbreiteten.[214] In den Querschnitten im Bereich der Schrauben ist darüber hinaus erkennbar, dass das Holz durch das Eindrehen der Schraube gespalten wurde (Abbildung 71 links).

Auch die Gewindestangen bzw. Muttern wurden großteils überwallt oder von Wundgewebe überwuchert, wobei in letzterem Fall die Achsen offensichtlich beim Festziehen der Muttern durch das Werkzeug verletzt worden waren. Auch konnten ähnlich wie bei den Verbindungen mit Schrauben wieder Risse in der Rinde beobachtet werden,[215] es kam jedoch zu keiner Spaltung des Holzes. Gleichwohl traten im Bereich der Gewindestangen Xylemverfärbungen auf, die sich bei den vier untersuchten Proben durchschnittlich ca. 17 mm (+/-3,5 mm) nach oben und unten ausbreiteten (Abbildung 71 rechts).[216]

- Morphologie und Anatomie der Verwachsungen

Bei allen Verbindungsstellen der Schraubverbindungen waren bei den stärker wachsenden Pflanzen verbreiterte, abgeflachte Kontaktflächen zu erkennen, wobei es dabei (im Gegensatz zu den Verbindungen mit Dyneema-Seilen) zu mehr oder weniger stark ausgeprägtem gegenseitigen Überwallungen kaum (verstärktes Dicktenwachstum in den Randbereichen der Kontaktstellen). Bei zwei von drei Stellen waren äußerlich sehr gut erkennbare Rindenverwachsungen vorhanden, die sich über weite Bereiche der Kontaktzone erstreckten (Abbildung 70 rechts). Auf den Querschnitten (Mai/Juni 2010) konnten in allen Fällen Rinden- und Xylemverwach-

---

[211] Um zu klären, ob an den Kontaktflächen von außen nicht erkennbare Verwachsungen vorlagen, wurden bei fünf der sechs Verbindungen der Variante mit Dyneema 2 im Juni 2010 Querschnitte angefertigt.

[212] Von neun angelegten Verbindungen bei den Schrauben zeigten nur drei ein Dickenwachstum von über bzw. knapp 3 mm. Bei allen anderen waren Wachstum und Verwachsungsreaktionen sehr gering. Damit liegen nur sehr wenige aussagekräftige Verbindungen vor. Bei den neun angelegten Verbindungen mit Gewindestangen zeigten vier ein sehr geringes Dickenwachstum, in einem Fall starb eine Pflanze ab. Bei vier Verbindungen waren Durchmesserentwicklung (über bzw. knapp 3mm) und Verwachsungsreaktion für eine Auswertung/Beschreibung ausreichend.

[213] Interessant ist dabei, dass diese Risse nicht unmittelbar beim Verschrauben entstanden, sondern erst nach einigen Tagen sichtbar wurden.

[214] D. h., dass ein axialer Bereich von ca. 54 mm verfärbt war. Da sich diese Messungen nur auf drei Verbindungsstellen beziehen, sind sie statistisch kaum belastbar. Hier sei auf die ergänzenden Versuche mit Schrauben und Gewindestangen verwiesen (Abschnitt 3.3.1.2.4)

[215] Ggf. jedoch in einem geringeren Ausmaß als bei den Verbindungen mit Schrauben.

[216] Hier sei wieder auf die zusätzlichen Versuche mit Schrauben und Gewindestangen im folgenden Abschnitt verwiesen.

sungen nachgewiesen werden, wobei anzunehmen ist, dass auch die Xylemverwachsungen bereits in der Vegetationsperiode 2009 entstanden waren (vgl. Abbildung 71 links).

Ähnlich wie bei den Schraubverbindungen entstanden bei den stärker wachsenden Pflanzen der Gewindestangenverbindungen abgeflachte, verbreiterte Kontaktflächen, wobei – vergleichbar mit den Verbindungen mit Dyneema-Seilen – äußerlich so gut wie keine Anzeichen von Rindenverwachsungen zu erkennen waren (vergleichbar Abbildung 70 Mitte rechts). Die bei vier Verbindungen angefertigten Schnitte (Juni 2010) zeigten jedoch, dass an der Kontaktfläche im Verlauf der Vegetationsperiode 2009 Rindenverwachsungen entstanden waren. In diesem Zeitraum traten bei zwei Verbindungen wahrscheinlich bereits umfassendere Xylemverwachsungen auf, Mitte 2010 waren bei allen Proben Xylemverwachsungen zu erkennen, wobei bis zu diesem Zeitpunkt auch äußerlich meist Rindenverwachsungen entstanden waren (Abbildung 71 rechts).

Abbildung 70 Typische Morphologie der Verbindungen mit Schrauben. Die beiden Abbildungen links zeigen verheilte Rindenrisse an den Schraubenköpfen und Austrittsstellen. Vergleichbare Risse traten auch bei den Muttern/Unterlegscheiben der Gewindestangenverbindungen auf. Mitte-Rechts: Gegenseitige Überwallung ohne äußerlich erkennbare Rindenverwachsung, wie sie auch bei Gewindestangenverbindungen auftrat. Rechts: Gegenseitige Überwallung mit von außen sichtbarer Rindenverwachsung.

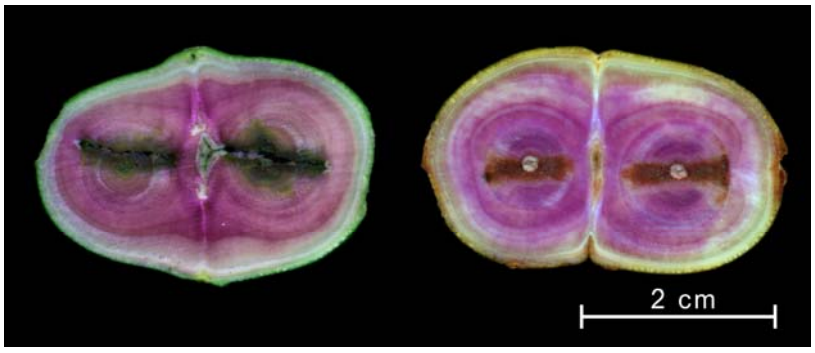


Abbildung 71 Querschnitte ca. 5mm oberhalb der Verbindungsstelle (Phloroglucin-Färbung). Links: Schraubverbindung mit sehr deutlicher Verfärbung und Spaltung des Holzes.
Rechts: Gewindestangenverbindung ohne Spalt und mit etwas schwächerer, bräunlicher Verfärbung (bei anderen Proben auch tief schwarz verfärbt).

3.3.1.2.4 Zusätzliche Parallelverbindungen mit Edelstahlschrauben und Gewindestangen an 2008 angelegten Versuchen[217]

- Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik; Zustand der Verbindungsmittel

Im Verlauf des Jahres 2009 wuchsen bei gut der Hälfte der Verbindungen (sowohl bei den Schraub- als auch bei den Gewindestangenverbindungen) die Verbindungsmittel vollständig ein oder wurden großteils überwallt. Bei den anderen Stellen kam es zu partiellen Überwallungen, teilweise war auch gar keine Überwallungsreaktion zu erkennen.

Bei den Ein- und Austrittsstellen der Verbindungsmittel traten wieder häufig kleinere Rindenrisse auf, die eine Ausdehnung von wenigen Millimetern aufwiesen und meist im Verlauf des Jahres 2009 vollständig verheilten.[218] Bei fünf Schraubverbindungen und einer Gewindestangenverbindung kam es zu größeren Rindenrissen oder zu langen, nekrotischen Bereichen (mehrere cm Ausdehnung) unterhalb des Schraubenkopfs bzw. der Mutter. Diese Wunden verheilten innerhalb des Beobachtungszeitraums oft nicht vollständig (Abbildung 73 links).

Abbildung 72 Serienschnitte mit typischen Verfärbungsmustern. Oben: Schraubverbindung. Unten: Gewindestangenverbindung. (Angegeben ist der axiale Abstand des Schnittes von der Verbindungsstelle)

Beim Eindrehen der Schrauben wurde das Holz wieder gespalten, währen es bei den Gewindestangen zu keiner Spaltung kam. Im Bereich der Schrauben kam es zu umfangreichen schwarzbraunen Verfärbungen des Holzes (Fäulnis), die sich nach oben und unten (axial) 38,5 mm (+/-9,8 mm) ausdehnten. Ähnliche Holzverfärbungen waren auch bei den Gewin-

[217] An den Parallel verbundenen Pflanzen der Versuchsreihe 2008 wurden wie beschrieben (vgl. Abschnitt 3.2.6.2) oberhalb der bestehenden Verbindungen bis zu drei weitere Verbindungen angelegt. Die allgemeine Entwicklung der Pflanzen kann den Beschreibungen der Versuchsreihe 2008 entnommen werden, aufgrund des großen Abstands zur Basis ist die dort wiedergegebene Durchmesserentwicklung nicht ganz zutreffend. Die Verbindungsmethode mit Edelstahlschrauben kam hier an 21 Stellen zur Anwendung, diejenige mit Gewindestangen an 10 Stellen.

[218] Diese Risse wurden wieder nicht unmittelbar beim Eindrehen registriert, sondern erst im Verlauf der Vegetationsperiode.

destangenverbindungen vorhanden, die sich in beide Richtungen axial um 39,8 mm (+/- 16,4 mm)[219] ausbreiteten. (Abbildung 72)

Auf Längsschnitten der Verbindungsstelle, bei denen die Schrauben teilweise freigelegt wurden, waren deutliche Deformationen der verfärbten Fasern im Bereich der Schraube zu erkennen. Daraus lässt sich schließen, dass die Schrauben ausrissen und die Verbindungen so dem Wachstumsdruck nachgaben (die Achsen also nicht unverschieblich aneinandergedrückt wurden). Vergleichbare Längsschnitte bei den Gewindestangenverbindungen zeigten, dass hier das verfärbte Holz teils deutlich zusammengedrückt wurde, die Verbindungsmittel aber nicht ausrissen. (Abbildung 73 rechts)

Abbildung 73 Ganz links: Starke Rindennekrose im Bereich unterhalb eines Schraubenkopfs, teilweise verheilt. 2. v. links: Typisches Beispiel eins kleinen, verheilten Risses (Gewindestange). Rechts: Längsschnitte mit freigelegten Verbindungsmitteln. Oben rechts (Schraubverbindung) ist zu sehen, wie die Fasern beim (partiellen) Ausreißen der Schraube deformiert werden. Bei der Gewindestangenverbindung (unten) sind die braun verfärbten Gewebe deutlich zusammengedrückt.

- Morphologie und Anatomie der Verwachsungen

Bei den Schraubverbindungen war bei gut der Hälfte der Verbindungsstellen eine leicht elliptische Deformation der Achsen mit abgeflachten Kontaktflächen zu erkennen, jedoch meist ohne dass dabei ein verstärktes Wachstum in den Randbereichen (gegenseitiges Überwallen) beobachtet werden konnte. Rindenverwachsungen waren äußerlich so gut wie nicht zu sehen und ein gutes Drittel der Verbindungsstellen zeigte keinerlei Verwachsungsreaktion (d. h. auch keine abgeflachten Kontaktflächen). Auch im Querschnitt zeigten sich kaum Verwachsungen, meist nur lokal sehr begrenzte Verwachsungen der Rinden und in zwei Fällen[220] Ansätze von Xylemverwachsungen (Abbildung 72 oben, 2. v. l.). Verbindungen, bei denen das oben beschriebene Ausreißen der Schrauben im Schnitt dokumentiert wurde, zeigten Mitte 2010 (Anfertigung der Schnitte) einen deutlichen, teils borkigen Spalt an der Verwachsungsstelle, der in einem Fall bereits im Verlauf des Jahres 2009 dokumentiert wurde und ansonsten während der Vegetationsperiode 2010 deutlich hervortrat.

[219] Zu beachten ist die extrem große Streuung dieser Werte. Einige Schnitte wurden Anfang 2010, andere Mitte 2010 angefertigt. Ggf. nahm die Ausdehnung in diesem Zeitraum weiter zu.

[220] Bei 6 ausgeführten Schnitten.

Bei den Verbindungen mit Gewindestangen entstand bei sechs von 10 Verbindungsstellen eine mehr oder wenige deutlich hervortretende, abgeflachte Kontaktfläche, bei drei Stellen kam es aufgrund von Unterschieden im Dickenwachstum zu einer einseitigen Überwallung (stärker wachsende Pflanze überwallt schwächere). Bei einer Verbindung waren Rindenverwachsungen zu erkennen und ein konvexes Ausbeulen an der Kontaktstelle deutete auf eine Xylemverwachsung hin. Bei fünf Verbindungsstellen wurden Quer- bzw. Serienschnitte angefertigt, bei denen in drei Fällen Ansätze von Xylemverwachsungen, in einem Fall nur Rindenverwachsungen und in einem Fall keinerlei Verwachsungsreaktionen zu erkennen waren.

3.3.2 Gewöhnliche Platane (*Platanus acerifolia*)

3.3.2.1 Versuchsreihe 2008

3.3.2.1.1 Allgemeine Entwicklung der Pflanzen

Auch bei den Platanen entwickelten sich die meisten Pflanzen vital und zeigten ein kräftiges Wachstum.[221] Die Basisdurchmesser nahmen, ausgehend von 10,3 mm (+/- 0,8 mm), in der ersten Vegetationsperiode um durchschnittlich 8,7 mm und in der zweiten um 8,3 mm zu, sodass am Ende des Beobachtungszeitraums Werte von 27,3 mm (+/- 4 mm) erreicht wurden. Das Durchmesserwachstum war demnach in beiden Jahren etwa gleich groß, das Pflanzenmaterial war sehr homogen, wobei die Durchmesserunterschiede im Laufe der Zeit deutlich zunahmen. Im ersten Jahr war das Dickenwachstum mit dem der Weiden vergleichbar, im zweiten jedoch deutlich geringer als bei diesen. In beiden Vegetationsperioden wurde immer wieder leichter Pilzbefall beobachtet, der unmittelbar behandelt wurde (vgl. Abschnitt 3.2.4) und sich nicht gravierend auf die Entwicklung auswirkte, sodass so gut wie alle Verbindungen in die Ergebnisbeschreibung einbezogen werden konnten.

Bei den Versuchen mit Kreuzungen von Pflanzenpaaren wurde das Dickenwachstum gesondert ermittelt, da bei diesen Varianten die Pflanzendichte um 50% größer war (vgl. Abschnitt 3.2.5). Das Dickenwachstum dieser Pflanzen war (ausgehend von im Prinzip gleichen Anfangsdurchmessern) in beiden Vegetationsperioden mit 5,3mm bzw. 6,2 mm deutlich geringer als bei den anderen Versuchen. Diese geringeren Durchschnittswerte kommen insbesondere dadurch zustande, dass 11 der 68 Pflanzen in ihre Entwicklung stark zurückblieben und kaum Dickenwachstum zeigten.

3.3.2.1.2 Parallelverbindungen mit Drahtseil[222]

- Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik; Zustand der Verbindungsmittel

Ähnlich wie bei den entsprechenden Verbindungen mit Weide schnitten die Drahtseile teilweise bereits während des Verbindens in die Rinde ein, in allen anderen Fällen geschah dies unmittelbar mit Einsetzen des Dickenwachstums. In keinem Fall kam es zu einem Saftstau, vielmehr

---

[221] Von insgesamt 160 Pflanzen wuchsen zwei nicht an und zwei weitere starben im Verlauf des Beobachtungszeitraums ab.

[222] 23 Verbindungen (6 Pflanzenpaare) angelegt; 7 (2 Pflanzenpaare) nach erster Vegetationsperiode zu Dokumentationszwecken entnommen, d. h. 16 Verbindungen (4 Pflanzenpaare) in zweiter Vegetationsperiode vorhanden. (Bei einigen Pflanzenpaaren wurden nur drei Verbindungen angelegt, da die Achsen im oberen Bereich teils sehr dünn oder bereits deutlich verzweigt waren (resultierend aus der Pflanzengröße 50/80, vgl. Abschnitt 3.2.3))

schwollen die Achsen sowohl ober- als auch unterhalb der Seile geringfügig an. Die Stellen, an denen die Seile einschnitten, schlossen sich in allen Fällen in sehr kurzer Zeit mit Wundgewebe, das eine sehr gleichmäßige und glatte Oberfläche bzw. Struktur aufwies. Damit wuchsen die Seile in allen Fällen bereits in der ersten Vegetationsperiode vollständig ein. Im gleichen Zeitraum wurden sie meistens jedoch auch aufgesprengt, die Pflanzen wurden aber (wie bei den Versuchen mit Weide) teilweise durch die eingewachsenen Seilenden mehr oder weniger fest zusammengehalten. (Abbildung 74; Abbildung 75)

- Morphologie und Anatomie der Verwachsungen

In der ersten Vegetationsperiode entstanden bei knapp der Hälfte der Verbindungen (10 von 23) deutlich sichtbare Verwachsungen der Rinde, wobei die verbindenden Gewebe meist eine auffällig glatte und homogene Oberfläche aufwiesen. In einigen Fällen waren wieder mit bloßem Auge die bei den entsprechenden Versuchen mit Weide beschriebenen, miteinander fusionierenden Rindenhöcker erkennbar. Die Achsen zeigten im Bereich zwischen zwei Verbindungsstellen oft größere Abstände, sodass die Verwachsungen eine brückenartige Verbindung der zwei Pflanzen bildeten (Abbildung 74 links). Abgeflachte, durch Überwallung verbreiterte Kontaktflächen entstanden (fast) nur bei Verbindungen, bei denen die Seile nicht gerissen waren. Dies war meist bei den obersten Verbindungen der Fall, die das geringste Dickenwachstum zeigten (Abbildung 74 rechts). Bei drei Verbindungen kam es hier zu einem gegenseitigen Überwallen (Verbreiterung der Kontaktflächen), ohne dass Rindenverwachsungen äußerlich sichtbar waren. Die übrigen 10 Verbindungen wiesen am Ende der ersten Vegetationsperiode einen borkigen Spalt auf oder klafften auseinander (Abbildung 74 Mitte). Diese Verbindungen, bei denen immer die Seile gerissen waren, wurden offensichtlich nicht bzw. nicht in ausreichendem Maße durch die eingewachsenen Seilenden zusammengehalten.

Abbildung 74 Links: Typische Verwachsung. Mitte: Aufgebrochene Verwachsung nach Versagen der Seilverbindung. Rechts: Oberste Verwachsung eines Pflanzenpaars mit teils geringem Dickenwachstum, Seile nicht gerissen. (Fotos nach erster VP)

Am Ende der zweiten Vegetationsperiode zeigten sich bei knapp einem Drittel der Verbindungen, die zu diesem Zeitpunkt vorhandenen waren (5 von 16), Verwachsungen mit mehr oder weniger homogener Oberfläche und teils abschuppenden Rindenauflagerungen (Abbildung 75 oben links). Bei 2/3 der Verbindungen klafften die Pflanzen auseinander oder es war ein borkiger Spalt an der Kontaktstelle zu erkennen (Abbildung 75 oben rechts). Diese Merkmale wurden insbesondere bei Verbindungen gefunden, bei denen bereits im Vorjahr entweder schon ein Spalt zu erkennen war oder (sichtbare) Rindenverwachsungen nur in sehr geringem Umfang

auftraten. Ferner ist auch hier (wie bei den Versuchen mit Weide) anzumerken, dass die unterschiedlichen Wachstumsergebnisse auf die Pflanzenpaare nicht zufällig verteilt waren, sondern dass meist alle vier Verbindungen eines Pflanzenpaares ähnliche Ergebnisse zeigten.[223]

Abbildung 75 Links: Ansicht und Querschnitt einer vollständigen Verwachsung, mit entstehenden gemeinsamem Jahrring (2. VP). Rechts: Verwachsung mit einem äußerlich erkennbaren borkigen Spalt ohne Xylemverwachsung (Phloroglucin-Färbung)

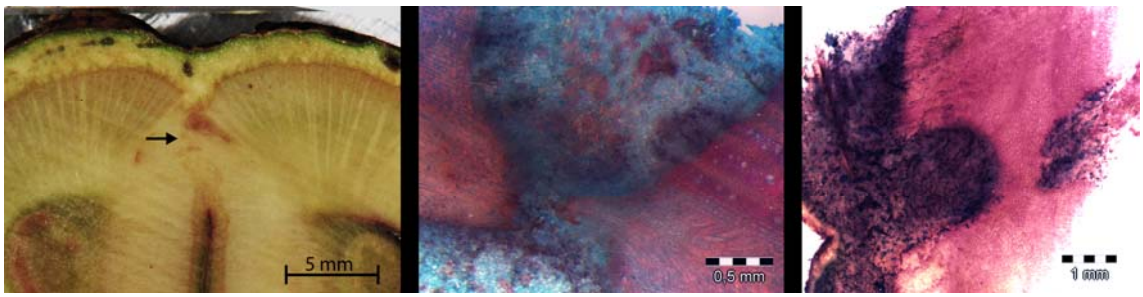


Abbildung 76 Entstehung einer Xylemverwachsung. Links: Bereich, in dem die Verwachsung entsteht (Pfeil). Mitte: Aufeinander zu wachsende Xylemhöcker. Rechts: Miteinander fusionierte Xyxlemhöcker (Mitte und rechts: FCA-Färbung)

[223] Abgesehen davon, dass wie oben beschrieben bei den obersten Verbindungen die Seile weniger oft aufgesprengt wurden.

Bei Verbindungen mit äußerlich erkennbaren, umfangreicheren Rindenverwachsungen konnte am Ende der ersten Vegetationsperiode im Querschnitt das Entstehen von Xylemverwachsungen dokumentiert werden (andere Verbindungen wurden nicht untersucht). In den mikroskopischen Aufnahmen sind die aufeinander zu wachsenden und dann miteinander verschmelzenden Xylemhöcker zu erkennen (Abbildung 76), ähnlich wie von Millner (1932) beschrieben.

Abbildung 75 zeigt Querschnitte von zwei unterschiedlich entwickelten Verwachsungen nach der zweiten Vegetationsperiode (April 2010). Während bei der Verbindung mit einem borkigen Spalt (rechts) lediglich kleinere Ansätze von Rindenverwachsungen zu erkennen sind, zeigt die Verbindung, bei der von außen weit entwickelte Rindenverwachsungen und eine homogene Oberfläche zu sehen sind, im Querschnitt deutliche Xylemverwachsungen. Dabei ist zu erkennen, dass diese erst in der zweiten Vegetationsperiode entstand (Jahrringgrenze). Auch bei anderen Verwachsungen, die von außen eine homogene, und großteils konvexe Querschnittskontur erkennen lassen, ist daher anzunehmen, dass am Ende der zweiten Vegetationsperiode vollständige Verwachsungen vorlagen.

3.3.2.1.3 Kreuzverbindungen mit Drahtseil[224]

- Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik; Zustand der Verbindungsmittel

Das Einwachsen der Drahtseile erfolgte im Prinzip genauso wie bei den Parallelverbindungen.[225] In vielen Fällen ließ sich jedoch nicht eindeutig klären, ob und wann die Drahtseile rissen, da sie schon früh weitgehend eingewachsen waren. Anzunehmen ist, dass bei mindestens einem Drittel der Verbindungen die Seile am Ende der ersten Vegetationsperiode noch intakt waren,[226] während sie bei einem weiteren Drittel zu diesem Zeitpunkt eindeutig gerissen waren. Am Ende der zweiten Vegetationsperiode waren nur bei zwei von sieben Verbindungen die Seile offensichtlich noch intakt. Bei diesen beiden Verbindungen ist auffällig, dass jeweils mindestens eine Pflanze ein geringes Dickenwachstum zeigte. Bei allen anderen Verbindungen ist anzunehmen, dass die Seile gerissen waren. In einem Fall klafften die Pflanzen an der Verbindungsstelle auseinander, ansonsten wurden sie durch die eingewachsenen Seilenden zusammengehalten.

- Morphologie und Anatomie der Verwachsungen

In den allermeisten Fällen waren bereits in der ersten Vegetationsperiode entlang der Kontaktzonen über weite Bereiche Rindenverwachsungen deutlich zu erkennen (Abbildung 77 links). Insbesondere bei Verbindungen mit offensichtlich intakten Seilen kam es zu einem deutlichen gegenseitigen Überwallen der Achsen, bei den anderen zu einer eher brückenartigen Verbindung. Diese bereits in der ersten Vegetationsperiode erkennbaren Unterschiede zwischen Verbindungen mit gerissenen und intakten Seilen nahmen im Verlauf des zweiten Wachstumsjahres deutlich zu.

Die Verwachsungsstellen nahmen häufig deutlich erkennbar eine konvexe Kontur an und es waren an den „Nahtstellen“ borkige, nach außen gedrückte Rindenreste bzw. Abschuppungen

---

[224] 17 Verbindungen angelegt, 10 nach erster Vegetationsperiode entnommen (Dokumentation, Platzgründe), d. h. 7 im zweiten Jahr vorhanden.

[225] Gleiches gilt für alle anderen Verbindungen mit Drahtseil bei Platane, sofern nichts anderes erwähnt ist.

[226] Dies waren vor allem Verbindungen, bei denen mindestens eine Pflanze einen unterdurchschnittlich kleinen Durchmesser aufwies.

zu sehen – eine offensichtliche Folge von Xylemverwachsungen. In einem Fall waren diese Rindenreste am Ende der zweiten Vegetationsperiode abgefallen; darunter hatte sich eine helle, homogen durchgehende Rindenoberfläche gebildet (Abbildung 77 Mitte).

Abbildung 77 Links: Beispiel einer sich gut entwickelnden Kreuzverwachsung am Ende der ersten Vegetationsperiode. Mitte: Die gleiche Verwachsung am Ende der zweiten Vegetationsperiode. Rechts: Partielle Verwachsung bei Verbindung mit gerissenem Seil (2. VP).

Abbildung 78 dokumentiert Verwachsungsstadien- bzw. Bereiche einer eher brückenartigen Verwachsung und zeigt in weiten Teilen einen durchgehenden, in der zweiten Vegetationsperiode entstandenen Jahresring. Während bei diesen Verbindungsstellen die Xylemverwachsungen offensichtlich erst in der zweiten Vegetationsperiode entstanden waren, zeigen am Ende der ersten Vegetationsperiode ausgeführte Schnitte, dass bei manchen Verbindungen bereits zu diesem Zeitpunkt Xylemverwachsungen vorlagen. Diese erstreckten sich teils auf fast die gesamte Kontaktfläche, waren teils aber auch nur punktuell ausgebildet.

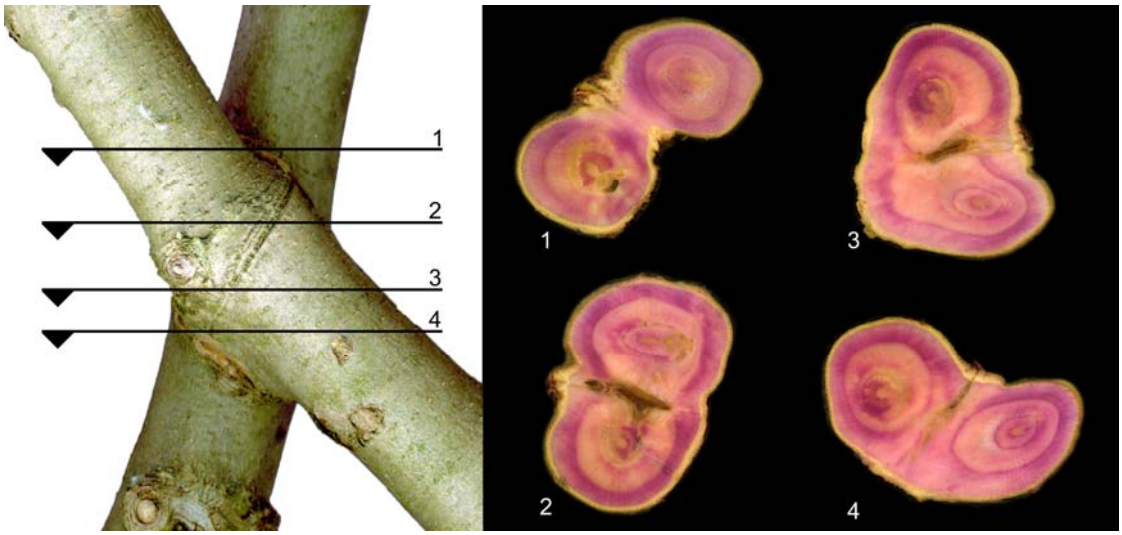


Abbildung 78 Serienschnitte durch eine Kreuzverwachsung. Zu erkennen sind Rindeneinschlüsse im mittleren Bereich (2) und fast vollständige Verwachsungen an den Rändern (1 und 4).

3.3.2.1.4 Parallelverbindungen mit Gewebeband[227]

- Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik; Zustand der Verbindungsmittel

Wie bei den entsprechenden Verbindungen mit Weide gab das Gewebeband an den Klebeflächen dem Wachstumsdruck nach, ein Reißen der Gewebefasern wurde jedoch nicht beobachtet.[228] Nach der ersten Vegetationsperiode hafteten die Klebeflächen bei allen Verbindungen noch aufeinander, nach der zweiten hatte sich das Band in einigen Fällen bereits gelöst und war abgefallen. Unter dem Gewebeband wurden keine Beeinträchtigungen des Dickenwachstums registriert, es kam jedoch zu deutlichen Veränderungen der Rindenstruktur (borkige, braune Abschuppungen). Nach dem Abfallen bzw. Ablösen blieben Klebstoffreste zurück und die Rinde zeigte sich stark rissig und gelblich-braun verfärbt (Abbildung 79).

- Morphologie und Anatomie der Verwachsungen

Nach der ersten Vegetationsperiode waren bei vielen Verbindungsstellen keinerlei Verwachsungsreaktionen erkennbar (10 von 24). Sofern unter dem Gewebeband zu beurteilen, kam es in einigen Fällen zu gegenseitigen Überwallungen (5 von 24), jedoch nur selten (3 von 24) zu sichtbaren Rindenverwachsungen. Bei fünf Verbindungen kam es zu Ansätzen von Verwachsungen mit einem borkigen Spalt.

Auch nach der zweiten Vegetationsperiode waren bei der Hälfte der Verbindungen (10 von 20) keine Ansätze von Verwachsungen erkennbar, bei ca. einem Viertel der Verbindungen waren intakte, äußerlich sichtbare (Rinden-)Verwachsungen vorhanden, in drei Fällen waren Ansätze von Verwachsungen wieder aufgebrochen (Abbildung 79).

Abbildung 79 Typische Verwachsungsergebnisse am Ende der zweiten Vegetationsperiode. Deutlich erkennbar sind die Rindenveränderungen und Klebstoffreste. Links: Brückenartige, vollständige Verwachsung. Mitte: Minimale, wieder aufgebrochene Verwachsungsansätze. Rechts: Minimale Verwachsungsansätze (Verwachsene Rindenhöcker).

[227] 24 Verbindungen (6 Pflanzenpaare) angelegt, ein Pflanzenpaar nach erster Vegetationsperiode zur Dokumentation entnommen, d. h. 20 Verbindungen (5 Pflanzenpaare) in zweiter Vegetationsperiode vorhanden.

[228] Dieser Zustand wurde auch bei allen folgenden Arten so angetroffen und wird daher im Einzelnen nicht mehr dargestellt.

3.3.2.1.5 Parallelverbindungen mit Buddy-Tape[229]

- Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik; Zustand der Verbindungsmittel

Bereits in der ersten Vegetationsperiode riss das Tape großteiles auf, sodass die Pflanzen nur noch an wenigen Stellen durch intakte Restbereiche zusammengehalten wurden, oder sogar auseinanderklafften (ein Pflanzenpaar). Da auch die verbleibenden Reste einem Auseinanderdrücken der Achsen keinen nennenswerten Widerstand mehr entgegensetzten, wurden sie im Winter 08/09 im Zuge der Dokumentation in den meisten Fällen entfernt. Beeinträchtigungen des Dickenwachstums, Saftstau oder Verfärbungen der Rinde wurden nicht registriert.

- Morphologie und Anatomie der Verwachsungen

Bei zwei der sechs Pflanzenpaare waren nach der ersten Vegetationsperiode keinerlei Verwachsungsreaktionen zu beobachten. Bei den anderen traten unterschiedliche Verwachsungsreaktionen auf: In einem Fall kam es zu einer Verwachsung, die mit denjenigen bei Drahtseilverbindungen beobachteten vergleichbar war (vgl. Abbildung 74 links). An drei Stellen wurden Ansätze von Verwachsungen mit einem borkigen Spalt beobachtet, an drei weiteren leichte Überwallungen und punktuelle Verwachsungen der Rinden (verwachsene Rindenhöcker). Ebenfalls an drei Stellen wurde ein geringfügiges gegenseitiges Überwallen ohne weitere Verwachsungsreaktion beobachtet. Am Ende der zweiten Vegetationsperiode war die Situation bei den verbliebenen Pflanzen, abgesehen von der Dickenzunahme, im Prinzip unverändert.[230]

3.3.2.1.6 Parallelverbindungen mit Drahtseil und Buddy-Tape[231]

- Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik; Zustand der Verbindungsmittel

Analog zu den Versuchen mit Weide entsprach der Zustand der beiden Verbindungsmittel demjenigen der Versuche, bei denen diese einzeln eingesetzt wurden. Das Einwachsen des Drahtseils wurde jedoch nicht durch das Buddy-Tape behindert und es wurden keine Veränderungen der Rindenstruktur registriert.

- Morphologie und Anatomie der Verwachsungen

Die Entwicklung der Verwachsungen war augenscheinlich mit der bei Drahtseilverbindungen ohne Buddy-Tape vergleichbar: Nach der ersten Vegetationsperiode zeigten sich bei einem Drittel bis der Hälfte der Verbindungen[232] großflächigere Rindenverwachsungen, die meist eine mehr oder weniger homogene Oberfläche/Struktur aufwiesen. Bei ca. einem Fünftel der Verbindungen waren Verwachsungen mit einem borkigen Spalt zu beobachten und bei knapp einem Drittel kam es zu Überwallungen und/oder Ansätzen von Verwachsungen (partielle Rindenver-

---

[229] 6 Pflanzenpaare angelegt. Nach der ersten Vegetationsperiode wurden zwei Pflanzenpaare, die keinerlei Verwachsungsreaktion zeigten entfernt, sowie ein weiteres Paar zu Dokumentationszwecken. D. h. in der zweiten Vegetationsperiode 3 Pflanzenpaare vorhanden.

[230] Eine Verwachsung, zwei Stellen mit leichter Überwallung, drei Stellen mit borkigem Spalt Dabei ist darauf hinzuweisen, dass die Pflanzen in einigen Fällen ggf. nur durch die oberhalb angelegten, zusätzlichen Verbindungen mit Schrauben bzw. Gewindestange zusammengehalten wurden.

[231] 6 Pflanzenpaare angelegt, 3 in zweiter Vegetationsperiode vorhanden.

[232] D. h. an den Stellen, an denen die Drahtseile angeordnet waren. Verwachsungen in Zwischenbereich von zwei Drahtseilverbindungen wurden nicht beobachtet.

wachsungen). Nach der zweiten Vegetationsperiode zeigte nur ein Viertel der Verbindungen Verwachsungen mit homogener Oberfläche, bei mehr als der Hälfte war ein borkiger Spalt zu sehen.

3.3.2.1.7 Tangentialverbindungen mit Drahtseil[233]

- Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik; Zustand der Verbindungsmittel

Nach der ersten Vegetationsperiode war bei mindestens der Hälfte der Verbindungen das Drahtseil offensichtlich gerissen. Nach der zweiten Vegetationsperiode waren drei von fünf Verwachsungen auseinandergebrochen, die anderen beiden wurden vermutlich durch eingewachsene Seilenden zusammengehalten. Ansonsten entsprach die Reaktion der Pflanzen auf die Drahtseile den entsprechenden Parallelverbindungen.

- Morphologie und Anatomie der Verwachsungen

Bei Verbindungen mit offensichtlich intakten Seilen kam es in der ersten Vegetationsperiode meist zu äußerlich sichtbaren Rindenverwachsungen, wobei die verwachsenen Bereiche oft sehr klein waren; nur in einem Fall entstand eine großflächigere Verwachsung. Sofern die Pflanzen durch die Seilenden zusammengehalten wurden, zeigten sich Verwachsungen mit einem borkigen Spalt, ansonsten klafften die Pflanzen mehr oder weniger weit auseinander und an den (ehemaligen) Kontaktflächen waren borkige Auflagerungen zu erkennen.

In der zweiten Vegetationsperiode wurde in einem Fall eine deutliche gegenseitige Überwallung ohne sichtbare Rindenverwachsung beobachtet, in einem anderen entstand eine vollständige, aber nur einseitige bzw. punktuelle Verwachsung.

3.3.2.1.8 Kreuzverbindungen mit Drahtseil (2-2)[234]

Neben der Kreuzverbindung am Knotenpunkt treten bei dieser und der folgenden Verbindungsgeometrie auch Parallelverbindungen der Pflanzenpaare auf (vgl. Abbildung 60). Obwohl die Kreuzungspunkte im Fokus der Betrachtung stehen, wird auch auf die Entwicklung der Parallelverbindungsstellen eingegangen, da einige interessante Unterschiede zu den Standard-Parallelverbindungen mit Drahtseil registriert wurden.

- Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik; Zustand der Verbindungsmittel

An den Kreuzverbindungsstellen waren die meisten Drahtseile vermutlich bereits nach der ersten Vegetationsperiode gerissen. Demgegenüber wurden bei den Parallelverbindungsstellen nur die wenigsten Drahtseile aufgesprengt. Ansonsten ergaben sich keine Unterschiede zu den oben beschriebenen Parallel- bzw. Kreuzverbindungen.

---

[233] 8 Verbindungen wurden angelegt, 5 wurden nach der ersten Vegetationsperiode entnommen, darunter drei partielle Verwachsungen bzw. Verwachsungen mit einem borkigen Spalt. D. h. 3 in zweiter Vegetationsperiode vorhanden.

[234] Angelegt wurden sechs Kreuzungen, d. h. 12 Pflanzenpaare mit je 4 Parallelverbindungsstellen. Damit wurden 48 Parallelverbindungen angelegt. Nach der ersten Vegetationsperiode wurden keine Pflanzen entnommen, bei drei Pflanzenpaaren blieb jedoch mindestens eine Pflanze deutlich in der Entwicklung zurück. Diese Pflanzen starben in der Vegetationsperiode 2010 meist ab.

- Morphologie und Anatomie der Verwachsungen

Bei den Parallelverbindungsstellen entstanden meist äußerlich erkennbare Rindenverwachsungen in großen Bereichen der Kontaktzone oder deutliche gegenseitige Überwallung mit einem Rindenwulst[235] an der Kontaktzone, ohne dass dabei sichtbare Rindenverwachsungen auftraten. Bei den wenigen Fällen, bei denen die Seile gerissen waren, konnte wieder ein borkiger Spalt beobachtet werden. Im Vergleich zu den Standard-Parallelverbindungen erstreckten sich die Verwachsungen meist über einen größeren, d. h. längeren Bereich. Dieser Unterschied trat nach der zweiten Vegetationsperiode noch viel deutlicher hervor: Drei Pflanzenpaare waren über die gesamte Länge verwachsen, einige weitere Pflanzenpaare über große Bereiche (Abbildung 80).

An den Kreuzungsstellen berührten sich häufig nur zwei der vier Pflanzen, oder die zwei Pflanzen des einen Paars berührten nur eine Pflanze des anderen Paars. Oft kam es zu einem gegenseitigen Überwallen oder zu Verwachsungen mit einem borkigen Spalt. Verwachsungen mit quasi umlaufend sichtbaren Rindenverwachsungen wie bei den Standard-Kreuzungen traten jedoch nicht auf. Nach der zweiten Vegetationsperiode waren vier von sechs Verbindungen am Kreuzungspunkt wieder auseinandergebrochen oder wiesen einen deutlichen borkigen Spalt auf (Abbildung 81 links).

Abbildung 80 Serienschnitte durch die parallel verwachsenen Achsen einer X-Verbindung (2-2). Fast im gesamten Bereich liegen Xylemverwachsungen vor, bei den Schnitten 1 und 2 mit nur minimalen Rindeneinschlüssen.

[235] Unter einen Rindenwulst wird hier und bei allen folgenden Beschreibungen eine stark gefaltete Rindenstruktur im Randbereich einer gegenseitigen Überwallung verstanden, vgl. Abb. und Diskussion

3.3.2.1.9 Kreuzverbindungen mit Drahtseil (1-1-1-1)[236]

- Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik; Zustand der Verbindungsmittel

Betreffs des Zustands der Seile und der Reaktionen der Pflanzen auf die Verbindungstechnik wurden keine nennenswerten Unterschiede zu den Kreuzverbindungen (2-2) festgestellt.

- Morphologie und Anatomie der Verwachsungen

Bei den Parallelverbindungsstellen erstreckten sich die Verwachsungen wieder über axial ausgedehnte Bereiche, es kam jedoch nicht wie bei den Kreuzverbindungen (2-2) zu Verwachsungen über die gesamte Verbindungslänge. Dies ist u. a. schon dadurch zu erklären, dass sich die Achsen durch die Verbindungsgeometrie im Bereich der Kreuzverbindung gar nicht berühren. Obwohl an den Kreuzungspunkten wieder die meisten Drahtseile aufgesprengt wurden, kam es bei den Pflanzen, die ein stärkeres Dickenwachstum aufwiesen, häufig zu einem deutlichen gegenseitigen Überwallen,[237] meist mit sichtbaren Rindenverwachsungen oder einem ausgeprägten Rindenwulst. Dabei verwuchsen dann häufig mindestens zwei benachbarte Pflanzen miteinander, oft sogar drei oder alle vier Pflanzen (Abbildung 81 rechts).

Im Gegensatz zu den Kreuzverbindungen (2-2) muss hier an der Kreuzungsstelle zwischen innen- und außenliegenden Pflanzen unterschieden werden (vgl. Abbildung 60): Außenliegende Pflanzen haben nur eine Kontaktzone zu einer Nachbarpflanze, innenliegende Pflanzen verfügen über zwei Kontaktzonen zu zwei Nachbarpflanzen, sie werden sozusagen von zwei Pflanzen umschlossen. Bei diesen innenliegenden Pflanzen wurde teils ein deutlicher Saftstau am Kreuzungspunkt registriert. In vielen Fällen wurden auch ein deutlicher Knick in der Achse und ein Durchmessersprung beobachtet.

Abbildung 81 Links: Typischer Zustand einer X-Verbindung (2-2) nach der zweiten Vegetationsperiode. Die Kreuzverbindung ist aufgebrochen, die parallelen Achsen sind über weite Bereiche verwachsen. Rechts: Typischer Zustand einer X-Verbindung (1-1-1-1). Verwachsung an der Kreuzungsstelle mit einem deutlichen Saftstau der innenliegenden Pflanzen.

[236] 11 Kreuzverbindungen wurden angelegt. Es wurden keine Verbindungen nach der ersten VP entnommen. Bei 4 Kreuzverbindungen war bereits nach der ersten VP mindestens eine Pflanze in der Entwicklung stark zurückgeblieben, nach der zweiten VP waren zwei dieser Pflanzen abgestorben.

[237] Die schwach wachsenden Pflanzen zeigten in der Regel kaum Reaktion, teilweise entstanden aber auch hier Verwachsungen.

3.3.2.2 Versuchsreihe 2009

3.3.2.2.1 Allgemeine Entwicklung der Pflanzen

Ähnlich wie bei den entsprechenden Versuchen mit Weide waren die gesamte Vitalität und das Dickenwachstum der Pflanzen bei den 2009 angelegten Versuchen mit Platane sehr viel geringer als bei denjenigen des Vorjahres.[238] Ausgehend von durchschnittlich 10,7 mm Durchmesser an der Basis (+/-1,22 mm) erreichten die Pflanzen am Ende der Vegetationsperiode 2009 Durchmesser von 12,8 mm (+/- 2,1 mm). Damit war das Dickenwachstum (2,1 mm) ca. 75% geringer als in der ersten Vegetationsperiode der 2008 angelegten Versuche. In vielen Fällen war daher das Wachstum so gering, dass an den Verbindungsstellen kaum Reaktionen zu beobachten waren. Während jedoch bei den Versuchen mit Weiden erst ab einer Durchmesserzunahme von ca. 3 mm Verwachsungsreaktionen zu beobachten waren, war dies bei den Platanen meist bereits ab einer Durchmesserzunahme von ca. 2 mm gegeben. Bei der Darstellung der Ergebnisse und insbesondere in der Diskussion werden daher hauptsächlich Verbindungen einbezogen, bei denen die Pflanzen um durchschnittlich mehr als 2 mm im Durchmesser zunahmen.

3.3.2.2.2 Parallelverbindungen mit Dyneema 1 + 2[239]

- Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik; Zustand der Verbindungsmittel

Bei beiden Varianten kam es in der Regel zu einem Einwachsen der Seile, das mit dem der Verbindungen mit Drahtseilen (Versuchsreihe 2008) vergleichbar war.[240] Auch wurde bei der Variante mit dem dünneren Seil (Dyneema 1) kein Saftstau festgestellt, bei der Variante mit dem stärkeren Seil (Dyneema 2) kam es jedoch bei zwei eher schwach wachsenden Pflanzen zu einem leichten Saftstau und einem Überwallen der Seile von oben her.[241] Weder im Verlauf der Vegetationsperiode 2009 noch in 2010 wurde ein Aufsprengen/Reißen der Seile beobachtet.

- Morphologie und Anatomie der Verwachsungen

Bei beiden Varianten kam es zu einem mehr oder weniger ausgeprägten gegenseitigen Überwallen der Pflanzen (abhängig vom Dickenwachstum) und bei ca. der Hälfte der Verbindungen zu äußerlich deutlich erkennbaren Rindenverwachsungen, tlw. auch zur Bildung eines Rindenwulstes. Bei der am stärksten wachsenden Verbindung mit Dyneema 1 waren äußerlich sehr umfangreiche Rindenverwachsungen erkennbar und im Querschnitt zeigten sich umfassende Xylemverwachsungen, die bereits in der Vegetationsperiode 2009 entstanden waren. Dies gilt jedoch nicht für weniger stark wachsende Pflanzen bzw. Verbindungen, bei denen es erst in der Vegetationsperiode 2010 zu Xylemverwachsungen kam.

---

[238] Einige Pflanzen zeigten wieder so gut wie kein Dickenwachstum oder starben ab. Die genauen Zahlen sind bei der Ergebnisdarstellung der einzelnen Versuche wiedergegeben. Wie bei den Versuchen 2008 trat teilweise wieder Pilzbefall auf, der ggf. zur Schwächung/Absterben einiger Pflanzen mit beitrug.

[239] Bei beiden Varianten bzw. Seilstärken wurden je 10 Verbindungen angelegt. Bei der Variante mit dem dünneren Seil (Dyneema 1) zeigten nur vier Verbindungen ein Dickenwachstum von mehr als 2 mm, bei der Variante mit dem stärkeren Seil (Dyneema 2) waren es sieben.

[240] Gleichmäßiges Anschwellen von oben und unten, vollständiges Einwachsen, siehe auch Längsschnitt Abbildung 83 links.

[241] Mitte 2010 waren aber auch hier die Seile vollständig eingewachsen.

Abbildung 82 Links: Relativ typische Morphologie einer sich kräftig entwickelnden Verbindung mit Dyneema 1. Rechts: Vergleichbare Situation bei einer Variante mit Dyneema 2. Bei allen vier Pflanzen ist kaum Safstau zu erkennen. Lediglich das Seil der schwächer wachsenden Pflanzen rechts ist noch nicht vollständig eingewachsen (leichter Saftstau).

Auch die Querschnitte (Mitte 2010) zeigen meist Xylemverwachsungen, die bereits in der Vegetationsperiode 2009 entstanden waren. Besonders deutlich ist hier eine für Platane insgesamt typische extreme Aufweitung der Holzstrahlen zu erkennen(parenchymatische Gewebe), die im Bereich der Verbindungsstelle einen Großteil des Holzvolumens der Anschwellungen ausmachen. (Abbildung 83)

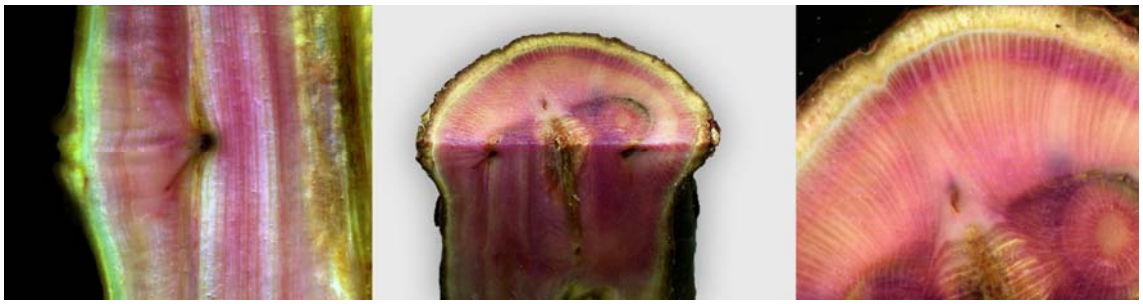


Abbildung 83 Mitte: Längs- und Querschnitt einer Verbindungstelle mit Dyneema-Seil. Im Bereich der Anschwellung besteht das Holz hauptsächlich aus Grundgewebe (weißlich, nicht bzw. schwach angefärbt). Rechts ein Ausschnitt des Querschnitts, der eine extreme Verbreiterung der Holzstrahlen im Bereich der Verwachsungsstelle zeigt. Links ein Ausschnitt des Längsschnitts, das vollständig und ohne größere Störungen eingewachsene Seil zeigend.((Phloroglucin-Färbung)

3.3.2.2.3 Parallelverbindungen mit Edelstahlschrauben[242]

- Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik; Zustand der Verbindungsmittel

Ähnlich wie bei Weide traten auch bei den Platanten im Bereich der Schraubenköpfe und Austrittsstellen wieder Rindenrisse auf, die rasch verheilten. Die Kallus- bzw. Wundgewebe wiesen hier genauso wie im Bereich der Verwachsungen eine glattere bzw. homogenere Oberfläche/Struktur auf als bei den Weiden. Abhängig vom jeweiligen Dickenwachstum kam es wieder zu einem mehr oder weniger starken Überwallen der Schrauben. Bei drei Verbindungen rissen die Schrauben im Verlauf der Vegetationsperiode 2009 aus. In diesen Fällen war es bereits beim Eindrehen zu einer deutlichen Spaltung einer der Achsen gekommen und/oder die Schrauben waren außermittig platziert worden (Abbildung 84 rechts). Auch bei den anderen Verbindungen konnte im Querschnitt wieder eine Spaltung des Holzes nachgewiesen werden und es kam zu braunen Verfärbungen der Xylemgewebe. Diese Verfärbungen ließen sich als leichte Farbveränderungen teils noch bei mehr als 30 mm Abstand von der Verbindungsstelle nachweisen.[243]

- Morphologie und Anatomie der Verwachsungen

Bei den Verbindungen, bei denen die Schrauben nicht ausrissen, kam es immer zu einem gegenseitigen Überwallen bzw. zu einem Rindenwulst (Abbildung 84 links), Rindenverwachsungen waren jedoch in der ersten Vegetationsperiode äußerlich nicht sichtbar. In den Schnitten (Mitte 2010) waren jedoch Verwachsungen der Rinde und auch des Xylems im Bereich der Kontaktflächen zu erkennen, die wahrscheinlich bereits im Verlauf der Vegetationsperiode 2009 entstanden waren. Gleichzeitig waren an der Kontaktstelle vermutlich durch Quetschung zerstörte Rindengewebe sichtbar.

Abbildung 84 Links: Wulstbildung bei einer sich stärker entwickelnden Verbindung. Mitte: Nur leichte Anschwellung bei einer eher schwach wachsenden Verbindung. Rechts: Ausgerissene Schraube (außermittig platziert).

[242] Von 11 angelegten Verbindungen zeigten sieben ein ausreichendes Dickenwachstum.

[243] Aufgrund der geringen Probenzahl ist eine quantitative Aussage zur Ausbreitung der Verfärbungen nicht möglich (siehe hierzu Abschnitt 3.3.2.2.4).

3.3.2.2.4 Zusätzliche Parallelverbindungen mit Edelstahlschrauben und Gewindestangen an 2008 angelegten Versuchen [244]

- Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik; Zustand der Verbindungsmittel

Bei den Schraubverbindungen waren an den Köpfen bzw. Austrittsstellen der Schrauben so gut wie immer kleinere Rindenrisse vorhanden, die meist sehr gut verheilten. Bei drei Verbindungen entstanden größere, mehrere cm lange Risse vor allem unterhalb des Schraubenkopfs (ggf. „Abdrehen" der Rinde beim Eindrehen der Schrauben; vergleichbar entsprechenden Verbindungen bei Weide, Abbildung 73). An den Muttern bzw. Scheiben der Gewindestangenverbindungen entstanden nur sehr kleine, teils kaum sichtbare Risse, nie größere Verletzungen oder Nekrosen wie bei den anderen vergleichbaren Verbindungen (Schraubverbindungen bei Platane, Schraub- und Gewindestangenverbindungen bei Weide). Die Muttern wurden immer zu Teilen bis beinahe vollständig überwallt.

Die Querschnitte zeigten bei den Schrauben wieder schwarzbraune Verfärbungen und eine von der Schraube verursachte Spaltung des Holzes. Die Verfärbungen wiesen hier eine Ausbreitung nach oben und unten von durchschnittlich 31,5 mm (+/-5 mm) auf. In Längsschnitten, bei denen wieder die Schrauben freigelegt wurden, war teilweise ein Ausreißen der Schrauben bzw. eine Deformation der Holzfasern zu erkennen, jedoch weniger stark als bei Weide. Demgegenüber wurde bei den Gewindestangenverbindungen wieder keine Spaltung des Holzes beobachtet und die auch hier auftretenden Xylemverfärbungen hatten im Querschnitt oft nur eine geringe Flächenausdehnung. Die Größe der verfärbten Fläche nahm mit dem Abstand von der Verbindungsstelle sehr rasch ab, teilweise war bereits nach ca. einem Zentimeter nur noch das Mark verfärbt. Die maximale axiale Ausdehnung der Verfärbungen nach oben und unten betrug durchschnittlich 23,3 mm (+/-3,8 mm; Abbildung 85 unten). Ein Zusammenpressen des Holzes im Bereich der Gewindestange (Längsschnitt) konnte nicht festgestellt werden.[245]

- Morphologie und Anatomie der Verwachsungen

Bei den meisten Schraubverbindungen konnten im Prinzip zwei sich graduell unterscheidende Reaktionen beobachtet werden. So war an der Verbindungsstelle sehr häufig ein Rindenwulst[246] zu sehen oder eine etwas breitere konvexe Auswölbung, die einen deutlichen Hinweis auf eine Xylemverwachsung darstellt. In beiden Fällen wurde an der Kontaktstelle meist eine kleine Fuge bzw. ein leichter Spalt beobachtet. Äußerlich erkennbare Rindenverwachsungen traten so gut wie nicht auf (2009). Auf allen Querschnitten waren in den Randbereichen Rindenverwachsungen zu erkennen, während die Rindengewebe in den Bereichen, in denen sie beim Verschrauben aufeinandergedrückt wurden, meist braun bis schwarz verfärbt waren (vermutlich durch Quetschung abgestorben). Bei knapp der Hälfte der Querschnitte (3 von 7) konnten Xylemverwachsungen nachgewiesen werden, die meist jedoch erst im Verlauf der Vegetationsperiode 2010 entstanden waren. Zu diesem Zeitpunkt waren dann auch äußerlich in vielen Fällen umfangreichere Rindenverwachsungen zu erkennen. Tendenziell schien sich ein Ausreißen

---

[244] Schraubverbindungen: 14 Verbindungen angelegt; am Ende der Vegetationsperiode 2009 bzw. in der Mitte der Vegetationsperiode 2010 wurden bei insgesamt 7 Verbindungen Längs- Quer und Serienschnitte angefertigt. Gewindestangenverbindungen: 9 Verbindungen angelegt, eine Pflanze bei Verbindungsstelle abgebrochen (Windbruch, da sich Fixierung (Hohlschnur) oberhalb gelöst hatte), 5 Schnitte angefertigt.

[245] Wenn, dann in sehr viel geringerem Umfang als bei den vergleichbaren Verbindungen mit Weide

[246] Tlw. mit punktuellen Ansätzen von Rindenverwachsungen.

der Schrauben (s. o.) äußerlich an einem deutlicher ausgeprägten Spalt bemerkbar zu machen und Xylemverwachsungen schienen insbesondere bei solchen Verwachsungen entstanden zu sein, bei denen die Schrauben nicht ausgerissen waren.

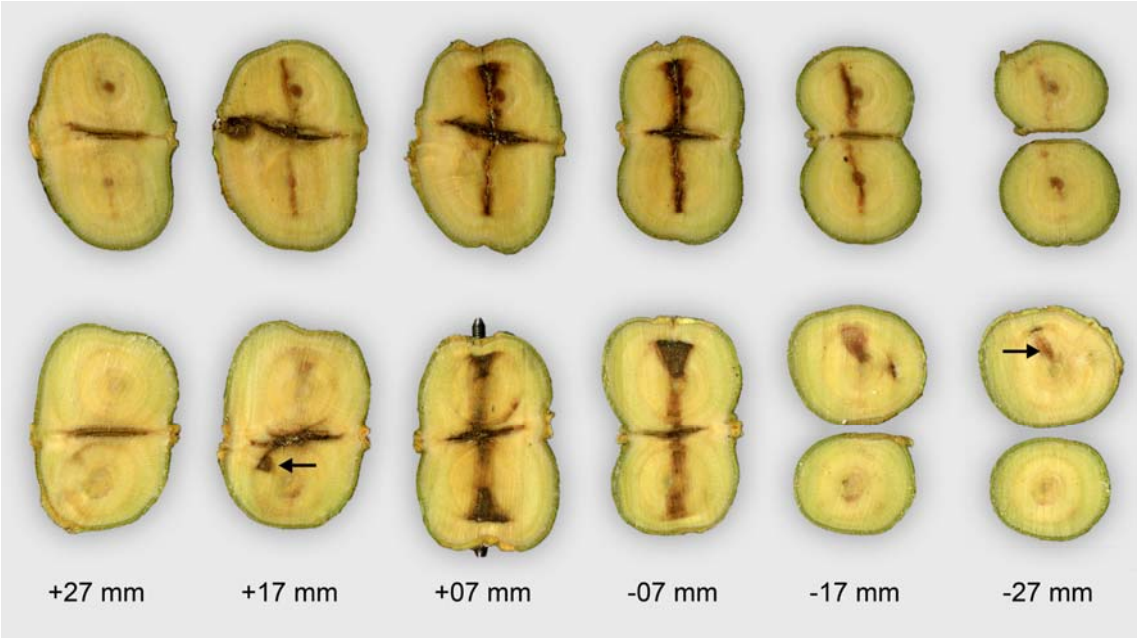


Abbildung 85 Serienschnitte. Oben: Schraubverbindung. Unten: Gewindenstangenverbindung. Die Pfeile markieren Verfärbungen, die durch äußere Verletzungen (Hagelschlag) verursacht wurden und in keinem Zusammenhang mit der Verbindungstechnik stehen.

Bei den meisten Verbindungen mit Gewindestangen zeigte sich als typische Reaktion an der Kontaktstelle ein Rindenwulst, der sich häufig über weite Bereiche erstreckte. Teils war auch eine konvexe Auswölbung zu erkennen, wobei zwischen diesen beiden Reaktionen wieder ein fließender Übergang bestand. Rindenverwachsungen waren äußerlich nur punktuell an wenigen Stellen zu sehen, in den meisten Fällen war vielmehr wieder eine leichte Fuge erkennbar (2009). Auf allen Schnitten zeigen sich meist umfangreiche Xylemverwachsungen, deren Ansätze in der Regel schon 2009 entstanden waren. Zum Zeitpunkt der Schnitte (Mitte 2010) waren auch äußerlich meist Rindenverwachsungen erkennbar. Ähnlich wie bei den Schraubverbindungen war die Rinde im unmittelbaren Kontaktbereich braun bis schwarz verfärbt (vgl. Abbildung 85).

3.3.3 Gemeine Esche (*Fraxinus excelsior*)

3.3.3.1 Versuchsreihe 2008

3.3.3.1.1 Allgemeine Entwicklung der Pflanzen

Die verwendeten Pflanzen waren gleichmäßig und kräftig entwickelt. Ausgehend von einem Basisdurchmesser von 13,5 mm (+/-1,9 mm) wiesen sie in der ersten Vegetationsperiode ein Dickenwachstum von 4,9 mm und in der zweiten von 11,0 mm auf, sodass am Ende des Beobachtungszeitraums durchschnittlich Werte von 29,4 mm (+/-2,5 mm) erreicht wurden.[247] Da-

[247] Die ermittelten Werte der Durchmesserentwicklung sind ggf. durch die große Anzahl an Entnahmen nach der ersten Vegetationsperiode beeinflusst.

mit lag das Dickenwachstum insgesamt in der Größenordnung der bei Platane gemessenen Werte, wobei die Zunahme vor allem in der zweiten Vegetationsperiode erfolgte. Allgemein entwickelten sich die Pflanzen arttypisch und kräftig, Schädlingsbefall oder dergleichen wurde nicht registriert.

3.3.3.1.2 Parallelverbindungen mit Drahtseil[248]

- Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik; Zustand der Verbindungsmittel

Die Reaktionen der Pflanzen auf die Drahtseilverbindung sind größtenteils mit den entsprechenden Versuchen bei Weide vergleichbar. Nur in Ausnahmefällen wurden ein Staftstau und ein Überwallen von oben beobachtet, ansonsten wuchsen die Seile rasch ein. Jedoch wurden so gut wie alle Seile frühzeitig in der ersten Vegetationsperiode aufgesprengt und die Pflanzen wurden oft auch nicht durch einwachsende Seilenden zusammengehalten (Abbildung 86).

- Morphologie und Anatomie der Verwachsungen

Bereits nach der ersten Vegetationsperiode klaffte ca. die Hälfte der Verbindungen wieder auseinander oder zeigte einen deutlichen (meist borkigen) Spalt. Im gleichen Zeitraum entstanden bei ca. einem Viertel der Verbindungen brückenartige Verwachsungen, teils direkt an der Verbindungsstelle, teils in der näheren Umgebung einer Verbindung. Auch bei diesen Verbindungen war in der Regel eine leichter Spalt bzw. eine Fuge zu erkennen (Abbildung 86 rechts). Bei Verbindungen mit offensichtlich intakten Seilen entstanden – teils direkt an der Verbindungsstelle, teils im Bereich zwischen zwei Verbindungsstellen – meist abgeflachte Kontaktflächen, die jedoch nur in Ausnahmefällen sichtbar durch gegenseitige Überwallung verbreitert waren. Äußerlich sichtbare Rindenverwachsungen konnten hier nicht beobachtet werden (Abbildung 86 Mitte).

Abbildung 86 Typische Ergebnisse nach der ersten Vegetationsperiode. Links: Keine Verwachsungsreaktion bei eingewachsenen, aber gerissenem Seil. Mitte: Deutliche gegenseitige Überwallung/Abplattung bei eingewachsenem, intaktem Seil. Rechts: Brückenartige Verwachsung mit borkigem Spalt bei eingewachsenem, gerissenem Seil.

[248] 24 Verbindungen (6 Pflanzenpaare) angelegt; nach erster VP 16 (4 Pflanzenpaare) entnommen, teilweise zur Dokumentation, meist wegen Austausch (Wiederholungsversuche 2009); d. h. 8 Verbindungen (2 Pflanzenpaare) in zweiter VP vorhanden.

Aufgrund vieler Entnahmen (→ Versuchsreihe 2009) lagen in der zweiten Vegetationsperiode nur wenige Verbindungen vor. Wie bei Weide und Platane bereits beobachtet, entwickelten sich vor allem bereits etablierte Verwachsungen weiter, insbesondere wenn (noch) ein guter Zusammenhalt durch die Drahtseile bestand (intakt oder fest eingewachsene Enden). Andere Verbindungen brachen wieder auseinander bzw. es stellte sich keine weitere Verwachsung ein. In einigen Schnitten sind Verwachsungen quasi ohne Rindeneinschlüsse mit sehr homogener Struktur zu sehen, bei brückenartigen Verwachsungen sind im Schnitt teils umfangreiche Einschlüsse erkennbar (Abbildung 87).

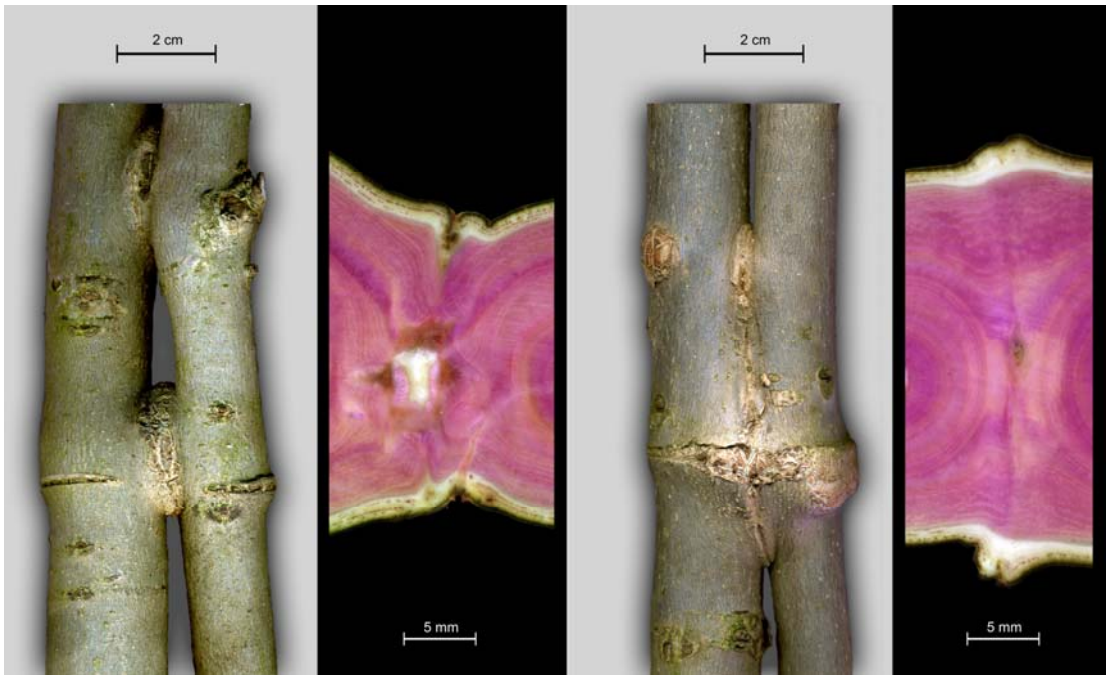


Abbildung 87 Links: Brückenartige Verwachsung bei gerissenen Drahtseilen. Im Schnitt sind Einschlüsse von Rindenresten und unverholzter Gewebe erkennbar. Rechts: Sehr weit bzw. gut entwickelte Verwachsung (vermutlich intakte Seile) mit äußerlich erkennbaren, umfangreichen Rindenverwachsungen. Im Schnitt (3mm oberhalb der Verbindungsstelle) sind hier so gut wie keine Rindeneinschlüsse erkennbar.

3.3.3.1.3 Kreuzverbindungen mit Drahtseil[249]

Sowohl die Reaktionen der Pflanzen auf die Verbindungstechnik als auch die Verwachsungsergebnisse entsprachen im Wesentlichen den Parallelverbindungen. Einige Verbindungen klafften bereits nach der ersten Vegetationsperiode auseinander, die Pflanzen wurden jedoch auch wieder häufig durch die eingewachsenen Enden der aufgesprengten Seile zusammengehalten und es entstanden brückenartige, oft lokal sehr begrenzte Verwachsungen, häufig mit einem borkigen Spalt.

[249] 8 Verbindungen angelegt, 5 nach erster VP entnommen, siehe Parallelverbindungen.

3.3.3.1.4 Parallelverbindungen mit Gewebeband[250]

Die Reaktionen der Pflanzen auf die Verbindungstechnik und der Zustand der Verbindungsmittel waren den entsprechenden Versuchen mit Platane sehr ähnlich: Die Gewebebänder gaben dem Dickenwachstum an den Klebeflächen nach und hinterließen beim Ablösen Klebstoffreste. In der ersten Vegetationsperiode zeigte sich an einer Stelle eine deutliche gegenseitige Überwallung, aus der sich im zweiten Jahr eine umfassende Verwachsung entwickelte. An einer weiteren Stelle kam es zu einer brückenartigen Verwachsung mit borkigem Spalt, ansonsten wurden keine Verwachsungsreaktionen beobachtet.

3.3.3.2 Versuchsreihe 2009

3.3.3.2.1 Allgemeine Entwicklung der Pflanzen

Auch bei den Eschen war das Dickenwachstum der Pflanzen dieser Versuchsreieh deutlich geringer. Ausgehend von 13,3 mm (+/-2,2 mm) nahmen die Basisdurchmesser durchschnittlich um nur 2,0 mm zu. Die Entwicklung war aber nicht so heterogen wie bei den 2009 angelegten Versuchen mit Weide und Platane. Daher wird in der Ergebnisdarstellung zunächst auf alle Pflanzen eingegangen und es werden explizit nur solche ausgenommen, die sehr wenig Dickenwachstum bzw. Verwachsungsreaktionen zeigten. Um eine Vergleichbarkeit mit den 2008 angelegten Pflanzen zu gewährleisten, wird insbesondere auch auf die weitere Entwicklung in der Vegetationsperiode 2010 eingegangen. Während es 2009 zu keinen Ausfällen kam, starben einzelne Pflanzen im Verlauf des Jahres 2010 ab.

3.3.3.2.2 Parallelverbindungen mit Dyneema-Seilen (1 + 2)[251]

- Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik; Zustand der Verbindungsmittel

Bei beiden Varianten wuchsen in der Vegetationsperiode 2009 nur wenige Seile vollständig ein, meist kam es zu einem Überwallen der Seile von oben und zu einem Saftstau, der zu einer deutlichen Anschwellung der Achsen führte, wobei die Schwellung nicht direkt an der Verbindungsstelle, sondern meist in einem geringen Abstand oberhalb des Seils am größten war (Abbildung 88 links). Im Verlauf der Vegetationsperiode 2010 wuchsen die Seile dann meist vollständig ein, die Schwellung im Bereich der Verbindungsstelle nahm dabei jedoch nicht ab, sondern teilweise sogar noch deutlich zu und es wurden starke Deformationen (Krümmungen, Ausbeulungen) der Achsen beobachtet (Abbildung 88 rechts). Im Verlauf der Vegetationsperiode 2009 riss keines der Seile. Im Verlauf der Vegetationsperiode 2010 riss jedoch die Hälfte der dünneren Seile (Dyneema 1) und auch eines der stärkeren (Dyneema 2) wurde aufgesprengt.

- Morphologie und Anatomie der Verwachsungen

An den Verbindungsstellen entstanden 2009 in den meisten Fällen lediglich abgeflachte Kontaktflächen ohne gegenseitige Überwallung. Rindenverwachsungen waren nur bei zwei Verbin-

---

[250] 8 Verbindungen (2 Pflanzenpaare) angelegt; 4 (ein Pflanzenpaar) zu Dokumentationszwecken nach erster Vegetationsperiode entnommen; d. h. 4 (1 Paar) in zweiter Vegetationsperiode vorhanden. Wie im Abschnitt 3.2.6.1 dargestellt, handelt es sich bei diesen Versuchen um Vorversuche in geringerem Umfang.

[251] Bei der Variante mit Dyneema 1 wurden 8 Verbindungen angelegt, von denen zwei sehr schwach entwickelte in der Ergebnisdarstellung nicht berücksichtigt werden. Bei der Variante mit Dyneema 2 wurden 9 Verbindungen angelegt, die alle dargestellt werden.

dungen mit Dyneema 2 erkennbar. Sofern die Seile intakt blieben entwickelten sich 2010 dann teils sichtbare Rindenverwachsungen (Abbildung 88 Mitte rechts), teils blieb es bei Abplattungen ohne weitere Reaktion. Wenn die Seile aufgesprengt wurden, klafften die Pflanzen wieder auseinander oder waren brückenartig mit einem mehr oder weniger stark ausgeprägten borkigen Spalt verwachsen. Im Querschnitt zeigten sich auch bei Verbindungen mit starken Anschwellungen und Deformationen der Achse Xylemverwachsungen mit teils nur minimalen Rindeneinschlüssen (vergleichbar Abbildung 87 rechts und Abbildung 89 rechts).

Abbildung 88 Links: Typisches Ergebnis am Ende der Vegetationsperiode 2009. Deutliches Anschwellen der Achsen oberhalb der Seilverbindung, Überwallung der Seile von oben, ohne dass diese eingewachsen sind; kaum Verwachsungsreaktion. Mitte-Links: Brückenartige Verwachsung mit gerissenem, eingewachsenem Seil (Mitte 2010). Mitte-Rechts: Umfangreiche Verwachsung mit eingewachsenem, vermutlich intaktem Seil (Mitte 2010). Rechts: Aufgerissene Verbindung mit teilweise eingewachsenen Seil und extremer Schwellung (Mitte 2010, Reaktion auf Seil relativ typisch).

3.3.3.2.3 Parallelverbindungen mit Edelstahlschrauben[252]

- Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik; Zustand der Verbindungsmittel

Bei den Köpfen und Austrittstellen der Schrauben traten wieder die bei Weide (und Platane) beschriebenen Rindenrisse auf, bei einem Drittel der Verbindungen waren diese größer, d. h. mehrere cm lang. Diese Verletzungen verheilten meist vollständig und die Schrauben wurden je nach Dickenwachstum mehr oder weniger stark überwallt, viele wuchsen im Verlauf der Vegetationsperiode 2010 vollständig ein. Eine stark außermittig in die Achsen eingedrehte Schraube riss bereits frühzeitig in der Vegetationsperiode 2009 aus, eine weitere im Verlauf der Vegetationsperiode 2010.[253] Im Querschnitt zeigte sich, dass durch die Schrauben wieder ein Spaltung des Holzes verursacht wurde, Verfärbungen im Bereich der Schrauben blieben jedoch auf eine minimale Fläche beschränkt und die axiale Ausbreitung fand in geringem Umfang, vor allem entlang des durch die Schraube verursachten Spalts statt.[254] Der Spalt im Holz war teilweise durch kallusartige Gewebe angefüllt, die in die entstandenen Hohlräume hineinwuchsen. Auch im Längsschnitt zeigen sich kaum Verfärbungen und keine Deformationen der Xylemfasern (d. h. normalerweise kein Ausreißen der Schrauben). (Abbildung 89)

---

[252] 8 Verbindungen angelegt, eine sehr schwachwüchsig und daher nicht berücksichtigt.

[253] Diese Schraube war relativ zu den Achsendurchmessern kürzer als bei den anderen Verbindungen.

[254] Für eine quantitative Auswertung der axialen Ausbreitung liegen nicht genügend Schnitte vor.

- Morphologie und Anatomie der Verwachsungen

Nachdem 2009 an den Verbindungsstellen meist gegenseitige Überwallungen, teilweise auch Rindenwulste und in einem Fall eine äußerlich sichtbare Rindenverwachsung dokumentiert wurden, entstanden 2010 bei drei Verbindungen großflächigere Rindenverwachsungen, die sich an den Stellen entwickelten, wo im Vorjahr schon Verwachsungen oder ausgeprägte gegenseitige Überwallungen vorhanden waren. Im Querschnitt konnten bei diesen Verbindungen immer Xylemverwachsungen über sehr weite Bereiche mit nur minimalen Rindeneinschlüssen nachgewiesen werden. Die Verbindung, bei der 2010 die Schraube ausriss, zeigte 2009 eine brückenartige Verwachsung mit leichtem Spalt.

Abbildung 89 Links: Morphologie einer typischen Verwachsungsstelle und des Schrauben-Austrittspunkts. Mitte: Die gleiche Verwachsung im Quer- und Längsschnitt. Der Pfeil markiert kallusartige, in den Schraubenspalt hineingewachsene Gewebe. Rechts: Vergrößerung des mit Kallusgewebe angefüllten Spalts.

3.3.3.2.4 Zusätzliche Parallelverbindungen mit Edelstahlschrauben und Gewindestangen an 2008 angelegten Versuchen[255]

- Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik; Zustand der Verbindungsmittel

Die Schrauben bzw. Muttern/Gewindestangen wurden wieder je nach Dickenwachstum mehr oder weniger stark überwallt und es traten die beschriebenen Rindenrisse auf. Genauso wie bei den anderen 2009 mit Edelstahlschrauben angelegten Verbindungen (Weide, Platane) entstand bei den Schraubverbindungen zwar wieder ein Spalt im Holz, die Verfärbungen waren jedoch gering. Bei den Verbindungen mit Gewindestangen wurde das Holz nicht gespalten und die Verfärbungen waren minimal, die axiale Ausbreitung betrug teils nur wenige Millimeter (Abbildung 90).

[255] Fünf Verbindungen mit Schrauben, vier mit Gewindestange angelegt. Aufgrund dieser geringen Wiederholungszahlen kann nicht gezielt auf Unterschiede zwischen den Varianten eingegangen werden.

- Morphologie und Anatomie der Verwachsungen

An den Verbindungsstellen entstanden meist abgeflachte Kontaktflächen, teilweise wurde auch ein gegenseitiges Überwallen beobachtet. Äußerlich waren keinerlei Rindenverwachsungen erkennbar; und auch auf den Querschnitten waren, wenn überhaupt, nur minimale Ansätze von Rindenverwachsungen und keine Xylemverwachsungen zu erkennen.

Abbildung 90 Schnitte im Abstand von 6 mm zum Verbindungsmittel. Links: Gewindestangenverbindung mit nur minimaler Xylemverfärbung. Rechts: Schraubverbindung mit Spalt und sehr geringer Xylemverfärbung.

3.3.4 Gemeine Birke (*Betula pendula*)

3.3.4.1 Versuchsreihe 2008

3.3.4.1.1 Allgemeine Entwicklung der Pflanzen

Die verwendeten Birken wiesen anfangs einen Durchmesser von 7,6 mm (+/-1,4 mm) auf und waren damit deutlich dünner als die Pflanzen der anderen Arten und teils auch insgesamt schwach entwickelt (tlw. geringe Bewurzelung). Die Entwicklung der Pflanzen war insgesamt sehr heterogen, einige Pflanzen zeigten nur wenig Dickenwachstum oder starben sogar ab (3 von 32). Das durchschnittliche Dickenwachstum in der ersten Vegetationsperiode lag bei 5,6 mm, sodass Ende 2008 Durchmesser von durchschnittlich 13,2 mm erreicht wurden, wobei die Streuung dieser Werte mit einer Standardabweichung von +/-3,2 mm relativ groß war. Da sich diese heterogene Entwicklung sehr stark auf die Verwachsungen auswirkte, wurden Ende 2008 sehr viele Pflanzen entnommen und durch neue, kräftiger entwickelte ersetz (vgl. Versuchsreihe 2009).[256]

[256] Aufgrund der geringen Zahl verbleibender Pflanzen in der Vegetationsperiode 2009 wird die Durchmesserentwicklung in diesem Zeitraum nicht dargestellt. Auch die Ergebnisbeschreibung bezieht sich hauptsächlich auf die Entwicklung in der Vegetationsperiode 2009.

3.3.4.1.2 Parallelverbindungen mit Drahtseil[257]

- Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik; Zustand der Verbindungsmittel

Ähnlich wie bei Platane schnitten die Drahtseile mit einsetzendem Dickenwachstum in die Rinde ein und wurden von einem Wundgewebe mit glatter, homogener Oberfläche bzw. Struktur umschlossen.[258] Sofern die Pflanzen ein deutliches Dickenwachstum zeigten, wuchsen die Seile vollständig ein, bei schwächer wachsenden Pflanzen kam es teils zu geringem Saftstau und zum Überwallen von oben her (Abbildung 91 links). Ein Aufsprengen der Seile konnte in keinem Fall dokumentiert werden.

- Morphologie und Anatomie der Verwachsungen

Bei allen stärker wachsenden Verbindungen zeigten sich Rindenverwachsungen, die sich meist über einen weiten Bereich erstreckten. Diese entstanden auch bei Verbindungen mit ungleicher Entwicklung der Pflanzen, bei denen in der Regel die stärker wachsende die schwächere überwallte. Im Querschnitt (Ende 2009) zeigte sich, dass bei allen Verbindungen mit äußerlich erkennbaren Rindenverwachsungen umfangreiche Xylemverwachsungen entstanden waren (gemeinsamerer Jahrring), teils mit nur minimalen Rindeneinschlüssen. Insbesondere in den 2008 entstandenen Jahrringen waren aber die Xylemkörper meist durch einen Streifen unverholzter Gewebe voneinander getrennt.

3.3.4.1.3 Kreuzverbindungen mit Drahtseil[259]

Die Reaktionen der Pflanzen auf die Drahtseilverbindung und der Zustand desselben entsprachen den Parallelverbindungen und auch die Verwachsungsergebnisse sind insgesamt vergleichbar. Äußerlich sichtbare Rindenverwachsungen waren etwas seltener, dafür wurde häufiger die Bildung eines Rindenwulstes beobachtet. Eine Pflanze knickte an der Verbindungsstelle leicht ab und es entstand eine Wunde mit deutlicher Kallusbildung.

3.3.4.1.4 Parallelverbindungen mit Gewebeband[260]

Der Zustand der Gewebebandverbindungen entsprach den Beschreibungen (z. B.) bei Platane, wobei das Nachgeben („Kriechen“) der Klebeflächen dem geringen Dickenwachstum entsprechend geringer war. Bei einer Verbindungsstelle entstand eine deutlich erkennbare Rindenverwachsung, bei einer weiteren kam es zu leichtem gegenseitigen Überwallen, ansonsten wurden keine Verwachsungsreaktionen dokumentiert.

---

[257] 24 Verbindungen (6 Pflanzenpaare) angelegt. 2 Pflanzenpaare sehr ungleich entwickelnd, eine Pflanze eines Paars abgestorben; d. h. nur 3 Paare (12 Verbindungen) mit gleichmäßiger, aussagekräftiger Entwicklung; 5 Pflanzenpaare (ungleich entwickelte und abgestorbene + 2 zur Dokumentation) nach erster Vegetationsperiode entnommen, d. h. 2009 nur ein Pflanzenpaar (4 Verbindungen) vorhanden.

[258] Ein Einschneiden des Seils beim Verbinden wurde nicht dokumentiert.

[259] 8 Verbindungen angelegt, in 3 Fällen Pflanzen stark ungleich entwickelt; 6 nach erster Vegetationsperiode entnommen, darunter alle ungleich entwickelten; d. h. 8 Verbindungen (2 Paare) in 2. VP vorhanden.

[260] 8 Verbindungen (2 Paare) angelegt; eine Pflanzen abgestorben, d. h. nur 4 Verbindungen (1 Paar); bei diesem Paar nur sehr geringes Dickenwachstum; alle Pflanzen nach erster Vegetationsperiode entnommen.

3.3.4.2 Versuchsreihe 2009

3.3.4.2.1 Allgemeine Entwicklung der Pflanzen

Wie beschrieben (Abschnitt 3.2.6.2) wurde bei dieser Versuchsreihe bewusst auf die nächstgrößere Baumschulsortierung zurückgegriffen, um mit kräftiger und homogener entwickelten Pflanzen arbeiten zu können. Die verwendeten Exemplare wiesen Basisdurchmesser von 17,8 mm (+/-1,4 mm) auf und zeigten ein Dickenwachstum von durchschnittlich 3,4 mm, sodass am Ende der Vegetationsperiode 2009 Durchmesser von 21,2 mm (+/- 3,2mm) erreicht wurden. Damit war das Dickenwachstum fast so groß wie bei der Versuchsreihe 2008, jedoch ausgehend von einem weit mehr als doppelt so großen Anfangsdurchmesser. Obwohl sehr großen Wert auf eine gleichmäßige Pflanzenqualität gelegt wurde, konnte eine heterogene Entwicklung der Pflanzen nicht vollständig vermieden werden.

3.3.4.2.2 Parallelverbindungen mit Dyneema 1[261]

- Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik; Zustand der Verbindungsmittel

Genauso wie bei den Drahtseilverbindungen schnitten die Seile bei allen Pflanzen, die ein deutliches Dickenwachstum zeigten, mit Einsetzen des Dickenwachstums in die Rinde und wuchsen vollständig ein. Dabei kam es wieder zu einem leichten Anschwellen der Achsen ober- und unterhalb des Seils, ohne dass ein Saftstau beobachtet werden konnte.[262] Bei weniger stark wachsenden Pflanzen kam es teils zu leichtem Saftstau und in einigen Fällen zum Überwallen der Seile von oben. Während in der Vegetationsperiode 2009 keines der Seile aufgesprengt wurde, rissen im Verlauf der Vegetationsperiode 2010 drei Seile auf, und zwar diejenigen der Verbindungen, bei denen das größte Dickenwachstum gemessen wurde.[263]

- Morphologie und Anatomie der Verwachsungen

Während 2009 nur wenige Verwachsungsreaktionen beobachtet wurden[264] kam es 2010 bei zwei Verbindungen zu umfangreichen, äußerlich sichtbaren Rindenverwachsungen und bei zwei weiteren zu deutlichen gegenseitigen Überwallungen ohne äußerlich sichtbare Rindenverwachsungen. Bei den letztgenannten waren im Querschnitt Rindenverwachsungen genauso wie erste Ansätze von Xylemverwachsungen erkennbar, bei äußerlich erkennbaren Rindenverwachsungen auch umfangreiche Xylemverwachsungen. (Abbildung 91 rechts)

---

[261] Von 9 angelegten Verbindungen zeigten 6 ein kräftiges Wachstum, 3 ein geringes mit einer Dickenzunahme von unter 3mm.

[262] Vgl. hierzu auch die entsprechenden Beschreibungen bei Parallelverbindungen mit Drahtseil bei Platane.

[263] Anfangsdurchmesser dieser Pflanzen entsprachen in etwas dem Durchschnitt.

[264] Meist entstanden nur leicht abgeflachte Kontaktflächen; kein oder nur geringes gegenseitiges Überwallen, einmal mit minimalem Ansatz von Rindenverwachsung.

Abbildung 91 Linke Bildhälfte: Typische Drahtseilverbindung. Nach der ersten Vegetationsperiode (links) noch leichter Saftstau bei der schwächer wachsenden Pflanze. Vollständig eingewachsenes Drahtseil und umfangreiche Rindenverwachsung nach der zweiten Vegetationsperiode (rechts). Rechte Bildhälfte: Typische Verbindung mit Dyneema-Seil. Links: Deutlicher Saftstau bei schwächer wachsender Pflanze und vollständig eingewachsenem Seil bei stärker wachsender. Rechts: Stark wachsendes Pflanzenpaar mit umfangreicher Rindenverwachsung.

3.3.4.2.3 Parallelverbindungen mit Edelstahlschrauben[265]

- Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik; Zustand der Verbindungsmittel

Die Schrauben wurden im Verlauf der Vegetationsperiode 2009 je nach Dickenwachstum mehr oder weniger stark überwallt und wuchsen in der folgenden Vegetationsperiode meist vollständig ein. In einigen Fällen entstanden an den Austrittsstellen der Schrauben wieder kleine Rindenrisse; im Bereich der Schraubenköpfe traten so gut wie keine Risse auf, es kam hier aber dennoch zur Bildung von Wundgewebe. Bei einigen Verbindungsstellen schwollen die Pflanzen im Bereich der Schraube deutlich an und in zwei Fällen rissen die Schrauben aus, sodass die Pflanzen auseinander klafften. Dies betraf, genauso wie beim Versagen der Verbindungen mit Dyneema-Seilen, die Verbindungstellen, bei denen das größte Dickenwachstum gemessen wurde. Wie bei den bislang beschriebenen Schraubverbindungen der anderen Arten kam es im Bereich der Schrauben zu einer Spaltung des Holzes und es wurden deutliche Verfärbungen der Xylemgewebe dokumentiert, die sich axial und tangential ausbreiteten (ähnlich wie z. B. bei Weide; Abbildung 92 rechts).[266] Bei einer Verbindung wurde vermutlich die Rinde im Kontaktbereich beim Anziehen der Schraube gequetscht und starb ab.

- Morphologie und Anatomie der Verwachsungen

Nachdem 2009 bei den meisten Verbindungen gegenseitige Überwallungen oder zumindest Abplattungen entstanden waren, zeigten alle stärker wachsenden Verbindungen im Verlauf der Vegetationsperiode 2010 Rindenverwachsungen, die sich teils über einen weiten Bereich er-

[265] Von 9 angelegten Verbindungen zeigten 6 ein kräftiges Wachstum (deutlich über 3mm), die andern ein teils sehr geringes.

[266] Aufgrund geringer Probenzahl keine quantitative Auswertung möglich.

streckten. Die Querschnitte dieser Verbindungen zeigten gleichmäßig entwickelte Xylemverwachsungen mit einem gemeinsamen Jahrring. (Abbildung 92)

Abbildung 92 Links: Typische Morphologie einer Schraubverbindung mit umfangreicher Rindenverwachsung und ohne erkennbare Rindenrisse. Rechts: Querschnitt knapp oberhalb der Schraube. Xylemverwachsung mit gemeinsamem Jahrring; umfangreiche Xylemverfärbungen und Spaltung vor allem bei der schwächeren Pflanze.

3.3.5 Schwarzerle (*Alnus glutinosa*)

3.3.5.1 Versuchsreihe 2008

3.3.5.1.1 Allgemeine Entwicklung der Pflanzen

Die verwendeten Pflanzen waren von kräftiger und homogener Qualität, sie wiesen Basisdurchmesser von 13,2 mm (+/-2,2 mm) auf und zeigten in der Regel eine sehr kräftige Entwicklung. Das Dickenwachstum lag in der ersten Vegetationsperiode bei 10,4 mm und in der zweiten bei 13,9 mm, sodass Ende 2009 Durchmesser von durchschnittlich 37,7 mm (+/-3,2 mm) erreicht wurden. Damit lag der Gesamtzuwachs in etwa in der Größenordnung der bei Weide erreichten Werte, wobei aufgrund des etwas größeren Anfangsdurchmessers auch größere und insgesamt die größten Enddurchmesser erreicht wurden.

Bei einigen Pflanzen kam es in der Vegetationsperiode 2008 zu erheblichem Befall durch die sogenannte Kräuselkrankheit (braunes Verfärben und Aufwölben der Blätter). Die Pflanzen wurden fungizid behandelt[267] und die befallenen Triebe wurden entfernt. Dennoch wurden stärker betroffenen Pflanzen durch den Befall deutlich geschwächt, blieben in der Entwicklung teils zurück und starben in Einzelfällen sogar ab.[268] Auf die Entwicklung dieser Pflanzen wird im Folgenden gesondert eingegangen.

[267] Ein bis zwei Spritzgänge mit Bayer Universal Pilzfrei, vgl. Abschnitt 3.2.4.

[268] Diese Pflanzen wurden bei der Ermittlung der durchschnittlichen Durchmesser nicht berücksichtigt.

3.3.5.1.2 Parallelverbindungen mit Drahtseil[269]

- Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik; Zustand der Verbindungsmittel

Bei den sich durchschnittlich bzw. kräftig entwickelten Pflanzen wuchsen die Drahtseile in der Regel bereits im Verlauf der ersten, spätestens in der zweiten Vegetationsperiode vollständig ein, wobei die Pflanzen ober- wie unterhalb des Seils meist leicht, teils aber auch deutlich anschwollen.[270] Dabei wurde – wenn überhaupt – nur ein geringer Saftstau beobachtet. Gleichzeitig wurden die Drahtseile durch das Dickenwachstum aufgesprengt und drei Verbindungen klafften deshalb nach der ersten Vegetationsperiode auseinander, die anderen wurden durch eingewachsene Seilenden mehr oder weniger fest zusammengehalten. (Abbildung 93 rechts) Bei einem sehr schwach wachsenden Pflanzenpaar (4 Verbindungen) blieben die Drahtseile über beide Vegetationsperioden intakt und es kam teils zu leichtem Saftstau und zum Überwallen der Seile von oben. Im Verlauf der zweiten Vegetationsperiode wuchsen die Seile aber auch hier vollständig ein und es wurde kein Saftstau mehr dokumentiert. (Abbildung 93 links)

- Morphologie und Anatomie der Verwachsungen

Am Ende der ersten Vegetationsperiode zeigten die Verbindungen, die durch eingewachsene Seilenden zusammengehalten wurden, eine meist brückenartige, manchmal partiell aufgebrochene Verwachsung mit einem mehr oder weniger stark ausgebildeten borkigen Spalt. Im zweiten Wachstumsjahr entstanden an diesen Stellen umfangreiche, brückenartige Verwachsungen,[271] wobei die Pflanzen einen teils recht großen Abstand zueinander aufwiesen. Damit entstanden auch dort Verwachsungen, wo ein lediglich geringer Zusammenhalt durch eingewachsene Seilreste vorhanden war und teils aufgebrochene Verwachsungsansätze des Vorjahrs vorlagen (Abbildung 93 rechts). In den Querschnitten dieser brückenartigen Verwachsungen zeigten sich umfangreiche Xylemverwachsungen und gemeinsame Jahrringe. An der Stelle, an der die Pflanzen ursprünglich aneinandergedrückt wurden, waren in größerem Umfang eingewachsene Reste (abgestorbener) Rindengewebe zu finden (Abbildung 94 rechts).

Bei allen vier Verbindungen des sehr schwach wachsenden Paars (intakte Drahtseile) entwickelte sich ein deutlicher Rindenwulst. Am Ende der ersten Vegetationsperiode waren bei zwei Verbindungen Rindenverwachsungen zu sehen, die sich über einen weiteren Bereich erstreckten,[272] die beiden anderen Verbindungen wiesen leichte Ansätze von Rindenverwachsungen auf. In der folgenden Vegetationsperiode entwickelten sich bei allen Verbindungen dieses Pflanzenpaars umfangreiche Verwachsungen (Abbildung 93 links).

---

[269] 20 Verbindungen (5 Paare) wurden angelegt. Bei einem Pflanzenpaar starb eine Pflanze in der ersten Vegetationsperiode ab, sodass 16 Verbindungen (4 Paare) dokumentiert wurden, von denen bei 4 (ein Paar) ein sehr geringes Dickenwachstum zeigten. (keine weiteren Entnahmen)

[270] Ähnlich wie bei Platane, vermutlich Einschneiden der Seile in die Rinde bei Einsetzen des Dickenwachstums.

[271] Im Unterschied bspw. zu den Baumarten Esche oder Platane, bei denen vergleichbare Verbindungen in der zweiten Vegetationsperiode dann vollständig aufbrauchen (s. o.)

[272] Den 2009 angelegten Parallelverbindungen bei Platane mit Dyneema-Seilen vergleichbar.

Abbildung 93 Linke Bildhälfte: Leichter Saftstau und Verwachsungsansätze am Ende der 1. VP (links). Die gleiche Verbindung zeigt am Ende der zweiten VP recht umfangreiche Verwachsungen und keinen Saftstau mehr (rechts). Rechte Bildhälfte: Aufgebrochene Verbindung mit borkigem Spalt (Ende 1. VP) Die gleiche Verbindung zeigt am Ende der 2. VP eine brückenartige Verwachsung.

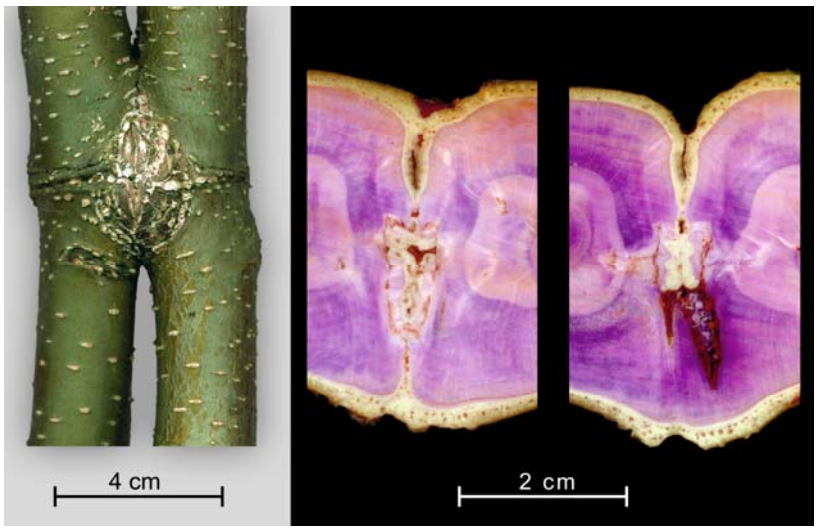


Abbildung 94 Querschnitte durch eine brückenartige Verwachsung (knapp ober- und unterhalb des Drahtseils). Deutlich zu erkennen sind die an der Verbindungsstelle eingewachsenen Rindengewebe, um die herum sich zumindest einseitig ein durchgehender Jahrring gebildet hat.

3.3.5.1.3 Kreuzverbindungen mit Drahtseil[273]

- Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik; Zustand der Verbindungsmittel

Auch bei diesen Verbindungen blieben offensichtlich nur dann die Seile intakt, wenn mindestens eine der beiden Pflanzen ein geringes Wachstum zeigte. Bei allen anderen Verbindungen wurden die Seile wieder rasch aufgesprengt, wobei sich der Zustand in einigen Fällen nicht eindeutig klären ließ.[274] Am Ende der ersten Vegetationsperiode klaffte eine Verbindung auseinander, alle anderen wurden durch die Seile oder die eingewachsenen Seilenden zusammenge-

[273] 7 Verbindungen angelegt, 3 nach erster Vegetationsperiode entnommen (darunter die aufgebrochene).

[274] Seile bzw. Seilreste vollständig eingewachsen.

halten. Im gleichen Zeitraum kam es bei vier Verbindungsstellen zu Saftstau und tlw. zum Überwallen der Seile von oben (meist bei den intakten Seilen); bei den meisten anderen wuchsen die Seile vollständig ein, ohne dass Saftstau in nennenswertem Umfang festgestellt wurde (Anschwellen von oben und unten wie bei Platane). Am Ende der zweiten Vegetationsperiode waren alle Seile vollständig eingewachsen und es wurde kein Saftstau mehr dokumentiert.

- Morphologie und Anatomie der Verwachsungen

In der ersten Vegetationsperiode kam es je nach Dickenwachstum zu einem mehr oder weniger deutlichen gegenseitigen Überwallen. Bei einer Verbindung waren Ansätze von Rindenverwachsungen zu sehen, bei einer anderen ein deutlicher Spalt (Seil gerissen). Auffallend ist insbesondere, dass bei vier Verbindungen mindestens eine der Pflanzen an der Verbindungsstelle abknickte und die Achsendurchmesser oberhalb der Verbindung teils größer waren als unterhalb (Abbildung 95).

Im Verlauf der zweiten Vegetationsperiode entwickelten sich bei allen in diesem Zeitraum vorhandenen Verbindungen Rindenverwachsungen, die sich auf den gesamt Kontaktbereich erstreckten. In Entsprechung zu den Schnitten, die bei den Parallelverbindungen angefertigten wurden, ist davon auszugehen, dass in allen Fällen umfassende Xylemverwachsungen vorlagen. An den im Vorjahr entstandenen Knicken kam es zur Bildung von Wundgeweben und die abgeknickten Achsen richteten sich bogenförmig auf.

Abbildung 95 Typische Morphologie der Kreuzverbindungen bei Erle. Links: An der Verbindungsstelle abgeknickte und bogenförmig aufgerichtete Pflanze. Rechts: Insbesondere die von rechts unten nach links oben verlaufende Pflanze weist an der Verwachsungsstelle einen deutlichen Durchmessersprung auf.

3.3.5.1.4 Parallelverbindungen mit Gewebeband[275]

Der Zustand der Gewebebänder und die Reaktion der Pflanzen auf diese entsprachen den bislang dargestellten Beobachtungen bei den anderen Arten; es wurde kein Einfluss auf das Dickenwachstum und kein Saftstau dokumentiert. In der Vegetationsperiode 2008 waren kaum

[275] 8 Verbindungen (2 Paare) angelegt. Ein Pflanzenpaar, bei dem eine Pflanze in der Entwicklung stark zurückblieb, wurde nach der ersten Vegetationsperiode entnommen.

Verwachsungsreaktionen erkennbar.[276] Bei den am Ende der zweiten Vegetationsperiode vorhandenen Verbindungen war dann in einem Fall eine brückenartige, mit den Drahtseilverbindungen vergleichbare Verwachsung entstanden. Bei den anderen Verbindungen wurden gegenseitige Überwallungen mit einem mehr oder weniger stark ausgeprägten Spalt dokumentiert.

3.3.5.2 Versuchsreihe 2009

3.3.5.2.1 Zusätzliche Parallelverbindungen mit Edelstahlschrauben und Gewindestangen an 2008 angelegten Versuchen[277]

Bei den meisten Verbindungen entstanden spätestens im Verlauf der Vegetationsperiode 2010 äußerlich deutlich erkennbare Rindenverwachsungen, in der vorausgehenden Vegetationsperiode wurden je nach Dickenwachstum mehr oder weniger stark ausgeprägte gegenseitige Überwallungen dokumentiert. Auch traten wieder die beschriebenen Rindenrisse und vereinzelt größere Rindennekrosen auf. Im Querschnitt (Mitte 2010) zeigen sich Xylemverwachsungen, aber auch großflächige und sich axial ausbreitende schwarzbraune Verfärbungen, ähnlich wie z. B. bei Weide. Die Anzahl der Wiederholungen und der ausgeführten Schnitte lässt keine genaueren Beschreibungen und keine Aussagen über Unterschiede zwischen den beiden Verbindungsvarianten zu.

3.3.6 Spitzahorn (*Acer platanoides*)

3.3.6.1 Versuchsreihe 2008

3.3.6.1.1 Allgemeine Entwicklung der Pflanzen

Die Pflanzen waren zu Beginn gleichmäßig und vital entwickelt und wiesen Durchmesser[278] von 11,8 mm (+/-1,3 mm) auf. In der ersten Vegetationsperiode wurde eine Dickenzunahme von 6,6 mm und in der zweiten von 9,3 mm gemessen, sodass sich am Ende des Beobachtungszeitraums Durchmesser von durchschnittlich 27,7 mm (+/- 9,3mm) ergaben. Damit lagen Anfangsdurchmesser und Zuwachs zwischen den Werten von Platane und Esche. Trotz eines häufiger auftretenden, für die Art typischen Mehltaubefalls[279] entwickelten sich alle Pflanzen kräftig und konnten daher in die Auswertung einbezogen werden.

---

[276] Kontaktflächen großteils durch Gewebeband verdeckt; in einigen Fällen vermutlich leichtes gegenseitiges Überwallen.

[277] Es wurden 4 Verbindungen mit Schrauben und ebenso viele mit Gewindestangen angelegt.

[278] Bei der stichprobenartigen Messung aller Durchmesser wurden anfangs keine Messungen bei Ahorn durchgeführt. Um die Daten zu ergänzen wurde in der Vegetationsperiode 2010 eine repräsentative Anzahl an Pflanzen entnommen und die Anfangsquerschnitte durch Messungen der Jahrringe und der Rindendicke entsprechend alter Triebe ermittelt.

[279] Behandlung bedarfsweise wie im Abschnitt 3.2.4 beschrieben.

3.3.6.1.2 Parallelverbindungen mit Drahtseil[280]

- Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik; Zustand der Verbindungsmittel

Der Zustand der Drahtseile am Ende der Vegetationsperiode 2008 ließ sich häufig nicht eindeutig klären. Nur in wenigen Fällen waren die Seile eindeutig gerissen, meist waren sie vermutlich intakt. Bei über der Hälfte der Verbindungen kam es zu Saftstau und einer Überwallung von oben, wobei die Seile eher selten und nur teilweise einwuchsen (Abbildung 96 links). Bei den anderen Verbindungen waren die Drahtseile meist großteils eingewachsen, in einigen Fällen wurden deutlich „herausquellende“ Überwallungswülste (Wundgewebe) beobachtet.

Im weiteren Verlauf der Entwicklung (Vegetationsperiode 2009) wuchsen die Drahtseile zwar meist ein (tlw. mit deutlichem Wulst), wurden aber so gut wie immer aufgesprengt, wobei die Pflanzen häufig auch nicht durch eingewachsene Seilenden zusammengehalten wurden.

- Morphologie und Anatomie der Verwachsungen

Am Ende der ersten Vegetationsperiode waren bei mehr als der Hälfte der Verbindungen lediglich leichte Abplattungen oder gar keine Verwachsungsreaktionen festzustellen. Bei einem Drittel der Verbindungsstellen kam es zu leichtem bis deutlich ausgeprägtem gegenseitigem Überwallen und in drei Fällen waren Ansätze von Rindenverwachsungen erkennbar, die sich aber nur auf einen kleinen Bereich erstreckten. Im Querschnitt waren bei einer derartigen Verbindung umfangreiche Xylemverwachsungen nachweisbar.

In der Vegetationsperiode 2009 entwickelten sich auch bei den Verbindungen, die durch eingewachsene Seilenden zusammengehalten wurden, keine weiteren Verwachsungen und es blieb bei leichten Überwallungen oder Abplattungen. Bei 2/3 der Verbindungen klafften die Pflanzen wieder auseinander oder zeigten einen deutlichen Spalt. In vier Fällen brachen dabei auch bereits entstandene Verwachsungen wieder auf (Abbildung 96 rechts).

Abbildung 96 Linke Bildhälfte: Typische Entwicklung einer Verbindung, bei der es zu keiner Verwachsung kam. Deutlicher Saftstau und intakte Seile in der ersten VP (links). Am Ende der zweiten VP sind die Seile gerissen, nur teilweise eingewachsen und die Verbindung ist auseinandergebrochen. Rechte Bildhälfte: In der ersten VP sind die Seile teilweise eingewachsen und es kam zu Verwachsungsansätzen. Dennoch ist die Verbindung nach der zweiten VP wieder aufgebrochen.

[280] 24 Verbindungen (6 Pflanzenpaare) angelegt; ein Pflanzenpaar (4 Verbindungen, darunter eine mit erkennbarer Rindenverwachsung) nach der ersten Vegetationsperiode entnommen.

3.3.6.1.3 Kreuzverbindungen mit Drahtseil[281]

- Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik; Zustand der Verbindungsmittel

Auch bei diesen Verbindungen ließ sich der Zustand der Seile am Ende der ersten Vegetationsperiode meist nicht eindeutig klären, sicher ist jedoch, dass einige bereits frühzeitig aufgesprengt wurden. Im Gegensatz zu den Parallelverbindungen wuchsen die meisten Seile bereits im Verlauf des Jahres 2008 vollständig ein und ein Überwallen von oben (Saftstau) wurde nur in einem Fall festgestellt. Im Verlauf der zweiten Vegetationsperiode wurden dann so gut wie alle Seile aufgesprengt.

- Morphologie und Anatomie der Verwachsungen

Bei den meisten Verbindungen entwickelten sich zunächst (2008) leichte bis ausgeprägte gegenseitige Überwallungen. Teils waren auch Rindenwulste und meist eine leichte Fuge bzw. ein kleiner Spalt erkennbar (bei gerissenen Seilen). In einem Fall waren punktuell Ansätze von Rindenverwachsungen zu sehen, in einem weiteren umfangreiche Verwachsungen in weiten Bereichen der Kontaktzone. Bei der letztgenannten Verwachsung entstand in der folgenden Vegetationsperiode eine umfassende Verwachsung, bei der aufgrund ihrer Morphologie von einer Xylemverwachsung ausgegangen werden kann. Alle anderen Verbindungen brachen wieder auf, nachdem die Seile gerissen waren.

3.3.6.1.4 Parallelverbindungen mit Gewebeband[282]

Der Zustand der Gewebebänder und die Reaktion der Pflanzen auf diese entsprachen den Beobachtungen bei den anderen Arten. Sofern unter den Bändern erkennbar, zeigten sich bei den vier Verbindungen des einen Pflanzenpaars im ersten Jahr keine Verwachsungsreaktionen, während bei dem anderen an einer Stelle eine gegenseitige Überwallung zu erkennen war und an einer anderen Verwachsungsansätze mit einem borkigen Spalt gefunden wurden. Im folgenden Jahr traten solche Verwachsungsansätze, die denen der Drahtseilverbindungen bei gerissenem Seil sehr ähnlich waren, an insgesamt vier Stellen auf. Bei zwei Verbindungen waren die Bänder abgefallen und die Pflanzen klafften auseinander. Bei einer anderen entstanden umfangreiche gegenseitige Überwallungen, bei denen die Pflanze an der Kontaktstelle durch eine leichte Fuge getrennt waren und sich äußerlich keine Rindenverwachsungen zeigten. Im Schnitt wurden hier Xylemverwachsungen mit einem großen Anteil undifferenzierter, nicht verholzter Gewebe dokumentiert.

[281] 8 Verbindungen angelegt, eine nach erster Vegetationsperiode entnommen (mit Rindenwulst, ohne sichtbare Rindenverwachsung).

[282] 8 Verbindungen (2 Paare) angelegt, keine Entnahmen nach erster Vegetationsperiode.

3.3.6.2 Versuchsreihe 2009

3.3.6.2.1 Zusätzliche Parallelverbindungen mit Edelstahlschrauben und Gewindestangen an 2008 angelegten Versuchen[283]

- Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik; Zustand der Verbindungsmittel

Sowohl bei den Verbindungen mit Schrauben als auch mit Gewindestange traten im Bereich der Muttern bzw. der Schraubenköpfe und -Austrittsstellen wieder Rindenrisse auf, die häufiger eine Ausdehnung von einigen cm hatten. Bei jeweils drei Verbindungen kam es zu umfangreichen Nekrosen, insbesondere im Bereich unterhalb der Schraube bzw. Gewindestange. Die Verbindungsmittel wurden fast immer nur leicht überwallt.

Bei allen Schnitten[284] fielen größere schwarzbraune Verfärbungen des Holzes im Bereich der Schrauben bzw. Gewindestangen auf. Eine Spaltung des Holzes wurde wieder bei den Verbindungen mit Schrauben, nicht jedoch bei Gewindestangen festgestellt. Axial breiteten sich die Verfärbungen bei den Schraubverbindungen nach oben und unten um durchschnittlich 38,5 mm (+/-14,5 mm) und bei den Verbindungen mit Gewindestangen um 28,3 mm (+/-4,6 mm) aus.

Abbildung 97 Oben: Typische Verfärbungen bei einer Schraubverbindung. Besonders in der etwas dünneren Pflanze sind ein deutlicher Spalt und sich radial, tangential und axial weit ausbreitende Verfärbungen zu erkennen. Unten: Typische Verfärbungen bei Gewindestangenverbindung: Im Bereich des Verbindungsmittels waren gleich große oder sogar größere Verfärbungen wie bei den Schraubverbindungen zu erkennen, die sich axial meist jedoch weniger weit ausbreiteten.

[283] Es wurden 12 Verbindungen mit Edelstahlschrauben und 9 mit Gewindestangen angelegt.

[284] Bei jeweils 8 Verbindungen wurden Quer- bzw. Serienschnitte angefertigt, um den Verwachsungszustand und die Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungsmittel detaillierter beschreiben zu können.

- Morphologie und Anatomie der Verwachsungen

Bei den meisten Verbindungsstellen wurde in der Regel ein leichtes gegenseitiges Überwallen der Pflanzen beobachtet, ohne dass am Ende der Vegetationsperiode 2009 Rindenverwachsungen zu erkennen waren. Auch fielen zu diesem Zeitpunkt äußerlich keine Unterschiede zwischen den Verbindungen mit Gewindestangen und denjenigen mit Schrauben auf.

Alle Verbindungen mit Gewindestangen zeigten im Querschnitt Xylemverwachsungen, die teils recht umfassend, teils lokal sehr begrenzt waren. Zu dem Zeitpunkt, als die Schnitte angefertigt wurden (meist Mitte 2010), waren bei diesen Verbindungen äußerlich in der Regel leichte Fugen mit Ansätzen von Rindenverwachsungen erkennbar. Bei den Schraubverbindungen wurden im Querschnitt bei 6 von 8 Verbindungen ebenfalls Xylemverwachsungen nachgewiesen, die tendenziell etwas weniger weit entwickelt waren als diejenigen der Verbindungen mit Gewindestangen. Auch waren keine von außen erkennbaren Rindenverwachsungen entstanden. Die zwei Schraubverbindungen, bei denen sich auch im Querschnitt keine Verwachsungen zeigten, wiesen einen bereits äußerlich erkennbaren Spalt zwischen den Pflanzen auf und es ist anzunehmen, dass die Schrauben in diesen Fällen ausgerissen waren (vgl. Abbildung 97).

3.3.7 Gewöhnliche Robinie (*Robinia pseudoacacia*)

3.3.7.1 Versuchsreihe 2008

3.3.7.1.1 Allgemeine Entwicklung der Pflanzen

Die Pflanzen waren in der Regel gleichmäßig und vital entwickelt und zeigten arttypisch ein kräftiges Wachstum. Sie erreichten ausgehend von 11,3 mm (+/-2,1 mm) am Ende der Vegetationsperiode 2008 Durchmesser von durchschnittlich 19,7 mm (+/-3,6 mm). Damit lag der Zuwachs (8,4 mm) in diesem Zeitraum in der Größenordnung der bei Weide gemessenen Werte. Von den insgesamt 32 Pflanzen wuchsen zwei nicht an und fünf blieben in der Entwicklung etwas zurück.[285] Da alle Pflanzen nach der ersten Vegetationsperiode entnommen wurden, liegen für 2009 keine Messwerte vor.

3.3.7.1.2 Parallelverbindungen mit Drahtseil[286]

Die Drahtseile verursachten häufig einen Saftstau, der zu einer deutlichen Schwellung führte. Die Seile wuchsen nie ein und wurden nur selten überwallt. Sie wurden frühzeitig in der Vegetationsperiode 2008 aufgesprengt und fielen dann teilweise gänzlich ab. Die Pflanzen klafften dann meist auseinander und einige knickten an der Verbindungsstelle leicht ab. In einigen Fällen schnitten die Seile bereits beim Verbinden (etwas) in die Rinde ein. Die dabei entstanden Wunden verheilten vollständig, wobei sich die Achsen sehr stark verdickten (Abbildung 98 links). Verwachsungsreaktionen konnten nicht beobachtet werden.

3.3.7.1.3 Kreuzverbindungen mit Drahtseil[287]

Die Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik entsprach im Prinzip den Parallelverbindungen. Die Seile wurden wieder fast immer rasch aufgesprengt, die Pflanzen klafften meist auseinander und viele knickten an der Verbindungsstell ab oder brachen vollständig (Abbildung

[285] Diese 5 Pflanzen sind in der Durchmesserentwicklung mit berücksichtigt.

[286] 24 Verbindungen (6 Paare) angelegt, alle nach erster Vegetationsperiode entfernt.

[287] 8 Verbindungen angelegt, alle nach erster Vegetationsperiode entfernt.

98 Mitte). In zwei Fällen (schwächer wachsende Pflanzen) blieben die Seile intakt und wuchsen teilweise ein. In einem Fall kam es zu gegenseitiger Überwallung und es traten Ansätze von Rindenverwachsungen auf (Abbildung 98 rechts).

Abbildung 98 Links: Typische Parallelverbindung. Seile aufgerissen und nicht eingewachsen, Achsen teilweise leicht abgeknickt und stark angeschwollen. Mitte: Typische Kreuzverbindung. Seile aufgerissen und nicht eingewachsen, Achsen stark abgeknickt und tlw. stark angeschwollen. Rechts: Ausnahme einer Verbindung mit intaktem Seil, Saftau und leichten Ansätzen von Rindenverwachsungen.

3.3.7.1.4 Parallelverbindungen mit Gewebeband[288]

Die Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik und der Zustand des Verbindungsmittels entsprachen wieder den bisherigen Beschreibungen (Weide u.a.). Verwachsungsreaktionen konnten nicht beobachtet werden.

3.3.8 Stieleiche (*Quercus robur*)

3.3.8.1 Versuchsreihe 2008

3.3.8.1.1 Allgemeine Entwicklung der Pflanzen

Die Pflanzen wiesen anfangs Basisdurchmesser von 9,3 mm (+/-2,3 mm) auf, wobei sich nicht nur im Durchmesser sondern auch in der Bewurzelung deutliche Unterschiede zeigten. Diese Unterschiede in der Entwicklung blieben erhalten und verstärkten sich teilweise stark, sodass einige Pflanzen deutlich zurückblieben und vier (von 32) während des Beobachtungszeitraums abstarben. Der durchschnittliche Zuwachs lag in der ersten Vegetationsperiode bei nur 2mm und in der zweiten bei 2,8 mm, sodass Ende 2009 Durchmesser von durchschnittlich 14,1 mm (+/-3,1 mm) erreicht wurden. Damit war das Dickenwachstum sehr viel geringer als bei allen bislang beschriebenen Arten der Versuchsreihe 2008 und entsprach eher dem Wachstum, welches z. B. Platanen in der Versuchsreihe 2009 zeigten. Dieses geringere Wachstum ist zum Teil arttypisch, die Pflanzen wurden aber auch durch Mehltaubefall,[289] der in allen Vegetationsperioden wiederholt auftrat, zusätzlich geschwächt und spätestens in der zweiten Vegetationsperiode durch stärker wachsende Nachbarpflanzen beschattet. Aufgrund des langsamen Wachstums

[288] 8 Verbindungen (2 Paare) angelegt, alle nach erster Vegetationsperiode entfernt.

[289] Dieser konnte auch durch anfangs bedarfsweise und in der zweiten Vegetationsperiode prophylaktische Behandlung mit Bayer Universal Pilzfrei und Entfernen stark befallener Triebe nicht erfolgreich behandelt bzw. verhindert werden. Befall mit Mehltau ist für die Art, vor allem unter starken Konkurrenzbedingungen, jedoch ein typisches Krankheitsbild.

wurde die Entwicklung der Verbindungen auch nochmal gegen Ende der Vegetationsperiode 2010 untersucht, wobei sich jedoch keine grundlegenden Veränderungen zum Zustand Ende 2009 ergaben.

3.3.8.1.2 Parallelverbindungen mit Drahtseil[290]

- Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik; Zustand der Verbindungsmittel

Entsprechend der insgesamt langsamen Entwicklungen waren in der ersten Vegetationsperiode bei einem Drittel der Verbindungen keine oder nur sehr wenige Reaktionen auf die Seilverbindungen erkennbar. Bei den anderen verursachten die Seile, die bei allen bis auf einer Verbindung intakt blieben, häufig Saftstau und es kam meist zu einem Überwallen von oben her (Abbildung 99 links), sehr selten zu einem Einwachsen. In der folgenden Vegetationsperiode wurden dann einige wenige Seile aufgesprengt, bei denen die Pflanzen dann auseinanderklafften oder durch die eingewachsenen Seilenden zusammengehalten wurden. Die meisten Seile blieben jedoch intakt und waren Ende 2009 oft großteils eingewachsen oder überwallt und partiell eingewachsen, wobei jedoch oft eine Schwellung an der Verbindungsstelle zu beobachten war (Abbildung 99 Mitte).

Abbildung 99 Links: Typische Morphologie am Ende der ersten VP. Die teilweise einschneidenden Seile verursachten einen deutlichen Saftstau und ein Überwallen von oben, ohne dass das Seil dabei einwuchs; die stärker wachsende Pflanze links überwallte die schwächer wachsende. Mitte und rechts: Morphologie und Anatomie einer Verbindung nach der zweiten VP. Deutliche Anschwellung der Achsen und auch starke Verdickung der Rinde. Im Querschnitt ist eine Art Xylemhöcker zu erkennen, der in die verwachsene Rinde wächst, ohne dass es dabei zu einer Xylemverwachsung gekommen wäre. Bei anderen vergleichbaren Verbindungen liegen hier jedoch Xylemverwachsungen vor.

[290] 24 Verbindungen (6 Pflanzenpaare) angelegt, 2 Paare (8 Verbindungen) nach erster Vegetationsperiode entnommen (einmal zur Dokumentation, eine Pflanze abgestorben). D. h. 16 Verbindungen (4 Pflanzenpaare) in zweiter Vegetationsperiode vorhanden.

- Morphologie und Anatomie der Verwachsungen

In der ersten Vegetationsperiode zeigte ein Drittel der Verbindungen keine oder nur sehr geringe Verwachsungsreaktionen. Bei den anderen Verbindungen kam es meist zu mehr oder weniger stark ausgeprägten Überwallungen, die jedoch oft nur von einer Pflanze ausgingen (Abbildung 99 rechts). Lediglich bei einer Verbindung kam es zu einer symmetrischen gegenseitigen Überwallung und zur Entstehung einer deutlich erkennbaren Rindenverwachsung.

In der zweiten Vegetationsperiode entstanden dann bei sechs Verbindungsstellen umfangreiche Rindenverwachsungen, wobei die verbindenden Rindengewebe eine kallusartige, heterogene Struktur aufwiesen. Bei den anderen Verbindungen blieb es bei (meist einseitigen) Überwallungen. Die Verbindungen, bei denen die Seile gerissen waren, zeigten meist einen (borkigen) Spalt. Im Querschnitt konnten bei Verbindungen mit äußerlich erkennbaren Rindenverwachsungen oft auch umfangreiche Xylemverwachsungen dokumentiert werden. Teilweise wuchsen aber auch höckerartige Xylemgewebe in die oftmals stark verdickten, verwachsenen Rindengewebe hinein, ohne dass ein entsprechender Höcker bei der anderen Pflanze entstand, sodass es dort dann nicht zu Xylemverwachsugnen kam (Abbildung 99 rechts).

3.3.8.1.3 Kreuzverbindungen mit Drahtseil[291]

- Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik; Zustand der Verbindungsmittel

Die Entwicklung in der ersten Vegetationsperiode war im Prinzip mit den Parallelverbindungen vergleichbar (Seile intakt, Saftstau etc.). Im Verlauf der zweiten Vegetationsperiode wurden dann bei der Hälfte der Verbindungen die Seile aufgesprengt und die Pflanzen klafften auseinander oder zeigten einen deutlichen Spalt. am Ende des Beobachtungszeitraums waren die Seile bei den stärker wachsenden Pflanzen meist großteils eingewachsen, während bei schwächer wachsenden auch nach wie vor ein Saftstau dokumentiert werden konnte (Seile hier intakt).

- Morphologie und Anatomie der Verwachsungen

Bei fast allen Verbindungen war das Wachstum der Pflanzen wieder sehr ungleich, sodass die stärker wachsende die schwächer wachsende (die keine Reaktion zeigte) überwallte. Bei fast allen Verbindungen konnten bis zum Ende des Beobachtungszeitraums keine Verwachsungen beobachtet werden, lediglich bei einer Verbindung entwickelten sich Ansätze von Rindenverwachsungen.

3.3.8.1.4 Parallelverbindungen mit Gewebeband

Da sich alle Pflanzen der Verbindungsvariante mit Gewebeband sehr langsam entwickelten, konnten keine Verwachsungsreaktionen dokumentiert werden. Ein Einfluss der Verbindungstechnik auf das Wachstum wurde nicht beobachtet.

[291] 8 Verbindungen angelegt, 2 wurden nach der ersten Vegetationsperiode entnommen (einmal zur Dokumentation, einmal eine Pflanze abgestorben).

3.3.9 Hainbuche (*Carpinus betulus*)

3.3.9.1 Versuchsreihe 2008

3.3.9.1.1 Allgemeine Entwicklung der Pflanzen

Die anfangs insgesamt eher schwachen Pflanzen (Basisdurchmesser 9,4 mm +/-1,0 mm) wiesen charakteristische Knicke auf (vgl. Abbildung 100 links) und zeigten in der ersten Vegetationsperiode mit deiner Dickenzunahme von lediglich 1,5 mm ein äußerst geringes Wachstum. Demgegenüber war die Entwicklung im zweiten Jahr sehr viel kräftiger und die Pflanzen legten im Durchmesser um 5,5 mm zu, sodass Ende 2009 durchschnittlich 15,4 mm (+/- 3,4mm) gemessen wurden. Die recht große Standardabweichung weist wieder auf eine heterogene Entwicklung hin, bei der einige Pflanzen recht kräftig wuchsen, während andere fast kein Dickenwachstum zeigten und zwei abstarben.[292] Da sich die Pflanzen auch in der Vegetationsperiode 2010 kräftig weiterentwickelten und sich der Zustand der Verbindungen nach dem Ende der Vegetationsperiode 2009 noch deutlich veränderte, wird im Folgenden auch die Entwicklung der Vegetationsperiode 2010 mit berücksichtigt.

3.3.9.1.2 Parallelverbindungen mit Drahtseil[293]

- Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik; Zustand der Verbindungsmittel

Bereits in der ersten Vegetationsperiode schnitten die Drahtseile, die so gut wie immer intakt blieben, trotz des meist sehr geringen Dickenwachstums oft in die Rinde ein. Sie wuchsen, insbesondere bei sich etwas kräftiger entwickelten Pflanzen, vollständig ein. Die Pflanzenachsen schwollen dabei kaum an und es wurde kein Saftstau beobachtet. Am Ende der Vegetationsperiode 2009 waren dann alle Seile, auch die der sehr schwach wachsenden Pflanzen, vollständig bzw. großteils eingewachsen (lokal sehr begrenztes Wundgewebe, kaum Anschwellen; Abbildung 100 Mitte). Bei einer sehr stark wachsenden Verbindung war das Seil gerissen, in drei Fällen war der Zustand unklar.

- Morphologie und Anatomie der Verwachsungen

Bei den meisten Verbindungen konnten zunächst (2008) keinerlei Verwachsungsreaktionen beobachtet werden, lediglich in fünf Fällen kam es zu ausgeprägtem gegenseitigem Überwallen. In der zweiten Vegetationsperiode nahm die Anzahl der Verbindungen mit Überwallungsreaktionen dann deutlich zu, an vier Stellen wurden darüber hinaus von außen sichtbare Ansätze von Rindenverwachsungen dokumentiert (Abbildung 100 Mitte) und in drei Fällen kam es zu mehr oder weniger brückenartigen Verwachsungen.[294] Im Querschnitt zeigten sich umfassende Xylemverwachsungen nicht nur bei Verbindungen mit äußerlich sichtbaren Rindenverwachsungen, sondern teils auch an Verbindungsstellen, bei denen äußerlich nur ein gegenseitiges Überwallen, teilweise auch mit einer leichten Fuge, zu erkennen war. Im Verlauf der Vegetationsperiode 2010 entwickelten sich bei einigen weiteren Stellen sichtbare Ansätze von Rindenverwachsungen und die bestehenden dehnten sich über weite Bereiche aus.

---

[292] Eine weitere Pflanze starb bereits vor dem Anlegen der Verbindungen ab und wurde ersetzt.

[293] 24 Verbindungen (6 Pflanzenpaare) angelegt, 2 Paare (8 Verbindungen) nach erster Vegetationsperiode entnommen (einmal zur Dokumentation, einmal eine Pflanze abgestorben).

[294] Bei diesen Verbindungen waren ggf. die Seile gerissen.

3.3.9.1.3 Kreuzverbindungen mit Drahtseil[295]

Die Entwicklung war mit den Parallelverbindungen vergleichbar, wobei jedoch das Dickenwachstum hier insgesamt etwas kräftiger war und in der zweiten Vegetationsperiode vermutlich bei der Hälfte der Verbindungen die Drahtseile aufgesprengt wurden. Bei diesen Verbindungen entstand dann teils ein borkiger Spalt, ansonsten kam es im gleichen Zeitraum zu gegenseitigen Überwallungen, meist mit Ansätzen von Rindenverwachsungen (Abbildung 100 links). Im Verlauf der Vegetationsperiode 2010 brach dann eine Verbindung auseinander, während sich bei zwei Verbindungen sehr umfangreiche Rindenverwachsungen entwickelt hatten. In Analogie zu bei den Parallelverwachsungen angefertigten Schnitten ist davon auszugehen, dass zu diesem Zeitpunkt bei den meisten Verbindungen (sofern kein größerer Spalt vorlag) umfangreiche Xylemverwachsungen vorhanden waren.

Abbildung 100 Links: Typische Kreuzverwachsung bei intaktem Seil mit deutlicher gegenseitiger Überwallung und Ansätzen sichtbarer Rindenverwachsungen. Unten links im Bild ist ein typischer Knick der Achse zu sehen (Ende 2009). Mitte und rechts: Typische Morphologie und Anatomie einer sich kräftiger entwickelnden Parallelverwachsung (Mitte 2010). Umfangreiche Xylemverwachsung (gemeinsamer Jahrring)

3.3.9.1.4 Parallelverbindungen mit Gewebeband[296]

Der Zustand der Gewebebänder und die Reaktion der Pflanzen auf diese entsprachen den Beobachtungen bei den anderen Arten, es wurde kein Einfluss auf das Dickenwachstum und kein Saftstau dokumentiert. Nachdem 2008 und 2009 nur an zwei Stellen leichte gegenseitige Überwallungen beobachtet wurden, entwickelten sich 2010 an vier Stellen umfangreiche, äußerlich sichtbare Rindenverwachsungen und an einer weiteren Stelle Verwachsungsansätze. Auch hier kann davon ausgegangen werden, dass zu diesem Zeitpunkt meist weit entwickelte Xylemverwachsungen vorlagen.

[295] 8 Verbindungen angelegt, 2 nach erster Vegetationsperiode entnommen (einmal zur Dokumentation, eine Pflanze abgestorben).

[296] 8 Verbindungen (2 Paare) angelegt, keine Entnahmen.

3.3.10 Rotbuche (*Fagus sylvatica L.*)

3.3.10.1 Versuchsreihe 2008

3.3.10.1.1 Allgemeine Entwicklung der Pflanzen

Die Pflanzen waren anfangs etwas kräftiger entwickelt als die Hainbuchen (Basisdurchmesser 11,9 mm +/-2,2 mm), zeigten aber im ersten Jahr mit einer Durchmesserzunahme von durchschnittlich nur 0,7 mm ein noch geringeres Wachstum. Auch in der zweiten Vegetationsperiode war das Wachstum sehr gering (Zuwachs 2,8 mm) und die Pflanzen erreichten Ende 2009 Durchmesser von lediglich 15,4 mm (+/-3,0 mm;). Obwohl kein Schädlingsbefall oder dergleichen dokumentiert wurde, starben vier Pflanzen bereits vor dem Anfertigen der Verbindungen ab und drei weitere im Verlauf der ersten Vegetationsperiode. Aufgrund des langsamen Wachstums wurde bei der Dokumentation wieder die Entwicklung im Verlauf der Vegetationsperiode 2010 einbezogen.

3.3.10.1.2 Parallelverbindungen mit Drahtseil[297]

- Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik; Zustand der Verbindungsmittel

Trotz des geringen Dickenwachstums schnitten die Seile meist bereits während der ersten Vegetationsperiode in die Rinde und wuchsen bei den allermeisten Verbindungen spätestens im Verlauf der zweiten Vegetationsperiode vollständig ein. Dabei kam es ähnlich wie bei Hainbuche wieder nur zu einem minimalen Anschwellen, Saftstau wurde in keinem Fall registriert (Abbildung 101 links). Während in der ersten Vegetationsperiode alle Drahtseile intakt blieben, wurden sie bei ca. einem Drittel der Verbindungen im Verlauf des Jahres 2009 aufgesprengt. Bei zwei Verbindungsstellen klafften die Pflanzen dann auseinander.

- Morphologie und Anatomie der Verwachsungen

Dem geringen Wachstum entsprechend zeigten sich 2008 kaum Verwachsungsreaktionen. Häufig berührten sich die Pflanzen an den Verbindungsstellen nicht einmal, da die Achsen aufgrund vieler Knicke nicht so angeordnet werden konnten, dass sie sich parallel über eine längere Strecke berührten.[298] Vielmehr traten eher punktuelle Kontaktstellen auf, bei denen es in der ersten Vegetationsperiode in fünf Fällen zu teils einseitigen, teils gegenseitigen Überwallungen kam. In der folgenden Vegetationsperiode wurden derartige Überwallungsreaktionen dann an 10 Stellen dokumentiert, wobei in 7 Fällen auch leichte Ansätze von Rindenverwachsungen zu sehen waren (Abbildung 101 Mitte-Links). Im Verlauf der Vegetationsperiode 2010 ergaben sich keine gravierenden Veränderungen, an einer Verbindungsstelle entstand aus den Verwachsungsansätzen eine Verwachsung mit umfangreicher Rindenverwachsung. In den Querschnitten zeigten sich, ähnlich wie bei Hainbuche, umfangreiche Xylemverwachsungen auch bei Verbindungen, bei denen äußerlich nur Überwallungen und nicht unbedingt Rindenverwachsungen zu erkennen waren (Abbildung 101 Mitte-rechts und rechts).

---

[297] 24 Verbindungen (6 Pflanzenpaare) angelegt, 2 Paare (8 Verbindungen) nach erster Vegetationsperiode entnommen (einmal zur Dokumentation, eine Pflanze abgestorben).

[298] Ähnliches gilt auch für Hainbuche, vgl. Abbildung 100

Abbildung 101 Links: Typische Situation am Ende der ersten VP. Die Seil schneiden in die Rinde ein und sind teilweise schon vollständig eingewachsen. Mitte-links: Typische Situation am Ende der zweiten VP: Wegen vieler Knicke nur punktuelle Berührung, dort gegenseitige Überwallung und tlw. Ansätze sichtbarer Rindenverwachsung. Mitte-rechts: Gegenseitige Überwallung ohne äußerlich sichtbare Rindenverwachsung. Rechts: Querschnitt der gleichen Verbindung im Bereich der gegenseitigen Überwallung. Im unteren Bereich umfangreiche Xylemverwachsung, oben Rindenverwachsung mit entstehender Xylemverwachsung.

3.3.10.1.3 Kreuzverbindungen mit Drahtseil[299]

Während der Zustand des Drahtseils und die Reaktion der Pflanzen auf dasselbe in der ersten Vegetationsperiode mit den Parallelverbindungen vergleichbar waren, kam es an den Kontaktstellen hier immer zu meist deutlichen gegenseitigen Überwallungen. Rindenverwachsungen waren aber auch hier in der ersten Vegetationsperiode nicht sichtbar und auch in der zweiten nur bei einer Verbindung in Ansätzen zu erkennen. Im Verlauf des Jahres 2010 kam es dann jedoch in drei Fällen zu äußerlich erkennbaren (Rinden-)Verwachsungen, die sich teils auf die gesamt Kontaktzone erstreckten. In einem Fall blieb es bei gegenseitigen Überwallungen. Entsprechend der Querschnitte bei den Parallelverbindungen ist davon auszugehen, dass bei allen Verbindungen spätestens 2010 (meist umfangreiche) Xylemverwachsungen vorlagen.

3.3.10.1.4 Parallelverbindungen mit Gewebeband[300]

Der Zustand der Gewebebänder und die Reaktion der Pflanzen auf diese entsprachen den Beobachtungen bei den anderen Arten. Nachdem es in der ersten Vegetationsperiode zu so gut wie keinen Verwachsungsreaktionen gekommen war, wurden Ende 2009 an drei Stellen gegenseitige Überwallungen dokumentiert und in einem Fall auch Ansätze von Rindenverwachsungen. Im Verlauf des Jahres 2010 kam es dann an insgesamt sechs Stellen zu gegenseitigen Überwallungen, bei denen in vier Fällen Ansätze von Rindenverwachsungen auftraten. Es kann angenommen werden, dass bei diesen Verbindungen meist umfangreiche Xylemverwachsungen vorlagen (vgl. Schnitte bei Parallelverbindungen mit Drahtseil). Bei zwei Verbindungen waren bis zu diesem Zeitpunkt keine Verwachsungsreaktionen festzustellen.

[299] 6 Verbindungen angelegt, 2 nach erster Vegetationsperiode entnommen (einmal zur Dokumentation, eine Pflanze abgestorben).

[300] 8 Verbindungen angelegt, keine Entnahmen.

3.4 Diskussion

Aufgrund der Vielzahl an untersuchten Baumarten und Verbindungsvarianten ergibt sich aus den dargestellten Ergebnissen zunächst ein relativ heterogenes Bild. Um die Verbindungstechniken und die Baumarten bezüglicher ihre Verwendbarkeit in der Baubotanik bewerten zu können, muss zunächst geklärt werden, inwiefern die Unterschiede zwischen den Versuchsreihen 2008 und 2009 durch die Variation der Verbindungstechniken oder durch veränderte Wachstumsbedingungen zu erklären sind. Damit können dann die unterschiedlichen Verbindungstechniken und der Einfluss der Verbindungsgeometrie beurteilt, die Ergebnisse der einzelnen Baumarten bewertet und erste Schlussfolgerungen für die Praxis gezogen werden.

3.4.1 Unterschiede zwischen den Versuchsreihen 2008 und 2009

Bei der Versuchsreihe 2009 wurde nicht nur die Verbindungstechnik variiert, sondern es lagen auch veränderte Wachstums- und Randbedingungen vor, die sich auf die allgemeine Entwicklung der Pflanzen auswirkten (Konkurrenzbedingungen). Darüber hinaus wurden die Verbindungen einige Wochen später angelegt (vgl. Abschnitt 3.2.4). Daher ist wenn möglich zu klären, inwiefern sich diese Bedingungen auf das Verwachsungsergebnis und auf die Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungstechnik auswirkten. Wie im Ergebnisteil dargestellt, zeigten die Pflanzen der 2009 angelegten Versuche bedingt durch Beschattung und einen reduzierten Kronenraum ein deutlich geringeres Dickenwachstum (Abbildung 102) und eine insgesamt geringere Vitalität. Um zumindest eine gewisse Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden daher wie beschrieben sehr schwach wachsende Pflanzen bzw. Verbindungen in der Darstellung der Ergebnisse nicht berücksichtigt.

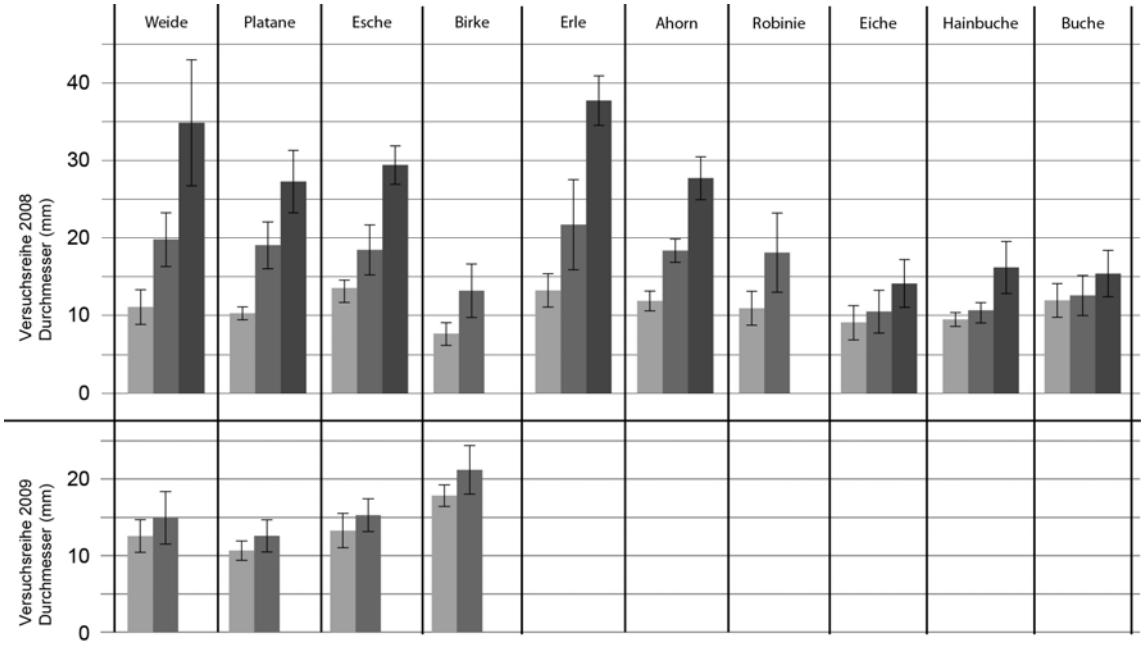


Abbildung 102 Übersicht über die Durchmesserentwicklung der Versuchsreihen 2008 und 2009. (v.l.n.r. jeweils Anfang VP 1, Ende VP1 und Ende VP 2)

3.4.1.1 Häufigkeit und Entstehungsprozess von Rindenverwachsungen

Bei den Verbindungen der Versuchsreihe 2009 zeigte sich, dass die 2008 vor allem bei Weide und Platane häufig mit bloßem Auge und von außen erkennbaren Rindenhöcker so gut wie nicht auftraten und äußerlich erkennbare Rindenverwachsungen zumindest in der ersten Vegetationsperiode sehr viel seltener waren. Um mögliche Gründe für diese Unterschiede diskutieren zu können, wird im Folgenden ein Erklärungsmodell für die Entstehung der Rindenhöcker entwickelt, das jedoch – da keine entsprechenden Untersuchungen vorliegen – als eine Arbeitshypothese anzusehen ist. Insbesondere die mehr oder weniger zeitgleiche Entwicklung und anschließende Fusion von sich gegenüberstehenden Rindenhöckern an zwei unterschiedlichen Pflanzen kann eigentlich nur durch die Wirkung von Phytohormonen erklärt werden. Von den fünf bzw. sechs bekannten Phytohormonen kommt hier hauptsächlich das gasförmige Ethylen in Frage, da es ohne unmittelbaren Kontakt und ohne eine bereits bestehende Verwachsung über Individuengrenzen hinweg wirksam werden kann. Als sogenanntes Stresshormon wird Ethylen u. a. bei Verletzungen, Stauchungen oder Quetschungen der Achsen und damit vermutlich im Bereich der durch die Verbindungstechnik aufeinandergedrückten Kontaktflächen abgegeben. Es regt u. a. die Bildung von Wund- bzw. Kallusgeweben an, kann sich im näheren Umkreis der Verbindungsstelle anreichern und dort die Entstehung der Rindenhöcker (kallusartige Gewebe) herbeiführen (vgl. Jansen et al. 1998, S. 92f.).

Als Hauptunterschied zwischen den Versuchsreihen kann die unterschiedliche Wachstumsgeschwindigkeit (Dickenwachstum) angesehen werden. Beim Dickenwachstum wird die Rinde durch die Umfangszunahme tangential gedehnt. Lebende und teilungsfähige Gewebe (Grundgewebe) können dieser Ausdehnung durch tangentiales Wachstum folgen, während andere Gewebeschichten wie z. B. die abschließenden Korkschichten aufreißen und von innen her durch neue Zelllagen ersetzt werden (vgl. Abschnitt 3.2.2.1). Insbesondere bei schnell wachsenden Pflanzen treten daher Bereiche mit aufgerissenen oder zumindest sehr dünnen Abschlussgeweben auf, und die Grundgewebe folgen der Umfangszunahme durch Zellteilung. Gleichzeitig ist bei stärker wachsenden Pflanzen die Achsenatmung bzw. der Gaswechsel erhöht. Es ist daher anzunehmen, dass das an der Kontaktstelle abgegebene Ethylen von stärker wachsenden Pflanzen schneller bzw. in größerem Umfang aufgenommen wird als von langsam wachsenden Pflanzen und dadurch die Entstehung der Rindenhöcker gefördert ist. Unter Umständen begünstigen die dünnen bzw. gerissenen Abschlussgewebe auch, dass die Rindenhöcker auswachsen und miteinander fusionieren können.

Aufgrund dieser Überlegungen wird im Folgenden davon ausgegangen, dass die zwischen den Versuchsreihen 2008 und 2009 beobachteten Unterschiede bezüglich der Entstehung von Rindenhöckern bzw. von Rindenverwachsungen vor allem durch die Unterschiede im Dickenwachstum erklärt werden können. Ein Einfluss der tlw. nur leicht veränderten Verbindungstechniken (z. B. Unterschied zwischen Drahtseil- und Dyneema-Verbindung) auf die Bildung von Rindenhöckern ist demgegenüber relativ unwahrscheinlich.[301]

[301] Der spätere Zeitpunkt des Verbindens bei der Versuchsreihe 2009 wirkte sich wahrscheinlich insofern aus, als dass ein gewisser Teil der Durchmesserzunahme bereits vor dem Verbinden erfolgt. Denkbar ist auch, dass sich Unterschiede in den Wetterbedingungen auswirkten. Hier ist durch die künstliche Bewässerung jedoch von einem nur geringen Einfluss auszugehen.

3.4.1.2 Reaktion auf die Verbindungstechnik (Seilverbindungen)

Auch bezüglich der Reaktion der Pflanzen auf die Verbindungsmittel ist der Einfluss der unterschiedlichen Randbedingungen und der dadurch veränderten Gesamtentwicklung zu diskutieren. Hier sind insbesondere die Unterschiede bei den Varianten der Seilverbindungen von Interesse.[302] Bei den Arten Birke und Platane waren die Unterschiede der Versuchsreihen eher gering.[303] Deutliche Unterschiede ergaben sich jedoch bei den Arten Weide und Esche: Bei beiden Arten Schnitten die Drahtseile (2008) beim Verbinden oder mit Einsetzen des Dickenwachstums meist in die Rinde und wuchsen dann ein. Wenn sie nicht einschnitten, wurden sie meist rasch überwallt und wuchsen dann ein. Gleichzeitig wurden die meisten Seile aufgesprengt und die Pflanzen wurden nur bedingt durch die eingewachsenen Seilenden zusammengehalten. Im Gegensatz dazu schnitten die Dyneema-Seile der Versuchsreihe 2009 meist nicht in die Rinde ein und es kam zu einem deutlichen Saftstau. Auch wenn die Seile in der Vegetationsperiode 2010 dann tlw. einwuchsen, kam es – insbesondere bei Esche – zu einem weiteren Anschwellen der Achsen und zu starken Deformationen. Die Dyneema-Seile blieben in den meisten Fällen intakt, sodass die Pflanzen dauerhaft und starr zusammengehalten wurden.

Zu diskutieren ist also, ob das weniger häufige Aufsprengen der Seile, das seltenere Einschneiden in die Rinde und der häufiger zu beobachtende Saftstau bzw. das nachfolgende Anschwellen auf die veränderte Verbindungstechnik (Dyneema-Seile statt Drahtseile) oder auf die veränderten Randbedingungen und bzw. die veränderte Gesamtentwicklung zurückzuführen sind.

Da in der Vegetationsperiode 2010 auch einige der Dyneema-Seile (insb. Dyneema 1 bei verhältnismäßig stark wachsenden Pflanzen) aufgesprengt wurden und alle Dyneema-Verbindungsvarianten eine höhere Festigkeit aufwiesen als die Drahtseilverbindungen (Schwachstelle Knoten, vgl. Voruntersuchungen), ist davon auszugehen, dass die Drahtseilverbindungen auch dann versagt hätten, wenn sie unter den Bedingungen der Versuchsreihe 2009 verwendet worden wären. Damit kann das weniger häufige Aufsprengen der Seile in der Versuchsreihe 2009 hauptsächlich durch die veränderte Verbindungstechnik erklärt werden.

Die Drahtseile (Versuchsreihe 2008) wurden meist erst aufgesprengt, nachdem sie vollständig eingewachsen waren. Dies belegen sowohl der Verwachsungsverlauf (Zusammenhalt der Verbindung durch eingewachsene Seilenden bei gerissenen Seilen) als auch Längsschnitte, bei denen die Seile vollständig von Xylemgeweben umschlossen waren. Das heißt, dass der Assimilattransport in der Rinde zu dem Zeitpunkt, als die Drahtseile rissen, meist nicht mehr behindert wurde. Daraus kann gefolgert werden, dass es bei der Versuchsreihe 2008 auch dann vermutlich nicht zu einem Saftstau gekommen wäre, wenn die Drahtseile intakt geblieben wären. Der bei der Versuchsreihe 2009 beobachtete Saftstau kam also zustande, weil die Seile nicht (schnell genug) einwuchsen – er wurde wahrscheinlich nicht dadurch verursacht, dass die Seile dem Dickenwachstum nicht nachgaben, weil sie intakt blieben. Die insbesondere bei Esche beobachten Anschwellungen und Deformationen nach dem Einwachsen der Seile (VP 2010) müssen davon jedoch getrennt betrachtet werden (vgl. Abschnitt 3.4.4.2).

Weshalb es in der Versuchsreihe 2009 nach Überwallung der Seile weniger oft bzw. erst später zu einem vollständigen Einwachsen der Seile kam, kann mit den obigen Ausführungen zu Rin-

---

[302] Schraubverbindungen wurden nur in der Versuchsreihe 2009 und Verbindungen mit nachgebenden Verbindungsmitteln (Gewebeband, Buddy-Tape) nur in der Versuchsreihe 2008 angelegt.

[303] Sowohl bei den Drahtseil- als auch bei den Dyneema-Verbindungen schnitten die Seile hier bei kräftiger wachsenden Pflanzen immer in die Rinde und wuchsen rasch und vollständig ein. Bei schwächer wachsenden Pflanzen wurde bei beiden Versuchsreihen vorübergehend ein leichter Saftstau dokumentiert, der sich mit Einwachsen des Seiles jedoch wieder auflöste.

denverwachsungen erklärt werden und ist damit im Wesentlichen durch die veränderten Randbedingungen bzw. Wachstumsgeschwindigkeiten begründet: Beim Einwachsen nach Überwallung müssen die über das Seil wachsenden Überwallungswülste mit dem Achsenabschnitt unterhalb des Seils verwachsen.[304]

Damit wäre noch zu klären, warum die Dyneema-Seile (2009) weniger oft in die Rinde einschnitten als die Drahtseile (2008) und welche Folgen daraus resultieren. Die Versuchsergebnisse zeigten insgesamt (unabhängig vom Seiltyp), dass ein Einschneiden der Seile in die Rinde zu einem raschen und problemlosen Einwachsen führte.[305] Schneiden die Seile nicht ein, kommt es zu einem verzögerten Einwachsen nach Überwallung und/oder zu einer (mehr oder weniger lang anhaltenden) Behinderung des Assimilattransports. Insofern kann die Tatsache, dass die Seile 2009 weniger oft in die Rinde einschnitten, für einen Großteil der Saftstauprobleme verantwortlich gemacht werden. Als Ursachen für das Unterbleiben des Einschneidens kommen sowohl materialspezifische Faktoren als auch aus den veränderten Wachstumsbedingungen resultierende Faktoren in Betracht.

Durch das geringere Dickenwachstum baute sich wahrscheinlich ein geringerer Wachstumsdruck[306] auf, der ggf. nicht ausreichte, um die Rindengewebe mit den Seilen zu durchtrennen. Dies belegen die Versuchsergebnisse dahingehend, dass auch bei der Versuchsreihe 2008 bei schwächer wachsenden Pflanzen häufiger ein leichter Saftstau und kein Einschneiden der Seile beobachtet wurde. Des Weiteren kommt es wie oben dargestellt bei starkem Dickenwachstum zu einer Dehnung bzw. zu einem Aufreißen von Rindengeweben und damit zu einer gewissen Veränderung der Rindenanatomie. Es könnte sein, dass derartige Veränderungen das Einschneiden des Seils bei schnell wachsenden Pflanzen begünstigen.[307] Auf der Materialseite ist zunächst festzuhalten, dass der Durchmesser der Dyneema-Seile (0,3 bzw. 0,7 mm) leicht bis deutlich größer war als der der Drahtseile (0,24 mm) und dass die Oberfläche der Drahtseile deutlich rauer ist. Es ist davon auszugehen, dass dünnere Seile schneller bzw. leichter in die Rinde einschneiden als dickere. Vor allem kam es bei den Drahtseilen beim Anziehen des Knotens aufgrund der rauen Oberfläche zu einer Art Sägeeffekt und damit zum Einschneiden des Seils unmittelbar beim Verbinden. Vergleichbare Effekte wurden bei den Dyneema-Seilen nur in sehr geringem Umfang dokumentiert. Sofern davon ausgegangen werden kann, dass der Aufbau der Rinde zu Beginn der Vegetationsperioden bzw. zum Zeitpunkt des Verbindens bei den Versuchsreihen 2008 und 2009 vergleichbar war, resultiert dieser Unterschied aus der unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheit der Seile.

Insgesamt sind also für die Unterschiede bezüglich des Einschneidens der Seile in die Rinde sowohl die veränderten Randbedingungen als auch die Unterschiede im Material (insb. Rauigkeit, ggf. auch Durchmesser) als Ursachen auszumachen. Um die Unterschiede im Detail zu klären, müssten jedoch nochmals Drahtseil- und Dyneema-Verbindungen unter identischen Bedingungen untersucht werden. Aus Perspektive der baubotanischen Praxis erscheinen derartige Versuche jedoch wenig zielführend, da die vorliegenden Ergebnisse ja bereits zeigen, dass die Drahtseilverbindungen keine verlässliche Verbindungsmethode darstellen (frühzeitiges Versagen).

---

[304] Wie in Abschnitt 3.1.1.2 beschrieben, müssen dazu erst die Rindengewebe fusionieren, was wie oben dargestellt bei langsamer wachsenden Pflanzen seltener bzw. später stattfindet.

[305] Wobei auch hier artspezifische Unterschiede bestehen.

[306] Kleiner bleibende Kontaktflächen, tlw. nicht einmal gegenseitige Überwallung.

[307] Da hierzu jedoch keine weiteren anatomischen Untersuchungen vorgenommen wurden, bleibt dies hypothetisch.

3.4.2 Beurteilung der Verbindungstechniken

3.4.2.1 Seilverbindungen (Drahtseil und Dyneema-Seile)

Insgesamt muss festgehalten werden, dass die verwendeten Drahtseile – zumindest in Kombination mit der angewendeten Knotentechnik – für das verlässliche Verbinden der Pflanzen nicht geeignet sind. Sie werden häufig aufgesprengt, bevor es zu einer Xylemverwachsung kommt, welche die beiden Pflanzen an der Verbindungsstelle von sich aus so fest zusammenhält, dass sich die Verwachsung etablieren kann und nicht durch Dickenwachstum im Randbereich der Verwachsung wieder aufgesprengt wird (vgl. Abschnitt 3.1.3.3). Bei einigen Arten[308] wurden die Achsen bei gerissenen Seilen zwar durch eingewachsene Seilenden zusammengehalten, auf einen Zusammenhalt durch einwachsende Seilenden zu hoffen, kann allerdings in keiner Weise Grundlage für die Entwicklung einer praxistauglichen Verbindungstechnik sein, da die Verlässlichkeit viel zu gering ist.

Hier soll jedoch auch noch der Aspekt beleuchtet werden, dass sich aus dem Aufsprengen bzw. Nachgeben der Seile auch pflanzenphysiologische Vorteile und/oder ein besseres Verwachsungen resultieren könnten. Die Ergebnisse geben zunächst keinen Hinweis darauf, dass sich ein starres Verbinden negativ auf das Verwachsungsergebnis auswirken würde, auch wenn sich Verwachsungsprozess und Verwachsungsergebnis im Detail unterscheiden (vgl. Abschnitt 3.4.2.2). Auch lässt sich die Frage, wann und ob es zu einem Einwachsen des Seiles oder zu einem Assimilatstau kommt, nicht direkt damit in Zusammenhang bringen, ob die Seile aufreißen oder nicht (s. o.). Die insbesondere bei Esche, teilweise auch bei Eiche und Robinie beobachteten starken Anschwellungen nach dem Einwachsen der Seile sind davon jedoch unabhängig zu betrachten und werden bei den einzelnen Arten im Detail diskutiert. Insgesamt wurden damit jedoch keine eindeutig positiven Effekte nachgebender Seilverbindungen nachgewiesen, weshalb in weiteren Untersuchungen der Weg starrer Seilverbindungen weiterverfolgt werden sollte.

Die getesteten Dyneema-Seile scheinen sich aufgrund ihrer insgesamt höheren Festigkeit besser zu eignen als die Drahtseile. Die Ergebnisse z. B. bei Esche zeigen jedoch auch, dass zumindest die dünnere Variante immer noch zu schwach dimensioniert war, um die Wachstumsdrücke verlässlich aufnehmen zu können. In weiteren Versuchen wäre zu klären und insbesondere zu quantifizieren, welche Wachstumsdrücke abhängig von Baumart, Anfangsdurchmesser und Wachstumsgeschwindigkeit tatsächlich auftreten und wie sich der Durchmesser der Seile auf das Einwachsen desselben auswirkt. Des Weiteren wäre interessant zu untersuchen, ob der angewendete Zurrknoten tatsächlich nötig ist, um einen Anpressdruck an der Verbindungsstelle zu erzeugen. Unter Umständen könnte auch ein einfacher Knoten ausreichen, da der Druck an der Verbindungsstelle letztendlich durch den Wachstumsdruck hervorgerufen wird.

Als ein möglicher Nachteil der Dyneema-Seile im Vergleich zu den Drahtseilen wurde deren glattere Oberfläche identifiziert, die ggf. dazu führte, dass die Seile beim Verbinden nicht einschnitten und dadurch langsamer bzw. später und mit größeren Saftstauproblemen einwuchsen. Diesbezüglich wäre es sinnvoll, in weiteren Versuchen Techniken zu entwickeln und zu testen, bei denen die Rinde im Bereich des Dyneema-Seils künstlich angeschnitten[309] wird, um die positive Wirkung des Sägeeffekts bei Drahtseilen auch bei Dyneema-Seilen nutzen zu können. Aus Sicht der Praxis ist jedoch anzumerken, dass das Anfertigen der Seilverbindungen mit Zurrknoten unter allen getesteten Varianten am zeitaufwändigsten war und durch ein Einschnei-

[308] Auf die Unterschiede zwischen den einzelnen Arten wird im Abschnitt 3.4.4 im Detail eingegangen.

[309] Horizontaler Schnitt, in dem dann das Seil bzw. die Seile platziert werden.

den der Rinde noch aufwändiger werden würde. Sollten auch einfachere Knotentechniken anwendbar sein, wäre jedoch unter Umständen eine Automatisierung über Bindemaschinen möglich.

3.4.2.2 Nachgebende Verbindungen (Gewebeband und Buddy-Tape)

Bei den Verbindungen mit Gewebeband entwickelten sich bei so gut wie allen Arten einige wenige Verwachsungen (Tabelle 3). Die wiedergegebenen Daten geben im Rahmen des vorgenommenen Screenings jedoch nur erste Hinweise, und die zwischen den einzelnen Arten erkennbaren Unterschiede im Verwachsungserfolg sind statistisch nicht belegbar.[310] Dennoch lässt sich schlussfolgern, dass es mit der Gewebebandverbindung im Prinzip möglich ist, bei unterschiedlichen Arten Verwachsungen zu erzeugen, wobei die eingesetzte Technik jedoch noch lange nicht weit genug entwickelt ist, um den Verwachsungsprozess zuverlässig zu initiieren.

Tabelle 3 Übersicht erfolgreicher Verwachsungen mit Gewebebandverbindung (Versuchsreihe 2008, nach erster und zweiter Vegetationsperiode)

Baumart	Anzahl ges. VP 1	Anzahl verwachsen[311] VP 2	%	Anzahl ges. VP 2	Anzahl verwachsen[10] VP 2	%
Weide	24	8	33	20	7	35
Platane	24	3	13	20	5	25
Esche	8	1	13	4	1	25
Birke	8	1	13			
Erle	8	0	0	4	1	25
Ahorn	8	2	25	8	2	25
Robinie	8	0	0			
Eiche[312]						
Hainbuche	8	2		8	4	50[313]
Buche	8	0	0	8	5	62,5[313]

Die unter den Gewebebändern beobachteten Rindenveränderungen und Klebstoffrückstände können als negative, jedoch unkritische Begleiterscheinungen betrachtet werden, die sich zudem deutlich reduzieren oder vermeiden lassen müssten, wenn Bänder verwendet werden, die im unmittelbaren Kontaktbereich mit der Pflanze keine Klebefläche aufweisen, sondern stattdessen mit einer dünnen Lage Schaumstoff o. ä. beschichtet sind. Positiv hervorzuheben ist, dass Beeinträchtigungen des Dickenwachstums und des Assimilattransports nur in Ausnahmefällen (meist bei sehr stark wachsenden Pflanzen) auftraten, bei denen es meist auch zu Verwachsungen kam (Weide, Erle). Damit erscheint es prinzipiell möglich, mit den eingesetzten Gewebe-

[310] U. a. zu geringe Anzahl an Wiederholungen. Auch müsste für eine statistische Auswertung der Verwachsungserfolg in Querschnitten verifiziert werden, um ein eindeutiges Kriterium (z. B. Xylemverwachsung) heranziehen zu können.

[311] Mindestens Umfangreiche Rindenverwachsung oder deutliche gegenseitige Überwallung.

[312] Keine Verbindungen mit aussagekräftiger Entwicklung vorhanden.

[313] Bezogen auf die Mitte 2010 vorliegenden Verwachsungen.

bändern oder anderen Verbindungsmitteln, die dem Dickenwachstum in ähnlicher Art und Weise nachgeben, Verwachsungen auf eine sehr pflanzenschonende Art zu erzeugen, bei der weder Saftstauprobleme noch Verletzungen auftreten. Allerdings bedarf es dazu einer sehr präzisen Einstellung der Kraft, die das Verbindungsmittel dem Dickenwachstum entgegensetzt. Ist diese Kraft zu gering – wie in den meisten Fällen der angelegten Versuche – wird das Verbindungsmittel gedehnt und letztendlich abgesprengt, ohne dass es zu Verwachsungen kommt. Ist der Widerstand zu groß, kommt es unweigerlich zu einem Saftstau, und damit zu einem Überwallen der Bänder und einem nicht beabsichtigten und zu vermeidenden Einwachsen. Welchen Widerstand die Verbindung dem Dickenwachstum entgegensetzt, kann bei Gewebebandverbindungen z. B. über die Anzahl der Umwicklungen auf einfache Art und Weise eingestellt werden. Dabei ist jedoch davon auszugehen, dass sowohl der Wachstumsdruck als auch die Kraft, die das Verbindungsmittel dem Dickenwachstum entgegensetzen, sehr stark von Umweltfaktoren wie Temperatur, Luftfeuchte, oder auch der Wachstumsgeschwindigkeit abhängig sind. Deshalb ist keineswegs sicher, dass sich überhaupt bzw. bei allen Arten ein verlässlicher und praxistauglicher Kompromiss finden lässt. Auf jeden Fall ist eine möglichst detaillierte Kenntnis der auftretenden Wachstumsdrücke und der Kräfte, die vom Verbindungsmittel unter verschiedenen Bedingungen aufgenommen werden können, notwendig, die in weiteren umfangreichen und quantitativen Untersuchungen ermittelt werden müsste. Dabei ist jedoch hervorzuheben, dass die Technik durch das sehr preisgünstige Ausgangsmaterial und die relativ schnelle und einfache Verarbeitbarkeit auch über große praktische Vorteile verfügt.

Die Varianten mit Buddy-Tape (Weide und Platane) können insgesamt ähnlich bewertet werden wie die Gewebebandverbindungen. Die sehr unterschiedliche Entwicklung der Verwachsungen bei den einzelnen Pflanzenpaaren kann wahrscheinlich damit erklärt werden, dass die Bänder beim Anlegen unterschiedlich stark vorgedehnt wurden und auch die Zahl der Umwicklungen leicht variierte. Die zusätzlichen Versuche mit Buddy-Tape und Drahtseilverbindungen geben keine Hinweise darauf, dass sich Nebenwirkungen des vollständigen Umhüllens (höhere Luftfeuchtigkeit etc., vgl. Abschnitt 3.2.6.1) positiv oder negativ auf das Verwachsungsergebnis auswirken würden.[314] Dass in einem Fall (Weide) ein Pflanzenpaar über die gesamte Länge verwuchs, kann ein rein zufälliger Effekt sein oder aus der kontinuierlichen (d. h. nicht nur punktuellen) Verbindung resultieren. Da die auftretenden Wachstumsdrücke über die Kontaktfläche Rinde-Gewebeband bzw. Rinde-Buddy-Tape übertragen werden, können mit zunehmender Kontaktfläche auch größere Wachstumsdrücke aufgenommen werden. Bei einer kontinuierlichen Umhüllung ist diese Kontaktfläche deutliche größer als bei den punktuellen Gewebebandverbindungen. Daher wäre es interessant, in weiteren Versuchen zu untersuchen, ob Verwachsungen über die gesamte Länge beispielsweise auch mit kontinuierlichen Gewebebandverbindungen oder mit in sehr kurzen Abständen aufgebrachten Gewebebandstreifen erzielt werden könnten (vgl. Abschnitt 3.4.3.1).

Bei den Verbindungen mit nachgebenden Verbindungstechniken[315] wurde ein Verwachsungsprozess beobachtet, der sich von dem bei starrer Verbindung[316] im Detail unterschied: Je weniger die Verbindungen nachgeben, desto häufiger kam es zu gegenseitigen Überwallungen und vor allem zur Entstehung von Rindenwulsten (z. B. Abbildung 84 links, Abbildung 91 links).

---

[314] Dass die Umhüllung mit Buddy-Tape das Einwachsen der Drahtseile tlw. negativ beeinflusste (Strangulation) ist eine Nebeneffekt, der sich allein durch die Kombination der Verbindungstechniken ergab. Die Tatsache, dass bei diesen Verbindungen auch im Bereich zwischen zwei Verbindungen Verwachsungen auftraten, zeigen, dass auch hier das Buddy-Tape mechanische wirksam wurde.

[315] Buddy-Tape, Gewebeband und nach Aufreißen nachgebende Drahtseilverbindungen.

[316] Dyneema-Seile bzw. nicht aufreißende Drahtseile oder Schraubverbindungen.

Bei stärker wachsenden Pflanzen und nachgebenden Verbindungsmitteln traten teils sichtbare Rindenverwachsungen auf, ohne dass gegenseitige Überwallungen oder Rindenwulste beobachtet wurden. Bei nachgebenden Verbindungstechniken entstanden häufiger brückenartige Verwachsungen, bei denen im Querschnitt oft ein Einschluss undifferenzierter bzw. unverholzter Gewebe dokumentiert wurde (z. B. Abbildung 87 links). Diese Ergebnisse sind mit denen von Millner (1932) bei natürlichen Efeuverwachsungen vergleichbar, weshalb davon ausgegangen werden kann, dass die durch Haftwurzeln zusammengehaltenen Achsen dem Wachstumsdruck teilweise nachgeben konnten. Bei den starr verbundenen Pflanzen zeigten sich entweder kurze Streifen teilweise abgestorbener Rinde, die beim gegenseitigen Überwallen eingeschlossen wurden oder aber auch Verwachsungen quasi ohne jegliche Einschlüsse(z. B. Abbildung 87 rechts). Ob und wie sich diese anatomischen Unterschiede längerfristig auf die physiologische und biomechanische Leistungsfähigkeit der Verbindungen und die Dauerhaftigkeit (z. B. Fäulnisanfälligkeit) auswirken, kann noch nicht abschließend beurteilt werden. Eine gleichmäßige Entwicklung ohne zusätzliche Störungen im weiteren Entwicklungsverlauf vorausgesetzt, ist aber in beiden Fällen mit keinen gravierenden Einflüssen und damit auch nicht mit beachtenswerten Unterschieden zu rechnen.

3.4.2.3 Durchdringende Verbindungen (Schrauben und Gewindestangen)

Die Versuche zeigen insgesamt, dass die Pflanzen durch die gewählten Verbindungstechniken relativ verlässlich verbunden werden können, sodass (bei vitaler Gesamtentwicklung) die Voraussetzungen für das Entstehen von Verwachsungen gegeben sind.[317] Ein Versagen der Verbindungstechnik wurde nur bei einigen Schraubverbindungen beobachtet,[318] und zwar indem die Schrauben ausrissen, nachdem es zu einer Spaltung des Holzes oder in Ausnahmefällen der gesamten Achse gekommen war. Daher ist im Wesentlichen zu diskutieren, wie die beobachteten negativen Folgen der Verbindungstechniken (Rindenrisse, Spaltung des Holzes, und Holzverfärbungen bzw. Fäulnis) zu beurteilen und ggf. zu vermeiden sind.

Rindenrisse wurden tendenziell häufiger bei Bäumen mit einem hohen Faseranteil in der Rinde beobachtet (Weide, Esche), sie waren bei Schraubverbindungen etwas häufiger und tlw. auch länger als bei den Gewindestangenverbindungen. Spaltungen des Holzes wurden bei allen Arten in vergleichbarem Umfang, jedoch immer nur bei den Schraubverbindungen beobachtet. Die anfängliche Vermutung, dass die (tlw. erst nach einigen Tagen oder Wochen auftretenden) Rindenrisse durch die Spaltung des Holzes hervorgerufen wurden, konnte nicht bestätigt werden. Vielmehr zeigte sich, dass bei einigen Schraubverbindungen eine Spaltung des Holzes auftrat, ohne dass Rindenrisse dokumentiert wurden (z. B. Schraubverbindungen bei Birke), während andererseits auch einige Verbindungen vorlagen, bei denen keine Spaltung des Holzes auftrat, wohl aber Rindenrisse (z. B. Gewindestangenverbindungen bei Platanen, hier jedoch in geringerem Umfang). Daher ist anzunehmen, dass die Rindenrisse durch das Anpressen der Schraubenköpfe/Muttern bzw. durch das Austreten der Schraubenspitzen verursacht wurden. Die verwendeten Unterlegscheiben zeigten hier keine erkennbare positive Wirkung, weshalb in weiteren Versuchen zu prüfen wäre, ob mit anderen Schraubenköpfen (Senkkopf, selbstfräsender Senkkopf) und z. B. selbstbohrenden Schrauben (Austrittsstelle) bessere Ergebnisse erzielt werden können. Da jedoch (vor allem kleinere) Rindenverletzungen bei vital wachsenden Pflanzen meist schnell verheilen, ohne dass gravierende Beeinträchtigungen des Holzes (Fäulnis etc.)

[317] Bei den älteren Pflanzen (zus. Versuche bei 2008 gepflanzten Pflanzen) dauert dies etwas länger.

[318] Abgesehen davon, dass bei einer Gewindestangenverbindung eine Pflanze, die oberhalb nicht korrekt fixiert war, abbrach.

auftreten, sind die üblicherweise beobachteten Rindenrisse für sich genommen als unkritisch einzustufen (vgl. Dujesiefken and Liese 2008, S. 42 ff.).[319]

Die durch das Verschrauben verursachten Verletzungen des Holzes müssen jedoch deutlich kritischer beurteilt werden als die Rindenrisse, da die ausdifferenzierten Gewebe des Xylems nicht wie das Kambium oder Teile des Phloems durch Um- und Neubildungen von Zellen umfangreich reagieren können.[320] Geschädigte Gewebe können lediglich durch den Verschluss der wasserleitenden Elemente und durch die Bildung von schützenden Inhaltsstoffen von den intakten Geweben getrennt werden (Abschottung bzw. Kompartimentierung, ebed. S. 34)

Beim Eindrehen der Schraube bzw. dem Bohren des Lochs dringt zunächst Luft in die Xylemgewebe ein, wodurch in den betroffenen Gefäßen die Wasserleitung zusammenbricht (Embolie, vgl. z. B. (Tyree und Zimmermann, 2002). Der Baum versucht nun unmittelbar, das weitere Ausbreiten der Luft im Gefäßsystem zu verhindern, indem die Leitelemente möglichst rasch durch sogenannte Thyllen oder Propfen verschlossen werden.[321] Zugleich sterben die angrenzenden Parenchymzellen ab und das abgestorbene, nicht mehr funktionsfähige Gewebe verfärbt sich und wird von Schaderregern (z. B. holzzerstörenden Pilzen) besiedelt (ebd. S. 61). In der unmittelbaren Wundnähe kann der Baum die Gefäße wegen des schnellen Absterbens der Parenchymzellen nicht effektiv verschließen, mit zunehmendem Abstand zur Verletzung können aus dem Grundgewebe heraus jedoch genügend Einlagerungen gebildet werden, um eine effektive Grenzschicht aufzubauen, die das vom Baum aufgegebene Gewebe von dem gesunden, funktionsfähigen trennt. Diese Grenzschicht ist makroskopisch meist gut als dunkler Streifen erkennbar und in Kambiumnähe scharf zum unverfärbten Holz abgegrenzt. Vor allem bei kleineren Verletzungen diese Schicht in der Lage, die Ausbreitung der Schadorganismen wirksam zu stoppen, und wenn die Wunde zudem durch Überwallung verschlossen wird, ist die Fäule eingekapselt und die Schaderreger sterben ab (Sauerstoffentzug, vgl. ebd. S. 68).

Eine engräumige Verfärbung steht deshalb für eine effektive Abschottung, eine weiträumige für eine schwache. Bei den Versuchen mit Schrauben und Gewindestangen wurde die axiale Ausbreitung gemessen und als quantifizierbares Kriterium zur Beurteilung herangezogen, während die radiale und tangentiale Ausbreitung nur anhand der Querschnittsflächen qualitativ beschrieben wurde. Zum Zeitpunkt der Schnittanfertigung waren die äußerlichen Wunden durch Überwallung meist schon großteils verschlossen, Grenzschichten waren meist jedoch nur in radialer Richtung nach außen hin, nicht jedoch in tangentialer und axialer sowie in radialer Richtung nach innen hin klar zu erkennen (vgl. Abbildung 103). Daher könnten sich die Verfärbungen in der weiteren Entwicklung noch axial und tangential und zum Zentrum hin weiter ausbreiten, mit einer Ausdehnung in das nach dem Verbinden gebildete Holz ist jedoch nicht zu rechnen. Auch ist nicht damit zu rechnen, dass es zu (weiteren) umfangreichen Holzzersetzungen durch Schadorganismen kommen wird, da durch die Wundheilung die Sauerstoffzufuhr unterbunden ist.[322]

---

[319] Die größeren nekrotischen Bereiche, die bei einigen Verbindungen entstanden, kamen wahrscheinlich durch zu starkes oder unsachgemäßes Anziehen der Schrauben bzw. Muttern zu Stande. Sie sind trotz eines sorgfältigen Vorgebens (Drehmomentbegrenzung etc.) in der Baupraxis wahrscheinlich nie ganz zu vermeiden

[320] Hier ist so gut wie keine Bildung von Wundperiderm und Wundkallus möglich.

[321] Thyllen: Blasenartige Ausstülpungen angrenzender Parenchymzellen im Gefäß. Pfropfen: „Schleimbildungen“ angrenzender Parenchymzellen, die in das Gefäß gedrückt werden.

[322] Hier kommt den Rindenrissen vermutlich doch noch eine wichtige Rolle zu, denn wenn diese klein bleiben und so rasch verheilen, können die Verfärbungen bzw. von Schadorganismen befallenen Bereiche schneller eingekapselt werden.

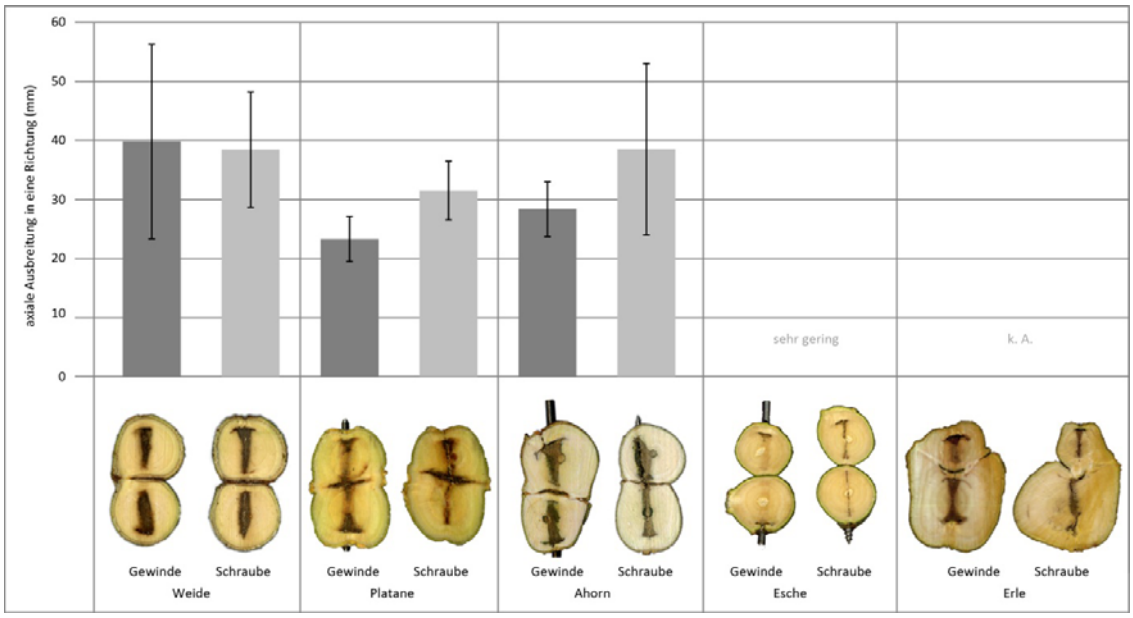


Abbildung 103 Axiale Ausdehnung der Verfärbungen bei Verbindungen mit Gewindestangen und Schrauben (zus. Verbindungen 2009) Die Ergebnisse bei Erle (ganz rechts) und Birke (nicht wiedergegeben) erlauben noch keine Schlussfolgerungen.

Unter den untersuchten Baumarten zeigten die Weiden, die allgemein als schlecht abschottend gelten, die umfangreichsten Verfärbungen, die sich axial in beide Richtungen um teils mehr als 50 mm ausbreiteten und auch im Querschnitt weite Bereiche betrafen (vgl. Abbildung 72). Unterschiede zwischen den beiden untersuchten Verbindungsvarianten ergaben sich nicht, d. h., dass der beim Schrauben verursachten Spalt die Verbindung diesbezüglich nicht nachteilig beeinflusste bzw. durch eine Vermeidung des Spaltes vermutlich keine nennenswerten Verbesserungen erzielt werden können.[323] Bei den Platanen, die in der Literatur[324] als gut abschottend beschrieben werden, war die Ausbreitung in beide Richtungen deutlich geringer, vor allem bei der Variante mit Gewindestangenverbindung; d.h., dass durch die Vermeidung einer Holzsspaltung deutlich bessere Ergebnisse erzielt werden können. Bei Ahorn war die axiale Ausbreitung der Verfärbungen in etwa mit Platane vergleichbar (etwas größer), die Flächenausdehnung im Querschnitt (radiale und tangentiale Ausbreitung) jedoch noch größer als bei Weide. Beides deckt sich im Wesentlichen mit den Beschreibungen in der Literatur, wobei der untersuchte Spitzahorn je nach Alter und Wachstumsbedingungen recht unterschiedliche Reaktionen zeigen kann. Sehr überraschend sind die Ergebnisse bei Esche, bei der die Verfärbungen mit Abstand am geringsten waren (keine quantitative Auswertung, vgl. Abbildung 90), obwohl die Art als schlecht abschottend gilt. Bei Erle scheint sich ein Reaktionsspektrum im Bereich zwischen Weide und Platane abzuzeichnen, wobei die vorliegenden Ergebnisse noch nicht aussagekräftig sind. (Abbildung 103)

Damit geben die in der Literatur zu findenden Angaben zum Abschottungsverhalten unterschiedlicher Baumarten erste Hinweise für die Anwendbarkeit von Schraubverbindungen. Da sich die meisten Untersuchungen jedoch in der Regel auf ältere Bäume und auf Verletzungen,

[323] Eine Spaltung des Holzes begünstigt jedoch ein Ausreißen der Schraube und ist von daher negativ zu sehen.

[324] Alle Ausführungen zur unterschiedlichen Abschottung von Baumarten aus: DUJESIEFKEN, D. & LIESE, W. 2008. Das CODIT-Prinzip. *Von den Bäumen lernen für eine fachgerechte Baumpflege.* Braunschweig: Haymarket Media.

die bei der Baumpflege entstehen (Astungswunden), beziehen, sind diese Ergebnisse nicht 1:1 auf baubotanische Schraubverbindungen übertragbar und es können sich teils deutliche Abweichungen ergeben (vgl. Esche).

Aus baupraktischer Perspektive ist anzumerken, dass die Verbindungstechnik mit Schrauben (ohne Vorbohren) durch eine enorme Schnelligkeit und einfache Arbeitsabläufe besticht. Demgegenüber ist das Verbinden mit Gewindestangen und Muttern weitaus aufwändiger. In weiteren Versuchen wäre daher zu untersuchen, inwiefern Nachteile der Schraubverbindungen (Holzspaltungen, verstärkte Rindenrisse) beispielsweise durch Vorbohren oder die Wahl selbstbohrender Schrauben[325] vermindert werden könnten. Zu untersuchen wäre auch, wie stark die Pflanzen beim Verbinden aneinandergepresst werden sollten bzw. dürfen. Die Querschnitte zeigen teilweise umfangreiche Bereiche abgestorbener Rinde, die vermutlich beim Verbinden zerquetscht wurde. Derartige Gewebezerstörungen sollten vermieden werden, da sie ebenfalls einen Angriffspunkt für Schaderreger darstellen und sich im Bereich der geschädigten Gewebe keine Verwachsungen entwickeln (vgl. z. B. Abbildung 85).[326]

3.4.3 Unterschiede zwischen den Verbindungsgeometrien

Wie bereits im Kapitel Material und Methoden (Abschnitt 3.2.5) ausgeführt, werden in baubotanischen Strukturen meist zwei oder mehr Pflanzen parallel miteinander verbunden[327] und es treten so gut wie immer Stellen auf, an denen sich zwei oder mehr Pflanzen kreuzen. In beiden Fällen sollen die Pflanzen vollständig miteinander verwachsen, sodass an Kreuzungsstellen Verbindungen entstehen, die im Prinzip einer „doppelten Astgabel“ gleichen, während die Pflanzen im Bereich der Parallelverbindungen zu einem homogen durchgehenden Stamm verschmelzen sollen. Parallelverbindungsstellen treten damit in relativ kurzem Abstand entlang so gut wie aller Achsen auf, während Kreuzungen einen größeren Abstand zueinander aufweisen und seltener vorkommen. Aus diesen leicht unterschiedlichen Rahmenbedingungen ergeben sich ggf. abweichende Anforderungen an die Verbindungstechnik.

Die Varianten der Standard-Kreuzverbindungen und Parallelverbindungen wurden gewählt, um zu untersuchen, ob die Verbindungstechniken in beiden Fällen gleichermaßen anwendbar sind, oder ob sich diesbezüglich Unterschiede ergeben. Die Tangentialverbindungen wurden als eine Alternative bzw. Variante der Kreuzverbindung getestet. Ebenso sind die Varianten der Paarkreuzungen als Alternativen zu betrachten, bei denen versucht wurde, die bestmögliche Anordnung für die Problemstellung der kreuzweisen Verbindung von vier Pflanzen an einem Punkt zu finden. Die Parallelverbindungen mit vier und acht Pflanzen wurden angelegt, um den Einfluss der Anzahl miteinander verbundener Pflanzen auf die Gesamtentwicklung, den Verwachsungsprozess und die Interaktion mit dem Verbindungsmittel zu untersuchen.

---

[325] Entsprechende Schrauben sind seit einigen Jahren auf dem Markt erhältlich. Zum Zeitpunkt des Versuchsbeginns waren jedoch keine Ausführungen in Edelstahl mit den gewünschten Abmessungen erhältlich.

[326] Die Annahme von Wiechula und Kirsch, eine Verletzung der Pflanzen durch das Eintreiben eines Nagels oder einer Schraube wurde sich insgesamt positiv auswirken, wurden mit den Untersuchungen damit widerlegt. Vor allem die gerade beim Einschlagen von Nägeln zu befürchtende Spaltung wirkt sich deutlich negativ auf das Verwachsungsergebnis aus und eine Verletzung der Rinde ist offensichtlich für die Entstehung einer Verwachsung nicht notwendig und vermutlich auch nicht förderlich.

[327] U. a. um die Addition der Pflanzen und um das Einbinden von technischen Bauteilen zu ermöglichen, vgl. Kapitel Turm.

3.4.3.1 Kreuz-, Parallel- und Tangentialverbindungen mit zwei Pflanzen

Unmittelbar nach dem Verbinden berühren sich die Pflanzen einer Kreuzverbindung im Prinzip nur an einem Punkt, während die Pflanzen bei Parallelverbindungen über eine mehr oder weniger lange Strecke aneinandergedrückt werden. Durch den längeren Kontaktbereich ist bei Parallelverbindungen die Kontaktfläche größer bzw. nimmt stärker zu als bei Kreuzverbindungen. Deshalb müssten bei Parallelverbindungen größere Wachstumsdrücke entstehen, die vom Verbindungsmittel aufgenommen werden müssen. In den Versuchen wurden jedoch keine Unterschiede bspw. beim Aufsprengen der Drahtseile beobachtet, genaussowenig beim Einwachsen der Seile und der Verwachsungsreaktionen. Auffällig ist jedoch, dass die teilweise beobachteten Knicke und Durchmessersprünge fast ausschließlich bei Kreuzverbindungen auftraten. Die Knicke resultieren wahrscheinlich daraus, dass nur die Pflanzen der Kreuzverbindungen gebogen wurden, weshalb sie an der Verbindungsstelle unter Spannung standen und die mechanische Schwächung durch das Verbindungsmittel (z. B. Durchtrennen der Bastfasern, ggf. leichter Saftstau) dann zum (Teil-)Versagen führte.

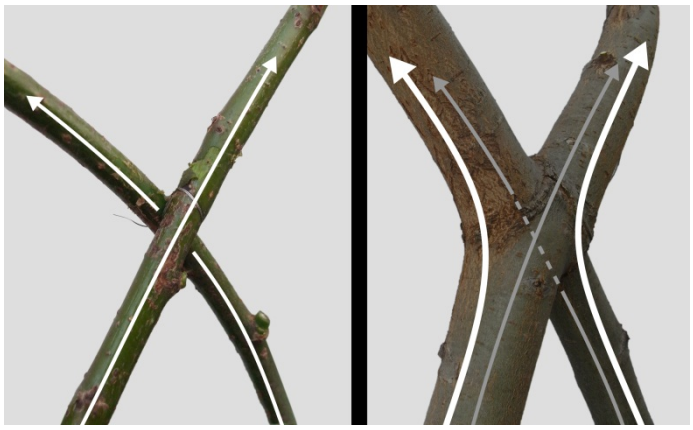


Abbildung 104 Veränderung des Xylemstroms bei einer Kreuzverwachsung.

Die Durchmessersprünge an den Kreuzverbindungsstellen (vgl. Abbildung 65) sind vor dem Hintergrund eines sich verändernden Xylemstroms zu interpretieren. Vor dem Verwachsen laufen die Xylemströme (Wassertransport) der beiden Einzelpflanzen aneinander vorbei (Abbildung 104 links). Mit der Entstehung eines gemeinsamen Jahrrings verändert sich dann die Transportrichtung, da die vom Kambium gebildeten Zellen und damit auch die Gefäße mehr oder weniger parallel und axial ausgerichtet werden (vgl. Tyree and Zimmermann, 2002). In dem nach dem Verwachsen gebildeten Holz werden sich die Xylemströme daher nie kreuzen, sondern eher wie in Abbildung 104 rechts (weiße Pfeile) dargestellt verlaufen.[328] Dabei entsteht der größte Xylemstrom zwischen dem Wurzelbereich mit der größten Wasseraufnahmekapazität und dem Kronenbereich mit der größten Blattmasse (Wasserabgabekapazität). Entsprechend der Model-Pipe-Theorie[329] ist das Dickenwachstum proportional zum Xylemstrom und die Achsenabschnitte wachsen am stärksten, die zu den leistungsfähigsten Kronen- bzw. Wurzelbereichen führen. Die ungleiche Durchmesserentwicklung deutet also auf eine asymmetrische Verteilung der Blatt- bzw. Wurzelmasse hin. Sie ist wahrscheinlich nicht auf einen Saftstau o. ä. zu zurück-

[328] Dies verdeutlicht der Zuwachs der 2007 angelegten Kreuzverbindungen im dritten bzw. vierten Wachstumsjahr. Hier kam es zu einem besonders starken Wachstum in den seitlichen Kehlen der Kreuzverbindungen (Abbildung 104 rechts).

[329] Vgl. Abschnitt 4.2.4.3.

zuführen, sondern im Gegenteil ein Anzeichen für eine vollständige, da über ursprüngliche Individuengrenzen hinweg leitfähige Verwachsung.

Bei Kreuzverbindungen ist des Weiteren darauf hinzuweisen, dass es, genauso wie bei Astgabeln, zum Einwachsen von Rinde bzw. Borke kommen kann, selbst nachdem eine vollständige Verwachsung entstanden ist. Aus der Baumpflege ist bekannt, dass die Tendenz hierzu von der Baumart und dem Winkel zwischen den Stämmlingen abhängig ist.[330] Vor allem bei engen Winkeln und Baumarten mit dicker Borke ist die Gefahr hier relativ groß. In weiteren Versuchen ist daher der Einfluss der Baumart und des Kreuzungswinkels auf die langfristige Entwicklung der Verbindungen zu untersuchen.

Bei den Parallelverbindungen ist auffällig, dass es in fast allen Fällen nicht zu einem Verwachsen der Achsen über die gesamte Länge kam, sondern meist nur Verwachsungen im Umkreis der Verbindungstelle auftraten. Dies ist damit zu erklären, dass die Verbindungsmittel entweder insgesamt nachgaben, oder dass der Anpressdruck bzw. der von Verbindungsmittel aufgenommene Wachstumsdruck nur direkt bei der Verbindung groß genug war, um eine Verwachsung zu initiieren. Aufgrund ihrer geringen Steifigkeit werden die Achsen bereits wenige cm neben der Verbindungsstelle durch das Dickenwachstum auseinandergedrückt und berühren sich dann im Zwischenbereich von zwei Verbindungsstellen kaum mehr. Erst im weiteren Verlauf der Entwicklung ist davon auszugehen, dass sich die Pflanzen in diesen Bereichen (wieder) berühren und dann ggf. verwachsen. Wenn die Pflanzen im Zwischenbereich von zwei Verbindungsstellen erst deutlich später verwachsen, ist mit mehr einwachsender Rinde zu rechnen[331], weshalb angestrebt werden sollte, dass die Pflanzen möglichst gleichmäßig und von Beginn an über die gesamte Länge verwachsen. Derartige Verwachsungen entstanden innerhalb des Beobachtungszeitraums nur bei einer Verbindung mit Buddy-Tape, bei einer Drahtseilverbindung mit leicht spiraliger Drehung einer Pflanze und bei den Parallelverbindungsstellen der Kreuzungsversuche (2-2). Bei den letztgenannten war der Abstand der Verbindungsstellen deutlich geringer (10 statt 15 cm) und die Seile wurden meist nicht aufgesprengt (geringeres Dickenwachstum). Daher sollte in weiteren Versuchen untersucht werden, ab welchem Verbindungsabstand (vermutlich < 10 cm) ein gleichmäßiges Verwachsen erreicht werden kann, und ob dies ggf. auch durch eine spiralige Anordnung/Verdrehung der Pflanzen erzielt werden kann.[332]

Die untersuchten Seilverbindungen scheinen in gleichem Maße für Kreuz- und Parallelverbindungen geeignet zu sein. Bei den Verbindungstechniken mit breiten Bändern (Gewebeband, Buddy Tape) hatten bereits die Vorversuche gezeigt, dass diese nur bei Parallel- und nicht bei Kreuzverbindungen angewendet werden können, da sie ansonsten einwachsen und Strangulationen verursachen. Schraubverbindungen eignen sich zunächst genauso wie Seilverbindungen sowohl für das kreuzweise wie auch das parallele Verbinden der Pflanzen. Vor dem Hintergrund der obigen Ausführungen zum nötigen Abstand der Parallelverbindungen (< 10 cm) muss jedoch berücksichtigt werden, dass zumindest bei einigen Arten die Gefahr besteht, dass sich die Xylemverfärbungen zu einem durchgehenden Bereich verbinden könnten, wenn Parallelver-

---

[330] Kritisch wird hier ein Winkel dann, wenn er kleiner als 45° ist; vgl.: PFISTERER, J. A., SPATZ, H.-C., EFORTH, D. & HEINZ, M. 2003. Untersuchungen zur Biegebruchfestigkeit von Astgabeln und Reiteraten der Hasel (*Corylus avellana L.*). *In:* BAUMPFLEGETAGE, D. (ed.) *Jahrbuch der Baumpflege 2003.* Braunschweig: Heymarket Media.

[331] Vgl. dazu selbst die relativ rasch vollständig verwachsenen Pflanzen in Abbildung 80, Schnitt 3.

[332] Werden die Pflanzen umeinander geschlungen, müssten sie sich durch ihr Dickenwachstum selbst aufeinander drücken.

bindungen mit sehr kurzen Abständen angelegt werden.[333] Damit besteht die Gefahr, dass eine Art Faulkern entsteht und dass sich Schadorganismen, z. B. auch bei einer späteren Verletzung des Stammes, rasch in sehr weiten Bereichen ausbreiten könnten.

Die als Alternative zu den Kreuzverbindungen getesteten Tangentialverbindungen unterschieden sich im Verwachwachsungsprozess nicht prinzipiell von den Parallel- oder Kreuzverbindungen. Da sich der Xylemstrom bei Kreuzverbindungen wie oben dargestellt (Abbildung 104) langfristig derart verändert, dass er dem bei Parallelverbindungen gleicht, sollten sich langfristig auch keine Unterschiede ergeben. Bei Arten mit dickerer Rinde könnte bei den Tangentialverbindungen jedoch die Gefahr bestehen, dass im weiteren Entwicklungsverlauf Rinde einwächst, da dort wo die Pflanzen zusammen- bzw. wieder auseinandergeführt werden, relativ spitze Winkel entstehen.

3.4.3.2 Verbindungen mit mehr als zwei Pflanzen

Bei fast allen Verbindungen, bei denen mehr als zwei Pflanzen auf einmal miteinander verbunden wurden,[334] wurden die Verbindungsmittel (Drahtseile) frühzeitig aufgesprengt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich die Durchmesserzunahmen, teilweise auch die Wachstumsdrücke aufaddieren.[335] Bei der Dimensionierung der Verbindungsmittel ist also unbedingt die Anzahl der miteinander zu verbindenden Pflanzen zu beachten. Je größer die Anzahl der Pflanzen ist, desto stärker müssten beispielsweise die Seile dimensioniert werden. Da ein größerer Seildurchmesser aber wahrscheinlich die Gefahr von Strangulationen erhöht, wäre es bei mehr als zwei Pflanzen vermutlich das Beste, wechselweise immer zwei Pflanzen derart miteinander zu verbinden, dass insgesamt alle Pflanzen miteinander verbunden werden. Eine vergleichbare Vorgehensweise ist mit Schraubverbindungen bei der Realisierung des prototypischen Turms (Kapitel 4) erfolgreich angewendet worden.

Darüber hinaus kam es durch die größere Pflanzendichte zu einer heterogeneren Entwicklung der Pflanzen und die durchschnittliche Durchmesserzunahme war insgesamt geringer. Beides wirkt sich negativ auf den Verwachsungsprozess aus, sodass allgemein anzuraten, ist mit einer möglichst geringen Pflanzenzahl bzw. Dichte zu arbeiten.[336]

3.4.3.3 Kreuzverbindungen (2-2) und (1-1-1-1)

Die Ergebnisse der beiden Varianten der Kreuzverbindung von Pflanzenpaaren sind sehr unterschiedlich zu bewerten. Bei den Verbindungen (2-2) versagten aufgrund der sich aufaddierenden Durchmesserzunahmen bzw. Wachstumsdrücke die Drahtseilverbindungen meist vorzeitig und es kam in der Folge meist nicht zu Verwachsungen. Bei den Verbindungen (1-1-1-1) entwickelten sich sehr viel häufiger Verwachsungen (kein Aufreißen der Seile), es kam aber vor allem bei den innenliegenden Pflanzen zu einem starken Saftstau. Sofern es in diesen Fällen zur Bildung eines alle vier Pflanzen umfassenden Jahrrings kommt, bevor Schäden durch den Saftstau entstehen (Absterben basaler Bereiche, mechanisches Versagen), können sich derartige Verbindungen vermutlich erfolgreich weiterentwickeln. Dennoch besteht bei dieser Anordnung ein großes Risiko, dass Pflanzen oder Pflanzenteile absterben, weshalb die Pflanzen besser paarweise gekreuzt werden sollten (2-2). Wie oben beschrieben sind die Pflanzen dann jedoch

---

[333] Aufgrund der axialen Ausdehnung der verfärbten Bereichen von tlw. mehr als 5 cm in eine Richtung ergeben sich verfärbte Bereiche von tlw. über 10 cm Länge.

[334] Parallelverbindungen mit 4 und 8 Pflanzen.

[335] Insbesondere bei den Wachstumsdrücken sind hier noch quantifizierende Untersuchungen nötig.

[336] Vgl. hierzu aber auch Abschnitt 4.2.1.

einzeln miteinander zu verbinden oder die Verbindungsmittel sind entsprechend stärker zu dimensionieren.

3.4.4 Bewertung und Beurteilung der Baumarten

3.4.4.1 Einfluss der Arteigenschaften auf den Verwachsungsprozess

Mit den gewählten Standardverbindungen (Kreuz- und Parallelverbindungen mit Drahtseil) wurden bei allen Arten zunächst vergleichbare Ausgangsbedingungen für die Entstehung von Verwachsungen geschaffen. Da sich die Arten in ihrer Gesamtentwicklung und in ihrer Reaktion auf die Verbindungstechnik jedoch sehr stark unterschieden (z. B. Aufsprengen vs. Einwachsen der Seile), stellten sich im Verlauf des Beobachtungszeitraums an den Verbindungsstellen sehr unterschiedlichen Bedingungen ein. Damit ist es mit dem gewählten Versuchsdesign nicht möglich, die Entstehung und Entwicklung von Verwachsungen bei identischen Bedingungen (z. B. gleicher Anpressdruck) zu vergleichen. Hier muss jedoch angemerkt werden, dass dies methodisch auch fast unmöglich ist, da immer irgendeine Form der Verbindungstechnik verwendet werden muss (auf die die Pflanzen unterschiedlich reagieren) und sich darüber hinaus die Bedingungen durch unterschiedliche Wachstumsgeschwindigkeiten etc. verändern.

Die Ergebnisse geben jedoch zumindest erste Hinweise, inwiefern sich die Arten im Verwachsungsprozess unterscheiden. So zeigten insbesondere Weide und Platane eine deutliche Neigung zur Bildung von Rindenverwachsungen.[337] Bei Birke, Esche und Erle war diese Tendenz etwas schwächer ausgeprägt, und bei Ahorn und Robinie wurden Ansätze von Rindenverwachsungen kaum beobachtet. Dass bei den Arten Eiche, Hainbuche und Buche Rindenverwachsungen zunächst seltener beobachtet wurden, muss vermutlich mit deren langsamerer Entwicklung erklärt werden, da bei schneller wachsenden Individuen oder im weiteren Verlauf der Entwicklung durchaus Rindenverwachsungen auftraten.[338] Versuche, diese Unterschiede rindenanatomisch zu erklären, bleiben vor dem Hintergrund der unterschiedlichen Wachstumsbedingungen relativ spekulativ. Der Borkentyp scheint hier keinen verallgemeinerbaren Hinweis zu geben, auffällig ist jedoch, dass bei Ahorn und Robinie zum Zeitpunkt des Verbindens bereits borkenartige, graubraune Abschlussgewebe vorlagen, während diese z. B. bei Weide sehr dünn waren und die Pflanzen eine grüne Rinde aufwiesen.

Ferner könnte ein Zusammenhang zwischen der Neigung zur Entstehung von Rindenverwachsungen und zur Entstehung von Adventivwurzeln bestehen. Diese Wurzelansätze sind in gewissem Sinne mit den Rindenhöckern vergleichbar, da sie anfangs aus relativ undifferenziertem Gewebe bestehen und die äußeren Rindenschichten durchbrechen. Die Entstehung von Adventivwurzeln wird sehr häufig bei Weiden und Schwarzerlen beobachtet und bei der Vermehrung von Platanen künstlich herbeigeführt (Stecklingsvermehrung). Hier wären genauere anatomische und physiologische Untersuchungen von großem Interesse, da ggf. Techniken zur Förderung der Wurzelbildung aus der Pflanzenvermehrung (Hormonpräparate) auch für die Förderung von Verwachsungen eingesetzt werden könnten. Unter Umständen könnte so auch bei Baumarten die Bildung von Rindenverwachsungen unterstützt werden, die natürlicherweise nicht dazu neigen.

Einige Ergebnisse geben Hinweise darauf, dass der Druck, der an der Verbindungsstelle vorhanden sein muss, damit es zu einer Xylemverwachsung kommt, bei den einzelnen Arten unter-

---

[337] Z.B. häufig Rindenhöcker auch in Bereichen, bei denen sich die Pflanzen nicht berührten.

[338] Darüber hinaus muss hier zwischen äußerlich erkennbaren und nur im Querschnitt nachweisbaren Rindenverwachsungen unterschieden werden.

schiedlich ist. So reichte bei einigen Verbindungen mit Erle scheinbar ein minimaler Zusammenhalt aus, um die Entstehung einer Xylemverwachsung herbeizuführen (Abb. 44). Demgegenüber wurden vergleichbare Verbindungen bei Ahorn durch das Dickenwachstum der sich gegenüberstehenden Kambien auseinandergedrückt und es kam nicht zu Verwachsungen. In weiterführenden Versuchen wäre es daher interessant, quantitative Untersuchungen der auftretenden bzw. notwendigen Drücke durchzuführen.

3.4.4.2 Artspezifische Eignung der Verbindungstechniken

Die zwischen den Baumarten beobachteten Unterschiede in der Reaktion der Pflanzen auf verschiedene Verbindungstechniken liefern sowohl für die Entwicklung baubotanischer Verbindungstechniken als auch für die Verwendbarkeit der einzelnen Arten in der Baubotanik wichtige Erkenntnisse. Die Ergebnisse legen nahe, dass im Prinzip bei allen Arten zufriedenstellende Verwachsungsergebnisse erzielt werden können, sofern es gelingt, den Prozess der Xylemverwachsung frühzeitig einzuleiten.[339] Für die Praxis ist letztendlich entscheidend, ob es gelingt, die Pflanzen einer bestimmten Baumart so zu verbinden, dass Verwachsungen entstehen, ohne dass dabei negative Folgen der Verbindungstechnik auftreten. Wenn eine Baumart theoretisch gut und schnell verwächst, praktisch aber keine Verbindungstechniken zur Verfügung stehen, mittels derer die Verwachsungen einfach, sicher und pflanzenschonend initiiert werden können, kann die Art in der Praxis nicht eingesetzt werden. Diesbezüglich sind die Ergebnisse mit Seil- und Schraubverbindungen relativ eindeutig, während die Ergebnisse mit nachgebenden Verbindungstechniken noch keine artspezifischen Aussagen erlauben. Aus den vorliegenden Ergebnissen konnten erste praktische Empfehlungen abgeleitet werden, die in Tabelle 4 dargestellt und im Folgenden kurz erläutert werden.

Bei **Weide** liegt die Situation vor, dass sehr schnell Verwachsungsansätze entstehen und im Prinzip auch alle Voraussetzungen für eine rasche Entwicklung vollständiger Verwachsungen gegeben sind. Die im Querschnitt erkennbaren, in tangentialen Schichten angeordneten Bastfasern[340] der Rinde scheinen weder die Bildung von Rindenverwachsungen noch die Entstehung von Xylemverwachsungen zu behindern. Gleichzeitig scheint es nicht ganz einfach, für die Art geeignete Verbindungstechniken zu finden. Techniken, bei denen das Holz verletzt wird, scheiden aufgrund der sehr großräumigen Verfärbungen und der bekannten Fäulnisgefahr so gut wie aus. Eine punktuelle Krafteinleitung erscheint aufgrund des sehr weichen Holzes insgesamt schwierig (Abbildung 73). Durch den hohen Bastfaseranteil in der Rinde besteht bei Seilverbindungen tendenziell die Gefahr, dass die Seile nicht einschneiden und erst nach Überwallung verzögert einwachsen. Aufgrund der Holzanatomie ist jedoch die Gefahr, dass es dabei zu einer kritischen Störung des Wassertransports kommt, vergleichsweise gering. Aufgrund des zerstreutporigen Holzaufbaus stehen die vor dem Verbinden gebildeten Gefäßen für den Wassertransport zur Verfügung, bis eine vollständige Verwachsung entstanden ist und damit außerhalb der Seile neue, durchgehende Leitgefäße gebildet werden können. Aufgrund des schnellen Wachstums können Fehlstellen der Seilverbindungen (z. B. nach Überwallung eingewachsene Rinde) rasch ausgeglichen werden bzw. werden durch neue, intakte Gewebeschichten ersetzt. Bei Kreuzverbindungen sind daher am besten Seilverbindungen, ggf. mit Einschneiden des Seils, zu verwenden, für Parallelverbindungen sollten alle Möglichkeiten nachgebender Verbindungstechniken (vgl. Gewebeband, Buddy-Tape) untersucht werden, da hier keine Verletzungs-

[339] Bei allen Arten bis auf Robinie entstanden in mindestens einem Fall Xylemverwachsungen. Es ist durchaus wahrscheinlich, dass auch bei Robinien durch eine starre Verbindung (Schraubverbindung) Verwachsungen erzeugt werden können.

[340] Vgl. anatomische Schnitte im Anhang.

und keine Strangulationsgefahr besteht. Aufgrund der Neigung zur Bildung von Rindenhöckern ist der Ansatz hier auch relativ vielversprechend (vermutlich geringer Anpressdruck bzw. Widerstand nötig).

Tabelle 4 Vorläufige Empfehlung für die Verwendung von Seil- und Schraubverbindungen bei den 10 untersuchten Arten (+++ = sehr gut verträglich; ++ = gut verträglich; + = ohne Risiken anwendbar; - = mit gewissen Risiken anwendbar; -- = deutliche negative Beeinträchtigung, wenn möglich nicht anwenden)

Baumart	**Seilverbindung Beschreibung**	**Seilverbindung Empfehlung/Bewertung**	**Schraubverbindung Beschreibung**	**Schraubverbindung Empfehlung/Bewertung**
Weide	Vorübergehender Saftstau möglich, jedoch funktionell unkritisch	+ -	Starke Verfärbungen, große Fäulnisgefahr	- -
Platane	Sehr gute Verträglichkeit	+++	Wenn keine Holzspaltung, geringe Verfärbungen und gute Einkapselung	+
Esche	Vorübergehender Saftstau möglich, auch anschließend funktionelle Beeinträchtigung	- -	Minimale Verfärbungen, weitere Versuche nötig	++(+)
Birke	Meist sehr gute Verträglichkeit	++	Vermutlich eher kritisch	?
Erle	Wahrscheinlich sehr gute Verträglichkeit[341]	(++)	Vermutlich eher kritisch	?
Ahorn	Vorübergehender Saftstau wahrscheinlich, ggf. verzögertes einwachsen, jedoch funktionell unkritisch	(- -)	Deutliche radiale und tangentiale, mäßige axiale Ausbreitung der Verfärbungen	-
Robinie	Saftstau, verzögertes Einwachsen und funktionelle Beeinträchtigung wahrscheinlich	- -	Nicht untersucht, laut Literatur gute Fäulnisresistenz	?
Eiche	Vorübergehender Saftstau möglich, funktionelle Beeinträchtigung wahrscheinlich	-(-)	Nicht untersucht, laut Literatur gute Fäulnisresistenz	?
Hainbuche	Sehr gute Verträglichkeit	+++	Nicht untersucht, laut Literatur gute Fäulnisresistenz	?
Buche	Sehr gute Verträglichkeit	+++	Nicht untersucht, laut Literatur gute Fäulnisresistenz	?

Bei **Platane** scheint die Neigung zur Entstehung von Verwachsungen in etwa so groß zu sein wie bei Weide. Da in der Rinde nur sehr wenige Fasern vorkommen, lassen sich die Pflanzen problemlos mit Seilen verbinden (keine Strangulation). Weil auch dickere Seile problemlos in die Rinde einschneiden und dann einwachsen, können diese so dimensioniert werden, dass sie dem Wachstumsdruck mit großer Sicherheit genug Widerstand entgegensetzen (vgl. Versuche mit Dyneema 2). Bei Verschraubungen halten sich die Verfärbungen, sofern es nicht zu einer Spaltung des Holzes kommt, in vertretbaren Grenzen. Holzanatomisch zeigen die Schnitte (z. B. Abbildung 83), dass die große Reaktionsfähigkeit der Art an der Verbindungsstelle (z. B. Umschließen eines Seiles mit Grundgewebe durch schnelles, aber lokal begrenztes Anschwellen) durch den großen Anteil und die gleichmäßige Verteilung der Holzstrahlen begünstigt bzw.

[341] Keine nicht-aufreißenden Seile getestet.

ermöglicht wird. Damit erscheinen alle getesteten Varianten (nach Weiterentwicklung bzw. Optimierung) prinzipiell anwendbar, sodass sich ein großes Anwendungsspektrum in der Praxis ergibt.

Bei **Esche** scheint die Neigung zur Entstehung von Verwachsungen wie beschrieben etwas geringer zu sein, wenn es jedoch gelingt, Verwachsungen zu initiieren, breiten sich diese rasch über einen weiten Bereich aus und es entstehen umfangreiche Xylemverwachsungen mit oft nur minimalen Einschlüssen (z. B. Abbildung 87 rechts, Abbildung 88 Mitte-rechts). Zum Verbinden der Pflanzen sind Seilverbindungen jedoch ungeeignet. Aufgrund des hohen Faseranteils in der Rinde besteht eine große Strangulationsgefahr, wenn die Seile nicht einschneiden. Gleichzeitig ergeben sich aus der Holzanatomie bei einer Strangulation Risiken für den Wassertransport: Die Gefäße des vor dem Verbinden gebildeten Holzes verlieren rasch ihre Funktionsfähigkeit, und wenn dann gleichzeitig die Bildung von neuen Gefäßen nicht möglich ist (kein durchgehender Kambiummantel, wenn Seil nicht eingewachsen), könnte die Wasserleitung an der Verbindungsstelle zusammenbrechen. Dies ist möglicherweise die Ursache für das Anschwellen der Achsen nach dem Einwachsen der Seile.[342] Demgegenüber scheint die Verträglichkeit von Schraubverbindungen hervorragend zu sein. Aufgrund der nur minimalen Verfärbungen (sogar bei Holzspaltung) kann diese Technik hier selbst bei Parallelverbindugnen mit sehr kurzen Abständen problemlos angewendet werden. Aufgrund der Literaturangaben (Esche als schlecht abschottend beschrieben) könnte es jedoch sein, dass beispielsweise bei älteren Pflanzen oder unter anderen Bedingungen weniger gute Ergebnisse erzielt werden. Mit der Schraubverbindung scheint damit bei Esche jedoch insgesamt eine Verbindungstechnik anwendbar zu sein, die viele praktische Vorteile (Schnelligkeit, Einfachheit) in sich vereint.

Bei **Birke** ergeben sich vergleichbare Möglichkeiten des Einsatzes von Seilverbindungen wie bei Platane. Auch hier liegen kaum Fasern in der Rinde vor; u. U. behindern die teils umfangreichen Einlagerungen von Steinzellen in einigen Fällen jedoch das unmittelbare Einschneiden des Seils. Genauso wie bei Weide und Platane stellen vorübergehende Strangulationen kein gravierendes Problem für den Wassertransport im Holz dar (Zerstreutporer). Der Anwendung von Schraubverbindungen ist aufgrund der ersten Versuchsergebnisse und der Literaturangaben eher skeptisch zu begegnen, es sind aber noch weitere Untersuchungen erforderlich. In der praktischen Anwendung der Art scheinen sich Probleme durch die teilweise sehr heterogene Entwicklung der Pflanzen (sehr unterschiedliches Dickenwachstum) zu ergeben. Damit zeichnet sich ein etwas geringeres Anwendungsspektrum ab als bei Platane.

Die bei **Erle** vorliegenden Ergebnisse lassen ähnliche Schlussfolgerungen zu wie bei Birke. Unter Umständen ist die Verträglichkeit von Seilverbindungen sogar noch besser,[343] dies ist jedoch noch in weiteren Versuchen mit Seilen, die auch bei stärkerem Dickenwachstum nicht aufgesprengt werden (Dyneema), zu überprüfen.

Bei **Ahorn** ist die Reaktion auf Seilverbindungen zunächst mit Weide vergleichbar. Aufgrund der geringeren Neigung zur Bildung von Rindenverwachsungen besteht jedoch zusätzlich die Gefahr, dass es nach Überwallung nicht oder erst sehr spät zum Einwachsen des Seils kommt. Daher ist diese Verbindungstechnik hier nicht zu empfehlen, auch wenn wie bei den andern Zerstreutporern ein vorübergehender Saftstau als unkritisch eingestuft werden kann. Aufgrund der geringen radialen und tangentialen Abschottung (große Flächenausdehnung der Verfärbungen im Querschnitt) sind auch Verschraubungen eher kritisch zu bewerten. Damit liegen mit den Versuchsergebnissen noch keine anwendbaren Techniken vor. Eine verlässliche und pflan-

[342] Die Pflanze versucht, schnellstmöglich so viele durchgängige Leitgewebe wie möglich zu erzeugen.

[343] Geringerer Anteil von Steinzellen in der Rinde.

zenverträgliche Methode könnten jedoch Seilverbindungen mit Einschneiden des Seils sein. Interessant wäre auch die Untersuchung weiterer Ahornarten, z. B. Bergahorn, der über eine Schuppen-Steinzellborke ähnlich Platane verfügt.

Bei **Robinie** haben sich die untersuchten Verbindungen mit Drahtseil als ungeeignet erwiesen und aufgrund der beobachteten Reaktionen und der Rinden- sowie der Holzanatomie ist auch bei anderen, festeren Seilen nicht mit positiven Ergebnissen zu rechnen (hoher Bastfaseranteil, Ringporer, vgl. Esche bzw. Ahorn). Schraubverbindungen wurden nicht untersucht, könnten jedoch aufgrund des allgemein als fäulnisresistent beschriebenen Holzes möglich sein. Aufgrund der sehr ausgeprägten und frühzeitigen Borkenbildung ist jedoch allgemein mit Problemen durch einwachsende Rinde zu rechnen, weshalb eine weitere Untersuchung der Art nicht lohnend erscheint.

Bei **Eiche** müssen die Einsatzmöglichkeiten von Seilverbindungen ebenso kritisch gesehen werden wie bei Esche (hoher Faseranteil in der Rinde, Ringporer). Ferner scheint die Anatomie des Holzes (Verteilung der Holzstrahlen) unter Umständen das Zustandekommen von Xylemverwachsungen zu erschweren (Abbildung 99 rechts). Schraubverbindungen wurden nicht untersucht, könnten aufgrund allgemein guter Abschottung jedoch möglich sein. Problematisch war im Versuchsverlauf die heterogene und insgesamt sehr langsame Entwicklung, wobei hierfür vermutlich auch die Standortbedingungen verantwortlich zu machen sind.

Bei **Hainbuche** und **Buche** ist der Einsatz von Seilverbindungen problemlos möglich. Die Reaktion der Pflanzen war bei beiden Arten vergleichbar positiv, obwohl in der Rinde von Hainbuche durchaus auch Bastfasern vorkommen. Entsprechend der Literaturangaben könnten aufgrund des festen Holzes und guter Abschottung auch Schraubverbindungen möglich sein, allerdings ist aufgrund des zumindest anfangs sehr geringen Dickenwachstums auch mit einer langsamen Wundheilung und – damit einhergehend – einer höheren Infektionsgefahr durch Schadorganismen zu rechnen. Hervorzuheben ist ferner, dass beide Arten im weiteren Entwicklungsverlauf (Vegetationsperiode 2010) häufige auch bei den Gewebebandverbindungen Verwachsungen zeigten, sodass auch nachgebende Verbindungsmittel prinzipiell geeignet scheinen.

3.5 Zusammenfassung

Ziel der durchgeführten Verwachsungsversuche war, die Eignung verschiedener Baumarten für baubotanische Anwendungen zu untersuchen und Grundlagen für die Entwicklung praxistauglicher Verbindungstechniken zu erarbeiten. Dazu wurden im Rahmen eines Screenings unterschiedliche Verbindungstechniken bei zehn Baumarten und mehreren Verbindungsgeometrien angelegt und der Verwachsungsprozess wurde morphologisch sowie anatomisch über ein bis drei Jahre dokumentiert. Bei den gewählten bzw. selbst entwickelten Verbindungstechniken erfolgt das Verwachsen ähnlich wie bei natürlichen Verwachsungen in einem zweistufigen Prozess, bei dem erst die Rinden- und anschließend die Holzgewebe fusionieren.

Die untersuchten Baumarten unterscheiden sich in ihrer Wüchsigkeit und in ihren holz- und rindenanatomischen Eigenschaften. Mit den Versuchen wurde u. a. untersucht, inwiefern ein Zusammenhang zwischen diesen Arteigenschaften und dem Verwachsungsergebnis bzw. der Eignung der unterschiedlichen Verbindungstechniken besteht, um die Ergebnisse wenn möglich verallgemeinern und auf andere Arten übertragen zu können. Gewählt wurden die schnellwüchsigen Pionier- bzw. Lichtbaumarten Silberweide (*Salix alba*), gemeine Birke (*Betula pendula*), Schwarzerle (*Alnus glutinosa*) und gewöhnliche Robinie (*Robinia pseudoacacia*), sowie die in der Regel etwas langsamer wachsenden Arten gewöhnliche Platane (*Platanus acerifolia*), gemeine Esche (*Fraxinus excelsior*), Spitzahorn (*Acer platanoides*) und Stieleiche (*Quercus ro-*

bur), und des Weiteren die sehr schattentoleranten und langsamwüchsigen Arten Hainbuche (*Carpinus betulus*) und Rotbuche (*Fagus sylvatica*).

Bezüglich der untersuchten Verbindungstechniken kann zwischen drei Kategorien unterschieden werden. Erstens wurden Verbindungstechniken untersucht, bei denen die Pflanzen mit breiten, auf der Rinde aufliegen und dem Dickenwachstum nachgebenden Bändern zusammengehalten wurden. Zweitens wurden Techniken getestet, bei denen die Pflanzen mit dünnen, in der Regel nicht nachgebenden, sondern einwachsenden Seilen verbunden wurden. Und drittens kamen in den Untersuchungen Techniken zur Anwendung, bei denen die Pflanzen mit Schrauben zusammengehalten wurden, die die Holzkörper durchdringen. Sofern möglich und sinnvoll wurden mit allen Techniken bei allen Arten sowohl kreuzweise als auch parallele Verbindungen angelegt, wobei jeweils zwischen zwei und acht Pflanzen miteinander verbunden wurden.

Mit den gewählten Techniken konnten bei allen Arten bis auf Robinie in vielen Fällen Verwachsungen erzeugt werden. Die Neigung zur Verwachsungen scheint tendenziell mit der Wüchsigkeit zu- und mit dem Anteil bzw. dem Entwicklungsstadium zum Zeitpunkt des Verbindens vorhandener Abschlussgewebe (Korkschichten, Borke) abzunehmen. Sofern es gelang, die beschriebenen Verwachsungsprozesse zu initiieren, konnten zwischen den einzelnen Baumarten innerhalb des Beobachtungszeitraums kaum qualitative Unterschiede im Verwachsungsergebnis dokumentiert werden.

Die Arten unterscheiden sich jedoch sehr deutlich in ihrer Reaktion auf die verschiedenen Verbindungstechniken. Vor allem bei den Varianten mit Seilverbindungen konnte ein deutlicher Einfluss sowohl der Rinden- als auch der Holzanatomie nachgewiesen werden. Diese Techniken sind insbesondere bei Arten geeignet, die einen geringen Faseranteil in der Rinde haben (Borkentyp Schuppen-Steinzellborke oder keine Borkenbildung), da die Seile dann in die Rinde einschneiden können und anschließend rasch und ohne kritische Nebeneffekte einwachsen (Platane, Birke, Esche, Erle, Buche, Hainbuche). Bei Arten mit mehr Fasern in der Rinde (Borkentyp Schuppen-Faser-Borke) ist das Einwachsen der Seile demgegenüber deutlich behindert und es kommt häufiger zu Saftstau. Bei Arten, die darüber hinaus holzanatonisch ringporig strukturiert sind, konnte dann an der Verbindungsstelle sehr häufig ein extremes Anschwellen beobachtet werden (Esche, Eiche, Robinie). Diese Symptome wurden nicht nur als Anzeichen eines behinderten Assimialttransports in der Rinde, sondern auch als Konsequenz einer kritischen Störung des Wassertransports im Holz interpretiert. Seilverbindungen sind bei diesen Arten daher als ungeeignet anzusehen.

Bei den Varianten mit Schraubverbindungen war der Einfluss der Rindenanatomie eher gering, die Arten unterschieden sich jedoch sehr deutlich bezüglich der im Holzkörper verursachten Verfärbungen und Gewebestörungen. Diesbezüglich konnten aus der Baumpflege bekannte Erkenntnisse und Daten zur Wundheilung und zur Abschottung verletzter Gewebebereiche bei einigen Arten bestätigt werden. So reagierten beispielsweise die als schlecht abschottend bekannten Weiden auf die von der Schraube verursachte Verletzung mit sehr umfangreichen Verfärbungen und die Technik sollte daher hier wenn möglich nicht angewendet werden. Deutlich geringer waren beispielsweise die Verfärbungen bei der als gut abschottend bekannten Platane. Die mit Abstand geringsten Verfärbungen zeigte jedoch die Esche, die in der Literatur als eher schlecht abschottend beschrieben werden. Damit geben Literaturwerte, die in der Regel unter anderen Bedingungen ermittelt werden, hier lediglich erste Hinweise auf die Anwendbarkeit von Schraubverbindungen, die bei jeder Art experimentell zu verifizieren sind und daher nicht verallgemeinert werden können. Arten, bei denen Schraubverbindungen anwendbar sind, weisen ein großes baubotanisches Anwendungspotential auf, da die Verbindungstechnik viele praktische Vorteile in sich vereint (z. B. Schnelligkeit in der Anwendung und Verlässlichkeit).

Die Verbindungstechniken mit nachgebenden Verbindungstechniken verursachten bei keiner Art gravierende bzw. unvermeidliche negative Effekte. Allerdings entstanden meist auch nur wenige Verwachsungen. Aussagen über den Einfluss der Arteigenschaften sind hier auf Basis der Versuchsergebnisse bislang kaum möglich. Hierzu wären weitere Untersuchungen, insbesondere Messungen der auftretenden Wachstumsdrücke, notwendig. Dennoch legen die Ergebnisse nahe, dass diese Technik anwendungsreif weiterentwickelt werden könnte und sollte, da gezeigt werden konnte, dass einerseits durchaus Verwachsungen erzeugt werden können, während andererseits eine sehr hohe Pflanzenverträglichkeit gegeben ist.

Über diese Ergebnisse hinaus zeigten die begleitend durchgeführten Messungen des Dickenwachstums, dass sich heterogene Ausgangsbedingungen und insbesondere Konkurrenzsituationen negativ auf den Verwachsungserfolg auswirken. In der baubotanischen Praxis ist daher größten Wert auf die Homogenität des Pflanzenmaterials und eine möglichst geringe Pflanzendichte (Konkurrenz) zu legen, damit sich alle Pflanzen vital und gleichmäßig entwickeln können.

Insgesamt haben sich Platanen als besonders geeignet erwiesen, da bei dieser Art alle getesteten Verbindungstechniken anwendbar sind und rasch Verwachsungen entstehen. Ungeeignet scheinen insbesondere Robinien zu sein, die kaum miteinander verwachsen.

4 Entwurf und Realisierung eines prototypischen Bauwerks

4.1 Einleitung

In den beiden vorangegangenen Kapiteln wurde dargestellt, wie man Pflanzen als baubotanische Konstruktionsmaterialien beschreiben, ihre technischen Eigenschaften durch Veränderung der Wachstumsbedingungen beeinflussen und mehrere Pflanzen zu einer Konstruktion fügen kann. Im Folgenden werden nun der Entwurfsprozess und die bauliche Umsetzung des Projekts „baubotanischer Turm“ dargestellt, bei dem einige Erkenntnisse der bisher beschriebenen Untersuchungen praktisch angewendet wurden. Vor allem aber wird aufgezeigt, dass in der Baubotanik eben nicht nur mit Pflanzen konstruiert wird. Vielmehr werden Wachstumsprozesse zum integralen Bestandteil des Entwurfs.

In der Konsequenz unterscheidet sich der Entwurf eines baubotanischen Projekts grundsätzlich von dem eines gewöhnlichen Bauwerks, bei dem der Architekt letztendlich immer ein fertiges Gebäude plant und mit detailgenauen Zeichnungen die exakte Umsetzung seiner Vorstellungen vorgibt. An die Stelle des fertigen Gebäudes tritt in der Baubotanik der Entwurf von Zuständen, die zu einem bestimmten Zeitpunkt eintreten und für einen gewissen Zeitraum Bestand haben sollen.[344] Damit diese Zustände – die zunächst nicht mehr sind als Spekulationen – Realität werden, muss ein Entwicklungsprozess sowie der Ausgangspunkt dieses Prozesses entworfen werden. Deshalb ist ein baubotanischer Entwurf zum einen durch die präzise und detailgenaue Planung einer Konstruktion (Ausgangspunkt), zum anderen aber vor allem durch die spekulative, teils unscharfe Beschreibung erwünschter Entwicklungszustände geprägt.

Der Wachstums- bzw. Entwicklungsprozess kann nicht bestimmt bzw. unmittelbar durch Planung diktiert werden. Vielmehr unterliegt er einer Eigengesetzlichkeit, die aus der Genetik der Pflanzen und den Umweltfaktoren, die auf diese einwirken, resultiert. Im Entwurfsprozess wird die genetische Grundlage durch die Wahl einer Baumart[345] bestimmt, und die wesentlichen Umweltfaktoren bzw. Wachstumsbedingungen der einzelnen Pflanzen werden durch die Festlegung des Standorts, vor allem aber auch durch den Entwurf der Anfangsstruktur determiniert. Damit ist dann bereits ein Entwicklungspfad vorgezeichnet, der zwar durch Pflege – also steuernde Eingriffe in die Wachstumsbedingungen und die Struktur selbst – beeinflusst werden kann, prinzipiell jedoch durch die anfangs gesetzten Systembedingungen im Laufe der Zeit mehr oder weniger zwangsläufig zu bestimmten Entwicklungszuständen führt.[346]

Ausgehend von dieser Abhängigkeit zwischen Wachstumsprozess und Anfangsstruktur wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine iterative Vorgehensweise abgeleitet, die prototypisch für das Entwerfen baubotanischer Projekte stehen kann: Zunächst werden – aufbauend auf einer stark vereinfachten Grundannahme der Entwicklung – ein Anfangszustand und ein oder mehrere

---

[344] Man kann nie von einem Endzustand sprechen, da sich die Pflanzenstrukturen ständig weiterentwickeln, und zwar durch Wachstum als auch durch das Absterben von Teilen.

[345] Bzw. einer Sorte oder eines bestimmten Klons.

[346] Vgl. hierzu entsprechende Vorgehensweisen in den Forstwissenschaften, die auf Ansätzen der Systemtheorie basieren: PRETZSCH, H. 2002. *Grundlagen der Waldwachstumsforschung*, Berlin, Parey., S. 3f.

Entwicklungszustände entworfen bzw. skizziert. Anschließend wird überprüft, welche Wachstumsbedingungen aus der Anfangsstruktur resultieren und welche Konsequenzen sich daraus für die Entwicklung ergeben. Damit kann dann abgeschätzt werden, inwiefern und wann die gewünschten Entwicklungszustände erreicht werden. Sofern sich abzeichnet, dass zwischen Zielsetzung und Entwicklung ein Widerspruch besteht, müssen Anfangsstruktur und/oder Zielsetzung schrittweise so angepasst werden, dass eine plausible Übereinstimmung von Entwicklungsverlauf und zu erreichenden Entwicklungszuständen entsteht.[347]

Am Ende dieses Entwurfsprozesses stehen dann vier Dinge: Erstens präzise Zeichnungen der Anfangsstruktur,[348] in denen die aus pflanzlichen und technischen Bauelementen gebildete Konstruktion detailliert dargestellt wird. Zweitens Beschreibungen und Visualisierungen von Entwicklungszuständen, die erreicht werden sollen,[349] sowie drittens Analysen der Wachstumsbedingungen, anhand derer die Entwicklung abgeschätzt wird, sodass beurteilt werden kann, wann und unter welchen Voraussetzungen die angestrebten Zustände erreicht werden können. Und viertens wird ein Konzept zur weiteren Steuerung der Entwicklung durch Pflege entwickelt, das sich aus der Analyse der Wachstumsbedingungen und den Zielsetzungen ergibt.

Vor diesem Hintergrund werden im Folgenden die besonderen Wachstumsbedingungen von Pflanzen in baubotanischen Strukturen zunächst allgemein beschreiben und es wird erörtert, wie sich diese kurz- mittel- und langfristig auf die Entwicklung auswirken. Denn nur auf dieser Basis kann der iterative Entwurfsprozess überhaupt durchgespielt werden. Daran anschließend wird der baubotanische Turm, der auf dieser Basis entworfen wurde, vorgestellt. Das Projekt wurde im Juli 2009 als ein prototypisches Bauwerk realisiert, wobei neben ersten Erkenntnissen aus den Anzucht- und Verwachsungsversuchen (Kapitel 2 und 3) Ergebnisse weiterer Vorversuche zur Pflanzenaddition einflossen. Abschließend wurden die Wachstumsbedingungen der baubotanischen Struktur des Turms analysiert und es wurde versucht, die weitere Entwicklung zu prognostizieren sowie Möglichkeiten aufzuzeigen, wie in die Entwicklung entsprechend der im Entwurfsprozess festgelegten Zielsetzungen eingegriffen werden kann (Pflegekonzept).

4.2 Wachstumsbedingungen und Entwicklungsprozesse in baubotanischen Strukturen

Aus der Art und Weise, wie die Pflanzen einer baubotanischen Struktur angeordnet und miteinander verbunden werden, resultieren Wachstumsbedingungen, die die Entwicklung der einzelnen Pflanzen bzw. der verwachsenden Struktur direkt oder indirekt beeinflussen. Diese Wachstumsbedingungen – also die Umweltfaktoren, die auf jede einzelne Pflanze einwirken – können unterteilt werden in **Ressourcen**, die die Pflanze für das Wachstum benötigt, und in **Umweltreize**, die das Wachstumsmuster beeinflussen. In beiden Fällen ist für das baubotanische Entwerfen von Interesse, welche Pflanzen bzw. Abschnitte der Pflanzenstruktur wie stark wachsen und ob bzw. wann Pflanzen oder Pflanzenteile aufgrund der gegebenen Wachstumsbedingun-

---

[347] Der beschriebene iterative Prozess ist beim Entwerfen keineswegs unüblich, hier soll jedoch deutlich gemacht werden, dass botanische Gesetzmäßigkeiten (anstatt konstruktiver, raumbildender oder ökonomischer) entwurfsprägend werden.

[348] Inklusive der Beschreibung der aus ihr resultierenden Wachstumsbedingungen für die Pflanzen.

[349] Diese werden z. B. in Form eines Anforderungskatalogs bzw. einer abstrakteren Darstellung der räumlich-ästhetischen Eigenschaften beschrieben – wenn detailgenaue Visualisierungen oder Zeichnungen angefertigt werden, geben diese immer nur eine mögliche Variante unterschiedlicher, potentiell eintretender Entwicklungszustände wieder.

gen absterben könnten. Im Fokus der Betrachtung stehen dabei vor allem die miteinander verbundenen Triebabschnitte, die zu einer stabilen Konstruktion verwachsen sollen.

Die **Ressourcen**, die jeder einzelnen Pflanze in einer baubotanischen Struktur zur Verfügung stehen, werden unter anderem durch den **Wachstumsraum** begrenzt, der in einen Kronen- und einen Wurzelraum unterteilt werden kann. Der Kronenraum ist der von der Pflanze mit Blättern besetzte Raum und die wesentlichen Ressourcen sind hier das Licht und das CO_2 der Luft, die mittels der Photosynthese zur Energie- und „Baustoffgewinnung" genutzt werden. Der Wurzelraum ist der gewöhnlich unterirdische Raum, in dem die (Fein-)Wurzeln das Wasser und die Nährstoffe aufnehmen, die die Pflanze für Photosynthese und Wachstum benötigt.[350] In der Baubotanik wird vor allem der Kronenraum entwurfsbestimmend, denn der Umweltfaktor Licht stellt als gegebener Standortfaktor eine feste Größe dar, die insbesondere deshalb zu einem limitierenden Faktor wird, weil es bei der Bildung baubotanischer Strukturen zwangsläufig zu einer Überlagerung der Kronenräume kommt.[351] Daraus resultiert eine **Konkurrenz** um die knappe Ressource Licht, die das Wachstums der einzelnen Pflanzen begrenzt (Abschnitt 4.2.1). Demgegenüber kann die Schaffung geeigneter Wurzelräume als eine eher technische Aufgabe[352] betrachtet werden, die erst bei der konstruktiven Detailplaung entwurfsprägend wird (Abschnitt 4.4.5), dann jedoch eine nicht zu unterschätzende technologische Herausforderung darstellt.[353]

Die Rezeption von Umweltfaktoren als **Reize** dient Pflanzen dazu, ihr Wachstumsmuster so an die Umweltbedingungen anzupassen, dass die ihnen zur Verfügung stehenden Ressourcen möglichst effizient genutzt werden können. Bei der Bildung baubotanischer Strukturen werden einige Umweltreize in ihrer Wirkung spezifisch verändert, sodass mit einer entsprechenden Anpassung des Wachstumsmusters bzw. der „Ressourceninvestition" zu rechnen ist. Dies betrifft zum einen den **Gravitationsreiz**, dessen Rezeption der Pflanze eine Orientierung im Raum ermöglicht, und zum anderen **mechanische Reize**, die u. a. das Dickenwachstum beeinflussen. In baubotanischen Strukturen kommt es durch das Neigen und Biegen der Triebe zu gravitropen und gravimorphen Reaktionen (Abschnitt 4.2.2) und durch eine Veränderung des Lastfalls bzw. des mechanischen Systems zu einer Beeinflussung mechanischer Reize (Abschnitt 4.2.3).[354]

Für Bäume ist die Anpassung des Wachstums an mechanische Reize ein wichtiger Faktor, da sie auf Grund ihrer großen Höhe enormen Belastungen ausgesetzt sind und mit möglichst geringem Materialeinsatz eine Maximierung der Tragfähigkeit erreichen müssen. Darüber hinaus erfüllen Pflanzenachsen aber auch **Transportfunktionen**, die eine ausreichende Leitungskapazität erfordern. Deshalb gilt auch die Flussrate (beispielsweise von Wasser) in einer Achse als ein wichtiger, das Dickenwachstum beeinflussender Faktor. Wenn eine pflanzliche Achsenstruktur künstlich gebildet wird, wird die Grundgeometrie eines „Wegenetzes" vorgegeben, in dem –

---

[350] Weitere wichtige Wachstumsbedingungen wie z. B. die Temperatur werden hier zunächst nicht betrachtet, da sie in baubotanischen Strukturen nicht spezifisch verändert werden und deshalb zwar eine baupraktische, aber zunächst keine entwurfsrelevante Größe darstellen.

[351] Dichte Anordnung und z. B. kreuzweises oder paralleles Verbinden der Haupttriebe.

[352] Z. B. Wahl ausreichend großer Pflanzcontainer bei der Pflanzenaddition oder Schaffung geeigneter Wachstumsbedingungen im Erdreich durch Einbringen geeigneter Substrate; Optimierung der Wachstumsbedingungen und Vermeidung starker Konkurrenzbedingungen durch Wässerung und Düngung.

[353] Die Versorgung der Pflanzen mit Wasser und Nährstoffen bei der Pflanzenaddition ist eine technische und praktische Herausforderung, und aus der Anordnung von Wurzelräumen in der Luft resultieren enorme Anforderungen an die Stützstruktur.

[354] Auch das Licht ist ein relevanter Reiz (Phototropismus, Photomorphismus, vgl. Kapitel 2) Es wird hier, wie oben dargestellt, jedoch in erster Linie als Ressource betrachtet. Durch die besonderen Wachstumsbedingungen werden in der Regel keine phototropen Reaktionen ausgelöst, die für die Baubotanik spezifisch wären.

anders als in einem gewöhnlich wachsenden Baum – durch die Verwachsungen eine netzartige Struktur mit mehreren alternativen Transportwegen entsteht. Daher gilt es zu klären, wie sich diese Veränderung des Transportsystems – auch vor dem Hintergrund eines ebenfalls veränderten mechanischen Systems – auf das Dickenwachstum bzw. die Gesamtentwicklung auswirken (Abschnitt 4.2.4).

4.2.1 Konkurrenz und Biomasseproduktion

4.2.1.1 Self-Thinning in gewöhnlichen Baumbeständen

Mit dem Wachstum einer Pflanze nimmt die Masse lebender Gewebe kontinuierlich zu und die Stoffwechsel- und Wachstumsvorgänge benötigen eine ständig steigende Menge an Energie bzw. Assimilaten. Um diesen wachsenden Ressourcenbedarf zu decken, beansprucht die Pflanze – vor allem für die Photosynthese – einen immer größeren Raum. In einem Pflanzenbestand konkurrieren dann mit zunehmender Größe und Biomasse die einzelnen Individuen um den gleichen Raum, weshalb es zu einer Verknappung der Ressourcen kommt. Ab einer bestimmten Pflanzendichte können dann einzelne Pflanzen ihren Ressourcenbedarf nicht mehr decken und sterben deshalb ab. Die sich daraus ergebende Abnahme der Pflanzenzahl im Verlauf der Entwicklung von Pflanzenbeständen wird in den Forstwissenschaften als „Self-Thinning“ (Selbstdurchforstung) bezeichnet und stellt eine waldbaulich wichtige Größe dar (vgl. Pretzsch, 2000). Die hierzu vorliegenden Erkenntnisse können teilweise in die Baubotanik übertragen werden, um die Wirkungen von Konkurrenzbedingungen zu beschreiben. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Anordnung der Pflanzen weitaus komplexer ist und die Verwachsung der Pflanzen im Laufe der Zeit zu einer Veränderung der Betrachtungsebene führt.

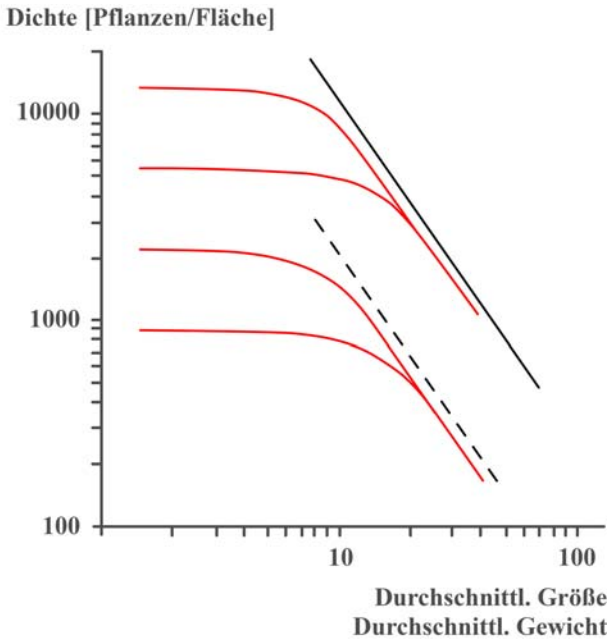


Abbildung 105 Selbstdurchforstungslinien (nach Pretzsch, 2000; doppelt-logarithmisches Koordinatensystem). Sobald die Pflanzen eines Bestandes einer bestimmten Pflanzendichte eine kritische Biomasse erreicht haben, nimmt die Pflanzendichte entsprechend der Selbstdurchforstungslinie (schwarz) ab. Die gestrichelte Linie repräsentiert eine Selbstdurchforstungslinie bei suboptimalen Standortbedingungen.

Der dem Prinzip der Selbstdurchforstung zugrundeliegende Zusammenhang zwischen der Größe bzw. Masse der einzelnen Pflanzen und der Pflanzendichte ist in Abbildung 105 schematisch dargestellt. Die von links oben nach rechts unten verlaufenden Geraden werden als Selbstdurchforstungslinien bezeichnet und markieren die für eine Art maximale Pflanzendichte.[355] Die obere Linie (ausgezogene Linie) markiert die Grenzlinie unter optimalen Standortbedingungen, die untere Linie (gestrichelt) charakterisiert einen Bestand unter suboptimalen Wachstumsbedingungen. In beiden Fällen zeigen die roten Linien, wie sich die Entwicklung unterschiedlicher Pflanzenbestände an die Selbstdurchforstungslinie angleicht, sobald ausgehend von einer anfänglich gegebenen Pflanzendichte eine kritische Biomasse der Einzelpflanzen erreicht wird.

Die maximal mögliche Dichte ist wie dargestellt zwar von den Standortfaktoren und auch z. B. der Baumart abhängig, die Steigung der Selbstdurchforstungslinie ist jedoch für fast alle Pflanzenbestände so gut wie identisch. Sie liegt im doppelt logarithmischen Koordinatensystem bezogen auf die Masse bzw. das Volumen der Pflanzen bei -3/2 (sogenante Yoda-Regel nach Yoda et al., 1963). Diese Steigung ergibt sich überraschend einfach aus der Betrachtung der geometrischen bzw. stereometrischen Zusammenhänge in Pflanzenbeständen: In Abbildung 106 links ist ein Ausschnitt eines Waldes mit Kronen- und Wurzelräumen dargestellt, der die räumliche Situation relativ exakt wiedergibt. Da jedoch der gesamte Stammbereich nicht mit Blättern besetzt ist und deshalb eigentlich nicht zum Kronenraum gehört, lässt sich die Situation auch deutlich einfacher darstellen, indem Kronen- und Wurzelraum jeweils als Halbkugeln betrachtet werden (Abbildung 106 rechts). Mit zunehmender Grundfläche der Kugeln steigt deren Volumen mit einer Progression von 3/2 an (stereometrische Beziehung).

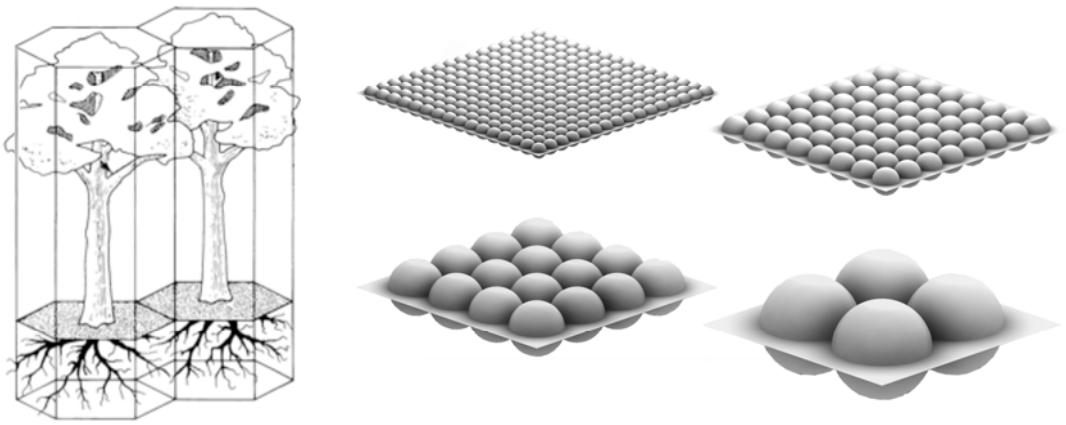


Abbildung 106 Links: Darstellung der Raumverhältnisse in einem Baumbestand (nach Norberg 1988, S. 224, verändert). Rechts: Vereinfachte Darstellung der räumlichen Verhältnisse und Abnahme der Pflanzenzahl mit zunehmender Größe der Einzelvolumen (stereometrische Beziehung, nach Pretzsch, 2000)

Gleichzeitig können auf einer gegebenen Grundfläche immer weniger Kugeln untergebracht werden, und die Anzahl der Kugeln pro Grundflächeneinheit nimmt entsprechend mit einer Progression von -3/2 ab.[356] Nach Pretzsch (2000) kann davon ausgegangen werden, dass die

[355] -bei gegebener Größe bzw. bei gegebenem Gewicht pro Pflanze im gleichaltrigen Reinbestand.

[356] Vgl. hierzu auch: THOMPSON, D. A. W. 1961. *On Growth and Form: The Complete Revised Edition,* Cambridge, Cambridge University Press.

Masse eines Baumes proportional zu dem von ihm besetzen Raum ist, sodass sich für die Pflanzendichte-Masse-Beziehung die gleiche Steigung der Selbstdurchforstungslinie von -3/2 ergibt.[357] Diese rein geometrisch hergeleiteten Beziehungen stehen in sehr guter Übereinstimmung mit empirischen Werten. Da sich in der forstlichen Praxis die Biomasse eines Baumes jedoch relativ schwer bestimmen lässt, wird ersatzweise der Stammdurchmesser in 1,3 Metern Höhe herangezogen, der weitaus einfacher bestimmt werden kann. Auf der Basis allometrischer Zusammenhänge zwischen der oberirdischen Biomasse und dem Stammdurchmesser[358] ergibt sich eine vergleichbare Selbstdurchforstungslinie, wobei sich jedoch eine leicht abweichende Steigung von ca. -1,6 ergibt (Selbstdurchforstungsregel nach Reineke, 1933).

4.2.1.2 Übertragung auf baubotanische Strukturen

Diese Zusammenhänge sind für das Entwerfen baubotanischer Strukturen in mehrerlei Hinsicht bemerkenswert. Zunächst einmal wird klar, dass im Prinzip bei jeder Struktur immer irgendwann der gleiche Grenzwert der Pflanzendichte erreicht wird, und zwar unabhängig davon, ob bei der Anfangsstruktur mit vielen oder wenigen Pflanzen (bzw. mit einer großen oder kleinen Pflanzendichte) begonnen wurde. Des Weiteren erscheint es durchaus möglich, diese Grenzwerte für baubotanische Strukturen abzuschätzen, indem sie mit Baumbeständen verglichen werden, die ähnliche Rahmenbedingungen aufweisen (Baumart, geografische Lage, Nährstoffversorgung), wobei sich jedoch das methodische Problem stellt, dass nicht mehr die Grundfläche als Bezugsgröße herangezogen werden kann.[359] Am Beispiel des Turmes wird diesbezüglich in Abschnitt 4.5.1.2 versucht, über die Berechnung von Kronenvolumina Werte zu gewinnen, die einen Vergleich mit gewöhnlichen Pflanzen bzw. Baumbeständen zulassen. Damit lässt sich dann abschätzen, welche Entwicklung die Anfangsdichte zulässt und wann es zwangsläufig zum Absterben von einzelnen Pflanzen kommen muss.[360]

Ein weiteres methodisches Problem besteht darin, dass im Verlauf der Entwicklung durch Verwachsungen aus mehreren Pflanzen eine physiologische Einheit entsteht. Rechnerisch kommt es so zu einer plötzlichen Abnahme der Pflanzenzahl, während sich die Biomasse des neu entstandenen Organismus aus der Addition der Massen der verschmolzenen Einzelindividuen ergibt. Hier muss gefragt werden, ob die verwachsenen Pflanzen in den Konkurrenzbetrachtungen und Biomasseberechnungen tatsächlich als eine Pflanze oder nach wie vor als mehrere Pflanzen anzusehen sind. Dies ist zum einen davon abhängig, inwiefern sich die Verteilung der Assimilate verändert, die jetzt über ursprüngliche Individuengrenzen hinweg transportiert werden können, und zum anderen davon, ob sich der Ressourcenbedarf der Pflanzen durch das Verwachsen insgesamt verändert. Die zuletzt genannte Frage des Ressourcenbedarfs muss detailliert betrachtet werden, da sich – je nachdem wie die Pflanzen verwachsen bzw. miteinander verbunden wurden – unterschiedliche Konsequenzen ergeben.[361]

Der Ressourcenbedarf einer Pflanze ist in erster Näherung proportional zu der Masse lebender Gewebe. Und da bei allen Pflanzenachsen die lebenden Gewebe hauptsächlich im oberflächen-

---

[357] Dies gilt mit relativ guter Näherung auch für die in Abbildung 106 links dargestellten Waldbestände, obwohl die Annahme der halbkugelförmigen Wachstumsräume hier eigentlich nicht zutreffend ist.

[358] In den Forstwissenschaften ist es üblich, die Holzmasse eines Baumes anhand des Durchmesser in 1,3 m Höhe (sogenannten Brusthöhendurchmessers BHD) zu berechnen.

[359] Insbesondere bei auf dem Ansatz der Pflanzenaddition basierenden Strukturen.

[360] Bei der Übertragung ergibt sich darüber hinaus jedoch noch das Problem, dass die Beschreibung baubotanischer Strukturen eine größere räumliche und zeitliche Auflösung verlangt, als dies in den Forstwissenschaften üblich ist.

[361] Dabei verändert sich die Gesamtsumme der zur Verfügung stehenden Ressourcen natürlich nicht.

nahen Bereich liegen (Rinde und Kambium), kann vereinfacht angenommen werden, dass der Ressourcenbedarf einer Pflanzenachse in etwa proportional zu deren Oberfläche ist. Größere Bäume mit einem dickeren Stamm verbrauchen deshalb weniger Energie als viele kleine der gleichen Gesamtmasse, da letztere über eine deutlich größere Oberfläche verfügen. Werden Pflanzenachsen über längere Strecken parallel miteinander verbunden und verwachsen zu einem einzigen, in etwa runden Stamm, entspricht die Oberfläche derjenigen einer Einzelpflanze des gleichen Durchmessers. Da aus diesen Gründen auch der Ressourcenbedarf dem einer einzigen Pflanze entspricht, sind die verwachsenen Pflanzen in den Konkurrenzbetrachtungen wie eine Pflanze anzusehen (Abbildung 107 rechts). Werden Pflanzen jedoch nur punktuell (z. B. kreuzweise) verbunden, verändern sich die Masse-Oberfläche-Verhältnisse und damit auch der Ressourcenbedarf nicht wesentlich. Für die Berechnung der Pflanzendichte bzw. Pflanzenzahl müssen derart verwachsene Pflanzen daher weiter als Einzelpflanzen betrachtet werden (Abbildung 107 Mitte).

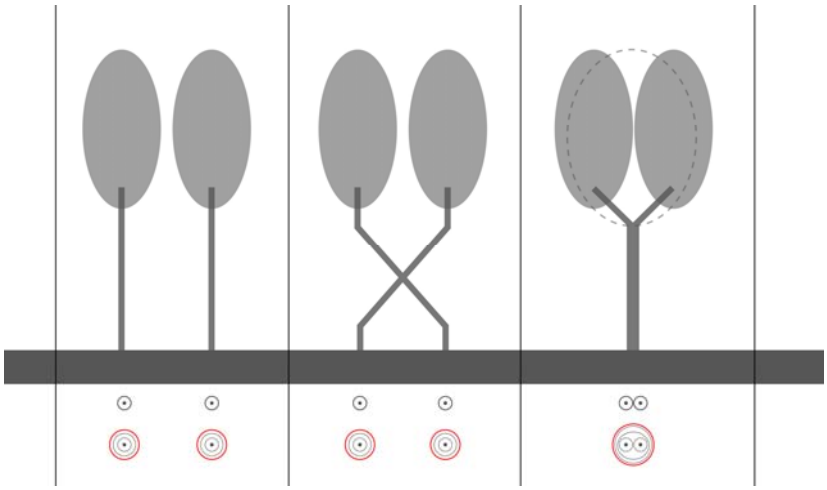


Abbildung 107 Konsequenzen von Verwachsungen für Konkurrenzbetrachtungen: Durch kreuzweises Verbinden verändert sich das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen und damit der Ressourcenbedarf im Vergleich zu zwei Einzelpflanzen nicht. Demgegenüber haben parallel verwachsene Pflanzen bei gleicher Querschnittsfläche eine geringere Oberfläche und damit eher den Ressourcenbedarf einer Einzelpflanze der gleichen Gesamtmasse.

Bei dieser Betrachtung ist jedoch noch nicht berücksichtigt, dass Assimilate über die Verwachsungsstelle hinweg transportiert werden können und dass deshalb eigentlich nicht mehr von einer Konkurrenz zwischen zwei Individuen gesprochen werden kann. In diesem Zusammenhang sei insbesondere auf den Abschnitt 4.2.4 verwiesen, sowie darauf, dass auch innerhalb eines Baumes unterschiedliche Bereiche bzw. Stoffwechselvorgänge in durchaus vergleichbarer Art und Weise um eine begrenzte Menge von Ressourcen (in diesem Fall Assimilate) konkurrieren. Dies bestätigen auch Untersuchungen von Waldbeständen mit Wurzelverwachsungen, bei denen es dazu kommt, dass schwächeren Individuen über die Verwachsungsstelle Wasser und Nährstoffe entzogen werden und deren oberirdische Teile daher schneller absterben, während das Wurzelsystem von der stärkeren Pflanzen „assimiliert“ wird (Lyr 1992, S. 432). Vor diesem Hintergrund wird in Abschnitt 4.5.3.2 die (hypothetisch) vollständig verwachsene Struktur des Turmes betrachtet und dabei untersucht, ab welchem Durchmesser der verwachsenen Achsen mit dem Absterben einzelner Achsenabschnitte zu rechnen ist.

4.2.2 Gravitrope und gravimorphe Reaktionen

4.2.2.1 Apikale Dominanz und Kontrolle

In einem frei wachsenden Baum zeigen alle Triebe bzw. Triebabschnitte abhängig von ihrer relativen Lage im Gesamtsystem einen bestimmten Winkel gegenüber der Vertikalen und weisen eine jeweils typische Wachstumsgeschwindigkeit auf: Der in der Regel senkrecht stehende Haupttrieb zeigt den größten Zuwachs, während die ihm entspringenden Seitentriebe (1. Verzweigungsebene) mehr oder weniger stark gegenüber der Vertikalen geneigt sind und in der Regel langsamer wachsen. Diese Abnahme der Wachstumsgeschwindigkeit setzt sich in den weiteren Verzweigungsebenen fort, wobei die Zweige tendenziell umso stärker von der vertikalen Wachstumsrichtung abweichen, je weiter sie von der Spitze des Haupttriebs entfernt liegen bzw. je tiefer sie in der hierarchischen Struktur der Verzweigungsebenen stehen.

Der dieser Ordnungsstruktur zugrunde liegende Steuermechanismus basiert im wesentlichen auf einer hormonellen Unterdrückung der Seitentriebe durch den Haupttrieb und wird als apikale Kontrolle bezeichnet. Er ermöglicht es Bäumen, möglichst rasch und effizient einen möglichst großen Kronenraum mit Ästen bzw. Blättern zu besetzen und gleichzeitig an Höhe zu gewinnen, um potentiellen Konkurrenten „davonzuwachsen“.[362] Ein ähnlicher Mechanismus, der als apikale Kontrolle bezeichnet wird, regelt in vergleichbarer Art und Weise, ob bzw. welche Seitenknospen überhaupt austreiben: In der Regel wird das Austreiben der Seitenknospen durch den wachsenden Hauptrieb im ersten Wachstumsjahr vollständig unterdrückt, im zweiten Jahr treiben dann meist die der Triebspitze am nächsten stehenden Knospen aus, während die basalen Knospen „schlafend“ bleiben. Aus diesem Muster resultiert der für die meisten Baumarten typische, mehr oder weniger stockwerkartige Aufbau der Baumkrone (Abbildung 108, vgl. u. a. Brown, 1967).

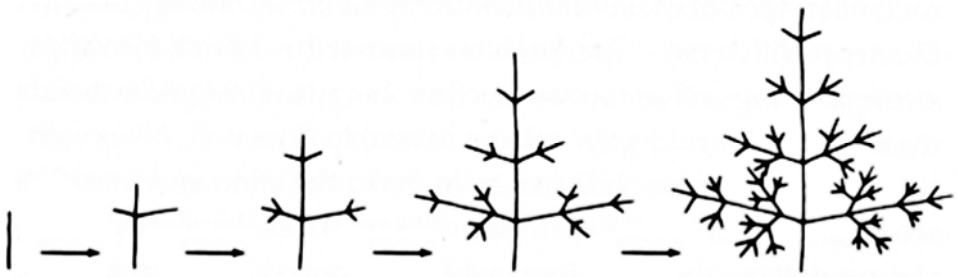


Abbildung 108 Schematische Darstellung des Verzweigungsmusters von Bäumen. Zu beachten sind insbesondere die Längen der Einzelnen Triebe. (Wilson 1984, S. 12)

Der Neigungswinkel und die Wachstumsgeschwindigkeit eines Triebabschnitts sowie die Entwicklung der Seitenknospen können demnach als ein Gleichgewichtszustand angesehen werden, der aus den korrelativen Hemmungen umgebender Triebabschnitte resultiert. Sobald Triebe entfernt oder in ihrem Neigungswinkel verändert werden, wird dieser Gleichgewichtszustand für alle direkt oder auch indirekt betroffenen Triebabschnitte gestört. In der Folge versucht die

[362] Zur Anpassung dieses Verzeigungsmusters an Umweltbedingungen wie z. B- Lichtmangel oder Konkurrenzsituationen siehe Schattenfluchtreaktion Abschnitt 2.1.2.

Pflanze durch geotrope und geomorphe Reaktionen, einen neuen Gleichgewichtszustand zu erreichen. Geotrope Reaktionen sind Wachstumsbewegungen, bei denen sich der Neigungswinkel eines Triebes durch die Bildung sogenannten Reaktionsholzes verändert – beispielsweise indem sich ein waagrecht gelegter Haupttrieb allmählich wieder aufrichtet, oder auch indem sich ein künstlich nach oben gebogener Seitenast entsprechend seiner Gleichgewichtslage wieder nach unten biegt. Demgegenüber sind geomorphe Reaktionen Veränderungen des Wachstums- bzw. Verzweigungsmusters – beispielsweise indem schlafende Knospen austreiben oder künstlich aufgerichtete Seitentriebe apikale Kontrolle über andere Triebe erlangen und so selbst zum Leittrieb werden.

4.2.2.2 Veränderung des Verzweigungsmusters durch Neigen und Biegen

Wenn bei der Bildung baubotanischer Strukturen Triebe – in der Regel unverzweigte Haupttriebe – gebogen und/oder aus ihrer vertikalen Wachstumsrichtung geneigt werden, ist mit derartigen geomorphen und geotropen Reaktionen zu rechnen. Geotrope Reaktionen sind dabei vermutlich von eher sekundärer Bedeutung, da die Pflanzen in ihrer Lage fixiert werden und einige Untersuchungen den Schluss nahelegen, dass Pflanzen unter solchen Bedingungen die Bildung von Reaktionsholz nach einiger Zeit einstellen.[363] Von größerer Bedeutung scheint zu sein, wie sich das Neigen und Biegen auf das Verzweigungsmuster und – oft eine Konsequenz daraus – auf das Dickenwachstum der zu einer künstlichen Struktur verbundenen Pflanzen auswirkt.

Zu diesem Themenbereich liegt eine Vielzahl von Untersuchungen vor, da der Einfluss unterschiedlicher Neigungswinkel auf das Wachstum Botaniker seit langem fasziniert hat und die Konsequenzen geomorpher Reaktionen auch traditionell im Gartenbau genutzt werden (z. B. Zimmermann and Brown 1971, S. 152ff). So ist es eine im Obstbau etablierte Methode, durch Herunterbiegen von Zweigen das vegetative Wachstum zu verringern und die Blütenbildung zu fördern. McLean (1940) beobachtete beispielsweise, dass das vegetative Wachstum junger Bäume anhält, wenn sie zu einem Kreis gebogen werden und bereits Vöchting (1878) stellte an Weidenästen fest, dass der Neigungswinkel deutlich beeinflusste, welche Knospen austrieben und welche schlafend bleiben.

In jüngerer Zeit haben Leakey and Longman (1986) den Einfluss unterschiedlicher Neigungswinkel auf die Orientierung und Länge von Seitentrieben detaillierter untersucht.[364] In Ihren Versuchen dokumentierten sie, dass bei vertikal ausgerichteten Pflanzen immer der kräftigste, vertikal orientierte Trieb aus der obersten Knospe entstand, während sich bei horizontal ausgerichteten Pflanzen in der Nähe der Basis vertikale Triebe entwickelten und die apikalen Austriebe stark unterdrückt und fast waagrecht geneigt waren. Bei 45° geneigten Pflanzen entsprach das Muster der Wüchsigkeit bzw. der Trieblängen dem einer Zwischenstellung zwischen den

---

[363] Vgl.: ALMERAS, T. 2001. Acquisition de la forme chez des axes ligneux d'un an de trois variétés d'abricotier : confrontation de données expérimentales à un modèle biomécanique. PhD Thesis. Montpellier: Agro-Montpellier, Univ. In den Versuchen von Alméras wurden normalerweise fast vertikal aufrecht wachsende Seitentriebe waagrecht gebogen und an dieser Stelle fixiert. Nach 3 Jahren wurden Querschnitte durch die Äste angefertigt. Es zeigte sich, dass nach einem Jahr in den waagrechten Ästen nicht mehr Reaktionsholzbildung als in Kontrollästen auftrat. Dies wurde dahingehend interpretiert, dass der waagrecht fixierte Ast aufgrund seines geringeren Längenwachstums (siehe oben) im hierarchischen System der apikalen Kontrolle seine ursprünglich Stellung verliert und er nach einiger Zeit von anderen Seitentrieben derart dominiert wird, dass die waagrechte Stellung seiner Gleichgewichtsposition entspricht.

[364] Die Untersuchungen wurden an einjährigen, ca. 1 m großen, bewurzelten Stecklingen des tropischen Laubbaums *Triplochiton sceleroxylon K. Schum*., bei denen die Triebspitzen entfernt worden waren, durchgeführt.

horizontal und den vertikal ausgerichteten Pflanzen. Demnach wird das Verteilungsmuster der Trieblängen mit zunehmender Abweichung der Mutter- bzw. Hauptachse von der Vertikalen zunächst abgeschwächt und dann quasi invertiert. Dies bedeutet auch, dass mit zunehmendem Neigungswinkel die Wahrscheinlichkeit zunimmt, dass sich einer der basisnahen Austriebe durchsetzt, zum neuen Führungstrieb wird und alle anderen Triebe unterdrückt (= apikale Kontrolle auf sie ausübt).

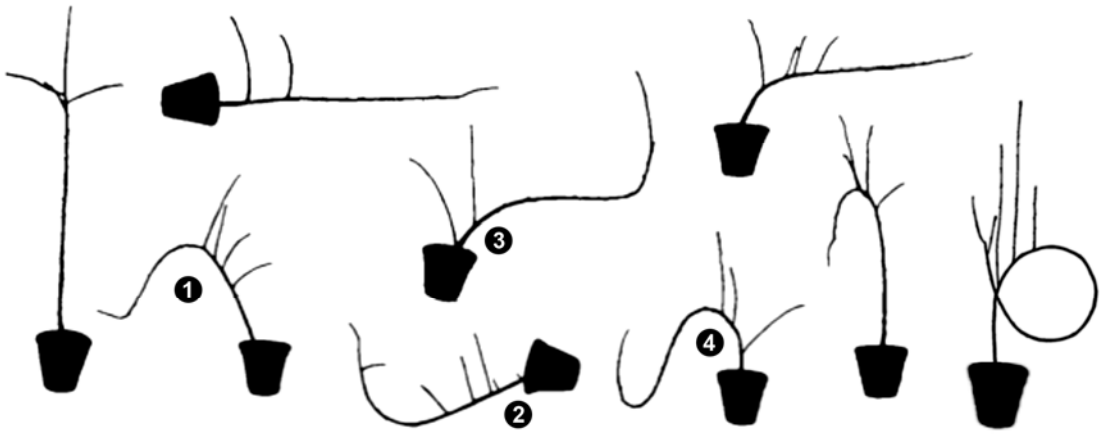


Abbildung 109 Veränderung der Verzweigungsmuster durch Neigen und Biegen. Weitere Erklärungen siehe Text. (nach Wareing und Nasr, 1961, verändert)

Wareing and Nasr (1961) kamen bei geneigten Trieben zu ähnlichen Ergebnissen[365] und untersuchten darüber hinaus den Einfluss unterschiedler Biegungsformen auf das Verzweigungsmuster: In ihren Versuchen stellten sie fest, dass Pflanzen, die derart zu einen Bogen (Halbkreis) gebogen wurde, dass der basale Bereich schräg nach oben und die Triebspitze vertikal nach unten orientiert war, ein äußerst geringes Längenwachstum des apikalen Triebs zeigten (- 71% im Vergleich zum aufrechten Wuchs) und der Austrieb ausschließlich im basalen Bereich stattfand. Die längsten Triebe befanden sich jedoch am oberen Ende des basalen Bereichs in der Nähe des höchsten Punkts des Bogens (Abbildung 109-1). Ein in etwa vergleichbares Ergebnis wurde erzielt, wenn die Pflanzen bogenförmig in entgegengesetzter Richtung gebogen wurden, sodass der basale Bereich schräg nach unten und die Triebspitzen vertikal nach oben ausgerichtet war. Die längsten Austriebe waren nun unmittelbar in der Nähe der Basis zu finden und das Wachstum des Apikaltriebs war nicht ganz so schwach wie bei der erstgenanten Bogenform (- 50%; Abbildung 109-2). Wenn nur der oberste Bereich eines vertikal ausgerichteten Triebes nach unten umgebogen wurde, fand der meiste Austrieb am oberen Ende des vertikalen Abschnitts bzw. an der Spitze des Bogens statt. Und wenn waagrecht umgebogene Pflanzen an der Triebspitze wieder vertikal nach oben gebogen wurden, wuchs der Spitzentrieb zwar immer noch deutlich weniger als bei den vertikalen Pflanzen (- 36%), jedoch deutlich mehr als bei den

[365] Eine waagrechte Ausrichtung eines vertikal gewachsenen Hauptriebs führte hier beispielsweise zu einer Reduktion des Längenwachstums um ca. 50%. Seitentriebe entstanden bei diesen Versuchen meist nur im basalen Bereich und die stärksten Austriebe entwickeln ein größeres Wachstum als die jeweiligen Apikaltriebe. Die Untersuchungen wurden an unterschiedlichen Apfel- Kirsch- Pflaumenarten durchgeführt.

komplett horizontal gebogenen (+61%; Abbildung 109-3).[366] Ähnliches konnte bei bogenförmig gekrümmten Pflanzen beobachtet werden, deren Triebspitzen nach oben gebogen worden waren (Abbildung 109-4).

Aus ihren Ergebnissen ziehen die Autoren folgende Schlussfolgerung: Bei gebogenen Achsen treiben Seitenknospen an dem basis-nächsten aber gleichzeitig höchsten Punkt aus, an dem die Hauptachse aus der Vertikalen ausgelenkt wird. Bei allen Halb- und Vollkreisbögen (theoretisch aber auch bei wellenförmig gebogenen Achsen), bei denen die Achse an der Basis nach oben gerichtet ist, ist dies immer der erste Scheitel- bzw. Hochpunkt. Bei den gleichen Formen, bei denen die Basis jedoch nach unten gerichtet ist, ist dies der Punkt unmittelbar an der Basis. Zu dieser Stelle werden in der weiteren Entwicklung dann jeweils auch die meisten Nährstoffe geleitet und es kommt zum größten Längenwachstum. Das Austreiben von Seitenknospen geneigter oder gebogener Achsen kann in geringem Umfang durch die Orientierung des apikalen Bereichs des Muttertriebs beeinflusst werden, die Orientierung aller anderen Achsenabschnitte scheint jedoch mindestens genauso wichtig zu sein.

4.2.2.3 Konsequenzen für das Entwerfen baubotanischer Strukturen

Für die Entwicklung baubotanischer Strukturen sind die durch das Neigen der Achsen hervorgerufenen morphologischen Veränderungen durchaus kritisch, denn bei starker Neigung oder Biegung ist wie dargestellt mit der Entstehung eines apikal dominierenden „Führungstriebes“ im basalen Bereich der Pflanzen zu rechnen.[367] In der Folge würden die zur baubotanischen Struktur gefügten Achsenabschnitte oberhalb dieses Triebes im Wachstum unterdrückt werden, sodass sie weniger Dickenwachstum zeigen und langfristig sogar absterben können. Das bedeutet, dass mit zunehmendem Neigungswinkel (Abweichung von der Vertikalen) bzw. mit entsprechenden Biegungen (s. o.) eine Entwicklungstendenz ausgelöst wird, die im Wiederspruch zu dem gewünschten Entwicklungsziel steht. Dieser Tendenz kann dann nur mit Pflege – Entfernen unerwünschter und Fördern erwünschter Leittriebe – begegnet werden. Dabei gilt jedoch immer, dass der Kontroll- und Pflegeaufwand zunimmt, je stärker der natürliche Entwicklungstrend von der gewünschten Entwicklung abweicht.

Aus diesen Überlegungen ergibt sich auch, dass das Dickenwachstum stark geneigter Triebe allein schon deshalb immer geringer ist als das schwach geneigter, da aufgrund der notwendigen Pflege regelmäßig große Teile der Blattmasse entfernt werden müssen, sodass weniger Biomasse gebildet werden kann. Hier ist ferner zu bedenken, dass der Schnitt aller Pflanzen an die am stärksten zu schneidende Pflanze angepasst werden muss, da die stark geschnittene Pflanze ansonsten aufgrund von Konkurrenzeffekten rasch abstirbt (s. o.). Dadurch wird die gesamte Entwicklung durch die aufgrund ihrer Lage bzw. ihres Neigungswinkels am langsamsten wachsende Pflanze determiniert.

---

[366] Das Austriebsmuster wurde durch das Aufrichten der Triebspitze jedoch nur wenig verändert und entsprach in etwa dem der komplett waagrecht gebogenen Triebe, wobei in geringem Umfang auch Seitentriebe im Bereich der Triebspitze zu beobachten waren

[367] Die dargestellten Untersuchungen geben zunächst nur die Reaktionen der jeweils untersuchten Baumarten wieder, die bei anderen Arten – je nach Ausprägung der apikalen Kontrolle und Dominanz – abweichen können. Dennoch können sie als bei Laubbäumen allgemeingültige Prinzipien bzw. Tendenzen angesehen werden, die auf das Entwerfen baubotanischer Strukturen zumindest qualitativ übertragen werden können. Im Verlauf des Verwachsungsprozesses ist jedoch zu bedenken, dass sich die auf Transportprozessen von Phytohormonen basierenden Steuermechanismen verändern, sobald Hormone an den Verwachsungsstellen über ursprüngliche Individuengrenzen hinweg ausgetauscht werden können.

Vor diesem Hintergrund kann des Weiteren davon ausgegangen werden, dass mit zunehmenden Neigungswinkeln, aber auch mit zunehmenden Unterschieden in den Neigungswinkeln (selbst bei optimaler Pflege) die Wahrscheinlichkeit größer wird, dass das gewünschte Entwicklungsziel verfehlt wird, weil Achsenabschnitte nur sehr schwach wachsen oder absterben. Aus diesen Zusammenhängen lassen sich allgemeine Schlussfolgerungen ableiten: Bei Strukturen, die eine horizontale Distanz überspannen (z. B. „Dach“ oder „Brücke“), müssen zwangsläufig viele Achsenabschnitte stark geneigt sein oder sogar waagrecht oder nach unten geneigt verlaufen. Derartige Strukturen sind daher schwieriger und in ihrer Entstehung langwieriger als vertikal ausgerichtete Strukturen, bei denen es viel einfacher möglich ist, die Achsen nur moderat zu neigen und in etwa gleiche Neigungswinkel der einzelnen Pflanzen einzuhalten.[368] Insgesamt besteht hier jedoch noch ein größerer Forschungsbedarf, da die Reaktion unterschiedlicher Baumarten im Detail untersucht und unter verschiedenen Wachstumsbedingungen quantifiziert werden müsste.

4.2.3 Mechanische Reizungen

4.2.3.1 Adaptives Dickenwachstum bei Bäumen

Dass mechanische Reize das Wachstum von Bäumen entscheidend beeinflussen, ist vor allem in der Forstbotanik seit Langem bekannt. Bereits 1893 stellte Metzer die These auf, dass das Wachstum eines Baumes bestimmt ist „von dem Bedürfnis des Baumes nach mechanischer Festigkeit“ und dass der Baumstamm deshalb ein „Träger gleichen [mechanischen] Widerstandes“ sei.[369] An diese frühen Arbeiten anknüpfende Forschungsprojekte belegen in einer Vielzahl von Experimenten, dass zwischen dem Wachstum einer Pflanze und ihrer mechanischen Belastung deutliche Wechselwirkungen bestehen. Die Ergebnisse weichen zwar im Detail voneinander ab, es kann jedoch allgemein festgehalten werden, dass das Durchmesserwachstum einer Achse bei verstärkter mechanischer Reizung zunimmt.[370] Mattheck entwickelte die Ansätze von Metzger zu dem „Axiom der Konstanten Spannung“ weiter und untersuchte darüber hinaus auch die Anpassung inneren Strukturen (z. B. Faserverlauf) an mechanische Anforderungen (Mattheck, 1995; Mattheck und Kubler, 1997).[371]

Die Stämme, Äste und Zweige eines Baumes werden durch ihr Eigengewicht, zusätzliche Auflasten (z. B. Schnee) und Wind beansprucht und können mechanisch als frei schwingende, an einem Ende eingespannte Träger beschrieben werden. Unter diesen in der natürlichen Umgebung auftretenden Belastungen dominieren schon bei geringen Windgeschwindigkeiten die aus den Windkräften resultierende Biegespannungen, die auch den größten Einfluss auf das Dickenwachstum haben (Sloboda und Gaffrey 1999, S. 6). Torsionsbelastungen führen ebenfalls zu erhöhtem radialen Wachstum (Quirk et al., 1975), während Druck (Quirk and Freese, 1976a) oder Vibration (Quirk and Freese, 1976b) keinen signifikanten Einfluss haben. Lediglich bei

---

[368] Die in Abschnitt 1.3.1.2 erwähnten Brücken aus Ficus-Luftwurzeln unterliegen dieser Regel vermutlich nicht, da die Luftwurzeln offenbar so gut wie keine geomorphen Reaktionen zeigen.

[369] METZGER, K. 1893. Der Wind als maßgeblicher Faktor für das Wachsthum der Bäume. Mündener forstl. Hefte. Zitiert nach BÜSGEN, M., MÜNCH, E. 1927. *Bau und Leben unserer Waldbäume,* Jena, Verlag Gustav Fischer., S. 164

[370] Siehe hierzu die Zusammenfassung und Diskussion entsprechender Forschungsergebnisse in MITCHELL, C. A. & MYERS, P. N. 1995. Mechanical Stress Regulation of Plant Growth and Development. *Horticultural Reviews,* 17**,** 1 - 42.

[371] Neben den beschriebenen mechanischen Reizungen reagieren Pflanzen z. B. auch auf Berührungsreize (Thigmomorphogenese) oder auch das Schütteln der gesamten Pflanze. Beides führt in der Regel zu einer Reduktion des Längenwachstums. Vgl. Ibid.

extrem schlanken Bäumen, die z. B. durch Schnee eine zusätzliche Auflast bekommen, kann es vorkommen, dass durch kritische Knicklasten Biegespannungen aus Druckbeanspruchung Bedeutung gewinnen (Tirén, 1928; Marsch, 1989).[372]

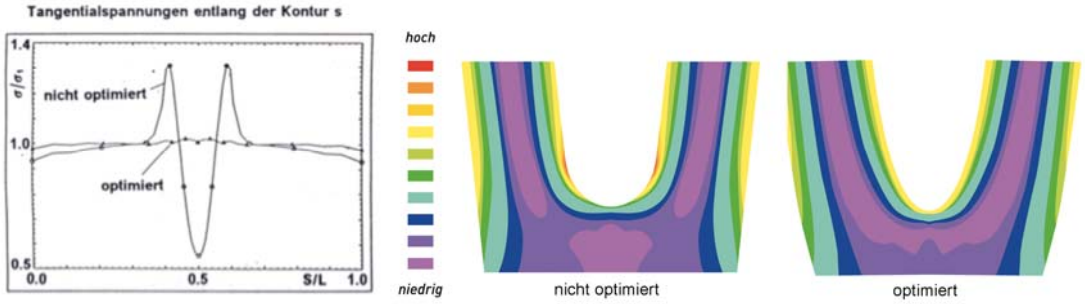


Abbildung 110 Reduktion der an der Oberfläche auftretenden Spannungen durch adaptives Dickenwachstum nach dem „Axiom der konstanten Spannung“ (Mattheck, 2006).

4.2.3.2 Mechanische Reize in baubotanischen Strukturen

Ausgehend von dem beschriebenen „Axiom der konstanten Spannung“ (Mattheck, 1995) wurde zunächst die Hypothese entwickelt, dass die zu baubotanischen Tragwerken verbunden Pflanzenachsen ihr Dickenwachstum adaptiv an die jeweilige Belastung anpassen müssten und durch diese Form der Selbstoptimierung ähnlich wie bei frei wachsenden Baumstämmen eine Struktur entsteht, die im zeitlichen Mittel eine homogene Spannungsverteilung aufweist (Ludwig, 2007; Storz, 2009). Eine genauere Betrachtung der oben angeführten Forschungsergebnisse lässt jedoch große Zweifel an dieser Hypothese aufkommen, da anzunehmen ist, dass die mechanischen Reize der wesentlichen Lastfälle nicht zu einer Stimulation des Dickenwachstums führen: Bei der Bildung baubotanischer Strukturen werden die Pflanzenachsen zusammen mit technischen Bauteilen zu fachwerkartigen Strukturen verbunden und die Pflanzen deshalb an mindestens zwei Stellen fixiert. Durch diese Veränderung des mechanischen Systems werden die bei freiem Wachstum einseitig eingespannten Triebe zu Druck und Zugstäben in einem relativ steifen Verbund. Mit diesem Ansatz wird das Ziel verfolgt, Biegebeanspruchungen zu reduzieren und ein Ausknicken der Achsen unter Auflast zu vermeiden, sodass Strukturen entstehen, die im Vergleich zu einem frei wachsenden Baum größere Nutzlasten (z. B. Schneelast eines Daches oder Verkehrslasten einer begehbaren Ebene) aufnehmen können. Die Konsequenz daraus ist jedoch, dass in den Pflanzenachsen statt Biegespannungen hauptsächlich axiale Druck- und Zugspannungen auftreten. Wie oben dargestellt führen jedoch hauptsächlich Biegespannungen, wie sie beispielsweise beim Schwingen eines Baumes im Wind auftreten, zu signifikanten Steigerungen des Dickenwachstums. Eine Reduktion dieser Belastungen, beispielsweise durch Fixieren des Triebes, führt zu einer Reduktion des Dickenwachstums, die auch nicht durch axiale Druckbelastung kompensiert werden kann (vgl. Quirk und Freese, 1976a). Axiale Druckbelastungen, die zu einer Stimulation des Dickenwachstums führen könnten, müssten so groß sein,

[372] Vgl. auch die Zusammenfassung dieser Versuchsergebnisse bei SLOBODA, B. & GAFFREY 1999. Dynamik der Stammorphologie. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt Az.: SI 11/6-1. Göttingen: UniversitätGöttingen, Institut für Forstliche Biometrie und Informatik.

dass die Achsenabschnitte zwischen zwei Knotenpunkten ausbeulen – eine in der Praxis kritische und damit gefährliche und nicht anzustrebende Belastungssituation.[373]

Auch wenn im Detail bis heute nicht bekannt ist, welche Prozessketten die mechanischen Belastungen das Wachstum der kambialen Zellen auslösen, erscheinen die Forschungsergebnisse und Schlussfolgerungen doch insgesamt plausibel: Nur bei Biegebeanspruchungen treten große Zug- und Druckspannungen auf, die im Kambiumbereich zu starken Dehnungen führen und von den lebenden Zellen detektiert und adaptiv in Dickenwachstum umgesetzt werden können. Bei axialen Belastungen sind die Spannungen gleichmäßig verteilt bzw. werden die Kräfte sogar hauptsächlich durch den steiferen Kern (totes Holz) abgeleitet, sodass es im Kambiumbereich nur zu minimalen Dehnungen und damit auch nicht zu rezipierbaren Reizungen kommt. (Abbildung 111)

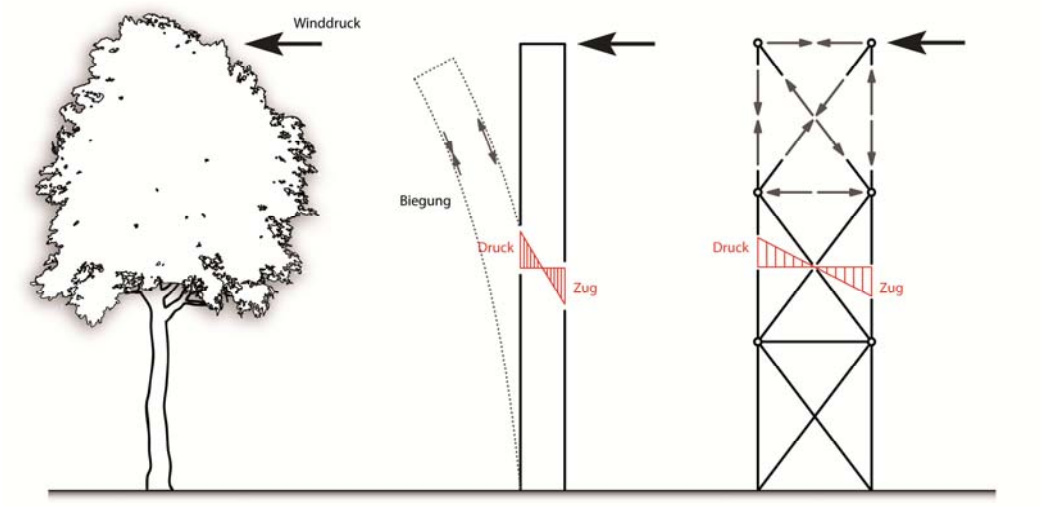


Abbildung 111 Links und Mitte: Ein Baumstamm kann mechanisch als eine eingespannte Stütze betrachtet werden. Bei den vorherrschenden Biegebelastungen (Wind) treten in den Randbereichen (Kambium) große Zug- und Druckspannungen auf. Rechts: In der Baubotanik werden fachwerkartige Strukturen gebildet, bei denen die Biegespannungen in axiale Zug- und Druckkräfte aufgelöst werden. Diese können vom Kambium nicht detektiert und daher auch nicht adaptiv in Dickenwachstum umgesetzt werden.

Die Konsequenz aus diesen Überlegungen ist, dass zu einer baubotanischen Fachwerkstruktur verbundene Pflanzenachsen vermutlich ein etwas geringeres Dickenwachstum zeigen als frei wachsende Triebe (z. B. die Austriebe dieser Struktur). Darüber hinaus scheint es innerhalb einer baubotanischen Struktur für das Dickenwachstum mehr oder weniger irrelevant zu sein, welche Pflanzen wie stark axial belastet werden.[374] Demnach würden unterschiedliche axiale Belastungen nicht zu Unterschieden im Dickenwachstum führen und der Lastfall wäre damit kein das Dickenwachstum entscheidender Faktor und es kann nicht mit einer Optimierung der

[373] Das heißt auch, dass die Strukturen auch nicht mit künstlichen Belastungen für die Aufnahme von Nutzlasten „trainiert“ werden können.

[374] In Knotenpunkten kann jedoch ggf. ähnlich wie bei Astgabeln von einer mechanischen Optimierung gesprochen werden. Fraglich ist jedoch, ob die dabei stattfindenden Wachstumsprozesse tatsächlich durch mechanische Reize ausgelöst werden.

Struktur bzw. einer homogenen Spannungsverteilung aufgrund an die Belastung angepassten Dickenwachstums gerechnet werden.[375]

4.2.4 Transportprozesse und Dickenwachstum

Neben mechanischen Reizen wird auch der Einfluss der Transportströme in einer Pflanzenachse seit Langem als ein möglicher Einflussfaktor auf das Dickenwachstum diskutiert, wobei insbesondere der im Holz (Xylem) stattfindende Wassertransport als ausschlaggebend angesehen wird. Bereits 1913 formulierte der Pflanzenphysiologie Jaccard die Hypothese, dass eine konstante Proportionalität zwischen der wasserleitenden Querschnittsfläche eines Astes oder Stammes und der von diesem versorgten Blattmasse bestehe. Demnach würden Bäume durch adaptives Dickenwachstum nicht einen Zustand homogener mechanischer Spannungsverteilung sondern einen Zustand homogener Leitungswiderstände im Holz anstreben (Jaccard, 1913).[376] Dieser Ansatz wurde in den 1960er Jahren mit der sogenannten Pipe-Modell-Theorie (Shinozaki et al., 1964a ; Shinozaki et al., 1964b) wieder aufgegriffen, gleichzeitig aber bereits frühzeitig in Frage gestellt (Huber, 1928). Aufgrund dieser zunächst unklar erscheinenden wissenschaftlichen Grundlage werden im Folgenden zunächst der grundlegende Aufbaus des Wasserleitsystems und die Funktionsweise des Wassertransports von Bäumen dargestellt, um anschließend Zusammenhänge zwischen Wassertransport und Dickenwachstum sowie eine mögliche Übertragung auf baubotanische Strukturen diskutieren zu können.

4.2.4.1 Funktionsweise des Wasserleitsystems

Im Gegensatz zu dem Transport von Assimilaten in der Rinde, der durch Stoffwechselmechanismen angetrieben wird,[377] erfolgt der Wassertransport im Xylem hauptsächlich passiv. Treibende Kraft ist eine Wasserpotentialdifferenz zwischen der Atmosphäre und dem Boden: Wasser strömt nach dem Gesetz der Diffusion von einem Bereich mit hohem Wasserpotential[378] zu einem Bereich mit niedrigem Potential. Da das Wasserpotential des Wasserdampfs in der Luft sehr gering, das des flüssigen Wassers im Boden jedoch sehr viel höher ist, stellt die Pflanze gewissermaßen eine Verlängerung des hohen Wasserpotentials des Bodens in den Luftraum hinein dar. Deshalb ist aus rein physikalischen Gründen zu erwarten, dass Wasser vom Boden in die Pflanze strömt und von dort in die umgebende Atmosphäre übertritt. (Abbildung 112)

Die Elemente, in denen dieser Wassertransport stattfindet, sind die Gefäße des Xylems, die die Dimension von Kapillaren haben und von den Wurzelspitzen bis zu den Verzweigungen im Blatt ununterbrochene, miteinander vernetzte Wasserleitungsbahnen bilden (Tracheen).[379] Die Wassermoleküle in den Kapillaren bilden aufgrund ihrer Kohäsion (Wasserstroffbrückenbindungen) regelrechte „Wasserfäden“, die sich durch eine hohe Zerreissfestigkeit (Zugfestigkeit) auszeichnen. Ebenso ist die Adhäsion der Wasserfäden an die Gefäßwand so groß, dass sie

---

[375] Weiterführende Untersuchungen und Quellenangaben zum Themenkomplex „mechanische Stimulation und Dickenwachstum“: siehe Promotionsvorhaben von O. Storz (ITKE, Uni Stuttgart)

[376] Dabei wird die Blattmasse als proportional zum Wassertransport bzw. Wasserbedarf angesehen.

[377] Assimilate werden von der Quelle zum Ort des Verbrauchs transportiert (Sink-Source-Theorie).

[378] Das Wasserpotential gilt als ein Maß dafür, wie weit das Wasser eines Systems für ein anderes System verfügbar ist und gibt damit Auskunft über die Fähigkeit eines Systems, Wasser abzugeben oder aufzunehmen. Es wird meist in Megapascal angegeben und hat damit die Dimension eines Drucks.

[379] Die Gefäße sind im funktionierenden Zustand tote Zellen, von denen nur noch die Zellwände erhalten sind, teilweise werden auch die Querwände aufgelöst, sodass lange Röhren entstehen.

selbst bei relativ starkem Sog nicht abreißen.[380] Die Adhäsion des Xylemsaftes an die Gefäßwände führt jedoch auch zu einem relativ starken Strömungswiderstand und es müssen größere Wasserpotentialdifferenzen („Saugkräfte“) aufgewendet werden, um diesen Widerstand zu überwinden.[381] Neben diesem Widerstand im Xylem stehen dem Wasserstrom noch weitere Widerstände entgegen, die den Transport teilweise erheblich beeinflussen. Ein erster großer Widerstand liegt bereits im Bereich der Feinwurzeln, weil die Wassermoleküle beim Übergang vom Außenraum in die Pflanze Engstellen passieren müssen, die der Pflanze zur Selektion der aufzunehmenden Stoffe dienen (Caspary-Streifen). Nachdem der Wasserstrom dann das Xylems passiert hat (2. Hauptwiderstand), verlassen die Wassermoleküle im Blattinnenraum die Leitungsbahnen, gehen in die Gasphase über und diffundieren anschließend durch die Spaltöffnungen der Blätter (Stomata) in die Atmosphäre (3. Hauptwiderstand).

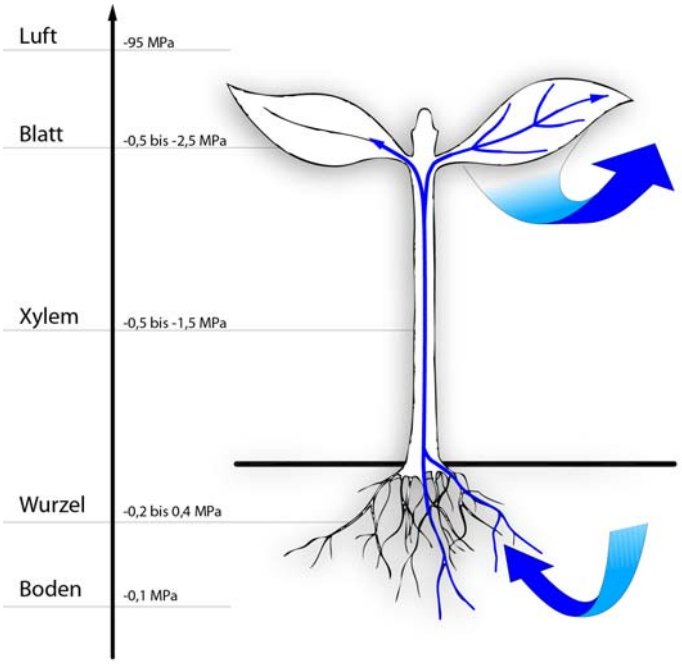


Abbildung 112 Weg des Wassers vom Boden in die Atmosphäre entlang eines abnehmenden Wasserpotentialgradienten. (nach Mohr und Schopfer 1992, S. 500, verändert)

4.2.4.2 Widerstandsmodell und Ersatzschaltpläne

Die beschriebene Abfolge von Transportwiderständen wird in der Pflanzenphysiologie häufig als eine Art Schaltplan dargestellt, bei dem die Pflanze bzw. deren Organe und Organteile die Wasserpotentiale von Boden und Atmosphäre verbinden. In Analogie zu elektrischen Schaltplänen kann die Situation modellhaft als eine Reihen- bzw. Parallelschaltung von Widerständen

[380] Der Zerreißfestigkeit der Wasserfäden in den Gefäßen sind artspezifische Grenzen gesetzt. Wenn die Spannung zu groß wird, kommt es zu Embolien.

[381] Vgl. auch: „Böhms Kohäsionstheorie“: Die Kapillarität der Leitbahnen und die Kohäsions- und Adhäsionsfähigkeit der Wassermoleküle führen aus rein physikalischen Gründen zu einem Wasserstrom aus dem Boden durch die Pflanze in die Atmosphäre, solange die Transpiration funktioniert. An den Blattzellen, an denen die Verdunstung stattfindet, hängen kontinuierliche Wasserfäden, die mit dem Bodenwasser in Verbindung stehen. BÖHM, J. 1893. *Capillarität und Saftsteigen*. *Berichte Deutschen Botanischen Gesellschaft*, 203-212. Zit. nach: MOHR, H. & SCHOPFER, P. 1992. Pflanzenphysiologie. 4 ed. Berlin: Springer-Verlag.S. 499.

betrachtet werden. Dabei entspricht die Wasserpotentialdifferenz der elektrischen Spannung, der Transportwiderstand dem ohmschen Widerstand und der Xylemstom dem elektrischen Strom. Der Vorteil dieses stark vereinfachenden Analogiemodells liegt darin, dass es die Systemeigenschaften deutlich macht und (zumindest näherungsweise) eine Beschreibung des Systemverhaltens erlaubt. Der sogenannte „Ersatzschaltplan" eines Baumes bildet dann im Wesentlichen die Verzweigungsstrukturen der Äste und Wurzeln ab; die wichtigsten „Bauteile" sind die Widerstände, die dem Wasserstrom entgegenstehen. Mit den Wurzeln, den Pflanzenachsen und den Blättern sind, wie oben bereits dargestellt, drei wichtige Gruppen von Widerständen vorhanden (Abbildung 113). Der Wurzelwiderstand wird wesentlich durch die Anzahl bzw. Gesamt-Oberfläche der Feinwurzeln bestimmt[382] und im Schaltplan in der Regel als ein Einzelwiderstand dargestellt. Die einzelnen Abschnitte der Pflanzenachsen können als „Widerstandsdrähte" beschrieben werden, da der Widerstand eines bestimmten Achsenabschnitts von der Länge und der Querschnittsfläche abhängig ist.[383] Zur Darstellung in einem Schaltplan werden sie in sinnvolle Abschnitte gleicher Länge unterteilt, die dann als in Reihe geschaltete Einzelwiderstände dargestellt werden. Die letzte Gruppe von Widerständen wird durch die Blätter bzw. durch den Übergang Blatt-Atmosphäre beschrieben. Die Pflanze ist in der Lage, den Diffusionswiderstand durch die Öffnungsweiten der Stomata zu regulieren und damit den Transpirationsstrom zu steuern. Dies kann als eine Art Schutzmechanismus oder auch regelbarer Vorwiderstand betrachtet werden: Treten in bestimmten Achsenabschnitten – beispielsweise in Folge von Verletzungen oder aufgrund eins geringen Querschnitts – hohe Widerstände auf, schließt die Pflanze die Stomata, um eine zu hohe Saugspannung (Wasserpotentialdifferenz) und damit ein Abreißen der Wasserfäden im entsprechenden Achsenbereich zu vermeiden. Bei guter Wasserversorgung (geöffnete Stomata) kann der Transportwiderstand der Blätter jedoch als proportional zur Blattfläche angesehen werden. (vgl. Mohr and Schopfer 1992, S. 503f.)

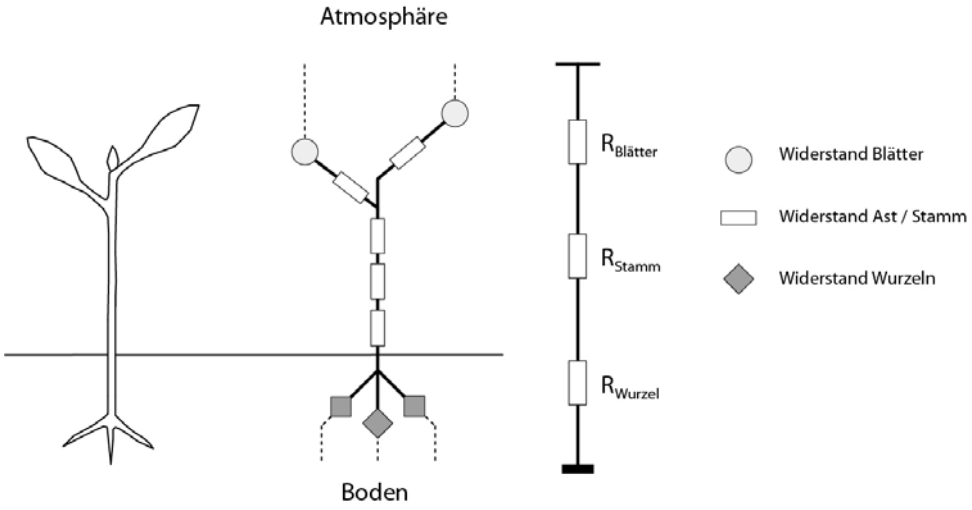


Abbildung 113 Darstellung der Widerstände des Wassertransports als Ersatzschaltplan (in 2 Abstraktionsstufen). Weitere Erklärungen siehe Text.

[382] Er ist aber auch vom Substrat und dem Wassergehalt des Substrats abhängig.

[383] Des Weiteren spielen natürlich die anatomischen bzw. hydraulischen Eigenschaften des Xylems eine entscheidende Rolle

4.2.4.3 Huber-Wert und Pipe-Model-Theorie

Aufgrund dieses Mechanismus erscheint die eingangs zitierte Hypothese von Jaccard nachvollziehbar, wonach in allen Achsenabschnitten das gleiche Verhältnis zwischen Transportwiderstand und Xylemstrom vorliegt und damit – bei geöffneten Stomata – ein konstantes Verhältnis zwischen Transportwiderstand und Blattfläche bzw. Blattmasse. Dies ist auch die Kernaussage der „Pipe-Model-Theorie“, nach der die Blattmasse oberhalb einer beliebigen horizontalen Ebene eines Baumes oder Baumbestandes immer proportional zu der summierten wasserleitenden Querschnittsfläche aller Achsen an dieser Stelle ist. In der Pipe-Model-Theorie werden Pflanzenachsen vereinfacht als eine Bündelung von Rohren konstanter Querschnittsfläche verstanden, die Wurzelbereiche mit Kronenbereichen verbinden und eine bestimmte Blattmasse mit Wasser versorgen.[384] Bei Bäumen verbleiben die nicht mehr genutzten Leitungen, die ursprünglich Blätter bereits abgeworfener Zweige versorgten, in den Stämmen und Ästen zurück, wodurch die typischerweise konische Stamm- bzw. Astform entsteht. (Abbildung 114)

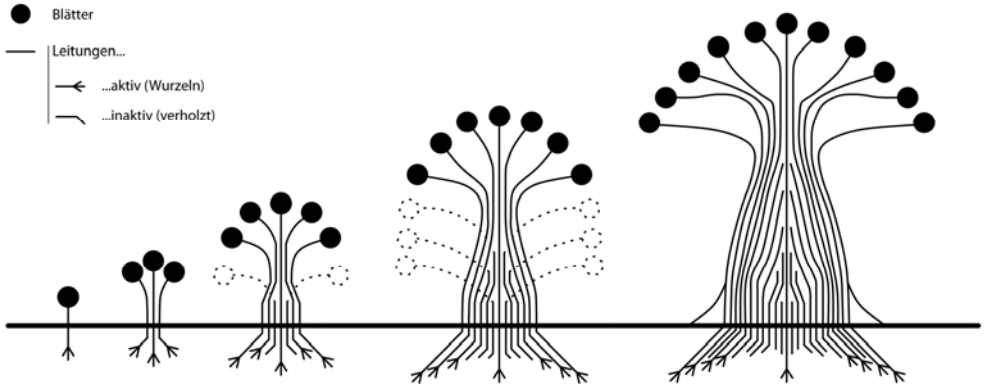


Abbildung 114 Darstellung der Entwicklung eines Baumes nach der Pipe-Model-Theorie (nach Shinozaki et al., 1964b, verändert und ergänzt)

Tatsächlich weisen die verschiedenen Achsenabschnitte in den Verzweigungsstrukturen von Bäumen jedoch teils sehr unterschiedliche Verhältnisse zwischen Leitfähigkeit und Blattmasse auf (Blattflächenspezifische Leitfähigkeit). Untersuchungen hierzu werden erstmals von Huber (1928) durchgeführt, der die Querschnittsfläche einer Achse vereinfachend mit der Leitfähigkeit gleichsetzte[385] und dabei allgemeine, artabhängig jedoch teils unterschiedlichen Verteilungsmuster der nach ihm benannten Huber-Werte dokumentierte: Die Werte des Stammes steigen tendenziell von der Basis zu Spitze hin an und sind in der Regel (bei zerstreutporigen Laubhölzern und Koniferen) deutlich größer als die der Seitenäste. Darüber hinaus liegen im Bereich der

[384] Bildlich gesprochen wird eine bestimmte Blattmasse durch eine Leitung/Röhre versorgt, die auf der ganzen Länge den gleichen Querschnitt hat. Diese Röhre dient sowohl als Leitung wie auch der Stabilität. Eine Pflanzengemeinschaft ist nichts weiter als die Ansammlung solcher Blatt-Leitungs-Einheiten. Diese gedachte Leitungs- bzw. Röhreneinheit ist nicht die tatsächlich existierende Röhreneinheit in einer Pflanze bzw. Pflanzengesellschaft; vielmehr sind mehrere Einheiten in den Pflanzenachsen der einzelnen Pflanzen vereinigt; die Pflanzengemeinschaft wird dann aus vielen dieser Pflanzen gebildet. Pflanzenbestände und Einzelpflanzen zeigen im Prinzip das gleiche räumliche Blattverteilungsmuster.

[385] Vgl. FRÜH, T. 1995. Entwicklung eines Simulationsmodells zur Untersuchung des Wasserflusses in der verzweigten Baumarchitektur. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme der Universität Göttingen,* A - 131. S. 47.

Astanbindungen meist sehr geringe Werte vor (vgl. Zimmermann, 1978; Zimmermann und Brown 1971, S. 190f.). Dieses Verteilungsmuster kann als ein Ausdruck der in Abschnitt 4.2.2.1 beschriebenen Förderung des Haupttriebs (apikale Dominanz) gedeutet werden, da Achsen und Blätter in der Peripherie des Verzweigungsmusters aufgrund der geringeren Leitungskapazitäten bei Wassermangel früher unter Trockenstress leiden, während die der zentralen Abschnitte verzögert von der Trockenstresswirkung betroffen sind und daher stärker wachsen können.

4.2.4.4 Konsequenzen für das Entwerfen baubotanischer Strukturen

Für die Baubotanik sind diese Erkenntnisse von großem Interesse, weil sie einen Ansatz darstellen, die Xylemströme in Verwachsungsstrukturen vorhersagen und eventuell auch das Dickenwachstum abschätzen zu können. Die entscheidende Frage ist dabei zunächst, wie sich der Xylemstrom in netzwerkartig aufgebauten Verwachsungsstrukturen aufteilt, in denen mehrere alternative Leitungswege vorhanden sind. Entsprechend des Widerstandsmodells liegt bei solchen Strukturen ein Schaltplan vor, bei dem (im einfachsten Fall) die Reihenschaltung der Transportwiderstände des Stammes in eine Parallelschaltung überführt wird (Abbildung 115 links). Betrachtet man dabei den gesamten Transportweg des Wassers vom Boden in die Atmosphäre, wird deutlich, dass diese Veränderung des Schaltplans keine grundsätzliche Veränderung des Modells darstellt. Denn auch ein natürlich wachsender Baum zeigt in der offenen Verzweigungsstruktur Anordnungen von Widerständen, bei denen Äste nach einer Gabelung als physiologisch parallel betrachtet werden können. Der Unterschied liegt lediglich darin, dass die parallelen Achsen bei Verwachsungsstrukturen nochmals zusammengeführt werden. Die Aufteilung des Xylemsstroms nach dem Widerstandsmodell sollte daher prinzipiell auch für verwachsene Strukturen gelten und der Xylemstrom müsste sich umgekehrt proportional zu den jeweiligen Widerständen auf die parallelen Achsenabschnitte aufteilen.[386] Dies erscheint auch physikalisch plausibel, da sich eine Aufteilung des Xylemstroms einstellt, bei der der geringstmögliche Gesamtwiderstand auftritt. Wenn vereinfachend angenommen wird, dass der Widerstand proportional zur Leitungslänge und umgekehrt proportional zur leitenden Querschnittsfläche ist und ebenfalls angenommen wird, dass an den Verwachsungsstellen keine Widerstände auftreten, die eine bestimmte Flussrichtung fördern oder unterbinden, kann der Xylemstrom dann wie exemplarisch in Abbildung 115 rechts dargestellt ermittelt werden.

In einem zweiten Schritt stellt sich die Frage, ob und wie sich diese Aufteilung des Xylemstroms auf das Dickenwachstum der parallelen Achsenabschnitte einer Verwachsungsstruktur auswirkt. Entsprechend der Untersuchungen von Huber kann davon ausgegangen werden, dass sich in jedem Achsenabschnitt ein von der Lage im Gesamtorganismus abhängiges, spezifisches Verhältnis von Xylemstrom und leitender Querschnittfläche[387] einstellt: Ist der Xylemstrom im Verhältnis zur Querschnittsfläche zu hoch, wird das Verhältnis mittelfristig dadurch ausgeglichen, dass die Querschnittsfläche durch Dickenwachstum vergrößert wird. Ist der Xylemstrom im Vergleich zur Querschnittsfläche gering, kann angenommen werden, dass es zu keinem oder nur sehr geringen Dickenwachstum kommt, bis der Xylemstrom beispielsweise durch die Anlage neuer Blätter ansteigt. Wie hoch der Huberwert bzw. das Verhältnis von Querschnittsfläche und Xylemstrom in einem bestimmten Bereich einer Verwachsungsstruktur tatsächlich ist, kann auf Basis der vorliegenden Daten und Erkenntnisse allerdings nicht berechnet werden. In natürlich gewachsenen Bäumen ist es offensichtlich wie dargestellt von der Hierarchieebne im Verzweigungssystem sowie vom Abstand zur Spitze des Leittriebs bzw. zur

[386] Berechnung: Aufteilung nach ohmschem Gesetz etc. bzw. siehe Abbildung 115.

[387] Dabei wird von einer Proportionalität zwischen Blattmasse und Xylemstrom sowie von einer umgekehrten Proportionalität von Querschnittsfläche und Widerstand ausgegangen.

Wurzelbasis abhängig. Wenn in baubotanischen Strukturen der Stamm durch eine netzartige Struktur ersetzt wird (Abbildung 115 links), kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die so gebildeten parallelen Achsen sowohl bezüglich ihrer Position im hierarchischen Verzweigungssystem als auch bezüglich ihres Abstands zur Basis bzw. Triebspitze gleichwertig sind. Dementsprechend kann – in Übereinstimmung mit der Pipe-Model-Theorie – davon ausgegangen werden, dass sich das Dickenwachstum auf die parallelen Achsen so aufteilt, dass sich mittelfristig in allen Abschnitten ein ähnliches Verhältnis von (leitender) Querschnittsfläche und Xylemstrom einstellt.

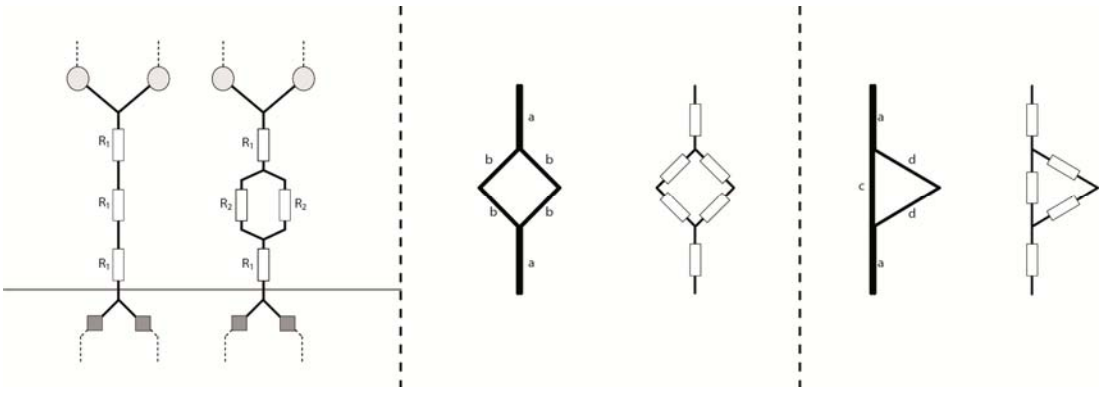


Abbildung 115 Ersatzschaltpläne baubotanischer Verwachsungsstrukturen. Links: Aufspaltung des Hauptstammes in zwei gleich lange, parallele Stämme. Wenn entsprechend der Pipe-Model-Theorie in allen horizontalen Ebenen die gleiche leitenden Querschnittsfläche bzw. der gleiche Gesamt-Leitungswiderstand vorhanden ist, gilt: $R_2=2*R_1$. In den Verwachsungsstrukturen Mitte und Links sind alle Achsenabschnitte (a-b-c-d) gleich lang und zunächst gleich dick. Bei der Struktur in der Mitte wird sich der Xylemstrom gleichmäßig aufteilen und es ist mit einem gleichmäßigen Dickenwachstum zu rechnen. In der Abbildung rechts ist der Widerstand des rechten Wegs doppelt so groß wie der des geraden (Reihenschaltung von zwei Widerständen). Zwischen den Abschnitten c und d wird sich der Xylemstrom daher wie 2:1 verteilen.[388] Daher ist auch damit zu rechnen, dass sich ein Dickenwachstum einstellt, dass zu einer Relation der Querschnittsflächen (A_c:A_d)von ebenfalls 2:1 führt.

Daraus resultiert, dass Pflanzenachsen in Verwachsungsstrukturen deutlich weniger wachsen oder ggf. auch früher absterben, wenn sie im Vergleich zu anderen, physiologisch parallelen Achsen einen Umweg darstellen. Wird ein gleichmäßiges Dickenwachstum und der Erhalt aller Achsenabschnitte angestrebt, sollten parallele Achsenabschnitte daher möglichst gleich lang sein. Wie in Abbildung 116 für gleichförmige, flächige Verwachsungsstrukturen dargestellt, trifft dies im Wesentlichen für Rauten- und entsprechend ausgerichtete Sechseckmuster zu. Bei allen anderen Anordnungen ist davon auszugehen, dass einige Achsenabschnitte nur wenig wachsen oder frühzeitig absterben, da in ihnen kein oder nur ein sehr geringer Wassertransport (Xylemstrom) stattfindet.

[388] Vgl. Elektrotechnik: I=U/R; $R_{rechts}=2*R_{links}$

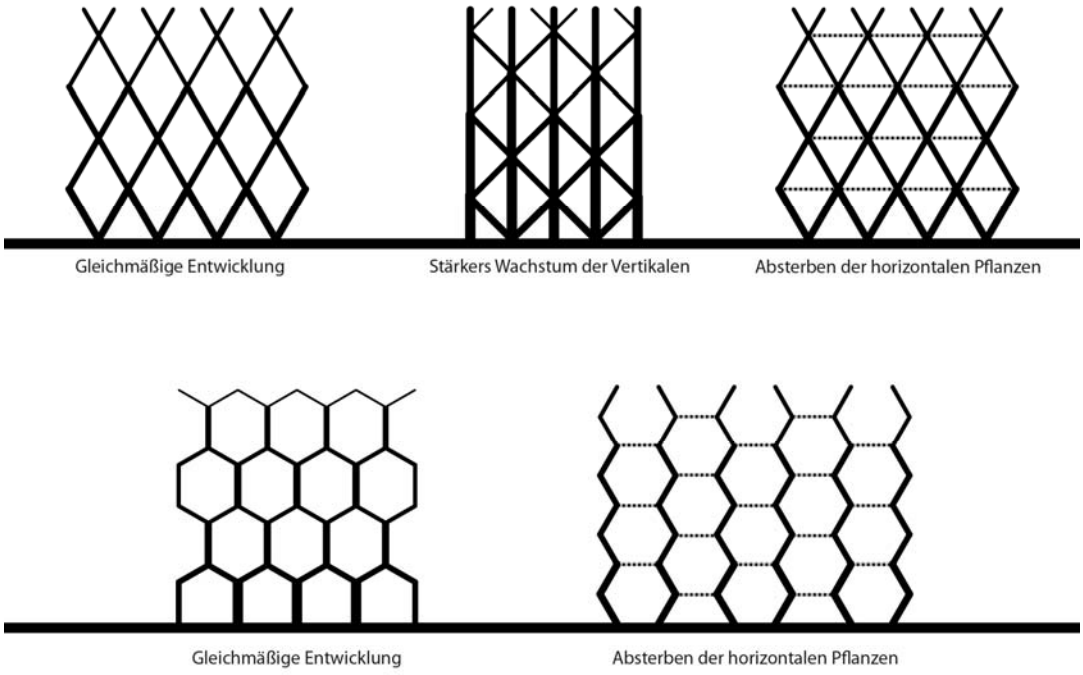


Abbildung 116 Flächige Muster baubotanischer Verwachsungsstrukturen. Nur bei Rauten- und Sechseckmustern ist mit einer gleichförmigen Entwicklung zu rechnen (oben und unten links). Weitere Erklärungen siehe Text.

Obwohl sich diese Schlussfolgerungen aus einer Hypothesenkette ergeben, in der die tatsächliche Situation an vielen Stellen stark vereinfacht dargestellt wird, erscheinen sie plausibel, weil sie als Ausdruck eines ressourceneffizienten Wachstumsmusters gewertet werden können: Um den Transportwiderstand eines kürzeren Achsenabschnitts durch Dickenwachstum zu reduzieren, wird weniger Biomasse benötigt, sodass die benötigten Transportkapazitäten mit geringerem Aufwand erzeugt werden können. Zudem stehen die Überlegungen in guter Übereinstimmung mit Beobachtungen in der Arborsculpture, wo bekannt ist, dass das gewünscht Dickenwachstums eines Stammabschnitt nicht eintritt, wenn an anderer Stelle ein kürzerer Verbindungsweg zwischen Wurzeln und Krone vorhanden ist (vgl. (Reams, 2005)). Dennoch erlaubt der Ansatz auf Grundlage der vorliegenden Datenbasis nur Abschätzung der Verhältnisse und keine quantitativen Berechnungen des Dickenwachstums. Um dies zu ermöglichen sollten in weiterführenden Versuchen die Zusammenhänge von Dickenwachstum und die Xylemströmen in Verwachsungsstrukturen quantitativ untersucht und z. B. auch die Leitungswiderstände an den Knotenpunkten (Verwachsungsstellen) genauer analysiert werden. Gleichzeitig zeichnet sich bereits jetzt eine allgemeine Regel für das Entwerfen baubotanischer Konstruktionen deutlich ab: Sollen die Konstruktionen ein hohe Tragfähigkeit erlangen, müssen sie so entworfen werden, dass der zu erwartende Xylemstrom dem Haupt-Kraftfluss entspricht. Nur so kann gewährleistet werden, dass mechanisch beanspruchte Achsenabschnitte tatsächlich auch ein entsprechendes Dickenwachstum zeigen und damit die gewünschte Tragfähigkeit erreichen (Kraftfluss = Saftfluss).

4.3 Detailbetrachtung der Pflanzenaddition

Bevor im Folgenden der baubotanische Turm im Detail beschrieben wird, soll zunächst der Ansatz der Pflanzenaddition nochmals vorgestellt und genauer analysiert werden. Aus den vorangegangenen Abschnitten kann der Schluss gezogen werden, dass die Zusammenhänge zwischen Xylemstrom und Dickenwachstum bei der Entwicklung von Verwachsungs- und insbesondere Additionsstrukturen aller Wahrscheinlichkeit nach eine entscheidende Rolle spielen. Obwohl die Übertragung der vorliegenden Erkenntnisse zunächst rein hypothetisch ist, liegen mit der Pipe-Model-Theorie und dem Widerstandsmodell Möglichkeiten der Beschreibung und Darstellung vor, mit deren Hilfe die physiologische Situation, die durch das iterative Aufeinanderpfropfen von Pflanzen beim Addieren geschaffen wird, gut veranschaulicht werden kann.

4.3.1 Pflanzenaddition und Xylemstrom

Wie in Abbildung 117 nach der Systematik der Pipe-Model-Theorie dargestellt, entsteht durch die Addition von Pflanzen eine künstlich gebildete physiologische Einheit, bei der zunächst die leitenden „Röhren“ bzw. Kapillaren des Xylems die auf unterschiedlichen Ebenen angeordnete Wurzelbereiche mit entsprechend verteilten Kronenbereichen verbinden. Damit sich aus dieser Konstellation die angestrebte, ausschließlich im Boden wurzelnde Struktur entwickelt, müssen nicht nur die Wurzeln im Boden entstehen, sondern auch die entsprechenden Leitungsbahnen, die die Wurzeln mit den Blättern verbinden. Gleichzeitig gilt nach dem Widerstandsmodell, dass der Xylemstrom entlang des Wegs des geringsten Widerstandes stattfindet und damit zwischen gleichartig ausgebildeten Kronen- und Wurzelbereichen tendenziell der kürzeste Weg bevorzugt wird. Wie in Abbildung 117 links rot markiert, würde der Xylemstrom in einer Additionsstruktur daher zunächst nicht bevorzugt von unten nach oben sondern vom jeweils nächstgelegenen Wurzelbereich zu dem nächstgelegenen Kronenbereich verlaufen.[389] Gleichzeitig ist das Dickenwachstum – in erster Näherung – proportional zum Xylemstrom bzw. der „Transportauslastung“ und würde daher hauptsächlich entlang der rot markierten Wege stattfinden. Daraus ergibt sich eine Entwicklungstendenz, die der angestrebten Entwicklung entgegensteht: Es entsteht nicht ein von den Wurzeln im Boden bis zum obersten Kronenbereich durchgehendes Leitsystem, sondern eine tendenziell wieder in „Einzelpflanzen“ zerfallende Struktur.

Die angestrebte Entwicklung muss daher gezielt durch eine aktive Beeinflussung des Xylemstroms und damit des Dickenwachstums herbeigeführt werden. Eine Beeinflussung des Xylemstroms unmittelbar an den Pflanzenachsen ist jedoch praktisch unmöglich, da dazu die leitende Querschnittsfläche verkleinert bzw. vergrößert werden müsste – letzteres geschieht ausschließlich durch Wachstum und ersteres wäre (fast) nur durch eine Zerstörung von Leitgefäßen möglich,[390] die wenn möglich vermieden werden sollte. Effektive Möglichkeiten den Xylemstrom zu steuern, bestehen daher im Wesentlichen in einer Beeinflussung des Widerstands von Wurzel- und Kronenbereichen, z. B. durch die Reduktion der Blattfläche in bestimmten Bereichen, die Begrenzung des Wurzelraums oder die (temporäre) Erhöhung des Wurzelwiderstands durch eine Reduktion der Wasserversorgung.[391] Mit dem Ansatz der Pflanzenaddition ist jedoch eine Fragestellung aufgerissen, die eine Vielzahl weiterer Untersuchungen und Erprobungen von Steuerungsstrategien nötig macht, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht detailliert untersucht werden konnten. Vielmehr sind weiterführende Forschungs-

[389] Vorausgesetzt, die Verwachsungen sind voll ausgebildet und in alle Richtungen gleich leitfähig.

[390] Z. B. Einschneiden der Achse; eine im Obstbau angewendete, aber umstrittene Praxis.

[391] Am Beispiel des Turmes werden hierzu in Abschnitt 4.5.2.1 einige Möglichkeiten diskutiert.

projekte notwendig, um die pflanzenphysiologischen und technischen Aspekte in ausreichender Tiefe untersuchen zu können.

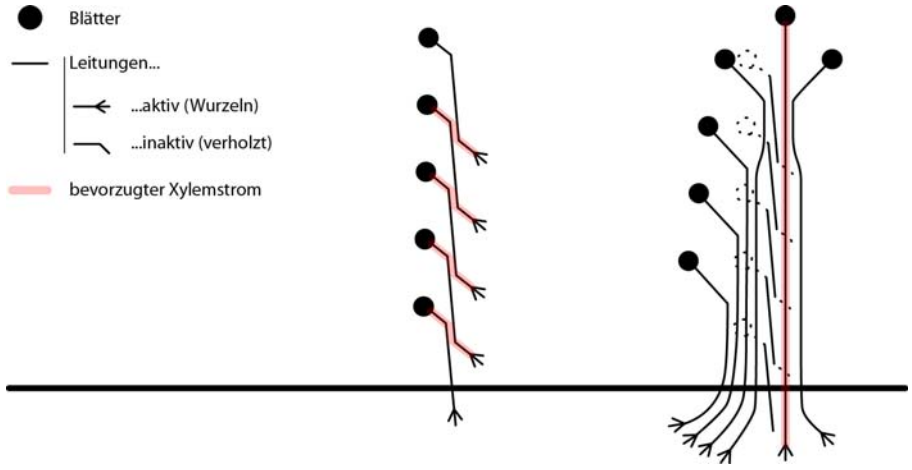


Abbildung 117 Pipe-Model-Darstellung der Pflanzenaddition. Links: Zustand unmittelbar nach dem Verbinden der Pflanzen; in Rot dargestellt ein möglicher „Kurzschluss" zwischen Wurzel- und Kronenbereichen, der durch das Verwachsen lokal entstehen kann. Rechts: Angestrebter Zustand mit von unten nach oben durchgehenden Leitungsbahnen (rot) nach erfolgter Verwachsung und Entfernen der Wurzelbereiche in der Luft.

4.3.2 Pflanzenaddition und Spross-/Wurzelentwicklung

Gleichzeitig kann die gewünschte Entwicklung aber auch als ein Differenzierungsprozess angesehen werden, der sich von der Entwicklung natürlicher Wurzel- und Sprosssysteme nicht substanziell unterschiedet. Denn auch bei frei wachsenden Bäumen sterben im Verlauf der Entwicklung Blätter, Wurzeln, Äste und Zweige ab, während an anderer Stelle neue entstehen. Im Stammbereich spricht man in diesem Zusammenhang von der „natürlichen Ästung": Die untersten, beschatteten und damit photosynthetisch weniger aktiven Äste sterben mit der Zeit ab und werden vom Baum abgestoßen, während zeitgleich insbesondere in gut besonnten Bereichen neue Blätter und Äste entstehen. Bei den Wurzeln folgt die Entwicklung einem weniger strengen Plan, das grundsätzliche Schema ist aber vergleichbar: Neue Wurzeln bzw. Feinwurzeln entwickeln sich in Bodenbereichen, in denen eine gute Versorgung mit Wasser, Nährstoffen und Sauerstoff gegeben ist, während gleichzeitig in anderen Bereichen insbesondere die empfindlichen Feinwurzeln rasch absterben, sobald die Bedingungen suboptimal werden. Dadurch verschieben sich die Bereiche der Wasser- und Nährstoffaufnahme (Feinwurzeln) im Verlauf der Entwicklung meist von der Stammbasis in Richtung des Bereichs unter der Kronentraufe. Das „Verschieben" der Wurzelbereiche bei der Pflanzenaddition von den im Luftraum angeordneten Containern in den Boden (vgl. Abbildung 31) kann durchaus mit dieser natürlichen Entwicklung verglichen werden, auch wenn die Anordnung der Wurzelbereiche hochgradig artifiziell ist und der Organismus, an dem die Umdifferenzierung stattfindet, künstlich durch Verwachsungen geschaffen wurde.

Die natürliche Ästung wird in der gärtnerischen Praxis häufig beschleunigt bzw. es wird versucht, die Entwicklung durch das Entfernen von Ästen und Zweigen so zu beeinflussen, dass die Baumkrone an einem bestimmten Ort ansetzt oder eine bestimmte Form aufweist (Baumschnitt). Demgegenüber ist eine Beeinflussung der Form des Wurzelsystems durch Schnitt üblicherweise weder erforderlich noch praktisch durchführbar. Lediglich ein einfaches Unterschnei-

den von Pflanzen zur Reduktion des Wurzelvolumens und zur Ausbildung eines kompakten Wurzelballens in Baumschulen ist hier gängige Praxis, die Techniken sind jedoch im Vergleich zu den oftmals ausgeklügelten und gärtnerisch hoch anspruchsvollen Methoden des Kronenschnitts relativ einfach. Vor diesem Hintergrund kann das Entfernen bestimmter Wurzelbereiche bzw. Pflanzcontainer in vollständig verwachsenen Additionsstrukturen als eine Pflegemaßnahme verstanden werden, die für die oberirdischen Pflanzenteile in der gärtnerischen Praxis alltäglich ist und nun dazu genutzt wird, ähnlich der „Verschiebung der Blattmasse" eine „Verschiebung der Wurzelmasse" herbeizuführen. Dabei ist jedoch immer zu bedenken, dass in einer verwachsenen Struktur genauso wie in einem gewöhnlichen Baum die Blätter und Feinwurzeln physiologisch voneinander abhängig sind und deshalb immer ein bestimmtes Verhältnis von Spross- bzw. Blatt- und Wurzelmasse gegeben sein muss: Die Reduktion von Wurzelmasse führt zu einer Stagnation des Blattwachstums, die erst dann wieder aufhört, wenn an anderer Stelle neue Wurzeln entstanden sind – entsprechendes gilt umgekehrt bei der Entnahme von Blättern bzw. Kronenbereichen.[392] Die Schnittmethoden im Gartenbau berücksichtigen diese Zusammenhänge, und es gilt, für die Steuerung der Entwicklung von Additionsstrukturen (systematische Entnahme von Wurzelbereichen) adäquate Methoden bzw. Praktiken zu entwickeln.

4.3.3 Vorversuch zur Pflanzendaddition

Im Vorfeld der Realisierung des baubotanischen Turmes wurde der Ansatz der Pflanzendaddition exemplarisch an einer vertikalen Pflanzenstruktur erprobt.[393] Dazu wurde an einer Süd-Ost orientierten Hauswand[394] eine Art Regal mit sechs Ebenen (ca. 35 x 70cm, vertikaler Abstand der Ebenen ca. 70 cm) installiert. Auf jedem dieser Regalfächer sowie unterhalb auf dem Boden wurden zwei Pflanzcontainer aufgestellt. In den linken Container wurde je eine Jungpflanze (*Salix alba*), in den rechten zwei gepflanzt.[395] Die senkrecht übereinander stehenden Pflanzen wurden in etwa auf Höhe des folgenden Containers mit konventionellen Methoden miteinander verpfropft (Ablaktieren), auf die gleiche Art und Weise wurden die Paare der rechten Container zusätzlich untereinander verbunden.[396] Bereits im Verlauf der ersten Vegetationsperiode (2007) wurde die Bewässerung der rechten Container eingestellt.[397] Dabei trockneten die meisten Pflanzen deutlich zurück oder starben sogar vollständig ab. Offensichtlich waren zu diesem Zeitpunkt noch keine ausreichenden Leitgewebe an den Verwachsungsstellen bzw. Wurzeln im untersten Container entstanden. Der Versuch wurde abgebrochen und nur die Variante mit Einzelpflanzen (linke Container) wurde in den folgenden Vegetationsperioden weitergeführt. Dabei wurden zunächst alle Pflanzen bzw. Container kontinuierlich weiter gewässert und gedüngt.

Im Verlauf der Vegetationsperiode 2008 wurde hier dann zunächst der unterste, auf dem Boden stehende Container auf ein Volumen von ca. 150 L vergrößert, um eine Pflanzung im Boden mit einem im Prinzip unlimitiertem Wurzelraum zu simulieren. Gleichzeitig wurde, nachdem an den

---

[392] Vgl. hierzu das Problem des Umpflanzens großer Bäume: Während ein vollständiges Entfernen aller Blätter durch Neuaustrieb ausgeglichen werden kann, sind nur wenige Pflanzen (z. B. Weiden) in der Lage, ein vollständig entferntes Wurzelsystem zu regenerieren.

[393] Versuchsbeginn und Anlage der Verbindungen: Juni 2007.

[394] Wagenhalle Stuttgart, Innerer Nordbahnhof 1.

[395] Substrat, Düngung und Pflanzenqualität entsprachen der Verwachsungsversuchen (Abschnitt 3.2.4), die Container den Anzuchtversuchen (Abschnitt 2.2.1); Die Bewässerung erfolgte nach Bedarf.

[396] Anschneiden der Rinde, Verbinden mit Buddy-Tape; Zum Zeitpunkt der Anlage der Versuche lagen noch keine Ergebnisse eigener Verwachsungsversuche vor.

[397] Um unkontrolliertes Wässern durch Regen zu vermeiden wurden die Container mit Hartschaumplatten abgedeckt.

meisten Verbindungsstellen deutliche Verwachsungen erkennbar waren, vorsichtig damit begonnen, die Wasserversorgung in einzelnen Containern zu reduzieren. Im Verlauf der Vegetationsperiode 2008 konnte bei den untersten beiden Containern die Wasserversorgung vollständig eingestellt werden, ohne dass es dabei zu erkennbaren Schäden wie z. B. einem Abwelken von Blättern o.ä. gekommen wäre. Diese beiden Container bzw. Wurzelbereiche wurden dann gegen Ende der Vegetationsperiode 2008 entfernt (Abbildung 118).[398] In den Vegetationsperioden 2009 und 2010 entwickelte sich die Struktur insgesamt vital weiter und in vergleichbarer Art und Weise konnten zwei weitere Container bzw. Wurzelbereiche entfernt werden (Ebenen 3 und 4). Die obersten beiden Container wurden nicht entfern, da bei der Verbindungsstelle auf Höhe der Ebene 5 Probleme bei der Verwachsung auftraten. Dennoch konnte mit dem Versuch die prinzipielle Umsetzbarkeit der Pflanzenaddition demonstriert werden und es konnten erste Erkenntnisse zur Steuerung der Entwicklung gewonnen werden, auf die beim Entwurf des Turms zurückgegriffen wurde.

Abbildung 118 Vorversuch Pflanzenaddition. Links und Mitte: Zustand unmittelbar nach Fertigstellung (Juli 2007). Rechts: Unterste Additionsstelle nach Entfernen des Wurzelbereichs (Januar 2009.)

4.4 Entwurfsbeschreibung

4.4.1 Zielsetzung und Projektvoraussetzungen

Mit dem Vorhaben, im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein baubotanisches Projekt zu entwerfen und baulich umzusetzen, sollte aufgezeigt werden, wie mit dem Ansatz der Pflanzenaddition in kürzester Zeit erlebbare, vertikal erschlossene Grünräume unmittelbar in der Dimension eines ausgewachsenen Baumes realisiert werden können. Um diese Zielsetzungen und den konstruktiven Anspruch der Baubotanik anhand eines prototypischen Bauwerks möglichst deutlich zu

[398] In diesem Fall wurde mit der Entnahme von Wurzelbereichen bei den untersten Container begonnen, um die Wurzelbildung im „Boden“ zu fördern. Siehe hierzu auch die Argumentation in Abschnitt 4.5.2.1

veranschaulichen, wurde als leitende Entwurfsidee die Entwicklung einer turmartigen Konstruktion gewählt. Konkret sollte ein Bauwerk entstehen, das über mindestens drei Geschosse bzw. vertikal übereinander angeordnete, begehbare Ebenen verfügen sollte, die in möglichst kurzer Zeit von der pflanzlichen Konstruktion getragen werden können.[399] Gleichzeitig bilden die in den vorangegangenen Abschnitten dargestellten Wachstumsbedingungen und Entwicklungsprozesse baubotanischer Strukturen die Grundlage des Entwurfs, wobei versucht wurde, diese botanischen Anforderungen mit räumlichen, konstruktiven und gestalterischen Ansprüchen in Einklang zu bringen.

Konsequenz der konstruktiven Zielsetzungen ist, dass ein baubotanisches Tragwerk zu entwickeln war, in dem möglichst geringe Beanspruchungen der pflanzlichen Tragelemente auftreten. Denn nur so kann die baubotanische Konstruktion in kurzer Zeit – d.h. mit relativ wenig Dickenwachstum – die angestrebte Tragfähigkeit erreichen. Dafür muss bereits die Anfangsstruktur konstruktiv optimiert sein und die Achsenabschnitte sollten ein gleichmäßiges Dickenwachstum zeigen bzw. insbesondere dort wachsen, wo sie konstruktiv beansprucht werden. Gleichzeitig sollte die Struktur eine gewisse Redundanz aufweisen, sodass auch beim Ausfall einer Pflanze bzw. eines Achsenabschnitt die Tragfähigkeit der Gesamtstruktur erhalten bleibt. Als gestalterische Prämisse wurde – ähnlich wie bei dem Projekt „baubotanischer Steg“ – eine möglichst einfache und geometrisch klare Kubatur des Bauwerks angestrebt, an dem die Wachstumsprozesse (Austriebe etc.) und das Verschmelzen von pflanzlichen und technischen Bauelementen deutlich ablesbar sind.

4.4.2 Standort und Baumart

Neben den bereits beschriebenen Voraussetzungen sind für einen baubotanischen Entwurf natürlich auch der Standort und die potentiell zur Verfügung stehenden Pflanzen bzw. deren Eigenschaften (vgl. Kapitel 2) entwurfsbestimmend. Das Bauwerk wurde auf dem Gelände des Projekts „Neue Kunst am Ried“[400] in unmittelbarer Nachbarschaft zu dem 2005 gebauten baubotanischen Steg realisiert.[401] Aufgrund der Höhenlage (ca. 650 m über NN) und der Standortbedingungen (Feuchtwiese) kamen nur robuste und feuchtigkeitsresistente Arten in Frage, die ferner – um möglichst rasch sichtbare Ergebnisse zu erzielen – möglichst schnellwüchsig sein sollten. Auf Grundlage der in Kapitel 3 dargestellten Verwachsungsversuche kamen unter diesen Umständen Weiden und Platanen in Betracht. Da aus Gründen des Landschafts- und Naturschutzes Platanen ausschieden,[402] wurde die in den Verwachsungsversuchen bereits untersuchte Silberweide (*Salix alba*) für das Projekt gewählt.[403] Der nicht nur feuchte, sondern auch vollsonnige Standort bietet dieser Art optimale Wachstumsvoraussetzungen. Um eine Verschattung der Pflanzen durch das Bauwerk selbst auf den sonnenabgewandten Seiten so gering wie möglich zu halten, wurde der Turm so positioniert, dass er keine reine Nordseite, sondern ausschließlich Nordost bzw. Nordwest ausgerichtete Flächen aufweist, die zumindest abends oder morgens direkt besonnt werden.

---

[399] Im Fokus des Entwurfs stehen trotzt dieser Zielsetzung die pflanzenphysiologischen Aspekte. Die konstruktiven und statischen Aspekte des Bauwerks wurden nicht quantitativ untersucht.

[400] Wald-Ruhestetten, Riedstraße 26.

[401] Die Wahl des Standorts erfolgte aus praktischen Erwägungen heraus (Verfügbarkeit, Möglichkeit der Kontrolle, Überwachung und Pflege).

[402] Angrenzendes Naturschutzgebiet; die Baumart gilt als Neophyt.

[403] Theoretisch wären auch Schwarzerlen denkbar gewesen, hier war jedoch aufgrund fehlender Vorerfahrung zweifelhaft, ob in der zur Verfügung stehenden Zeit der Vorproduktion entsprechend große Pflanzen hätten erzeugt werden können.

4.4.3 Baubotanische Pflanzenstruktur

Entsprechend der Überlegungen zu gravimorphen Reaktionen (Abschnitt 4.2.2) und zu den Zusammenhängen zwischen Xylemstrom und Dickenwachstum (Abschnitt 4.2.4) wurden die Pflanzen rautenförmig angeordnet, sodass alle Pflanzenachsenabschnitte gleich stark geneigt und alle parallelen Abschnitte gleich lang sind. In erster Näherung wurde bei dieser Anordnung angenommen, dass alle Achsenabschnitte in etwa gleich stark wachsen und so eine stabile Struktur entstehen kann (Kraftfluss = Saftfluss). Um eine möglichst steife, fachwerkartige Konstruktion zu bilden, wurde diese Pflanzenstruktur an den Kreuzungspunkten mit aussteifenden technischen Bauteilen verbunden (Einwachspunkte) und so eine Dreieckbildung erreicht. (Abbildung 119 rechts, Abbildung 122) Alle Streben der rautenförmigen Pflanzenstruktur wurden aus jeweils zwei Pflanzen gebildet, die über die gesamte Länge parallel miteinander verbunden wurden.

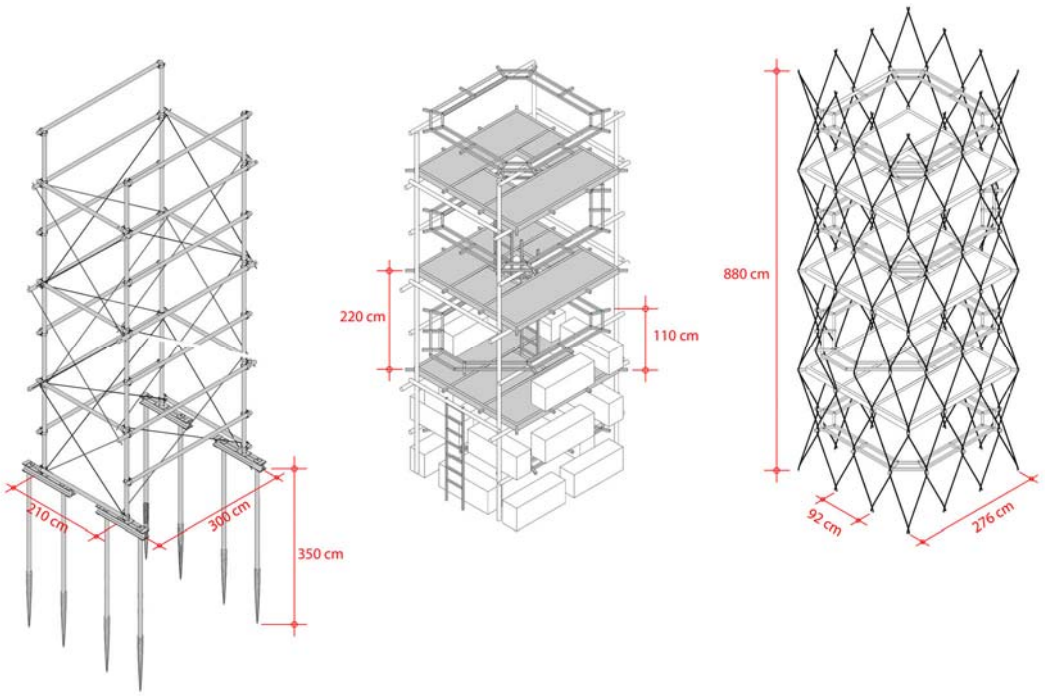


Abbildung 119 Struktureller Aufbau des Turms. Links: Temporäres Gerüst aus Rundohren mit Zugdiagonalen; Mitte: Dauerhaft verbleibende und einwachsende Bauteile (Geschossebnen und aussteifende Zwischenebenen; grau). Im unteren Bereich sind einige Pflanzcontainer dargestellt. Rechts Pflanzenstruktur und Einwachsende Bauteile (ohne Pflanzcontainer. (Maßstabsgetreue Darstellung im Anhang)

Die Neigungswinkel und Abstände der Pflanzen sowie die horizontalen Abstände der Ebenen ergaben sich aus den Abmessungen der zur Verfügung stehenden Pflanzen und aus den Anforderungen der Redundanz: Mit den Pflanzen, die Trieblängen von ca. 2 Metern aufwiesen (s. u.). können aufgrund des Neigungswinkels, der für die Addition benötigten Verbindungslänge und eines nötigen „freien Endes“ lediglich Höhen von ca. 110 cm überbrückt werden. Daraus ergab sich eine mögliche „Geschosshöhe“ von 220 cm (Achsmaß) und eine Anordnung der Pflanzen auf den begehbaren Ebenen sowie auf Zwischenebenen, die als aussteifende Handläufe bzw. Absturzsicherungen ausgebildet wurden.

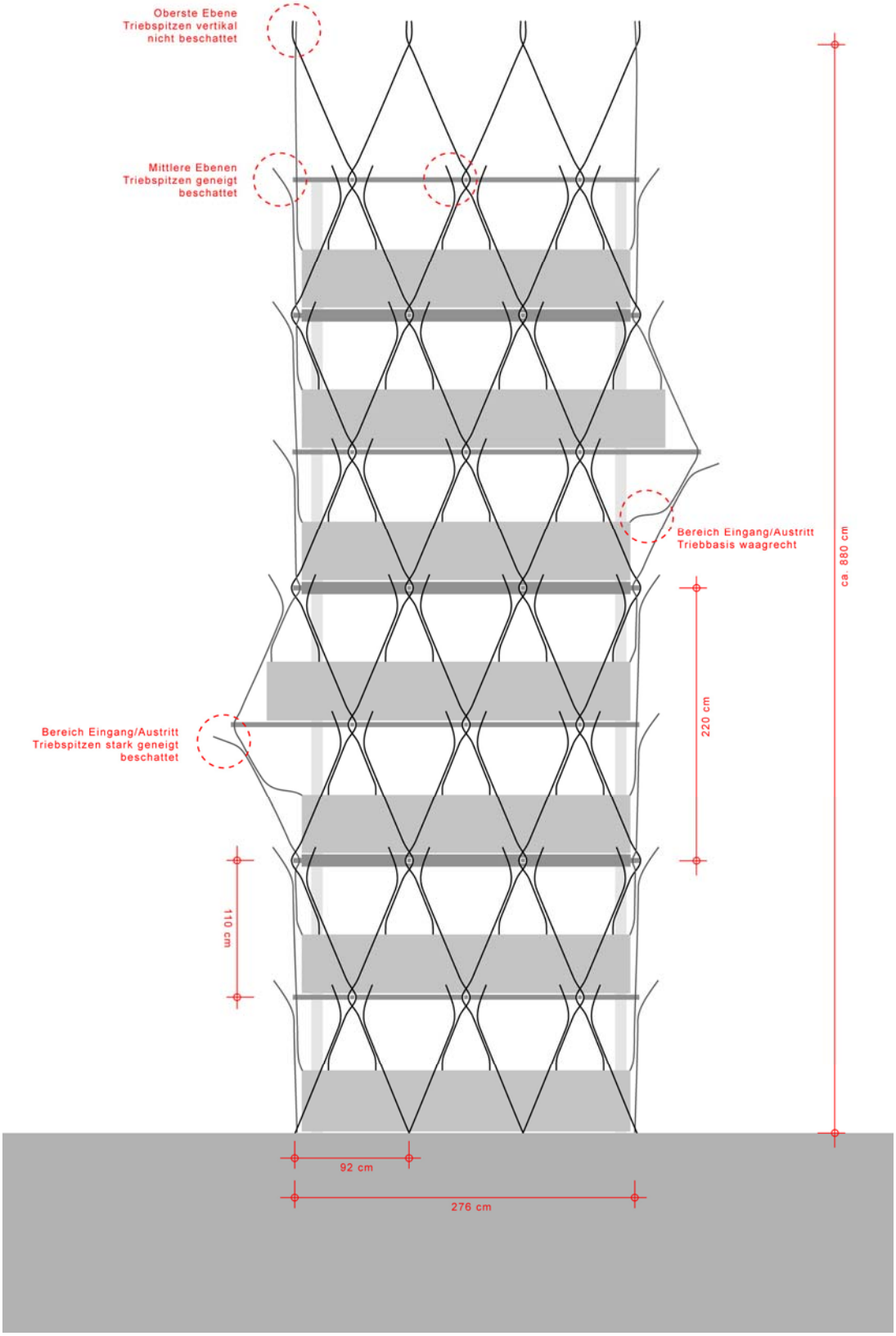


Abbildung 120 Ansicht Süd-West-Seite (Maßstab 1:50) mit Darstellung der Pflanzenanordnung (Erklärung der rot markierten Bereichen siehe Abschnitt 4.5.1.1).

Um eine Redundanz der Tragelemente zu gewährleisten, wurden je Seite in der Breite drei Rautenfelder vorgesehen, sodass sich insgesamt je Ebene 12 (pro Seite 3) Einwachspunkte ergaben.[404] Um eine Vergleichbarkeit der Wachstumsbedingungen zu gewährleisten, wurde ein quadratischer Grundriss gewählt, der eine Seitenlänge von ca. 280 cm (Achsmaß Pflanzen) aufweist.

Um in dieser zunächst allseitig geschlossenen Struktur einen Eingang auszubilden ohne die Neigungswinkel und Transportlängen (Xylemstrom) der Triebe zu verändern, wurden an der Nordostseite 4 Pflanzenpaare um 90° nach außen gedreht, sodass ein ca. 90 cm breiter und 220 cm hoher Durchgang entstand, der jedoch noch durch die Zwischenebene unterteilt wird (Abbildung 120; Abbildung 119). Der Eingang wurde nicht auf der Geländeebene, sondern auf Höhe der ersten Plattform angeordnet, um die im unteren Bereich am stärksten belastete Fachwerkstruktur möglichst wenig zu schwächen. In ähnlicher Art und Weise wurde in der zweiten Ebene ein balkonartiger „Austrittspunkt“ ausgebildet, der nach Entnahme der Pflanzcontainer einen Ausblick über die Riedlandschaft ermöglichen soll.

Abbildung 121 Pflanzenverbindung am Turm. Oben: Vorbohren und Eindrehen der Edelstahlschraube. Unten: Fertig montierte Kreuz- und Parallelverbindung (Additionsstelle).

[404] Bein einem Ausfall von einem bis maximal zwei Einwachspunkten je Seite ist immer noch eine kraftschlüssige Verbindung gegeben.

Die Pflanzenpaare wurden knapp ober- und unterhalb der Einwachspunkte gekreuzt, sodass die Einwachspunkte seitlich von 4 Pflanzen überwallt und ober- und unterhalb von einer Kreuzverwachsung umschlossen werden(Abbildung 122). Mit dieser Anordnung wurde versucht, eine möglichst verlässliche Verbindung entstehen zu lassen, die auch beim Ausfall einzelner Pflanzen nicht gleich ihre gesamte Stabilität einbüßt. An den Kreuzungs- sowie an den Parallverbindungsstellen wurden die Pflanzen mit Edelstahlschrauben verbunden, da sich diese Technik unter den gegebenen Bedingungen als besonders praktikabel erwies. Im Unterschied zu den Verwachsungsversuchen wurden alle Verbindungen vorgebohrt (D = 2 mm), um eine Spalten des Holzes zu vermeiden. An den Kreuzverbindungsstellen wurden die Pflanzenpaare mit insgesamt zwei Schrauben verbunden, an den Parallel- bzw. Additionsverbindungen ca. alle 20 cm mit einer Schraube je Pflanzenpaar. Zur Formgebung wurden die Pflanzen miteinander sowie am Bambusspalier (s. u.) mit doppelseitigen Klettband fixiert. (Abbildung 121).

4.4.4 Technische Bauteile und Hilfskonstruktion

Alle technischen Bauteile wurden aus Stahl konstruiert und feuerverzinkt. Die begehbaren Ebenen bestehen aus Rechteckrohren (50/100/3), die zu einem steifen Rahmen verschweißt und mit Gitterrosten belegt wurden. Die Zwischenebenen wurden als umlaufende, liegende Vierendeel-Rahmen ausgebildet (Quadratrohr 40/40/2), um eine horizontale Aussteifung zu erreichen und eine Auflagefläche für die Pflanzcontainer zu schaffen. Im Bereich des Eingangs bzw. des Austritts wurden diese Rahmen weiter nach außen geführt, sodass die erste Hauptebene im Eingangsbereich mittels einer Anlegeleiter betreten werden kann (Durchstieg, siehe Abbildung 119 Mitte). In der zweiten und dritten Ebene wurden jeweils mittig ein Durchstieg und eine Aluleiter angeordnet. Während der ersten Wachstumsphase dienen diese Ebenen ausschließlich der Wartung und Pflege.

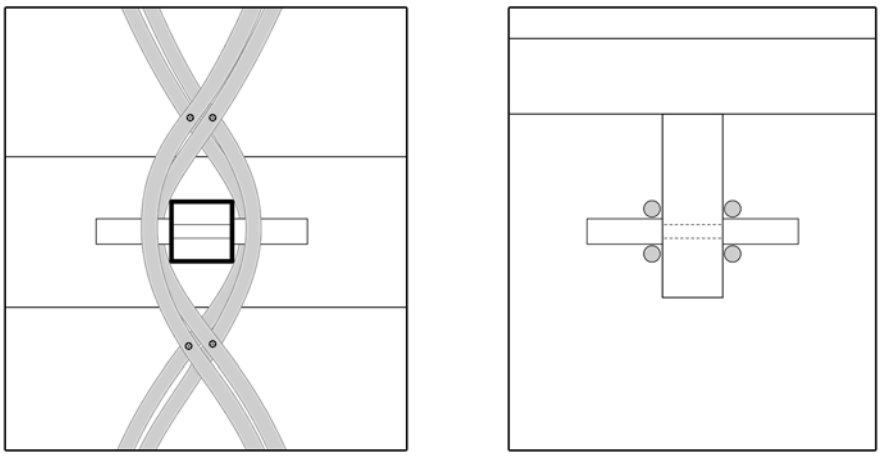


Abbildung 122 Detail Pflanzenanschluss(Einwachspunkt). Ansicht und Horizontalschnitt. (Maßstab 1:5)

Die Ebenen und Zwischenebnen werden von einer temporären Gerüststruktur getragen, die aus Rundrohren (90/5) konstruiert wurden. Die Vertikallasten werden von 4 Eckstützen aufgenommen, die Ebenen und Zwischenebenen liegen jeweils auf zwei horizontalen Rundrohren auf, die mit Rohrverbindern an den Stützen befestigt wurden. Die Windaussteifung erfolgt über diagonal

angeordnete Zugstäbe (Gewindestangen M12). Durch ein schrittweises Lösen der Rohrverbinder oder Lockern der Diagonalverstrebungen ermöglicht diese Konstruktion ein Überprüfen der Tragfähigkeit der baubotanischen Struktur, ohne dass dabei die Gefahr größerer Beschädigungen bestehen würde. Zur Verankerung der Stützstruktur im Erdreich wurden Schraubfundamente gewählt. Je Eckstütze wurden zwei auf 3,5 m verlängerte Schraubfundamente (System Krinner) eingedreht und mit einem liegenden U-Profil verbunden. Diese Fundamentierungsvariante ermöglichte es, in der kaum tragfähigen Feuchtwiese ohne nennenswerte Eingriffe zu gründen.[405] Gleichzeitig wird durch die Schraubfundamentierung der Wurzelraum der Pflanzen nur minimal beeinträchtigt. (Abbildung 119 links)

Zur Ausbildung der Einwachspunkte wurden an den Ebenen bzw. Zwischenebenen ca. 20 cm lange Quadratrohre (40/40/2) angeschweißt, die im Bereich der Kreuzungsstelle mit den Pflanzenpaaren eine Querbohrung aufweisen (D = 11mm). In dieser Bohrung wurde ein Gewindebolzen (M 10) mit zwei Edelstahl-Gewindehülsen befestigt, um die die Pflanzen einzeln herumgeführt wurden (Abbildung 122). Am äußeren Ende der Quadratrohre wurden mit Kabelbindern Bambusstäbe befestigt, die eine außerhalb der Pflanzenebene liegendes, dem Rautenmuster der Pflanzen entsprechendes Bambusspalier bilden, an dem die Pflanzen zur Formgebung befestigt wurden (vgl. Abbildung 121 oben links; in Zeichnungen nicht dargestellt).

4.4.5 Vegetationstechnik und Pflanzenproduktion

Neben dem Entwurf einer Anfangsstruktur, die die gewünschte Entwicklung ermöglicht, ist die Schaffung geeigneter Wurzelräume und die Versorgung der Pflanzen mit Wasser und Nährstoffen im Luftraum eine große technische Herausforderung der Pflanzenaddition. Konventionelle Techniken mit Pflanzcontainern und Tröpfchenbewässerungen, wie sie in Baumschulen oder auch Dachgärten etabliert sind, bringen ein hohes Gewicht mit sich und erfordern daher eine aufwändige Stützstruktur. Moderne Kulturverfahren wie Hydro- oder Airoponik kommen mit weitaus geringeren Massen aus, sind aber deutlich teurer und technisch aufwändiger. Da sie insbesondere für den Einsatz in Gewächshäusern entwickelt wurden, sind sie jedoch gegenüber Witterungseinflüssen (Frost) weitaus anfälliger als konventionelle Containersysteme. Um ein Versagen der Vegetationstechnik möglichst ausschließen zu können, wurden für den Turm daher relativ konventionelle Containersysteme mit Tröpfchenbewässerung gewählt und die daraus resultierenden Lasten in Kauf genommen. Die Nutzung technisch aufwändiger Systeme bietet zwar eine Reihe von Vorteilen (u. a. auch präzisere Steuerung und Düngung), setzt jedoch eine Forschungs- und Entwicklungsarbeit voraus, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht geleistet werden konnte und in weiterführenden Forschungsprojekten in Zusammenarbeit mit Agrarwissenschaftlern und Gartenbautechnikern vorgenommen werden soll.

Als Pflanzcontainer wurden Gabionen (Drahtkörbe) verwendet, die mit wasserdurchlässigem und atmungsaktivem Bändchengewebe ausgeschlagen wurden.[406] Als Substrat wurde von Seiten des Anzuchtbetriebs gewöhnliches Torfsubstrat gewählt. Für die Anzucht, die unmittelbar in diesen Containern stattfand, wurden die Jungpflanzen[407] auf zwei Augen zurückgeschnitten und paarweise an den entsprechenden Stellen im Pflanzcontainer gepflanzt (insgesamt 8 Pflanzen je Container). Weitere Pflanzen wurden einzeln in 3-Liter-Töpfen angezogen (Ersatz, Bodenpflan-

[405] D. h. ohne Bodenverdichtungen, ohne schweres Baugerät, ohne Abpumpen von Grundwasser etc.

[406] Abmessungen der Gitterkörbe: 120/35/50 cm (L/B/H). Bändchengewebe: MyPex, Fa. Meyer, Rellingen. Für den Bereich des Eingangs und des Austritts wurden spezielle, L-förmige Container konstruiert.

[407] 1x verpflanzte Sträucher mit min. 4 Trieben, Sortierung 60/100; Baumschule Schlegel, Riedlingen.

zung). Mit dieser Vorproduktion wurde im März 2009 im Gewächshaus (Fa. Helix Pflanzen, Leipzig, unbeheizt) begonnen. Während der Anzucht wurden Seitentriebe regelmäßig entfernt und die Hauptriebe an Bambusstäben fixiert. Die Pflanzen wurden dann im Juni zur Abhärtung ins Freiland gebracht und erreichten bis zum Einbau (Juli 2009) Trieblängen von ca. 200 bis 210 cm.

Abbildung 123 Oben links: In Pflanzcontainern vorkultivierte Pflanzen. Oben rechts: Schraubfundamentierung. Unten links: Montage der Gerüststruktur und der Pflanzen mithilfe eines Raupenkrans. Unten rechts: Abschließendes Verbinden der Pflanzen.

Das Platzieren der Pflanzen bzw. Pflanzcontainer am Bauwerk erfolgte im Zuge des Baufortschritts (Juli 2009) mit Hilfe eines Krans. Nach der Montage wurde ein Bewässerungssystem installiert, wobei je Pflanzenpaar ein Tropfer (Netafim Junior, 4l/h) vorgehsehen wurde (4 Tropfer pro Container).[408] Zur Bewässerung konnte ein auf dem Grundstück vorhandener Wassersammler (Oberflächennahes Grundwasser) genutzt werden, von dem das Wasser zum Bauwerk gepumpt wird. Die Steuerung der Bewässerung erfolgt mittels einer Zeitschaltung, wobei Dauer und Intervall witterungs- und jahreszeitenabhängig angepasst werden (Überschussbewässerung). Jede Containerebene kann zur Steuerung des Verwachsungs- bzw. Additionsprozesses

[408] Da die Container der obersten Ebene schneller austrockneten (Wind, direkte Sonneneinstrahlung) wurden hier 6 Tropfer je Container installiert. Zum Ende eines Bewässerungsgangs kommt es bei den unteren Tropfern zu einem längeren Nachlaufen, bis die Leitungen darüber entleert sind. Auch tropft in die unteren Container das Überschüssige Wasser der darüberliegenden ab. Da alle Container jedoch wasserdurchlässig sind und immer Feuchtigkeitsgesättigt sind, spielen die Unterschiede in der Wasserversorgung vermutlich eine geringere Rolle. Aufgrund des höheren Durchflusses kommt es bei den unteren Containern jedoch vermutlich zu einem stärkeren Auswaschen von Nährstoffen.

durch einen Absperrhahn von der Bewässerung abgekoppelt werden. Die Düngung erfolgt als manuelle Nachdüngung mit dem Depotdünger Triabon (16+8+12(+4+9), FA. Compo) nach Herstellerangaben.[409]

4.5 Entwicklungsprozesse und Pflegekonzept

Die sich an die Bauphase anschließende Entwicklung des Turms kann in drei Phasen unterteilt werden, die durch ein jeweils spezifisches Zusammenspiel von Wachstum, Mortalität und pflegerischen Eingriffen bestimmt sind: Unmittelbar nach der baulichen Fertigstellung besteht das Bauwerk aus 384 Einzelpflanzen, die auf mehreren Ebenen angeordnet sind und in Konkurrenz zueinander stehen (Phase 1). Sobald die Pflanzen dann an den Verbindungsstellen miteinander verwachsen sind und so eine physiologische Einheit entstanden ist, wird in der zweiten Phase damit begonnen, die in Abschnitt 4.3 beschriebene Entwicklung so zu steuern, dass eine ausschließlich im Boden wurzelnde Struktur entsteht. Wenn dieses Entwicklungsziel erreicht ist, beginnt die dritte Entwicklungsphase, in der sich die vollständig verwachsene und autark (ohne Bewässerungstechnik) vom Boden her mit Wasser und Nährstoffen versorgende Pflanzenstruktur durch Dickenwachstum, vermehrt aber auch durch das Absterben von Achsenabschnitten, weiterentwickelt.

Während sich die Wachstumsbedingungen der ersten und dritten Phase relativ gut erfassen lassen, liegt in der zweiten Phase das Problem vor, dass z. B. Konkurrenzbedingungen kaum korrekt ermittelt werden können, da sich hier die Betrachtungsebene ständig verändert.[410] Daher werden im Folgenden lediglich für die erste und dritte Phase die Wachstumsbedingungen detailliert analysiert und die sich daraus ergebenden Konsequenzen für die Entwicklung und Pflege abgeleitet.[411] Für die zweite Phase wird ausschließlich ein Ansatz vorgestellt, wie die gewünschte Entwicklung erreicht werden soll (Pflege- bzw. Steuerungskonzept), ohne gesondert auf die Wachstumsbedingungen der einzelnen Pflanzen bzw. des entstehenden Gesamtorganismus einzugehen.

4.5.1 Entwicklungsphase I: Entwicklung der Einzelpflanzen

Ziel der Entwicklung und damit auch der Pflege in der ersten Phase ist, dass sich die Pflanzen möglichst gleichmäßig entwickeln und ein möglichst großes Dickenwachstum zeigen, damit sie rasch miteinander verwachsen können (vgl. Kapitel 2). Grundvoraussetzung hierfür sind zunächst gute Wachstumsbedingungen im Wurzelraum, die durch eine möglichst optimale Versorgung aller Pflanzen mit Wasser und Nährstoffen gewährleistet werden können.[412] Im Kronenraum ist die Entwicklung durch die Anordnung der Pflanzen im Raum geprägt, aus der Konkurrenzbedingungen und gravimorphe Reaktionen resultieren (vgl. Abschnitte 4.2.1 und 4.2.2). Diese Faktoren gilt es detailliert zu analysieren, da zwischen den einzelnen Pflanzen trotzt der an sich gleichförmigen Anordnung im Detail nicht zu vernachlässigende Unterschiede bestehen.

---

[409] Bei den Pflanzen, die in den Boden gepflanzt wurden, erfolgte die Dünung und Wässerung auf vergleichbare Art und Weise.

[410] Übergang von Einzelpflanzen zu einem Gesamtorganismus.

[411] Dabei ist jedoch zu bedenken, dass die dritte Entwicklungsphase auf den Phasen 1 und 2 aufbaut und damit stärker als die erste Phase auf hypothetischen Annahmen basiert.

[412] Allen Pflanze in den Container steht prinzipiell der gleiche Wurzelraum zur Verfügung, vgl. Abschnitt 4.5.2.

4.5.1.1 Gravimorphe Reaktionen

Wie oben dargestellt (Abschnitt 4.4.3) wurde die baubotanische Struktur als eine gleichmäßige Rautenstruktur mit möglichst geringen, überall gleichen Neigungswinkeln der Triebe ausgebildet, um von vorne herein gravimorphe Reaktionen und Unterschiede in der Entwicklung so gering wie möglich zu halten. Darüber hinaus wurde versucht, die Enden der Triebe oberhalb der Additionsstelle senkrecht auszurichten, um deren apikale Kontrolle über die darunter liegenden Seitentriebe sowie die Bildung eines Leittriebs an der Spitze zu fördern (vgl. Abschnitt 4.2.2.2). Dies war jedoch nur bei der obersten Ebene uneingeschränkt möglich, da die Triebspitzen bei allen anderen Ebenen mehr oder weniger stark nach außen geneigt werden mussten, damit sie ausreichend belichtet werden und nicht mit den darüber angeordneten Pflanzen bzw. Pflanzcontainern kollidieren. Im Bereich des Eingangs und des Austritts war es bei einigen Pflanzen sogar nötig, die Triebspitzen annähernd waagrecht nach außen bzw. in besser belichtete Bereiche zu lenken. Bei diesen Pflanzen kam hinzu, dass sie im basalen Bereich stärker gebogen und über eine Strecke von ca. 25cm fast waagrecht geführt werden mussten (Abbildung 120).[413]

Aufgrund dieser Unterschiede in den gravimorphen Reizen ist damit zu rechnen, dass die Pflanzen der obersten Ebene aller Voraussicht nach ohne größere pflegerische Eingriffe einen vitalen Leittrieb an der Spitze entwickeln. Bei den anderen Pflanzen müssen vermutlich in regelmäßigen Abständen basale Triebe entfernt und sich stärker als der Haupttrieb entwickelnde Seitentriebe eingekürzt werden, um das gleiche Entwicklungsziel zu erreichen. Bei den beschriebenen Pflanzen im Bereich des Eingangs und des Austritts ist aufgrund waagrecht gebogener basaler Triebabschnitte bzw. besonders stark geneigter Triebspitzen vermutlich mit besonders starken Austrieben im basalen Bereich und einem sich nur schwach entwickelnden Haupttrieb zu rechnen. Diese Pflanzen bedürfen bei der Pflege einer besonderen Sorgfalt und werden sich vermutlich – da regelmäßig ein größerer Teil der Blätter entfernt werden muss – insgesamt am schwächsten entwickeln.

4.5.1.2 Pflanzendichte und Self-Thinning

Wie in Abschnitt 4.2.1 dargestellt, ist die Pflanzendichte für die Abschätzung der Entwicklung baubotanischer Strukturen von großer Wichtigkeit, da über den Vergleich mit Selbstdurchforstungslinien von Baumbeständen beurteilt werden kann, ab welcher Biomasse bzw. ab welchem Durchmesser der einzelnen Pflanzen die zur Verfügung stehenden Ressourcen nicht mehr ausreichen und daher einzelne Pflanzen absterben. Methodisch schwierig ist dabei, dass der Definition der Pflanzendichte eines Baumbestandes gewöhnlichen die Grundfläche zugrunde liegt und diese Bezugsgröße bei Additionsstrukturen nicht herangezogen werden kann. Dennoch soll hier versucht werden, einen Vergleich mit gewöhnlichen Pflanzenbeständen durchzuführen. Dabei kann aufgrund der Datenlage keine präzise Berechnung, sondern nur eine Abschätzung der Größenordnung erfolgen, die jedoch zunächst ausreicht, um Entwicklungstendenzen in erster Näherung zu prognostizieren.

In erster Näherung könnte die Mantelfläche des Turmes[414] als Ersatz für die Grundfläche herangezogen werden, da die Pflanzen gewissermaßen aus dieser Fläche herauswachsen. In einer

---

[413] Um die Öffnungen der Rautenstruktur in diesen Bereichen zu ermöglichen, wurden hier spezielle, L-förmige Container eingesetzt. Damit konnte jedoch die Änderung der Rautengeometrie nicht vollständig ausgeglichen werden, sodass die beschriebene Biegung der Pflanzen nötig wurde.

[414] Bei einer Seitenlänge von ca. 2,8 m (Außenkante Einwachspunkte) und einer Höhe von ca. 8,8 m (Höhe oberster Kreuzungspunkt) ergibt sich eine Mantelfläche von knapp 100 m².

zweiten Berechnungsmethode wurde versucht, über die Abschätzung bzw. Berechnung des entstehenden Kronenvolumens eine Referenz-Grundfläche zu ermitteln. Dem in Abbildung 125 links dargestellten Kronenvolumen liegen Trieblängen zugrunde, die aus Bildauswertungen von Referenzprojekten und der Entwicklung der Verwachsungsversuche mit Weiden für die ersten beiden Entwicklungsjahre abgeleitet wurden. Das dargestellte Kronenvolumen hat einen Inhalt von ca. 105 m³ und kann für die ersten zwei bis drei Jahre als relativ konstant angenommen werden, da aufgrund der notwendigen Schnittmaßnahmen immer wieder Triebe entnommen und eingekürzt werden.[415] Ein vergleichbarer Pflanzenbestand (z. B. eine Weidenplantage mit Gesamt-Trieblängen von ca. 300 cm) weist je Quadratmeter Bestandesgrundfläche ein Kronenvolumen von ca. 1 bis 1,5 m³ auf, da die lebenden Blätter nicht entlang des gesamten Triebes, sondern nur im oberen, besonnten Bereich angeordnet sind.[416] Daraus würde sich eine Referenz-Grundfläche von 70 bis 105 m² ergeben, sodass die referenzierte Pflanzendichte sowohl nach der ersten als auch nach der zweiten Berechnungsmethode zwischen 4 und 5,5 Pflanzen/m² liegt (Gesamtzahl der Pflanzen: 384).

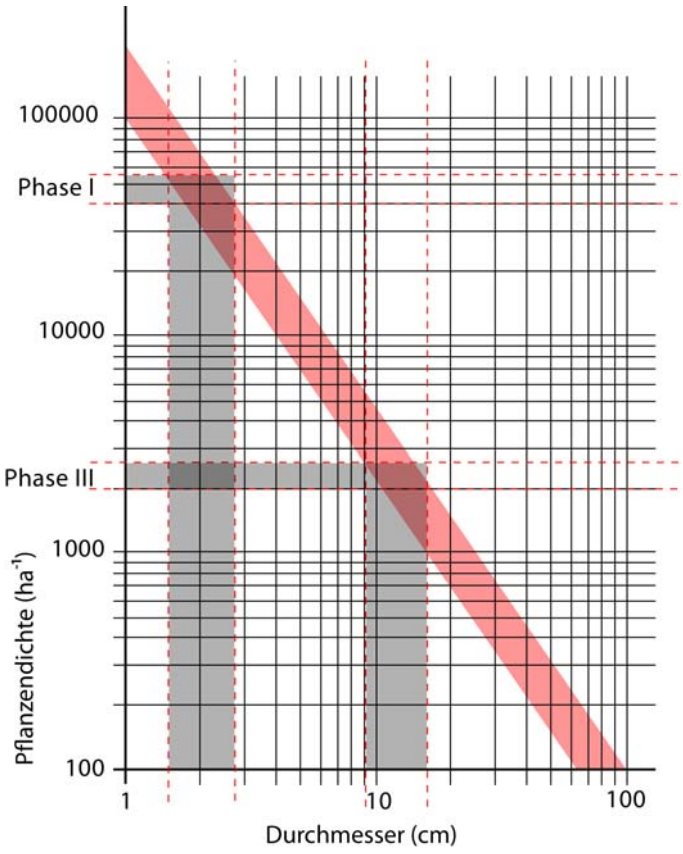


Abbildung 124 Ermittlung von Durchmessern, bei denen es zu einer Selbstdurchforstung kommen müsste. Dies ist bei Durchmessen von knapp 1,5 bis knapp 3 cm der Fall (Phase I). Selbstdurchforstungslinien (roter Balken) nach Daten von Pretzsch (2000). (Phase III siehe Abschnitt 4.5.3.2)

Für die Abschätzung der Entwicklung, die ausgehend von dieser referenzierten Pflanzendichte zu erwarten ist, wurde versucht, geeignete Selbstdurchforstungslinien zu ermitteln. Eine Aus-

[415] Es ist im ersten Jahr vermutlich etwas geringer, im zweiten etwas größer.

[416] Pers. Beobachtung in dichten Weidenplantagen.

wertung der von Pretzsch (2000) zusammengestellten Daten (vgl. Abschnitt 4.2.1) ergab, dass für alle dort wiedergegebenen Pflanzenbestände unabhängig von der Baumart (Douglasie, Fichte, Buche, Eiche, Kiefer) und dem Standort (Nordarmerika, Europa) die Selbstdurchforstungslinien so gut wie immer[417] in dem in Abbildung 124 wiedergegebenen Bereich liegen. Innerhalb dieses Genauigkeitsbereichs scheint die Selbstdurchforstungslinie offensichtlich nicht wesentlich von der Baumart und dem Standort beeinflusst zu sein und sollte somit in etwa auch für Weidenbestände bzw. in erster Näherung auch für die Wachstumsbedingungen am Turm gelten:[418] Für eine Pflanzendichte zwischen 40.000 und 55.000 Pflanzen/ha (bzw. 4 bis 5,5 Pflanzen/m²) lässt sich ablesen, dass ab einem Durchmesser von knapp 1,5 bis knapp 3 cm mit Selbstdifferenzierungsprozessen, d. h. mit dem Absterben von Pflanzen gerechnet werden muss, sofern keine pflegerischen Eingriffe erfolgen.[419] Die Pflanzen, die zum Zeitpunkt des Einbaus Durchmesser von ca. 1 cm aufwiesen, könnten demnach 0,5 bis maximal 2 cm an Dicke zulegen, bevor ein natürlicher Verdrängungsprozess einsetzt. Betrachtet man nach dem Verwachsen die miteinander verschmolzenen Pflanzenpaare als eine einzelne Pflanze (vgl. Abschnitt 4.2.1.2), so könnten diese Durchmesser von 3 bis 4 cm erreichen (Halbierung der Pflanzenzahl).

Damit ist die anfängliche Pflanzendichte beim Turm so hoch, dass bereits nach kurzer Zeit die Grenze der natürlichen Entwicklung erreicht wird und deshalb bereits innerhalb der ersten Vegetationsperioden aufgrund der Konkurrenzbedingungen mit dem Absterben einzelner Pflanzen gerechnet werden muss. Anderseits erscheint es jedoch auch möglich, die Entwicklung durch Pflege so zu steuern, dass alle Pflanzen einen Durchmesser von 2,5 cm oder mehr erreichen können, wenn der natürliche Verdrängungsprozess durch den Rückschnitt dominierender Pflanzen verlangsamt wird. Ab diesem Durchmesser kann davon ausgegangen werden, dass die parallel verbundenen Pflanzen vollständig miteinander verwachsen sind (vgl. z. B. Abbildung 71).

4.5.1.3 Kronenvolumen und Dickenwachstum der einzelnen Pflanzen.

Nach der obigen Betrachtung der Konkurrenzbedingungen, die sich aus der Gesamtzahl der Pflanzen und dem Gesamt-Kronenvolumen ergeben, sollen hier nun die Wachstumsbedingungen im Kronenraum der einzelnen Pflanzen im Detail untersucht und dargestellt werden. Wie beschrieben, ist das Kronenvolumen, das sich eine Pflanze erschließen kann, ein wichtiger Faktor in der Entwicklung. Denn nur mit einem ausreichend großen Kronenvolumen kann eine Pflanze genug Photosynthese betreiben, um die für Ihren Selbsterhalt und ihr Wachstum notwendigen Assimilate zu produzieren. Darüber hinaus ist die insgesamt zur Verfügung stehende Lichtmenge ausschlaggebend, die gerade bei Lichtbaumarten wie der Weide zu einer kritischen Größe wird, da Lichtmangel rasch zum Absterben führt.

In Abbildung 125 sind die potentiellen Kronenräume der einzelnen Pflanzen bzw. Pflanzenpaare des Turmes für die ersten beiden Entwicklungsjahre im Schnitt und Grundriss dargestellt. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die Pflanzen Triebe mit einer Länge von 80 bis 150 cm

---

[417] Bei über 80% der dort eingetragenen Werte.

[418] Mit der Kiefer ist eine Lichtbaumart in der Auswertung enthalten, die in diesen Aspekten mit der Weide vergleichbar ist. Die vorliegenden Selbstdurchforstungslinien nach Pretzsch wurden bei Pflanzen ab einem Brusthöhendurchmesser von 3 cm, in der Regel 5 cm bis 10 cm ermittelt. Um die Entwicklung der baubotanischen Struktur abschätzen zu können, wurden die Selbstdurchforstungslinien in den Durchmesserbereich bis 1cm interpoliert bzw. verlängert.

[419] Eine nicht unerhebliche Ungenauigkeit dieser Abschätzung liegt darin, dass in den zitierten Quellen mit dem Brusthöhendurchmesser gearbeitet wurde, die Durchmesser der Triebe des Turmes jedoch an der Basies gemessen wurden (eine Messung in 1,3 Metern Abstand von der Basis erscheint bei ca. 220 cm Trieblänge auch nicht angebracht)

entwickeln, die einen Winkel von maximal 30° gegenüber der Vertikalen aufweisen. Würde man die verwendeten Pflanzen auf einer freien Fläche senkrecht aufstellen, würden sie sich (unter dieser Annahme) das in Abbildung 125 rechts unten dargestellte Kronenvolumen von 4,2 m³ Rauminhalt erschließen (Referenzpflanze). Im Turm entwickeln die Pflanzen eine deutlich kleinere Krone, weil sie sich lediglich die Bereiche erobern können, die nicht von technischen Bauteilen (z. B. Pflanzcontainern) oder anderen Pflanzen besetzt sind. Wie in Abbildung 125 erkennbar, sind die Kronenvolumina der Ebenen 0 (Bodenpflanzung) bis 5 annähernd identisch.[420] Die Pflanzen der Ebene 6 können sich einen zusätzlichen Kronenraum erschließen, indem sie auch nach innen austreiben, da auf dieser Ebene keine Pflanzcontainer mehr angeordnet sind. Gleiches gilt für die Pflanzen der obersten Ebene (7), die sich darüber hinaus noch nach oben hin einen Kronenraum erschließen können, da dieser Bereich hier nicht durch weitere Pflanzen besetzt ist.

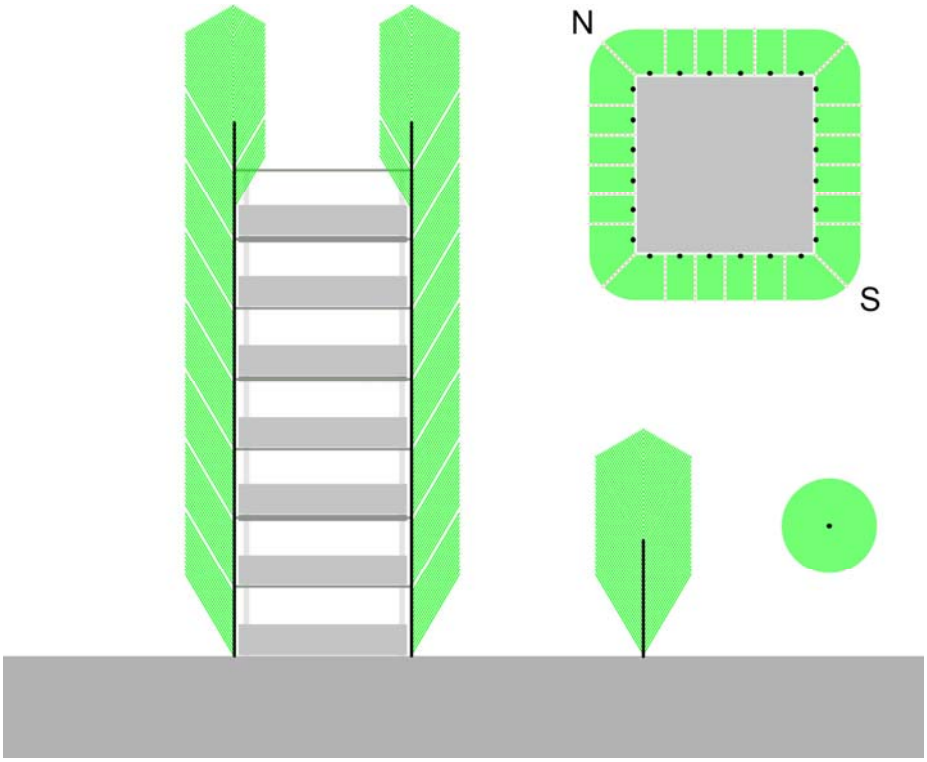


Abbildung 125 Angenommene Kronenvolumina der Pflanzen im Turmes und einer vergleichbaren Referenzpflanze in den ersten beiden Entwicklungsjahren.(Jeweils Schnitt und Grundriss).

Neben diesen Unterschieden zwischen den Ebenen ergeben sich auch Unterschiede zwischen Pflanzen bzw. Pflanzenpaaren, die an den Ecken und solchen, die eher mittig in den Wandflächen angeordnet sind. Während sich die mittig angeordneten Pflanzen nur einen schmalen Streifen des insgesamt zur Verfügung stehenden Kronenraums erobern können, steht den Pflanzen an den Rändern durch die Besetzung der Ecken weitaus mehr potentieller Kronenraum zur Verfügung. Die Kronenräume der Pflanzen im Bereich des Eingangs bzw. des Austritts sind in Abbildung 125 nicht gesondert dargestellt. Hier ergibt sich jedoch offensichtlich für die unteren, schräg nach außen strebenden Pflanzen durch die unmittelbar darüber angeordneten Pflanzen

[420] Der potentielle Kronenraum der untersten Pflanzen ist etwas kleiner, jedoch sind die Pflanzen hier auch kürzer bzw. tiefer gepflanzt. Bezogen auf die Länge der Triebe ergeben sich keine nennenswerten Unterschiede zu den Ebenen 1 bis 5.

und Pflanzcontainer eine deutliche Reduktion des Kronenraums, während sich die oberen, schräg nach innen strebenden Pflanzen nach oben hin einen zusätzlichen Kronenraum erschließen können. Gleichzeitig konkurrieren in diesem Bereich die in der Wandfläche angeordneten und die nach außen gedrehten Pflanzen um den gleichen, stark begrenzten Kronenraum und es kommt möglicherweise zu einer stärkeren Beschattung der unterhalb des Eingangs bzw. Austritts angeordneten Pflanzen. Aufgrund dieser relativ komplexen räumlichen Situation wurden diese Bereiche in der folgenden Berechnung und Bewertung der Kronenvolumina zunächst außen vor gelassen und erst in der Interpretation der Resultate wieder (qualitativ) berücksichtigt.

Tabelle 5 Exemplarische Übersicht der berechneten Kronenvolumina (Einzelpflanzen) und Korrekturfaktoren sowie der daraus ermittelten Durchmesser nach einer Wachstumsdauer von 2 Vegetationsperioden (angenommener Anfangsdurchmesser = 10 mm)

Seite	Ebene	Bezeichnung	Lage	Kronenvol. (m³)	Faktor	Durchmesser (mm)
Nordwest	1	1-NW-A	mittig, Ecke	0,31	0,6	12,9
Nordwest	1	1-NW-B	mittig, Seite	0,19	0,6	11,9
Nordwest	6	6-NW-A	mittig, Ecke	0,34	0,7	13,6
Nordwest	6	6-NW-B	mittig, Seite	0,25	0,7	12,8
Nordwest	7	7-NW-A-Nord	oben, Ecke	0,60	0,7	15,8
Nordwest	7	7-NW-B	oben, Seite	0,53	0,8	15,8
Nordwest	7	7-NW-A-West	oben, Ecke	0,60	0,8	16,4
Südwest	1	1-SW-A	mittig, Ecke	0,31	0,8	13,8
Südwest	1	1-SW-B	mittig, Seite	0,19	0,8	12,5
Südwest	6	6-SW-A	mittig, Ecke	0,34	0,9	14,5
Südwest	6	6-SW-B	mittig, Seite	0,25	0,9	13,5
Südwest	7	7-SW-A-West	oben, Ecke	0,60	0,9	17,1
Südwest	7	7-SW-B	oben, Seite	0,53	0,9	16,4
Südwest	7	7-SW-A-Süd	oben, Ecke	0,60	1,0	17,6
Referenzpflanze				4,22	1,0	40

In Tabelle 5 sind die in Abbildung 125 dargestellten Kronenvolumina exemplarisch für einige Pflanzen wiedergegeben, wobei davon ausgegangen wurde, dass sich die Pflanzen eines Paares jeweils ein identisches Kronenvolumen erschließen. Die Werte liegen in einem Bereich zwischen knapp 0,2 und ca. 0,6 m³ und damit ca. 85 bis 95% unter dem Kronenvolumen der Referenzpflanze (vgl. Abbildung 125 unten rechts). Darüber hinaus werden die meisten Pflanzen bzw. Kronenvolumina nur von einer Seite belichtet, während die frei stehende Referenzpflanze von allen Seiten und von oben belichtet wird. Auch werden die Pflanzen der nördlich orientierten Wandflächen fast den ganzen Tag über vom Turm selbst, d. h. den Gitterrosten, den Pflanz-

containern und den südlich angeordneten Pflanzen beschattet.[421] Eine quantitative Berücksichtigung dieser spezifischen Belichtungssituationen kann letztendlich nur auf Basis detaillierter Messungen erfolgen, die u. a. auch die zeitliche Verteilung unterschiedlicher Strahlungsqualitäten und Quantitäten[422] über die Vegetationsperiode berücksichtigt. Die in Tabelle 5 wiedergegebenen Modifikationsfaktoren bzw. Abminderungsfaktoren sind daher lediglich als provisorisch eingesetzte Werte zu verstehen, um aus der jeweiligen Himmelsrichtung resultierende Unterschiede in der Belichtung prinzipiell deutlich zu machen. Die Werte zwischen 0,6 und 1,0 entsprechen der Abminderung der Strahlung, die stichprobenartig an einem bewölkten Tag (nur gestreutes Licht) gemessen wurde.[423]

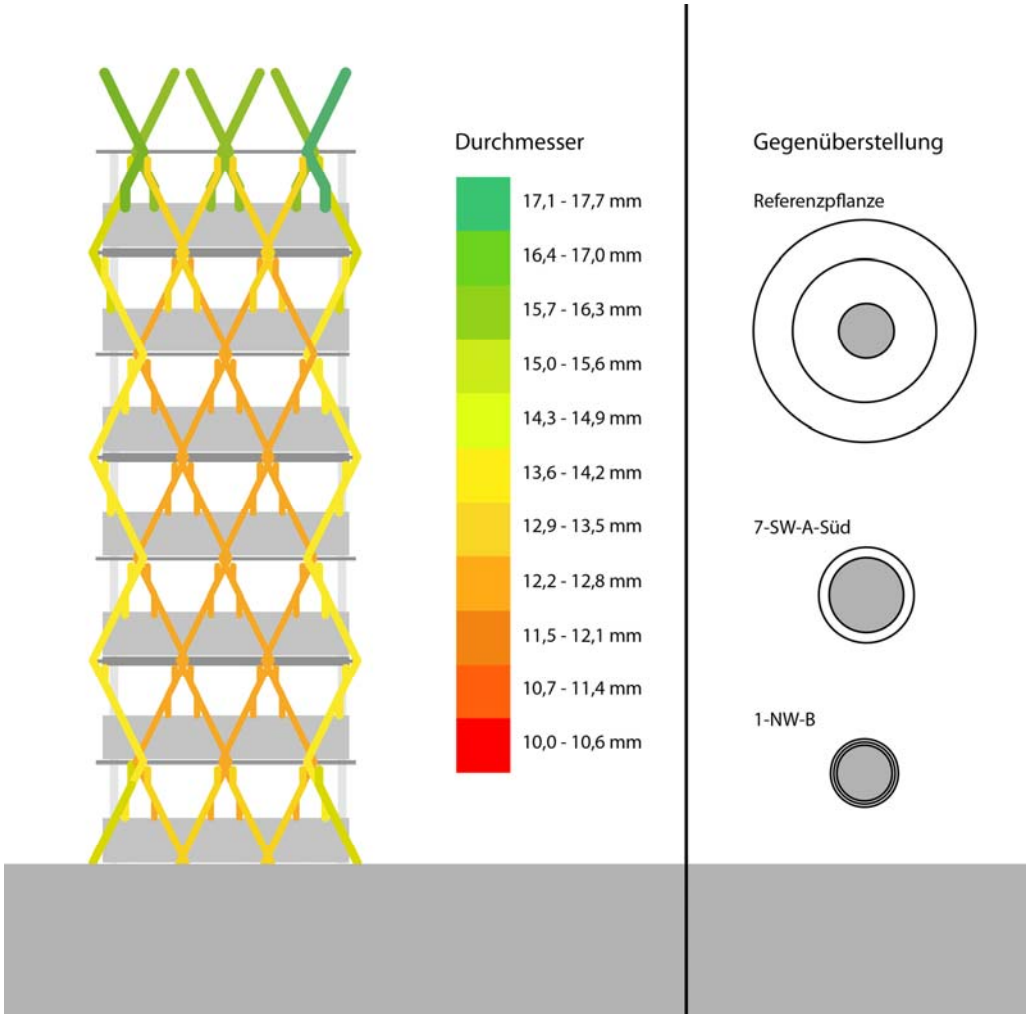


Abbildung 126 Links: Prognostizierte Durchmesser der Einzelpflanzen nach zwei Vegetationsperioden (Süd-West-Seite). Rechts: Gegenüberstellung der prognostizierten Durchmesser der Referenzpflanze mit Pflanzen am Turm.

[421] Die Wandflächen können in südlich und nördlich orientierte Flächen unterteilt werden. Vor allem bei direkter Sonneneinstrahlung ist die Belichtung der südlichen Flächen deutlich größer als die der nördlichen.

[422] Direktes Sonnenlicht, gestreutes Sonnenlicht, diffuse Strahlung bei bedecktem Himmel sowie reflektierte Strahlung.

[423] Messung mit einem Quantum-Meter (Apogee Instruments, waagrecht gehalten) im Wandbereich ca. 40cm vor den Pflanzcontainern, Februar 2010 (keine Belaubung); Zwischenwerte durch Interpolation ermittelt.

Unter der Annahme, dass alle Kronenvolumina in etwa gleich mit Blättern besetzt sind, kann in erster Näherung angenommen werden, dass das Dickenwachstum[424] der Pflanzen proportional zum Kronenvolumen ist (vgl. Pipe-Model-Theorie, Abschnitt 4.2.4). In Abbildung 126 sind unter zusätzlicher Berücksichtigung der oben genannten Modifikationsfaktoren die sich daraus ergebenden Durchmesser der einzelnen Pflanzen exemplarisch für eine Seite des Turms dargestellt bzw. farblich hervorgehoben. Die Werte beziehen sich auf einen Zustand, bei dem die frei stehende Referenzpflanze einen Durchmesser von 40 mm erreicht hätte, was bei guten Standortbedingungen nach zwei Jahren realistisch ist.[425] Zu dieser Zeit hätten dann die am stärksten wachsenden Pflanzen des Turms (Südecke, oberste Ebene) einen Durchmesser von 17,5 mm und die am schwächsten wachsenden (nordseitig, mittig) einen Durchmesser von nur 12 mm erreicht. Bei einer Wachstumszeit von zwei Jahren und einem Anfangsdurchmesser von ca. 10 mm ergeben sich daraus für die Referenzpflanze durchschnittliche Jahrringbreiten von 7,5 mm, für die starkwachsenden Pflanzen am Turm von knapp 2 mm und für die schwach wachsenden von nicht einmal 0,5 mm.

Damit wird deutlich, wie stark das Wachstum der einzelnen Pflanzen durch den Kronenraum bzw. durch die die Konkurrenzsituation beschränkt wird: Für benachteiligte Pflanzen ergibt sich eine bis zu viermal geringere Durchmesserzunahme als für solche an Orten mit besseren Wachstumsbedingungen bzw. einem größeren Kronenraum.

Bezüglich der Pflege stellt sich die Frage, wie bzw. inwiefern diese Unterschiede beispielsweise durch das Zurückschneiden stärker wachsender Pflanzen ausgeglichen werden sollte. Wie unten dargestellt (vgl. Abschnitt 4.5.2.1) erscheint dies bei den Unterschieden zwischen den Pflanzen der oberen Ebene und den darunterliegenden nicht nötig zu sein, sofern das kräftigere Wachstum der oberen Pflanzen nicht zu einer zusätzlichen Verschattung und damit Verschlechterung der darunter angeordneten Pflanzen führt. Allerdings besteht innerhalb der Ebenen die Gefahr, dass die an den Ecken angeordneten Pflanzen durch ihre kräftige Entwicklung die Nachbarpflanzen der gleichen Ebene unterdrücken und es so ggf. zu einem Absterben der mittig in der Wandfläche angeordneten Pflanzen kommt. Eine Reduktion des Kronenvolumens der Eckpflanzen zugunsten der benachbarten Pflanzen erscheint hier angebracht. Allerdings sind insbesondere im Bereich des Eingangs bzw. Austritts die unteren Pflanzen derart benachteiligt, dass deren effektive Förderung mit Sicherheit schwierig wird. Bei diesen muss aufgrund des stark eingeschränkten Kronenvolumens und der Belichtungssituation frühzeitig mit einem Absterben gerechnet werden.[426]

4.5.1.4 Zusammenwirken der Faktoren

Bei den meisten Pflanzen wirken die Beschränkung des Kronenraums, die Lichtbedingungen und die aus den gravimorphen Reizungen resultierenden Wachstumsbedingungen in der gleichen Richtung: Pflanzen, bei denen durch die starke Neigung apikaler oder auch basaler Triebabschnitte mit einer kritischen Entwicklung gerechnet werden muss, sind meist auch schlechter belichtet und weisen einen deutlich eingeschränkten Kronenraum auf (z. B. Eingang). Demgegenüber haben Pflanzen, die z. B. aufgrund ihrer geringeren Neigung bzw. Biegung an der Triebspitze eine Entwicklung zeigen werden, die dem Entwicklungsziel weitestgehend ent-

[424] Zunahme des Holzvolumens des Hauptriebs.

[425] Ausgehend von einem Anfangsdurchmesser von ca. 1 cm. Vgl. Dickenwachstum der Weiden in Verwachsungsversuchen, die tlw. trotz deutlicher Konkurrenzbedingungen ähnliche Werte erreichten.

[426] Bei der Darstellung der folgenden Entwicklungsphasen werden aus Gründen der Vereinfachung hauptsächlich die Wände ohne Öffnungen (Eingang/Austritt), d. h. die Südwest und die Nordostseite berücksichtigt.

spricht, auch einen größeren Kronenraum und sind gut belichtet (oberste Pflanzen). Damit addieren sich positive wie negative Wachstumsbedingungen in vielen Fällen auf und es ist damit zu rechnen, dass die oben dargestellten Unterschiede umso deutlicher ausfallen.

Aus diesem Zusammenwirken der Verhältnisse im Kronenraum und der geomorphen Reaktionen ergibt sich ein Konflikt für die Pflege: Eine Förderung des apikalen Leittriebs durch Zurückschneiden der Seitentriebe stellt eine Reduktion des Kronenraums bzw. der Blattmasse dar. Wenn dies verstärkt bei Pflanzen geschieht, die sowieso schon einen kleinen, schlecht belichteten Kronenraum haben, wird dieser weiter verkleinert und rasch von konkurrierenden, weniger stark geschnittenen und insgesamt unter besseren Bedingungen wachsenden Pflanzen eingenommen. Um diese zu verhindern, müssten letztendlich insbesondere im unmittelbaren Umfeld deutlich benachteiligter Pflanzen alle Pflanzen an das Wachstumsniveau der benachteiligten angeglichen werden. Wenn es dadurch nicht gelingt, die benachteiligten Pflanzen in ihrer Entwicklung deutlich zu fördern – und im Bereich des Eingangs muss dies bezweifelt werden – bewirkt der pflegerische Eingriff keine Verbesserung der Entwicklung, sondern vielmehr eine Schwächung einer großen Anzahl von Pflanzen. In solchen Fällen muss von der Entwicklung abhängig gemacht werden, ob und wann es besser ist, benachteiligte Bereiche aufzugeben bzw. sogar zu entfernen, anstatt sie auf Kosten gut wachsender fördern zu wollen.

4.5.2 Entwicklungsphase II: Additionsprozess/Additionsentwicklung

Wie oben dargestellt, ist die Entwicklung der einzelnen Pflanzen wesentlich durch die Beschränkung der Kronenräume determiniert. Obwohl auch die Wurzelräume durch die Größe der Pflanzcontainer beschränkt sind, wird das Wachstum der Pflanzen dadurch aller Voraussicht nach in den ersten Jahren nicht wesentlich beeinflusst. Bezüglich des Zusammenhangs zwischen Pflanzenmasse und notwendigem Wurzelraum liegen im Gegensatz zum Kronenraum zwar keine wissenschaftlichen Untersuchungen bzw. Berechnungen vor, diese können allerdings auf Basis in der Praxis bewährter Werte vorläufig abgeschätzt werden: In den Pflanzcontainern steht jeder Pflanze ein Wurzelraum von 20 Litern, bzw. jedem Pflanzenpaar ein Volumen von 40 Litern zur Verfügung. In Baumschulen werden unter vergleichbaren Bedingungen (Substrat, Düngung, Bewässerung) Pflanzcontainer mit einem Inhalt zwischen 35 und 50 Litern für Pflanzen bis ca. 4 cm Basisdurchmesser verwendet. Ab diesem Durchmesser (bezogen auf das dann verwachsene Pflanzenpaar) ist mit einer deutlichen Einschränkung des Wurzelraums im Container zu rechnen. Das bedeutet andererseits, dass bis dahin (4 cm Durchmesser der Paare) nicht damit zu rechnen ist, dass sich die im Boden wurzelnden Pflanzen aufgrund des Wurzelraums besser entwickeln als diejenigen in den Pflanzcontainern. Die gewünschte Entwicklung muss daher wie in Abschnitt 4.3 beschrieben aktiv durch Steuerung (Schnitt, Düngung, Wässerung) herbeigeführt werden.

4.5.2.1 Steuerung durch Umweltfaktoren und Pflege (Schnitt)

Durch die Steuerung der Additionsentwicklung soll erstens die Entstehung durchgehender Leitungsbahnen ausreichender Kapazität gefördert und zweitens ein starkes Wurzelwachstums im Boden (Ebene 0) unterstützt werden. Um die Entstehung durchgehender Leitungsbahnen zu stimulieren, müssen in allen Achsenabschnitten möglichst hohe Xylemströme generiert werden (vgl. Abbildung 117 links). Dies soll dadurch erreicht werden, dass[427] die Bewässerung abwechselnd auf jeder zweiten Ebene so lange abgestellt wird, bis es zu ersten Anzeichen von

[427] Sobald an allen Verbindungsstellen Xylemverwachsungen entstanden sind.

Wassermangel kommt (Wechselgießen). Dadurch soll der Xylemstrom wechselweise immer über mindestens zwei Ebenen, d.h. über ursprüngliche Individuengrenzen hinweg, stattfinden.

Die Förderung des Wurzelwachstums im Boden könnte im Prinzip über eine im Vergleich zu den Pflanzcontainern bessere Wasser- und Nährstoffversorgung erfolgen. Da dies aber bedeuten würde, dass die Pflanzen in den Containern suboptimal gewässert und gedüngt werden müssten und damit insgesamt weniger gut wachsen, wurde diese Vorgehensweise nicht gewählt. Vielmehr wird der oben beschriebene Ansatz verfolgt (Abschnitt 4.3.2), Wurzelbereiche sukzessive zu entfernen, um die Bildung neuer Wurzeln an anderer Stelle zu fördern. Begonnen werden soll damit in der obersten Pflanzebene, da die Pflanzen hier aufgrund des stärkeren Wachstums am schnellsten miteinander verwachsen. Auch kann so die große Menge der dort produzierten Assimilate (großer Kronenraum → viel Photosynthese) den darunterliegenden Pflanzen für das Stamm- und Wurzelwachstum zur Verfügung gestellt werden. Dazu sollen in einem Arbeitsgang die Wurzeln der obersten Ebene und ein Großteil der Austriebe bzw. der Blattmasse der zweitobersten Ebene entfernt werden, sodass das Spross-Wurzel-Verhältnis der obersten beiden Ebenen insgesamt erhalten bleibt. Gleichzeitig können sich so die darunter angeordneten Pflanzen einen größeren Kronenraum erschließen und damit stärker wachsen und so rasch mit den darüber liegenden, bereits „addierten" Pflanzen fusionieren. Auf die gleiche Art und Weise soll dann sukzessive Ebene für Ebene weiter verfahren werden, bis alle Pflanzcontainer von oben nach unten entfernt worden sind. Dabei ist damit zu rechnen, dass das Dickenwachstum der jeweils unteren Pflanzen durch die Verlagerung des Xylemstroms deutlich stimuliert wird, während es bei den oberen Pflanzen eher zu einer Stagnation der Dickenzunahme kommen müsste.

Ein derartiger Ansatz bedarf, wie bereits oben ausgeführt, der systematischen Untersuchung der Stoffströme und der Biomasseallokation, um die Entwicklung möglichst effektiv beeinflussen zu können. Im konkreten Fall des Turms können und sollen diese Aspekte nicht im Detail untersucht bzw. „ausgetestet" werden. Vielmehr wird versucht, möglichst auszuschließen, dass Pflanzen durch ein zu frühes Entfernen von Wurzelbereichen absterben (Demonstrationsbauwerk). Deshalb werden, ähnlich wie bei den Vorversuchen zur Pflanzenaddition, Wurzelbereiche erst dann entfernt, wenn äußerlich deutlich erkennbar eine vollständige Verwachsung vorliegt und wenn ein Einstellen der Bewässerung der betroffenen Wurzelbereiche zu keiner negativen Beeinträchtigung des Wachstums führt. Darüber hinaus sollen die im Folgenden dargestellten, überschlägigen Berechnungen der notwendigen Querschnittsflächen als Entscheidungskriterien herangezogen werden.

4.5.2.2 Abschätzung der notwendigen Stammquerschnitte und der zeitlichen Entwicklung

Sowohl für die gezielte Steuerung der Entwicklung als auch für die (zeitliche) Abschätzung des gesamten Additionsprozesses ist die Frage entscheidend, wann sich die Pflanzenstruktur autark vom Boden aus mit Wasser versorgen kann. Um die dazu notwendige Leitungskapazität näherungsweise zu berechnen, soll hier wieder die vereinfachende Annahme der Pipe-Model-Theorie herangezogen werden, nach der die Leitungskapazität proportional zur Querschnittsfläche einer Achse und diese proportional zur versorgten Blattmasse ist. Wenn man – ebenfalls stark vereinfachend – zunächst annimmt, dass sich das Kronenvolumen und damit die Blattmasse im Verlauf der zweiten Entwicklungsphase nicht wesentlich verändert,[428] dürfte sich auch die zur Versorgung dieser Blattfläche notwendige leitende Querschnittsfläche nicht ändern. Die Querschnittsfläche, die letztendlich an der Basis des Turms vorhanden sein muss, ergibt sich

[428] Was aufgrund der regelmäßig notwendigen Schnittmaßnahmen zunächst realistisch erscheint.

dann durch Addition der Querschnittsflächen der einzelnen Pflanzen bzw. Wurzelbereiche, die die Pflanzenstruktur zu Beginn des Additionsprozesses versorgt haben. Geht man des Weiteren davon aus, dass die Pflanzen zu Beginn des Additionsprozesses einzeln Durchmesser von 2 cm bzw. die verwachsenen Paare einen Durchmesser von 3 cm und ein entsprechendes Kronenvolumen erreicht haben (vgl. Abschnitt 4.5.1.2) errechnet sich daraus ein Durchmesser der einzelnen Stämme an der Basis des Turmes (verwachsene Pflanzenpaare) von ca. 8 cm.

Genauso wie die Berechnung der Pflanzendichte kann dieser Wert nur als eine erste, überschlägige Abschätzung angesehen werden. Sowohl die Datengrundlage als auch die Berechnungsmethode sind langfristig an die tatsächlichen Bedingungen anzupassen und zu verfeinern.[429] Der Wert erscheint in der Größenordnung jedoch plausibel, da der Durchmesser bei einer dann anzunehmenden Gesamthöhe des Turmes von 10 bis 12 Metern einem Schlankheitsgrad von 1:125 bis 1:150 entspricht – Werte, die bei Bäumen dieser Größe in sehr dichten Beständen (große Konkurrenz) nicht unüblich sind (z. B. Weiden- oder Pappelplantagen).

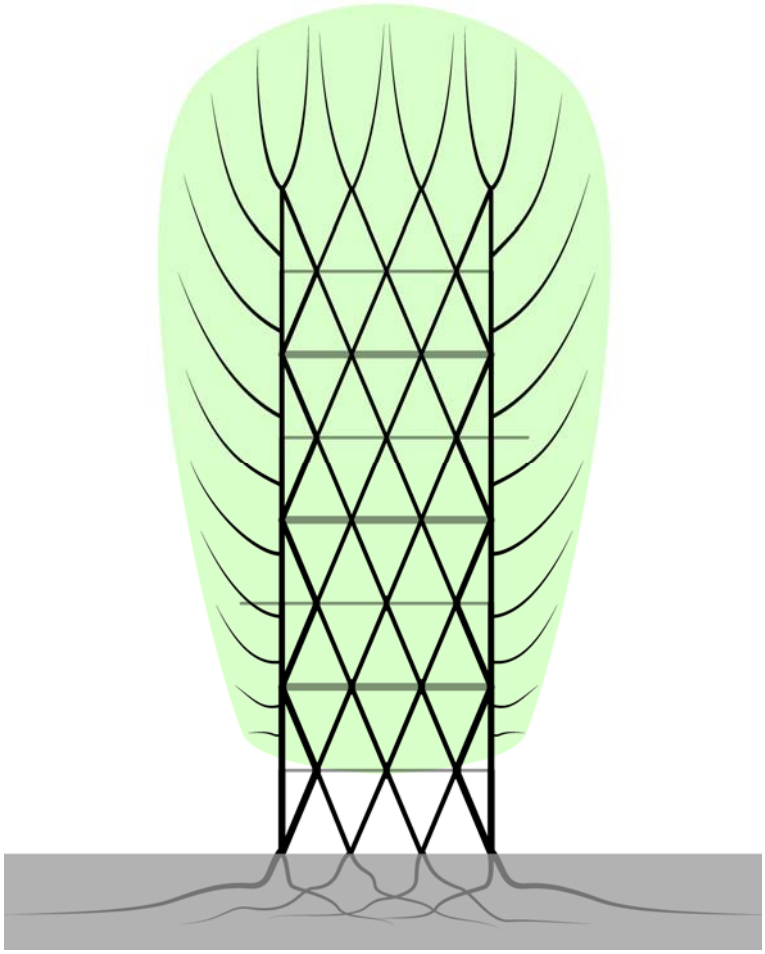


Abbildung 127 Prognostizierter Zustand am Ende der Entwicklungsphase II. Die Stämme haben nach voraussichtlich ca. 8 Jahren an der Basis einen Durchmesser von durchschnittlich 8 cm erreicht. Die Pflanzenaddition ist abgeschlossen und es kann damit gerechnet werden, dass die Struktur selbsttragend ist (Maßstab 1:100).

[429] Empirische Ermittlung bzw. Kontrolle der Blattmassen und Querschnittsflächen der Achsen; Berücksichtigung der Verteilungsmuster der Leitfähigkeit (Huberwerte) sowie Berücksichtigung möglicherweise nicht mehr leitendender Querschnittsbereiche (alte Jahrringe).

Die Frage, wann diese Durchmesser und damit der Zustand einer autark lebensfähigen Pflanzenstruktur (ohne Bewässerungstechnik und Pflanzcontainer im Luftraum) entstanden sein könnte, lässt sich nur bedingt abschätzen, da keine Erfahrungen vorliegen, wie sich die geplanten Pflegemaßnahmen und Umsteuerungsprozesse auf das Wachstum quantitativ auswirken. Einen ersten Anhaltpunkt der zeitlichen Dimension gibt jedoch die Abschätzung der Holz- bzw. Biomasse, die bis zu diesem Zeitpunkt entstehen muss: Nimmt man einen Stammdurchmesser von ca. 8 cm an der Basis des Turmes und von ca. 5 cm am obersten Punkt der baubotanischen Struktur an (s. o. vgl. auch Abschnitt 4.5.3.1), ergibt sich ein Stammvolumen von insgesamt ca. 0,7 m³.[430] Hinzu kommt die Holz- bzw. Biomasse der zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Äste und Zweige sowie die Biomasse, die im Verlauf der Pflege durch Schnitt entnommen wird. Da bei natürlich wachsenden Bäumen durchschnittlich ca. 80% der oberirdischen, verholzten Biomasse auf den Stamm und ca. 20% auf die Äste und Zweige entfallen,[431] kann mit einer Biomasse der zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Äste und Zweige von knapp 0,2 m³ gerechnet werden. Aufgrund der oben beschriebenen, nicht unerheblichen Entnahmen von Ästen und Zweigen im Zuge der Pflege wird angenommen, dass im Verlauf der Entwicklung in etwa die doppelte Masse der zum beschriebenen Zeitpunkt vorhandenen Astmasse entnommen wurde (0,4 m³). Die gesamte oberirdische, verholzte Biomasse, die insgesamt bis zum Ende des Additionsprozesses entstanden sein müsste, wir dementsprechend auf eine Größenordnung von ca. 1,3 m³ geschätzt.

Zieht man nun zu Vergleichszwecken wieder eine Weidenplantage und die in Abschnitt 4.5.1.2 ermittelte Referenz-Grundfläche von ca. 100 m² heran, ergibt sich für diese Referenzfläche ein jährlicher durchschnittlicher Biomassezuwachs von ca. 0,08 Tonnen bzw. 0,16 m³ Holz[432] woraus sich rechnerisch eine Wachstumsdauer von ca. 8 Jahren ergibt. Da alle Annahmen dieser Berechnung relativ grobe Schätzungen sind, kann auch dieses Rechenergebnis nur als Abschätzung der Größenordnung angesehen werden. In der Größenordnung erscheint die Berechnung insofern plausibel, als sich an der Basis durchschnittliche Jahresringbreiten von ca. 0,5 cm ergeben – für Weiden eher geringe, unter den gegebenen Konkurrenzbedingungen jedoch durchaus realistische Werte. Die grafische Darstellung dieser Situation in Abbildung 127 legt den Schluss nahe, dass die Struktur zu diesem Zeitpunkt auch bereits über eine mechanische Stabilität verfügen sollte, die ausreicht, um die auftretenden Kräfte aufzunehmen, sodass davon ausgegangen werden kann, dass am Ende des Additionsprozesses auch die temporären Gerüste entfernt werden können.[433]

---

[430] Geometrische Annahme und Berechnungsformel: Kegelstumpf

[431] Ermittelt nach VOß, S. 2005. Biomasseproduktion und morphologische Plastizität junger Eichen bei Konkurrenzbelastung durch unterschiedlich dichte Altholzschirme. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme der Universität Göttingen.* S. 38. Btr. der Baumart Eiche erscheint eine Übertragung der Ergebnisse nicht adäquat. Andere Untersuchungen mit unterschiedlichen Baumarten kommen jedoch zu sehr ähnlichen Ergebnissen.

[432] Nach Daten von: MURACH, D., KNUR, L. & SCHULTZE, M. (eds.) 2008. *DENDROM - Zukunftsrohstoff Dendromasse : Endbericht,* Remagen-Oberwinter: Verlag Dr. Norbert Kessel. S. 102 f;Angenommene Dichte des grünen Weidenholzes: ca. 500kg/m³

[433] Nähere Untersuchungen hierzu wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht durchgeführt, da nicht die tragwerksplanerischen sondern die pflanzenphysiologischen Aspekte im Zentrum des Interesses stehen. Es erscheint jedoch plausibel, dass die für diesem Zeitpunkt prognostizierten 24 Stämme mit einem durchschnittlichen Durchmesser von 8 cm die 4 Stahlrohre der Gerüststruktur ersetzen können.

4.5.3 Entwicklungsphase III: Dickenwachstum und Mortalität

4.5.3.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Mit dem beschriebenen Entwicklungsstadium am Ende der Entwicklungsphase II wären dann nach ca. 8 Jahren zwei wichtige Ziele des Projekts erreicht: Es müsste eine erstens physiologisch autarke und zweitens voraussichtlich auch selbsttragende und mechanisch belastbare baubotanische Struktur entstanden sein. Die prognostizierte Situation ist jedoch nicht mehr als ein möglicher Entwicklungszustand, der wahrscheinlich so oder so ähnlich eintritt, sofern die Grundannahmen der Überlegungen zutreffend sind und die Entwicklung bis zu diesem Zeitpunkt nicht durch Extremereignisse wie Windbruch, starken Schädlingsbefall oder dergleichen gravierend beeinträchtigt wird. Da die Prognose der weiteren Entwicklung auf dieser hypothetischen Ausgangssituation basiert, potenzieren sich nun jedoch Fehler und Ungenauigkeiten in den Grundannahmen und der Einfluss nicht planbarer Ereignisse wird immer stärker. Im Folgenden wird daher zunächst versucht, die weitere Entwicklung unter Fortschreibung der Idealbedingungen abzuschätzen,[434] um diese Prognose dann in einem zweiten Schritt exemplarisch mit Entwicklungstendenzen zu überlagern, die sich aus zufälligen Ereignissen wie z. B. dem Absterben von Pflanzen oder Pflanzenteilen oder sich verändernden bzw. ungleichmäßigen Ressourcenverteilungen (Wasser, Nährstoffe, Licht) ergeben.

Entsprechend der oben dargestellten Überlegungen und Berechnungen stellt sich die Ausgangsituation für die weitere Entwicklung bei Idealbedingungen wie folgt dar (Idealszenario): Die Stämme (d. h. die miteinander verwachsenen Pflanzenpaare) weisen an der Basis des Turms einen Durchmesser von durchschnittlich ca. 8 cm auf, wobei Stammabschnitte in südlich orientierten Wänden etwas dicker sind als die nördlich orientierter. Gleichzeitig sind die Stammabschnitte im Bereich der Ecken etwas dicker als mittig in den Wandflächen angeordnete.[435] Die miteinander verwachsenen Pflanzen stellen eine physiologische Einheit dar, die sich autark vom Boden aus mit Wasser und Nährstoffen versorgen kann, sodass die Pflanzkübel und die Bewässerungstechnik obsolet geworden sind und demontiert werden konnten. Da deshalb der gesamte Xylemstrom von den Wurzeln im Boden aus erfolgt, ist anzunehmen, dass sich – obwohl sich anfangs die obersten Pflanzen am stärksten entwickeln – eine Durchmesserabnahme der Stammquerschnitte (Taper) einstellt, die entsprechend der Pipe-Model-Theorie für natürlich gewachsene Bäume zu erwarten wäre.[436] Gleichzeitig werden durch die Verwachsungs- bzw. Additionsstellen nun nicht nur Nährstoffe und Assimilate, sondern auch Phytohormone über ursprüngliche Individuengrenzen hinweg transportiert. Damit entsteht ein Wirkungsgefüge der apikalen Kontrolle und Dominanz, bei dem – genauso wie in einem natürlich gewachsenen Baum – die obersten Triebe am kräftigsten und tendenziell vertikal wachsen, während die Seitentriebe mit zunehmendem Abstand zur Spitze immer schwächer wachsen und stärker geneigt sind. Daraus lässt sich die in Abbildung 127 schematisch dargestellte Kronenform ableiten.[437]

---

[434] D. h. so, wie sie sich im Wesentlichen aus den Systembedingungen der verwachsenen Pflanzenstruktur selbst ergeben würden.

[435] Unterschiede in der Querschnittsfläche müssten langfristig den Unterschieden im Zuwachs in Tabelle 5 entsprechen, da das Anfangsvolumen irrelevant wird. Achsenabschnitte an der Südecke würden demnach einen knapp 1,5-fach größeren Durchmesser als nordseitig orientierte aufweisen; die-Durchmesser müssten demnach in einem Bereich zwischen 6 cm und 9 cm liegen (vgl. Abbildung 127).

[436] D.h. entsprechend der Verteilung der Blattmasse im Luftraum.

[437] Entsprechend der Überlegungen zu Konkurrenzbedingungen und geomorphen Reaktionen wird des Weiteren angenommen, dass die Pflanzen im Bereich des Eingangs bereits abgestorben sind.

4.5.3.2 Konkurrenzsituation

Im Gegensatz zur ersten Entwicklungsphase, in der mehrere hundert Pflanzen insbesondere um die knappe Ressource Licht konkurrierten, sind die einzelnen Individuen in der dritten Entwicklungsphase vollständig miteinander verwachsen und können als ein einziger Organismus betrachtet werden. Dennoch muss geklärt werden, inwiefern dieser künstlich gebildete „Baum“ in der Lage ist, ausreichende Mengen an Ressourcen zu assimilieren, um überleben und weiter wachsen zu können. Dabei stellt sich im Detail die Frage, ob dieser Ressourcenbedarf durch die Kronen- und Wurzelräume, die sich die Struktur erschließen kann, gedeckt werden kann, und welche Teile der Struktur als erstes absterben, wenn die Ressourcen nicht ausreichen. Um diese Fragen zu beantworten, wird im Folgenden versucht, die Konkurrenzbedingungen innerhalb des neu entstandenen Meta-Organismus zu beschreiben und – ähnlich dem Vorgehen in Abschnitt 4.5.1.2 durch einen Vergleich mit natürlich gewachsenen Baumbeständen zu bewerten.

Entsprechend der Ausführungen zum Oberfläche-Volumen-Verhältnis von Verwachsungsstrukturen (Abbildung 107) ist die Pflanzenstruktur des Turms bezüglich ihres Ressourcenbedarfs mit einem Baumbestand von Einzelbäumen vergleichbar und kann daher in 24 Bäume bzw. physiologische Einheiten unterteilt werden, die für sich autark lebensfähig sind (Abbildung 128). Diese Darstellung entspricht auch der Überlegung, dass sich die Haupt-Xylemströme an den Knotenpunkten nicht kreuzen, sondern zusammen- und wieder auseinanderfließen (vgl. Abbildung 104). Dabei kann angenommen werden, dass alle 24 Untereinheiten unter Idealbedingungen ein ausgewogenes Verhältnis von Blatt- und Wurzelmasse aufweisen: Die an den Ecken angeordneten Einheiten können sich nicht nur einen größeren Kronenraum, sondern auch einen größeren Wurzelraum erschließen, sodass der größere Wasser- und Nährstoffbedarf der Eckbereiche auch durch die in den Ecken angeordneten Wurzeln gedeckt werden kann. Zu einem Quertransport von Wasser, Nährstoffen und Assimilaten an den Knotenpunkten kommt es also nur dann, wenn sich dieses Gleichgewicht verschiebt – bespielweise wenn sich bestimmte Wurzelbereiche besonders stark entwickeln oder Kronenbereiche absterben. Deshalb wird im Folgenden angenommen, dass die verwachsene Pflanzenstruktur bei Zunahme der Biomasse eine Mortalitätsrate bzw. ein Muster der „Selbstdurchforstung“ zeigt, das dem eines Pflanzenbestandes mit den beschriebenen 24 Einzelbäumen ohne Verwachsungen entspricht: Mit fortschreitendem Dickenwachstum der Stämme nähert sich die Struktur einem Pflanzenzahl-Biomasse-Grenzwert und es kommt – sobald dieser überschritten wird – zum Absterben von Pflanzen bzw. in diesem Fall von Stammabschnitten.

Um diesen Pflanzenzahl-Biomasse-Grenzwert bestimmen zu können, muss jedoch auch wieder die Pflanzendichte berechnet und deshalb mithilfe des Kronenvolumens eine Referenz-Grundfläche ermittelt werden (vgl. Abschnitt 4.5.1.2).[438] Ohne pflegerische Eingriffe würde das Kronenvolumen (und damit die Referenz-Grundfläche) im Verlauf der Entwicklung rasch zunehmen, da auch die künstlich gebildete baubotanische Struktur durch ihren Austrieb langfristig die Größe eines natürlich gewachsenen Baumes erreichen würde. Wird jedoch (genauso wie in den bisherigen Entwicklungsphasen) das Ziel verfolgt, dass sich alle Abschnitte der baubotanischen Struktur möglichst gleichmäßig entwickeln, muss durch Schnitt gewährleistet werden, dass stärker wachsende Kronenbereiche nicht schwächer wachsende verdrängen. Aufgrund der

[438] Obwohl nun alle Pflanzen im Boden wurzeln, entspricht die Grundfläche des Turmes nicht der Referenz-Grundfläche eines Waldbestandes, da der Turm als „freistehender Baum“ auch an allen Seiten photosynthetisch aktive Kronenbereiche aufweist, was bei geschlossenen Pflanzenbeständen nicht der Fall ist.

daraus resultierenden ständigen Reduktion des Kronenvolumens wird für die Berechnung der Pflanzendichte angenommen, dass das Kronenvolumen – zumindest anfangs – nur geringfügig zunimmt[439] und daher in der Größenordnung der Berechnungen von Abschnitt 4.5.1.2 (Entwicklungsphase I) liegt. Als referenzierte Grundfläche werden daher vorläufig 100 bis 120m² angenommen.

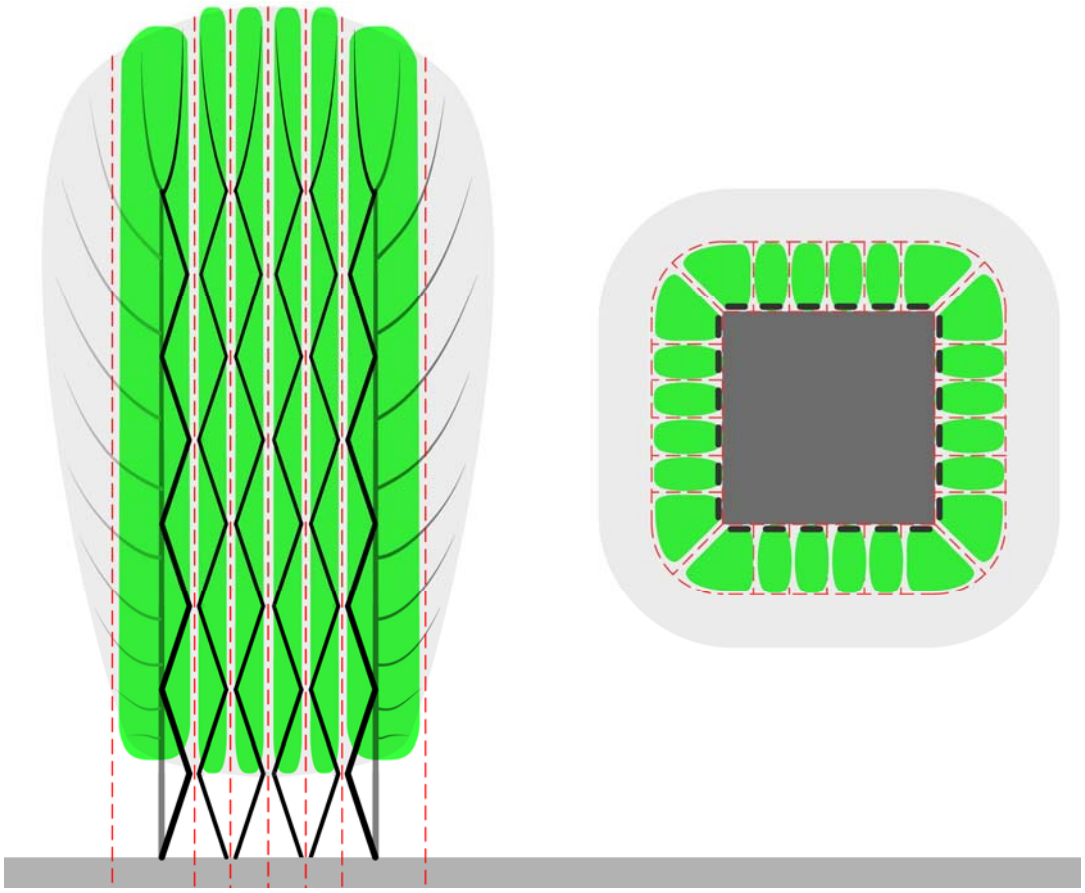


Abbildung 128 Einteilung der verwachsenen Pflanzenstruktur in physiologische Einheiten bzw. zick-zack-förmige Einzelbäume. Deutlicher erkennbar sind der stark eingeschränkte, sehr schlanke Kronenraum und die Unterschiede zwischen Wandflächen und Eckbereichen (Maßstab 1:100).

Für diese referenzierte Grundfläche ergibt sich dann eine „Pflanzendichte" von 2.000 bis 2.400 Pflanzen/ha und entsprechend der Selbstdurchforstungslinie in Abbildung 124 (→ Phase 3) ein möglicher Stammdurchmesser von 9 bis 14 cm (vgl. Abbildung 129 oben rechts). Wenn die Pflanzen an der Basis[440] einen Durchmesser in dieser Größenordnung erreicht haben, kommt es also zwangsläufig dazu, dass Pflanzen bzw. Stammabschnitte absterben. Der untere Wert von 9 cm liegt nur knapp über dem für eine erfolgreiche Addition notwendigen Durchmesser von 8 cm, sodass es unter Umständen bereits unmittelbar nach Ende der Entwicklungsphase II zu Absterbeprozessen aufgrund von Konkurrenzbedingungen kommen wird.

[439] Entsprechend das Austriebmusters in Abbildung 127 kommt es vermutlich zu einer Verschiebung des Kronenraums nach oben.

[440] Genauer: in 1,3 m Höhe, da sich die Werte auf den Brusthöhendurchmesser beziehen.

4.5.3.3 Pflege- und Entwicklungsszenarien

Die obigen Berechnungen zu Konkurrenzbedingungen wurden wie dargestellt unter der Annahme einer relativ kleinen, stark geschnittenen und daher in der Größe kaum zunehmenden Baumkrone vorgenommen. Der Schnitt sollte dabei dazu dienen, ein gegenseitiges Verdrängen der Pflanzen bzw. der physiologischen Einheiten zu verhindern. Offensichtlich kann dies aber nur bis zum Erreichen des Pflanzenzahl-Biomasse-Grenzwerts gelingen, danach müsste dann entweder das Dickenwachstum aller Stammabschnitte auf ein absolutes Minimum absinken,[441] oder es sterben eben doch Stammabschnitte ab. Für die Pflege bedeutet dies, dass ein Kompromiss zwischen Konkurrenzmanagement und Kronengröße gefunden werden sollte. Denn bei geringerem Schnitt und damit größerem Kronenvolumen kann natürlich auch mehr Biomasse erzeugt werden und die Stämme können daher insgesamt eine größere Gesamt-Querschnittsfläche erreichen. Wie ein optimaler Kompromiss genau aussehen muss, kann quantitativ nur in weiterführenden Versuchen bzw. umfangreicheren Berechnungen ermittelt werden, in denen nicht nur die pflanzenphysiologischen, sondern vor allem auch die tragwerksplanerischen Parameter genauer erfasst werden. Hier sollen lediglich – ausgehend von den obigen Berechnungen mit kleinem Kronenvolumen – Entwicklungsszenarien und Pflegestrategien qualitativ dargestellt werden.

Trotz des Absterbens von Stammabschnitten wird als Entwicklungsziel angestrebt, dass die Tragfähigkeit der baubotanischen Struktur weiter zunimmt oder zumindest möglichst lange erhalten bleibt und dass sich die verbleibenden Pflanzenteile vital weiterentwickeln. Dazu ist in Abbildung 129 schematisch dargestellt, welche unmittelbaren Konsequenzen das Absterben einzelner Kronen- Wurzel- oder Stammbereiche für die Gesamtstruktur hat: Durch Absterben frei werdende Kronen- und Wurzelräume werden vermutlich relativ schnell von benachbarten Wurzel- bzw. Kronenbereichen besetzt und der Wegfall von Stammabschnitten führt zu einer Umlenkung des Xylemstroms und damit zu einer entsprechenden Anpassung des Dickenwachstums.[442] Wie oben bereits ausgeführt, ist unter ideal-gleichmäßigen Rahmenbedingungen damit zu rechnen, dass die Pflanzen bzw. Stammabschnitte in den Ecken ein stärkeres Dickenwachstum zeigen als die mittig in den Wandflächen angeordneten. Unter dem Einfluss der Konkurrenzbedingungen werden diese benachteiligten bzw. schwächer wachsenden Stammabschnitte voraussichtlich auch früher absterben. Damit würde die Struktur tendenziell der in Abbildung 129 oben rechts widergegebenen Struktur entgegenstreben, bei der nur noch an den Ecken zickzack-förmige Bäume stehen bleiben und die wandmittig angeordneten Stammabschnitte vollständig absterben. In der Praxis ist jedoch nicht mit einer derart eindeutigen Situation zu rechnen. Denn die Frage, welche Bereiche am ehesten absterben werden, ist nicht nur von den (idealisierten) Wachstumsbedingungen abhängig, sondern vor allem auch von Zufallsereignissen.[443]

---

[441] Was vor allem bei der Pionierbaumart Weide pflanzenphysiologisch quasi nicht möglich ist.

[442] Da in den durch Absterbeprozesse ausgedünnten Wandbereichen in der Summe der gleiche Xylemstrom stattfindet, ist damit zu rechnen, dass die benachbarten Stammabschnitte ein stärkeres Dickenwachstum zeigen, sodass insgesamt die gleiche Querschnittsfläche gegeben ist bzw. langfristig entsteht.

[443] Zu bedenken ist auch, dass es, wie in Abschnitt 4.5.1.3 dargestellt, im Bereich des Eingangs und des Austritts vermutlich bereits frühzeitig zum Absterben von Stammbereichen kommt.

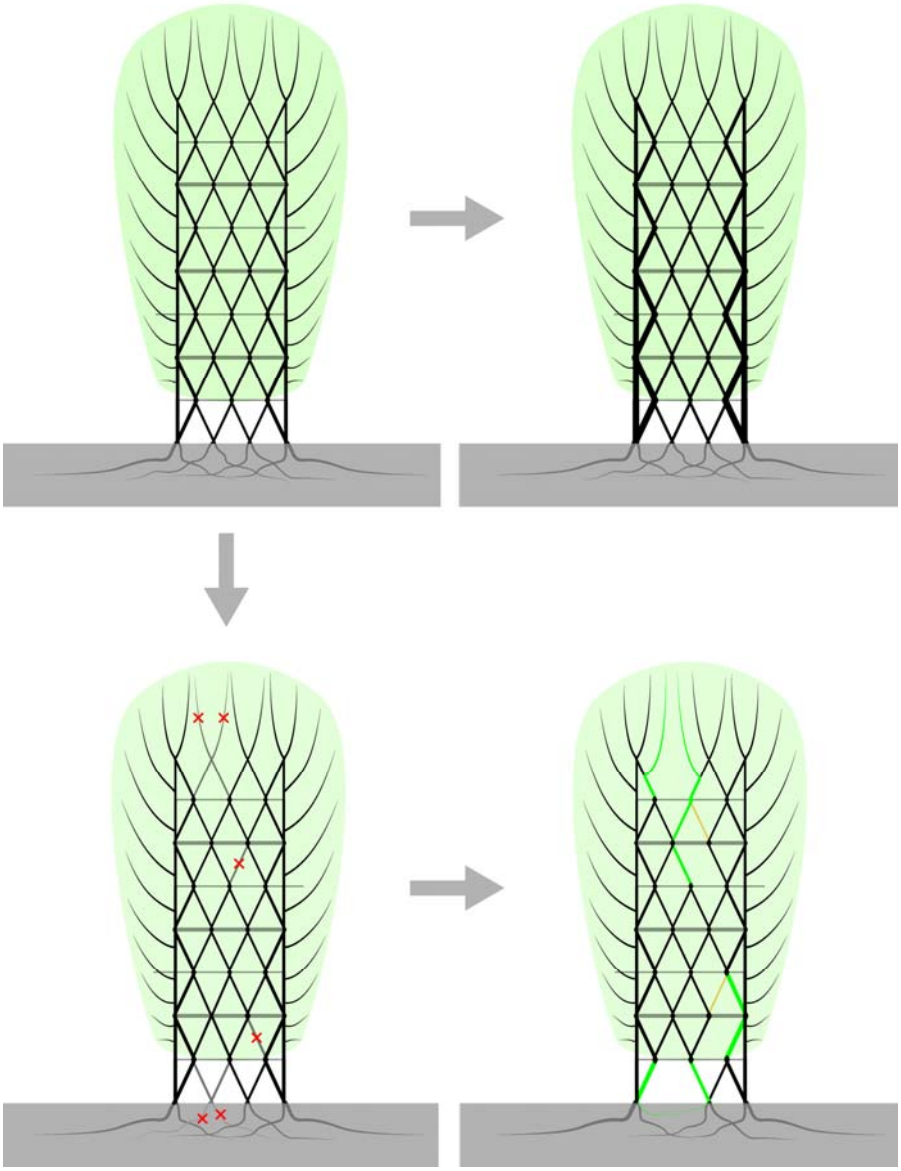


Abbildung 129 Oben: Entwicklung der Stammquerschnitte unter Idealbedingungen. Unten: Konsequenzen des Absterbens von Kronen- Wurzel- und Stammbereichen. Legende: Rote Kreuze: Absterbende Bereiche. Grün: Stärker wachsende Achsenabschnitte. Gelb: Schwächer wachsenden Achsenabschnitte.

Konstruktiv bzw. statisch führt jeder Verlust eines Stammabschnittes zunächst zu einer Reduktion der Tragfähigkeit bzw. zu einer Mehrbelastung der verbleibenden Stämme. Wie in Abschnitt 4.4.3 dargestellt, wurden die Pflanzenstruktur und die Einwachspunkte jedoch bewusst redundant ausgebildet. Erst wenn an einem Knotenpunkt mehr als zwei der vier Stämme absterben, geht die Kraftschlüssigkeit der Verbindung zwischen Pflanzenstruktur und technischem Bauteil verloren.[444] Inwiefern jedoch der durch das Absterben von Stammabschnitten hervorgerufene Stabilitätsverlust durch das Dickenwachstum der verbleibenden Stämme und Einwachspunkte kompensiert oder sogar überkompensiert werden kann, lässt sich durch die Pflege nicht direkt beeinflussen.[445] Es sollte jedoch darauf hingewirkt werden, dass die verbleibenden

[444] Sofern es nicht zu Fäulnisproblemen kommt.

[445] Indirekt dadurch, dass durch geringeren Schnitt und eine größere Krone das Dickenwachstum insgesamt zunimmt.

Stammabschnitte aufgrund ihrer Anordnung insgesamt – vor allem auch in Verbindung mit den aussteifenden horizontalen Ebenen – eine stabile Struktur bilden. Teil des Pflegekonzepts muss daher auch die Entwicklung einer Strategie sein, mit deren Hilfe entschieden werden kann, welche Stammabschnitte bzw. Wurzel- und Kronenbereiche gefördert und welche ggf. frühzeitig entfernt werden sollten.[446] Wie bereits dargestellt ist jedoch eine unmittelbare Förderung des Dickenwachstums eines Achsenabschnitts so gut wie unmöglich. Neben der Entnahme potentiell entbehrlicher Achsenabschnitte besteht lediglich die Möglichkeit, das Dickenwachstum mechanisch relevanter Achsenabschnitte zu stimulieren, indem die Entwicklung von Kronen- und Wurzelbereichen gefördert wird, die in den entsprechenden Abschnitten einen Xylemstrom hervorrufen und damit ein Dickenwachstum generieren. Während dies im Bereich der Krone insbesondere durch Schnitt[447] erfolgen kann, besteht diese Möglichkeit im Wurzelbereich nicht. Hier kann versucht werden, durch gezielte Düngung bestimmte Bereiche zu fördern. Da die Wurzelbereiche jedoch keineswegs klar voneinander abzugrenzen sind, sondern sich vielmehr überlappen bzw. durchdringen, ist diese Maßnahme jedoch relativ unspezifisch und eine spezifische Förderung von Wurzelbereichen scheint generell schwierig.

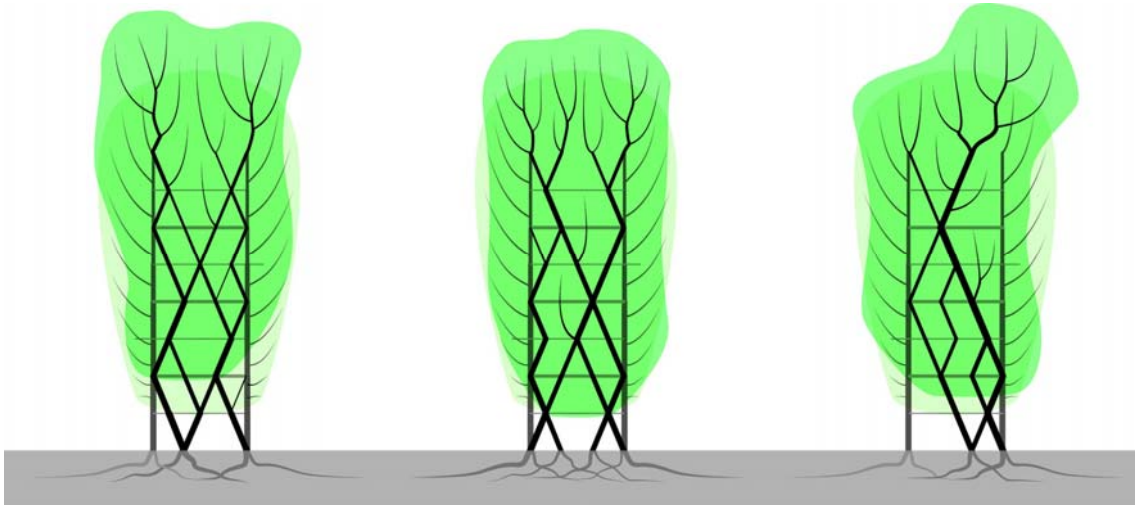


Abbildung 130 Drei verschiedene Entwicklungszustände, die durch das Zusammenwirken von Wachstum und dem Absterben von Kronen- Wurzel- und Stammbereichen entstehen könnten. Links und Mitte: Anstrebenswerte, relativ stabile Strukturen. Rechts: Durch Pflegemaßnahmen zu vermeidende, mechanisch eher unstabile Struktu,r[448] bei der sich ein „Haupttrieb" in der Entwicklung durchgesetzt hat.

[446] Ähnlich wie beim Absterben eines Astes stellt das Absterben eines Stammabschnitts immer eine Gefahr dar, dass Fäulnisbakterien etc. auch in die verbleibenden Teile eindringen und auch diese schwächen. Je größer der Durchmesser eines absterbenden Stammabschnitts, desto größere die entstehende Wundfläche, wenn dieser dann im Zuge von Pflegemaßnahmen entfernt wird. In der Baumpflege wird allgemein davon ausgegangen, dass Ästungswunden bis zu einem Durchmesser von 5 cm problemlos verheilen, während es spätestens ab einem Durchmesser von 10 cm häufiger zu dauerhaften Schädigungen kommt, da die große Wundfläche nur sehr langsam verheilt. Aus diesem Grund wäre ein relativ frühzeitiges Entfernen (z. B. bei einem Durchmesser von 5 cm bis 8 cm) aus baumpflegerischer Sicht empfehlenswert.

[447] Entfernen bzw. Zurückschneiden konkurrierender Kronenbereiche.

[448] Sofern auch auf der in der Ansicht linken Seite die Pflanzen bzw. Stämme abgestorben sind, ergibt sich eine nur einseitige Verankerung im Erdreich, die ein Absinken einer Ecke oder gar ein Kippen des gesamten Turms wahrscheinlich macht.

Insgesamt erscheint es aufgrund der Vielzahl von Einflussfaktoren und möglichen Zufallsereignissen nicht sinnvoll, im Vorfeld einen festen Plan vorzugeben, welche Bereiche zu erhalten bzw. zu fördern sind, sondern fallweise auf die jeweils eingetretene Situation zu reagieren. Als Zielsetzung bzw. leitende Grundregel wäre dabei darauf zu achten, dass auf jeder Hauptebene mindestens vier mechanisch belastbare Einwachspunkte dauerhaft erhalten bleiben, die möglichst gleichmäßig verteilt und idealerweise in den Ecken angeordnet sein sollten. Gleichzeitig sollte (vor allem im unteren Bereich) eine möglichst große Zahl aussteifender Dreiecksstrukturen erhalten bleiben. Im Boden sollten möglichst an allen vier Ecken Pflanzen vorhanden sein, damit eine möglichst große Standfläche gewährleistet ist. In Abbildung 130 sind mögliche Entwicklungsszenarien dargestellt, wobei zwischen anzustrebenden, mechanisch stabilen, und kritischen, vermutlich wenig belastbaren Strukturen unterschieden wird.

4.6 Diskussion

Die in den vorangegangenen Abschnitten für die drei Entwicklungsphasen hergeleiteten Prognosen sind in Abbildung 131 in Form einer möglichen Zeitreihe nochmals zusammenfassend wiedergegeben. Wie bereits mehrfach dargestellt, basieren diese Vorhersagen auf teilweise relativ groben Abschätzungen der Kronenvolumina und weiterer Randbedingungen sowie auf lediglich überschlägigen bzw. vergleichenden Berechnungen der Biomasseallokation und der Konkurrenzbedingungen. Für die Zukunft gilt es, diese Prognoseverfahren zu verfeinern und anhand der tatsächlichen Entwicklung zu überprüfen. Dies ist für die erste Entwicklungsphase bereits in Ansätzen möglich, eine Überprüfung der weiteren Prognosen kann natürlich erst im langfristigen Rückblick erfolgen.

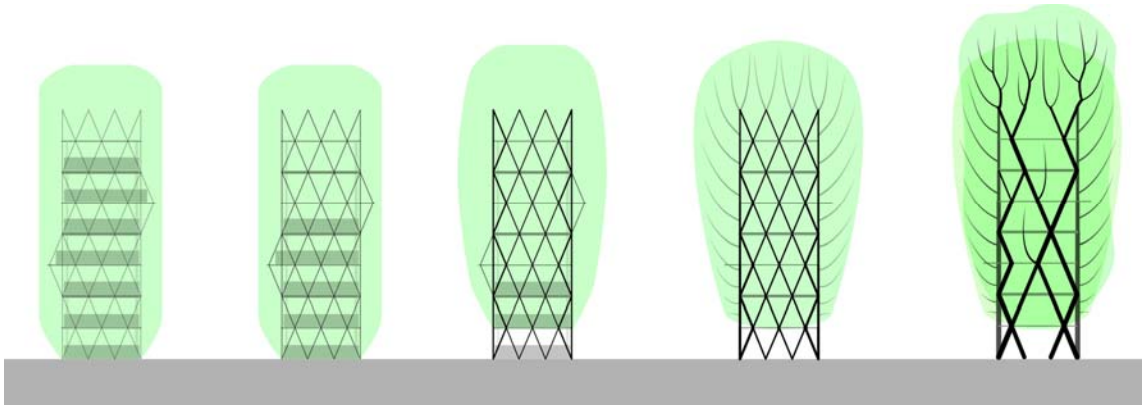


Abbildung 131 Zusammenstellung der prognostizierten Entwicklung. Von links nach rechts: Alle Pflanzen mit Pflanzcontainern (2009-2011); Pflanzcontainer auf den obersten 2 Ebenen entfernt (2012/2013); Pflanzcontainer auf 4 Ebenen entfernt, beginnende Effekte der apikalen Kontrolle (2014/2015); Additionsprozess abgeschlossen, selbsttragende Struktur mit baumtypischem Austriebsmuster (2017/18); Durch Absterben von Stammabschnitten und verstärktes Dickenwachstum geprägte Struktur (z. B. 2026).

Bis Mitte der Vegetationsperiode 2010 hatten die Pflanzen ein Kronenvolumen entwickelt, das an der Nordseite und im oberen Bereich etwas geringer und an der Südseite zumindest teilweise etwas größer war als angenommen (Abbildung 132). Da sich die Pflanzen der obersten Ebene dennoch wie angenommen insgesamt am kräftigsten entwickelten, scheinen die für die erste Entwicklungsphase angenommenen Volumina im Durchschnitt der Vegetationsperioden 2010 und 2011 in etwa der tatsächlichen Entwicklung zu entsprechen. Bezüglich der Durchmesser-

entwicklung wurden keine detaillierten Messungen vorgenommen. Augenscheinlich kam es jedoch spätestens im Verlauf der Vegetationsperiode 2011 zu deutlichen Unterschieden zwischen den obersten, südlich orientierten Eckpflanzen, und den nördlich orientierten wandmittig angeordneten Pflanzen der unteren Ebenen. Das Dickenwachstum war dabei insgesamt vermutlich etwas stärker als prognostiziert. Wahrscheinlich wurde das Wachstum der Referenzpflanze zu gering eingeschätzt und in den Überlegungen wurde nicht berücksichtigt, dass die Pflanzen ihren Stoffwechsel und ihr Wachstum darüber hinaus auch an die unterschiedlichen Wachstumsbedingungen anpassen und damit eine Reduktion des Kronenvolumens ggf. bedingt ausgleichen können. Im Mai 2011 hatten die obersten Additionsstellen einen Verwachsungszustand erreicht, bei dem bei den Vorversuchen zur Pflanzenaddition ein Abtrennen der Wurzelbereiche einer Ebene problemlos möglich war. Daher soll „planmäßig“ im Verlauf der Vegetationsperiode 2011 die oberste Containerebene entnommen werden.

Die weitere Entwicklung kann natürlich erst im Verlauf der kommenden Jahre mit der Prognose verglichen werden. Bezüglich der prognostizierten Absterbeprozesse in der dritten Phase erscheint es jedoch sinnvoll, die Vorhersage mit ähnlichen Strukturen, wie z. B. den von Konstantin Kirsch und Herman Block seit Mitte der 1990er Jahre gepflanzten Gitterwänden, zu vergleichen (vgl. Abschnitt 1.3.3.4). Diese zeigen in einigen Wandbereichen – rein visuell beurteilt – ein Verhältnis von Pflanzendichte und Biomasse bzw. Stammdurchmesser, das deutlich über den nach den Regeln der Selbstdurchforstung ermittelten Grenzwerten zu liegen scheint. Gleichzeitig weisen die meisten Stammabschnitte dieser Gitterwände trotz eines Alters von teilweise über 15 Jahren lediglich Durchmesser von wenigen Zentimetern auf und es sind deutliche Unterschiede zwischen sich im Konkurrenzkampf durchsetzenden und unterdrückten Pflanzen bzw. Bereichen zu erkennen.

Abbildung 132 Entwicklungszustand des Turms im Juli 2010 und Vergleich mit prognostizierter Krone (gestrichelte Linie).

Offensichtlich kann der mit den Self-Thinning-Regeln beschriebene Entwicklungstrend durch Pflegemaßnahmen – zumindest bei einigen Baumarten – über längere Zeit aufgehalten werden, indem das Absterben von Pflanzen durch den Rückschnitt stärker wachsender verhindert wird.

Selbstverständlich – und dies zeigen die teilweise extrem langsam wachsenden Strukturen von Kirsch und Block – kommt es dadurch nicht zu einer stärkeren, sondern vermutlich sogar zu einer geringeren Biomassezunahme, da durch die größeren Oberflächen mehr Assimilate für den Selbsterhalt verbraucht werden (vgl. Abschnitt 4.2.1.2). Demzufolge ist es durchaus denkbar, dass auch beim Turm durch intensive Pflege ein Großteil der Pflanzenachsen über einen etwas längeren Zeitraum erhalten werden kann, als durch die Berechnungen ermittelt. Dem ist jedoch andererseits wieder entgegenzuhalten, dass gerade bei der verwendeten Pionierbaumart Weide unterversorgte Stammabschnitte tendenziell früher absterben, da die ökologische Strategie der Art nicht im Erhalt bestehender Strukturen, sondern in der Neueroberung von Wachstumsräumen liegt.

Genauso wie die Entwicklungsprognosen sind auch die aus der Analyse botanischer Grundlagen abgeleiteten Entwurfsregeln als vorläufig bzw. provisorisch anzusehen. Sie müssen in der Praxis überprüft und durch weiterführende Untersuchungen verfeinert werden. Dabei sind insbesondere Zusammenhänge zwischen Transportprozessen und Dickenwachstum in Additionsstrukturen genauer zu untersuchen sowie der Einfluss der Pflanzendichte und der Neigungswinkel (gravimorphe Reaktion) baumartenspezifisch für baubotanische Strukturen in Versuchen zu quantifizieren. Beim Entwurf des Turms wurden die Schlussfolgerungen aus den Überlegungen zu gravimorphen Reaktionen und aus den Überlegungen zum Xylemstrom relativ rigide umgesetzt (gleiche Neigungswinkel, gleiche Leitungslängen). Hier könnten bei einer präziseren Datenlage und vor allem auch bei anderen Baumarten, die schwächere gravimorphe Reaktionen zeigen (z. B. Hainbuchen), auch größere Abweichungen von den aufgestellten Regeln möglich sein. Wie in Abschnitt 4.5.1.2 dargestellt, wurde jedoch mit der baubotanischen Struktur eine Pflanzendichte erzeugt, die bereits zu Beginn relativ nah an den ermittelten Grenzwerten (Selbstdurchforstungslinie) liegt. Vermutlich wäre es – gerade bei Pionierbaumarten wie der Weide – ratsam, mit geringeren Pflanzendichten zu beginnen, damit die einzelnen Pflanzen ein stärkeres Wachstum zeigen und Differenzierungsprozesse später einsetzen.

Insgesamt lag der Schwerpunkt des Entwurfs darauf, den verschieden Anforderungen der Pflanzen gerecht zu werden. Bereits die relativ simple funktionale Anforderung, in der aus botanischen Aspekten „idealen“ Rautenstruktur einen Eingang auszubilden, führte jedoch dazu, dass ein Kompromiss zwischen unterschiedlichen Anforderungen gefunden werden musste. Durch die Drehung von 4 Stammabschnitten wurde versucht, eine Struktur mit nach wie vor gleichen Transportlängen und annähernd gleichen Neigungswinkeln zu schaffen, gleichzeitig wurde dadurch jedoch der Kronenraum einiger Pflanzen stark beeinträchtigt. Die Analyse der Wachstumsbedingungen zeigte hier, dass die beschriebenen Stammabschnitte aller Wahrscheinlichkeit nach bereits frühzeitig absterben werden. Unter Umständen wäre es sinnvoller gewesen, zugunsten eines größeren bzw. homogeneren Kronenbereichs auf eine Konstanz der Neigungswinkel bzw. Transportlängen zu verzichten. Welche Prioritäten in solchen Fällen zu setzen sind, lässt sich jedoch erst beantworten, wenn die Entwurfsregeln in weiterführenden Versuchen quantifiziert und in weiteren Bauwerken überprüft worden sind. Bei zukünftigen Projekten wird es aber auch verstärkt darauf ankommen, auszuloten, inwiefern weitere funktionale Anforderungen (Raumprogramme, Verkehrslasten etc.) mit den botanischen Anforderungen der Pflanzen in Einklang gebracht werden können.

4.7 Zusammenfassung

Mit dem Entwurf und der baulichen Umsetzung des experimentellen Bauwerks „baubotanischer Turm“ wurde aufgezeigt, wie mit dem Ansatz der Pflanzenaddition (vgl. Kapitel 1, Abschnitt 1.4.4) in kürzester Zeit erlebbare, vertikal erschlossene Grünräume unmittelbar in der Dimension eines ausgewachsenen Baumes realisiert werden können. Gleichzeitig wurden einige Erkenntnisse der Versuche zur baubotanischen Produktion und Verbindung von Pflanzen praktisch angewendet (vgl. Kapitel 2 und 3). Vor allem aber wurde versucht, den Entwurf eines baubotanischen Projekts systematisch auf Gesetzmäßigkeiten des pflanzlichen Wachstums aufzubauen. Im Unterschied zu einem gewöhnlichen Architekturentwurf ist nämlich nicht in erster Linie ein Objekt, sondern ein Wachstums- bzw. Entwicklungsprozess zu entwerfen, der zu den gewünschten Entwicklungszuständen führen soll.

Da aus der Art und Weise, wie die Pflanzen einer baubotanischen Struktur angeordnet und miteinander verbunden werden, besondere Wachstumsbedingungen resultieren, wurden diese zunächst allgemein beschrieben und analysiert. Dabei wurden die vier Themenkomplexe „Konkurrenzbedingungen“, „Gravimorphe Reaktionen“, „Mechanische Reizungen“ und „Stofftransport“ als für das baubotanische Entwerfen besonders relevant identifiziert. In der genaueren Analyse zeigte sich, dass mechanische Reizungen die Entwicklung baubotanischer Strukturen weitaus weniger beeinflussen als anfangs angenommen. Diese wurden daher beim Entwurf nicht weiter berücksichtigt.

Demgegenüber können Konkurrenzbedingungen als entscheidend entwurfsprägend angesehen werden, weil es bei der Bildung baubotanischer Strukturen zwangsläufig zu einer Überlagerung der Kronenräume und damit in erheblichem Maße zu einer Konkurrenz um die knappe Ressource Licht kommt. Aus in den Forstwissenschaften etablierten Methoden konnte ein Verfahren zur Bestimmung kritischer Pflanzendichte-Stammdurchmesser-Verhältnisse für baubotanische Strukturen abgeleitet werden, mit dem im Entwurfsprozess eine sinnvolle Pflanzendichte hergeleitet werden kann.[449] Auch kann mit diesem Verfahren zumindest grob abgeschätzt werden, wann in der weiteren Entwicklung mit dem Absterben einzelner Pflanzen zu rechnen ist.

Gravimorphe Reaktionen prägen die Entwicklung baubotanischer Strukturen, weil durch das Neigen und Biegen von Trieben das natürliche Wachstumsmuster verändert wird. Aus vorliegenden Untersuchungen wurde die vorläufige Entwurfsregel abgeleitet, dass in baubotanischen Strukturen alle Triebe möglichst gleich stark geneigt bzw. gebogen werden sollten und dass der Neigungswinkel (Abweichung von der Vertikalen) möglichst gering sein sollte. Nur so ist mit einer gleichförmigen Entwicklung alle Pflanzen und einem homogenen Dickenwachstum entlang der miteinander verbundenen Triebabschnitte zu rechnen.

Bezüglich der Transportprozesse wurden die Betrachtungen auf Zusammenhänge zwischen dem Wassertransport im Holz (Xylemstrom) und dem Dickenwachstum fokussiert. Aus zwei in der Pflanzenphysiologie bzw. Ökophysiologie bekannten Theorien, der Pipe-Model-Theorie und dem Widerstandmodell,[450] wurde ein Verfahren abgeleitet, mit dem die Xylemströme in Verwachsungs- und Additionsstrukturen zumindest qualitativ beschrieben werden können. Aus diesen Überlegungen wurde abgeleitet, dass nur solche Verwachsungsstrukturen langfristig eine gleichmäßige und vitale Entwicklung zeigen, bei denen alle „physiologisch parallelen“ Stammabschnitte in etwa gleich lang sind.

---

[449] Übertragung der Regeln von Reinecke bzw. Yoda; vgl. Abschnitt 4.2.1.2 und die dort angeführten Quellen.

[450] Vgl. Abschnitt 4.2.4.4 und die dort angeführten Quellen.

Ausgehend von diesen Überlegungen wurde die Pflanzenstruktur des baubotanischen Turms als ein regelmäßiges Rautenmuster entwickelt, in das horizontal aussteifende, technische Bauteile eingebunden wurden. Bei diesen handelt es sich um 3 begehbare Ebenen mit einer quadratischen Grundfläche von ca. 2,8 m Kantenlänge sowie um Handläufe, die ebenfalls als aussteifende Elemente ausgebildet wurden. Diese insgesamt ca. 8 Meter hohe Struktur wird von einem temporären Gerüst aus Stahlrohren gestützt, das auch die auf 7 Ebenen angeordneten Pflanzcontainer trägt. Aufgrund ihrer Schnellwüchsigkeit und der Standortbedingungen (Feuchtwiese) wurde die Baumart *Salix alba* (Silberweide) gewählt. Die verwendeten Pflanzen wurden in der ersten Jahreshälfte 2009 direkt in den verwendeten Pflanzcontainern vorkultiviert, die bauliche Umsetzung erfolgte unmittelbar anschließend im Juni/Juli 2009.

Abschließend wurden die Wachstumsbedingungen der einzelnen Pflanzen analysiert und es wurde versucht, die weitere Entwicklung zu prognostizieren sowie ein Pflegekonzept zu entwickeln. Die Untersuchung der Konkurrenzbedingungen und Kronenräume ergab, dass die Pflanzendichte insgesamt relativ hoch ist und dass deshalb bereits dann mit dem Absterben einzelner Pflanzen zu rechnen ist, wenn diese Durchmesser von 1,5 bis 3 cm erreicht haben (Anfangsdurchmesser ca. 1 cm). Zur Steuerung des Additionsprozesses wurde – aufbauend auf den Überlegungen zum Xylemstrom in Verwachsungsstrukturen – ein Pflegekonzept entwickelt, bei dem die Pflanzcontainer von oben beginnend sukzessive entfernt werden sollen. Entsprechend der Pipe-Model-Theorie ist damit zu rechnen, dass sich die verwachsene Pflanzenstruktur autark vom Boden mit Wasser und Nährstoffen versorgen kann, sobald die Stämme an der Basis des Turms einen Durchmesser von ca. 8 cm erreicht haben. Mithilfe überschlägiger Berechnungen zur Biomasseproduktion von Weiden wurde ermittelt, dass dazu eine Wachstumsdauer von ungefähr 8 Jahren nötig sein müsste.

Aufgrund unterschiedlicher Wachstumsbedingungen (Kronenraum) werden sich entsprechend der Prognosen die Pflanzen bzw. Stammabschnitte an den Ecken vermutlich deutlich kräftiger entwickeln als wandmittig angeordnete. Gleichzeitig wird damit gerechnet, dass die Pflanzen im Bereich des Eingangs aufgrund ungünstiger Wachstumsbedingungen relativ rasch absterben werden. Dennoch zeichnet sich in den Prognosen ab, dass mit Abschluss des Additionsprozesses (ca. 8 Wachstumsjahre) nicht nur eine physiologisch autarke, sondern auch mechanisch belastbare Pflanzenstruktur entstanden sein wird, sodass die Gerüste entfernt werden können.

In der weiteren Entwicklung ist dann damit zu rechnen, dass aufgrund von Konkurrenzbedingungen, die auch in Verwachsungsstrukturen auftreten, vermehrt Stammabschnitte absterben und sich die regelmäßige Rautenstruktur allmählich auflöst. Mit diesen Prozessen ist spätestens ab einem Basisdurchmesser der Stämme von ca. 14 cm zu rechnen. Dieser Differenzierungsprozess wurde im Entwurf insofern bereits berücksichtigt, als dass ein Absterben einzelner Stammabschnitte nicht unmittelbar zum Verlust der Tragfähigkeit führt (Redundanz). Die Entwicklung ist mithilfe von Schnittmaßnahmen (Pflege) jedoch so zu steuern, dass immer eine stabile, sich selbst aussteifende Struktur erhalten bleibt. Erste Gegenüberstellungen der tatsächlichen Entwicklung in den ersten beiden Wachstumsjahren mit der Prognose zeigten, dass die Entwicklung des Austriebs relativ gut abgeschätzt wurde. Auch wurden die erwarteten Unterschiede zwischen den an unterschiedlichen Stellen angeordneten Pflanzen bestätigt, das Wachstum war insgesamt jedoch etwas größer als prognostiziert.

5 Schlussbetrachtungen und Ausblick

Der Ansatz, in der Architektur mit dem Wachstum von Bäumen zu arbeiten, bringt es mit sich, dass im Rahmen eines auf wenige Jahre beschränkten Promotionsvorhabens keine abschließenden Ergebnisse und Schlussfolgerungen vorgelegt werden können.[451] Inwiefern sich die entwickelten Techniken in der Praxis dauerhaft bewähren und ob sich die Prognosen und Entwurfsregeln als richtig erweisen, kann deshalb nur die Zeit zeigen. Dies unterstreicht einmal mehr, dass in der Baubotanik nicht fertige Gebäude, sondern Entwicklungsprozesse entworfen werden und damit ein Denken in Möglichkeiten, Zufällen und Wahrscheinlichkeiten gefordert ist, das in der Architektur bislang kaum gebräuchlich ist und überraschenderweise auch in der Landschaftsarchitektur – die ja schon immer mit dem Medium Pflanze arbeitet – erst in jüngerer Zeit systematisch entwickelt wird.[452] Auch sei hier nochmals darauf hingewiesen, dass mit der vorliegenden Arbeit lediglich erste Ansätze erarbeitet wurden, die mehr Fragen aufwerfen, als beantwortet werden konnten. So sind insbesondere viele pflanzenphysiologische und technische Fragestellungen der Pflanzenaddition noch großteils unbeantwortet und bedürfen eigener empirischer Forschungs- und Entwicklungsansätze.[453]

Dennoch wurden in den vergangenen Jahren ausgehend von den Techniken, Untersuchungen und Überlegungen, die in der vorliegenden Arbeit angestellt wurden, einige weitere Projekte entworfen und teilweise auch bereits realisiert. Bei diesen wurden – mehr oder weniger systematisch – unterschiedliche Aspekte der in Abschnitt 1.2 vorgestellten Zielsetzungen des baubotanischen Ansatzes aufgegriffen und weiterentwickelt. Diese Projekte sollen hier abschließend vorgestellt werden, um einen Ausblick auf verschiedene Entwicklungsperspektiven zu geben und um zu diskutieren, welch Vor- und Nachteile, offene Fragen und kritische Punkte sich bei den verschiedenen Entwurfsansätzen ergeben. Die Projekte basieren alle auf dem Verfahren der Pflanzenaddition und unterliegen damit einem Entstehungsprozess, der verglichen mit dem herkömmlicher Bauten lang, mit dem gewöhnlicher Bäume jedoch überraschend kurz ist. Da es sich dabei in erster Linie um einen Wachstums- und nicht um einen Bauprozess handelt, ist die Entstehungszeit jedoch nicht durch Lärm, Schutt, und Staub dominiert, wie wir es von gewöhnlichen Baustellen gewohnt sind, sondern von Beginn an durch die sinnlichen Qualitäten der jungen Zweige und Blätter geprägt. Die räumliche und ästhetische Wirkung wird aber genauso durch die notwendigen, teils dauerhaften, teils temporären technischen Strukturen geprägt, die daher nicht rein technisch entwickelt werden sollten, sondern zu einem integralen Bestandteil des Entwurfs werden.

---

[451] Vielmehr entwickeln sich die im Rahmen der Versuche angelegten Verwachsungen und der baubotanische Turm kontinuierlich weiter – hier sei insbesondere auf die Darstellung der Entwicklung des Turms im Anhang verwiesen, die den Zeitraum bis Oktober 2011 berücksichtigt.

[452] Vermutlich liegt dem Entwerfen in der Landschaftsarchitektur ein Denken in fertigen Bilden zu Grunde, das seine Wurzeln im Englischen Landschaftsgarten hat. Das Entwerfen dynamischer Prozesse wird u. a. in folgenden Dissertationen detaillierter untersucht: GROSSE-BÄCHLE 2003. *Eine Pflanze ist kein Stein. Strategien für die Gestaltung mit der Dynamik von Pflanzen. Untersuchungen an Beispielen zeitgenössischer Landschaftsarchitektur,* Hannover, Leibniz Universität Hannover Institut für Landschaftsarchitektur.; VAN DOOREN, N. in Arbeit. Drawing Time. Investigations into how time in landscape can be represented. Dissertation an der University of Amsterdam.

[453] Z. B. Untersuchung der Xylemströme und Entwicklung von adäquater Bewässerungs- und Düngungstechnik, Pflanzsubstraten und Containersystemen.

5.1 Eine Baumkrone als öffentlicher Ort in der Stadt: Platanenkubus Nagold

Der Platanenkubus Nagold wurde im August/September 2011 für die Landesgartenschau Nagold 2012 GmbH realisiert und kann in direkter Linie mit dem baubotanischen Turm gesehen werden.[454] Das würfelförmige Bauwerk mit einer Kantenlänge von ca. 10 Metern ist als eine Fusion aus Stadtbaum und Stadthaus konzipiert und wird sich in der Zeit nach der Gartenschau in eine Reihe von Stadthäusern einfügen. Doch während diese steinernen Häuser in einem grünen Garten stehen, ist es beim Platanenkubus genau umgekehrt: Das Bauwerk selbst ist die Pflanze, die aus einer primär steinernen Fläche emporwächst (Abbildung 133).

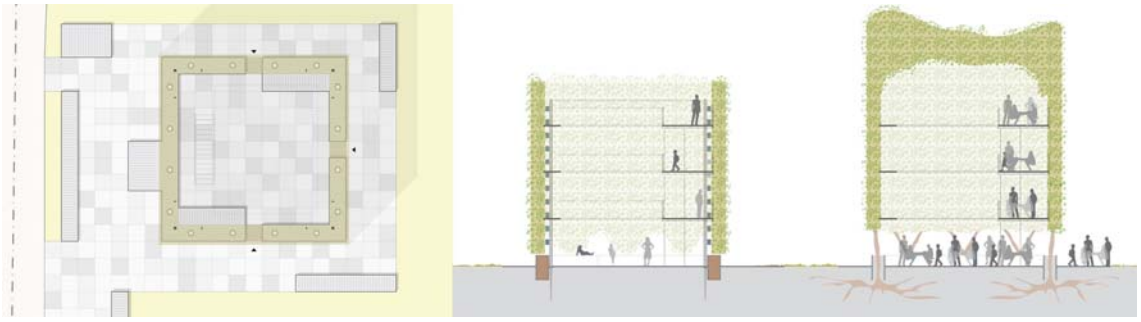


Abbildung 133 Links: Grundriss und Lageplan des Platanenkubus Nagold. Mitte: Schnitt zum Zeitpunkt unmittelbar nach Fertigstellung. Rechts: Schnitt des selbstragenden Zustands. (F. Ludwig und D. Schönle)

Dank einer sehr tragfähigen Stahl-Grundkonstruktion kann das Bauwerk bereits während der Gartenschau nicht nur ebenerdig, sondern auf drei Ebenen betreten werden, sodass die Besucher in unmittelbaren Kontakt mit den Blätterwänden, aber auch mit den Pflanzcontainern, Schläuchen und Tropfern der Bewässerungsanlage kommen (Abbildung 133 Mitte). Trotz dieses technischen Charakters soll der Innenraum des Platanenkubus aber auch ein meditativer Ort der Stille werden, der den Besuchern einen Rückzug vom Trubel des Gartenschaugeländes ermöglicht. Genauso wie beim baubotanischen Turm sollen die begehbaren Ebenen dauerhaft im Bauwerk verbleiben, während die Eckstützen, die zu Anfang alle Lasten abtragen, entfernt werden sollen, sobald die Pflanzenstruktur stabil genug geworden ist (Abbildung 133 rechts, Abbildung 134). Aufgrund der Größe des Bauwerks und der im Vergleich zur Weide etwas langsamer wachsenden Baumart Platane wird es jedoch vermutlich 15 bis 20 Jahre dauern, bis dieser Punkt erreicht ist. Daher, und aufgrund des großen Eigengewichts der Pflanzcontainer sowie der sich aus der öffentlichen Begehbarkeit ergebenden Nutzlast, mussten die Eckstützen sehr massiv dimensioniert werden,[455] sodass ein sehr starker Kontrast zwischen der schweren Stahlkonstruktion und den anfangs nur wenige Millimeter dicken, zart und zerbrechlich wirkenden Pflanzen entsteht (Abbildung 135 rechts). Im Verlauf der Entwicklung wird sich dieses Verhältnis – ähnlich wie in Abschnitt 1.1.1 am Beispiel des baubotanischen Stegs beschrieben – umkehren.

---

[454] Entwurfs- und Ausführungsplanung: Ferdinand Ludwig und Daniel Schönle; Tragwerksplanung: Ingenieurbüro Brocke, Stuttgart; Gartenbautechnische Beratung und Entwicklung: Christoph Roesler/SecOp Sulzbauch-Laufen.

[455] Verzinkte Stahlträger HEB 240.

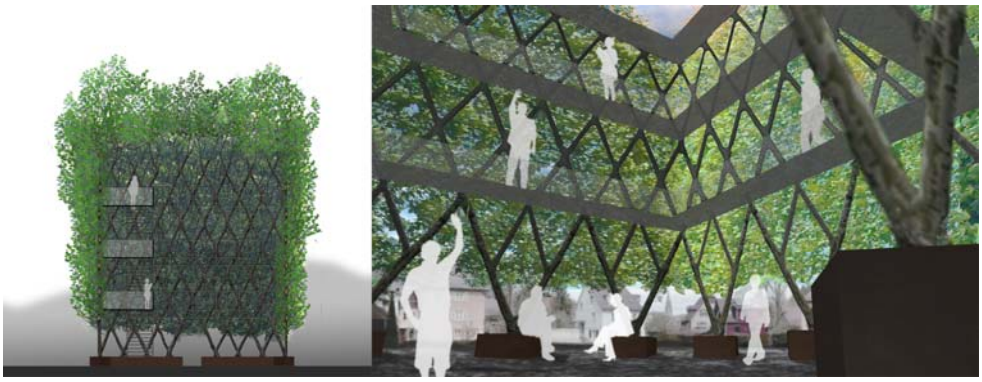


Abbildung 134 Visualisierung des selbstragenden Zustands als Schnitt (links) und Innenperspektive (rechts) (F. Ludwig und D. Schönle)

Es bleibt jedoch abzuwarten, ob die Öffentlichkeit der Pflanzenstruktur diese Entwicklung zutrauen wird, oder ob eine derartige Entwicklung die Grenzen der Vorstellungskraft der Gartenschaubesucher übersteigt. Sofern sich der Platanenkubus ähnlich entwickeln wird, wie dies für den baubotanischen Turm prognostiziert wurde (vgl. Abbildung 131), wird langfristig oberhalb der baubotanischen Struktur eine Baumkrone entstehen, während gleichzeitig im unteren Bereich die fachwerkartig ausgebildete Stammstruktur immer stärker hervortritt. Das frische Grün wird hier mehr und mehr einer knorrigen Struktur weichen, die die typische Schuppenborke einer Platane zeigt. Oben wird sich durch die Kronenentwicklung der anfänglich zum Himmel hin offene Innenraum im Laufe der Zeit mehr und mehr schließen.

Abbildung 135 Links: Montage der vorgefertigten baubotanischen Konstruktionselemente. Mitte: Außenansicht der „Blattfassade“ unmittelbar nach Fertigstellung. Rechts: Innenansicht mit Besucherplattform und Treppen zum gleichen Zeitpunkt. (Fotos: F. Ludwig)

Als eine öffentlich begehbare Baumkrone knüpft der Platanenkubus Nagold in gewissem Sinne an die Tradition der Tanzlinden an, die ja bereits Rudolph Doernach bei seinen lebenden Lauben der Stadtvision „Biopolis“ aufgegriffen hatte (vgl. Abschnitt 1.3.3.1). Der Kubus verdeutlicht aber auch, wie mittels der Baubotanik auf kleinstem Raum vielfältig nutzbare Grünräume geschaffen werden können, die innerhalb kürzester Zeit nutzbar sind. Genauso wie beim baubotanischen Turm liegt zu Beginn jedoch keine tragende Pflanzenkonstruktion und damit kein lebendes Bauwerk vor (vgl. Abschnitt 1.2.2), sondern lediglich eine begrünte Struktur, mit der das Versprechen in den Raum gestellt wird, dass im Verlauf der Zeit eine lebende Konstruktion entstehen wird. Wie oben dargestellt ist es bislang jedoch zumindest fraglich, ob es beim Platanenkubus gelingen wird, dieses Versprechen zu vermitteln. Bei zukünftigen Projekten könnte es sinnvoll sein, wenn sich die temporären Strukturen durch ihre Materialität von den dauerhaften

Strukturen unterscheiden, beispielsweise indem die temporären Stützen aus unbehandeltem Holz konstruiert werden, die langfristig verfaulen und so in den natürlichen Stoffkreislauf zurückgeführt werden. Dies ist jedoch erst dann möglich, wenn die Zunahme der Tragfähigkeit der baubotanischen Struktur genauer vorhergesagt werden kann.

5.2 Ökologisch motivierte baubotanische Begrünungen: Baumwand und Baumfassade

Beim Platanenkubus Nagold standen vor allem die Entwicklung der räumlichen Qualitäten sowie die Überprüfung des baubotanischen Ansatzes in einem urbanen Kontext im Zentrum des Interesses. Ökologische Fragestellungen wurden dabei meist ausgeklammert, obwohl das Bauwerk ohne Zweifel über die ökologischen Qualitäten eines ausgewachsenen Baumes verfügt. Die Nährstoffversorgung erfolgt jedoch über konventionelle Mineraldünger und es wird mit Trinkwasser gegossen, während die auf der weitgehend versiegelten Platzfläche anfallenden Niederschläge in die Kanalisation abgeleitet werden. Wenn die Baubotanik langfristig als eine ökologische Bauweise entwickelt werden soll, kann eine derartige Ressourcenverschwendung nicht akzeptiert werden, vielmehr müssen die Projekte als integrale Bestandteile urbaner Wasser- und Nährstoffkreisläufe gedacht werden, die im Idealfall eine Vielzahl ökologischer Aufgaben erfüllen können.[456]

Die als Produktentwicklungen angedachten Ansätze Baumwand[457] und Baumfassade[458] greifen diese Fragestellungen auf. Bei der Baumfassade handelt es sich um eine mit dem baubotanischen Turm und dem Platanenkubus Nagold vergleichbare Pflanzenstruktur, die jedoch vor konventionell konstruierten Bauwerken, beispielsweise im Bereich von Balkonen, angeordnet werden soll. Vornehmliches Ziel ist es hier nicht, ein pflanzliches Tragwerk entstehen zu lassen, auch wenn die Pflanzenstruktur ggf. langfristig die Funktion einer Balkonstütze übernehmen könnte. Fokussiert wird vielmehr auf die Einbindung der Pflanzenstruktur in das Klimakonzept des Bauwerks sowie auf eine Verknüpfung des Wasser- und Nährstoffbedarfs der Pflanze mit dem Abwassersystem des Gebäudes. Ähnlich wie bei dem in Abschnitt 1.3.4.2 vorgestellten Gebäude für Physik in Berlin-Adlershof sollen die Pflanzen zur sommerlichen Verschattung der (Glas-)Fassaden dienen und durch Verdunstung kühlen, während sie im Winter das Sonnenlicht zur passiven Nutzung der solaren Energie durchlassen. Darüber hinaus entsteht im Dachbereich durch die Baumkronen eine Art Dachgarten, ohne dass dort (langfristig) Pflanzsubstrate und Bewässerungseinrichtungen benötigt werden. Die Bewässerung der im Rahmen der Pflanzenaddition temporär notwendigen Pflanzcontainer soll mit Regenwasser erfolgen, das in Zisternen gesammelt wird. Langfristig soll die Wasserversorgung im Boden ebenfalls über Regenwasser erfolgen, das mittels Rigolen in den Boden eingespeist wird. Dabei ist auch eine Kopplung mit einer Art Pflanzenkläranlage angedacht, bei der die in häuslichen Abwässern enthaltenen Nährstoffe den Pflanzen zur Verfügung gestellt werden sollen. Insgesamt werden damit Ziele verfolgt, die großteils denen des Baumieter-Konzepts von Friedensreich Hundertwasser entspre-

---

[456] Aus dieser Perspektive wurde die Baubotanik auf der Konferenz „Produktive Pflanzensysteme in der post-fossilen Stadtgestaltung“ am 10.03.2011 in Stuttgart diskutiert (Veranstalter: IGMA und ILPÖ, Universität Stuttgart, Universität Hohenheim).

[457] Die Baumwand ist eine Entwicklung am IGMA/Forschungsgebiet Baubotanik im Auftrag der Firma Helix Pflanzensysteme, Kornwestheim; europäisches Patent erteilt; Erfinder: Ferdinand Ludwig und Christoph Roesler; Patentinhaber: Helix Pflanzensysteme. Der Begriff Baumwand ist markenrechtlich geschützt.

[458] Ideenskizze von Ferdinand Ludwig und Andreas Ernst, 2011.

chen, in der Umsetzung durch die Nutzung der Pflanzenaddition jedoch langfristig einfacher und damit realistischer erscheinen (vgl. Abschnitt 1.3.3.3).

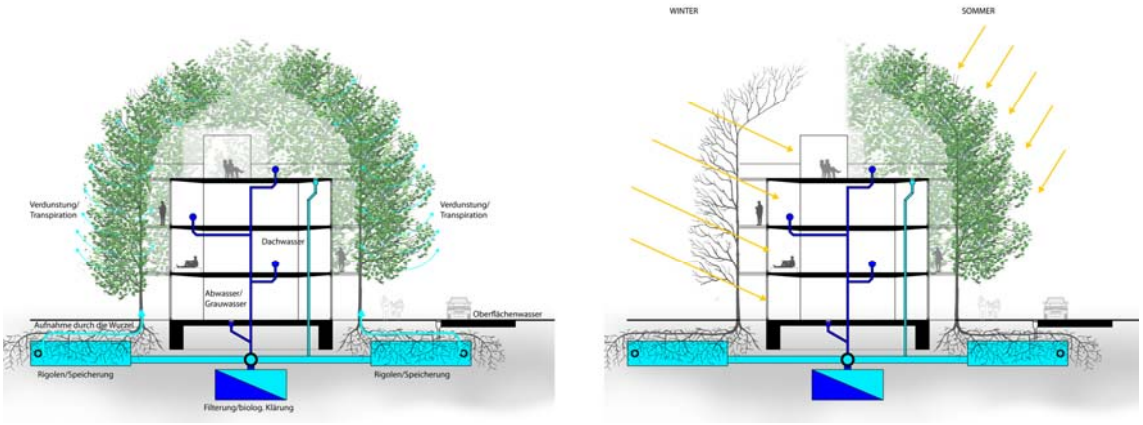


Abbildung 136 Links: Schematische Darstellung der Verknüpfung von Grau-und Abwassersystemen mit einer baubotanischen Baumfassade, die hier so ausgebildet ist, dass im oberen Bereich ein Baumkronen-Dachgarten entsteht. Rechts: Belichtungssituation im Sommer und Winter. (Ludwig und Ernst)

Bei dem Projekt Baumwand besteht die Grundidee darin, dass die zur Versorgung der Pflanzen notwendigen Behälter als selbstragende Bauelemente dauerhafter Bestandteil der Konstruktion sind und zusammen mit den Substratfüllungen eine geschlossene Wand bilden, die weitere Funktionen, wie z. B. die des Schallschutzes (Lärmschutzwand), übernehmen kann. Diese Wände nehmen nicht nur die zur Pflanzenaddition verwendeten Pflanzen auf, sie können und sollen darüber hinaus mit Stauden, Bodendeckern, Gräsern, Wildblumen etc. bepflanzt werden, sodass eine artenreiche Pflanzenwand entsteht, die ein weitaus vielfältigeres Habitat darstellt, als rein baubotanische Strukturen, bei denen es sich (zumindest bislang) immer um Monokulturen handelt. Die primären Tragfunktionen der Baumwand werden von den Pflanzbehältern und zusätzlichen, stabilisierenden Elementen, nicht von der Pflanzenstruktur übernommen. Diese stellen jedoch keine zusätzliche Belastung dar, sondern können zur Aussteifung und Verankerung des Bauwerks im Boden herangezogen werden. Insgesamt ist die Baumwand als ein „vegetatives Baukastensystem“ konzipiert: Die Pflanzbehälter sind in ihrer Modularität wie Mauersteine aufzufassen und werden bereits im Vorfeld mit Jungpflanzen bestückt. Baumartig wachsende Pflanzen werden mittels der Pflanzenaddition zu einer durchgehenden Struktur verbunden, sie bilden mit der Zeit vor und oberhalb der Wand eine Baumkrone aus, die unterschiedlich geschnitten und gestaltet werden kann (Abbildung 137). Weil die verwachsene Pflanzenstruktur ihren Wasser- und Nährstoffbedarf vom Boden aus decken kann, ist die Größe der Baumkrone nicht durch das limitierte Wurzelvolumen der Pflanzcontainer beschränkt. Integraler Bestandteil des Baumwand-Konzept ist außerdem die Einbeziehung eines Regenwassermanagement-Systems: Unter der Wand können im Erdreich poröse Wasserspeicher (Rigolen) eingebaut werden, die als Speicher für die künstliche Bewässerung der in der Wand wurzelnden Pflanzen dienen. Gleichzeitig steht dieses Wasserreservoir den im Boden wurzelnden Pflanzen unmittelbar zur Verfügung.

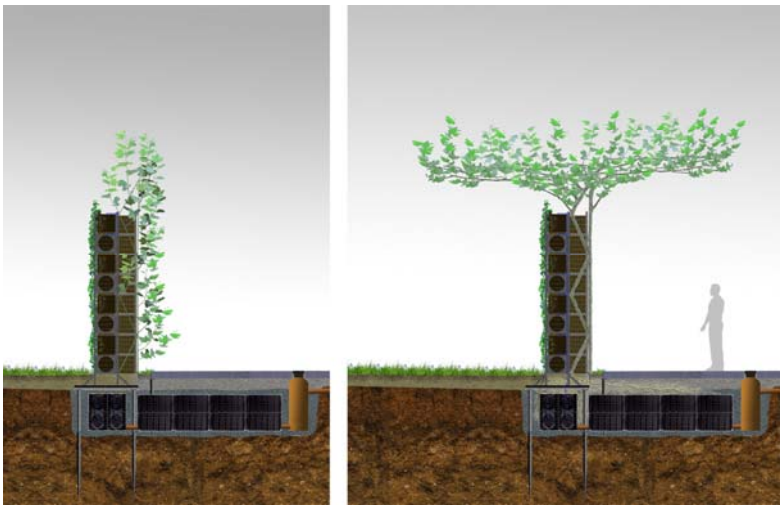


Abbildung 137 Links: Baumwand unmittelbar nach baulicher Fertigstellung. Rechts: Die gleiche Wand nach erfolgter Verwachsung und Ausbildung einer Baumkrone, die in diesem Fall dachförmig gezogen wurde. Im Boden sind jeweils die Kunststoffrigolen des Wassermanagements zu erkennen. (F. Ludwig und Ch. Roesler)

Noch stärker als beim baubotanischen Turm und dem Platanenkubus Nagold, die wie oben dargestellt temporär als begrünte Konstruktionen aufzufassen sind, verschwimmen bei der Baumfassade und der Baumwand die Grenzen zu konventionellen Begrünungen. Dennoch lassen sich in einigen Aspekten nennenswerte Unterschiede zwischen mit kletternden Pflanzen begrünten Strukturen und ausschließlich bepflanzten Bauten auf der einen und nach dem Verfahren der Pflanzenaddition „begrünten" Bauwerken auf der anderen Seite feststellen: Zunächst einmal kombiniert die Pflanzenaddition die Schnelligkeit einer Begrünung, die nur durch Bepflanzung erreicht werden kann, mit dem Vorteil der Begrünung mit Kletterpflanzen vom Boden aus, der darin besteht, dass langfristig keine Bewässerungs- und Düngungstechnik notwendig ist. Diese bei bepflanzten Fassaden wie z. B. den vertikalen Gärten von Patrick Blanc dauerhaft notwendige Bewässerungstechnik erhöht nicht nur den technischen Aufwand enorm, sondern führt auch bei diesen Projekten zu Preisen von ca. 800 bis 1000 EUR/m² (Weiß, 2011). Demgegenüber lagen beispielsweise die Kosten für die Pflanzenstruktur des Platanenkubus bei ca. 250 EUR/m² (ohne Stahlkonstruktion). Möglicherweise kann somit durch die Pflanzenaddition, die zunächst ein relativ aufwändiges Verfahren darstellt, durchaus auch ein ökonomischer Vorteil erzielt werden. Gleichzeitig ist anzunehmen, dass mit Bäumen gebildete Strukturen langfristig stadtklimatisch einen größeren Nutzen erzeugen können als beispielsweise Begrünungen mit Kletterpflanzen, da ihre Blattmasse nicht nur an der ursprünglich begrünten Fläche, sondern darüber hinaus in der sich entwickelnden Baumkrone entstehen kann. Auch ist die entstehende Tragfähigkeit der Strukturen durchaus auch dann ein Vorteil, wenn nicht primär tragende Pflanzenkonstruktionen gebildet werden, da aufwändige Stützstrukturen, wie sie z. B. bei Kletterpflanzen dauerhaft nötig sind, nur temporär benötigt werden. Diese ökonomischen und ökologischen Vorteile baubotanischer Begrünungen sollen jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass alle Formen der Begrünung gegenüber rein baubotanisch konstruierten Tragstrukturen nicht als lebende Bauten bezeichnet werden können, und damit ein Aspekt verloren geht, der den Charme von Bauten wie z. B. dem baubotanischen Steg ausmachen.

5.3 Baubotanische Quartiersentwicklung: Grow!

Das Entwurfsprojekt „Grow!“ versucht, die neuartige zeitliche Entwicklung baubotanischer Strukturen und die Nutzungspotentiale begehbarer Baumkronen-Räume mit einem städtebaulichen Entwicklungsprozess zu verschränken.[459] Grundgedanke ist dabei, dass sich die Nutzungsstrukturen neu gebauter Stadtviertel in der Regel nicht genau vorhersagen lassen und daher auch nicht von vorne herein in einer endgültigen Gebäudestruktur abgebildet werden können. Vielmehr entstehen beispielsweise 10 bis 15 Jahre nach der Fertigstellung, wenn sich ein Stadterweiterungsgebiet als eigenständiges Viertel etabliert hat, häufig neue Nutzungswünsche, die in der Planung nicht bedacht werden können. In dieser Phase der Entwicklung sollte ein Quartier daher noch nicht fertiggebaut und räumlich starr sein, sondern sich mit ausreichend nutzungsoffenen Möglichkeiten zur Nachverdichtung präsentieren. Bei dem Konzept des Entwurfs „Grow!“ ist vorgesehen, dass diese Nachverdichtung durch die Erschließung baubotanischer Strukturen erfolgt.

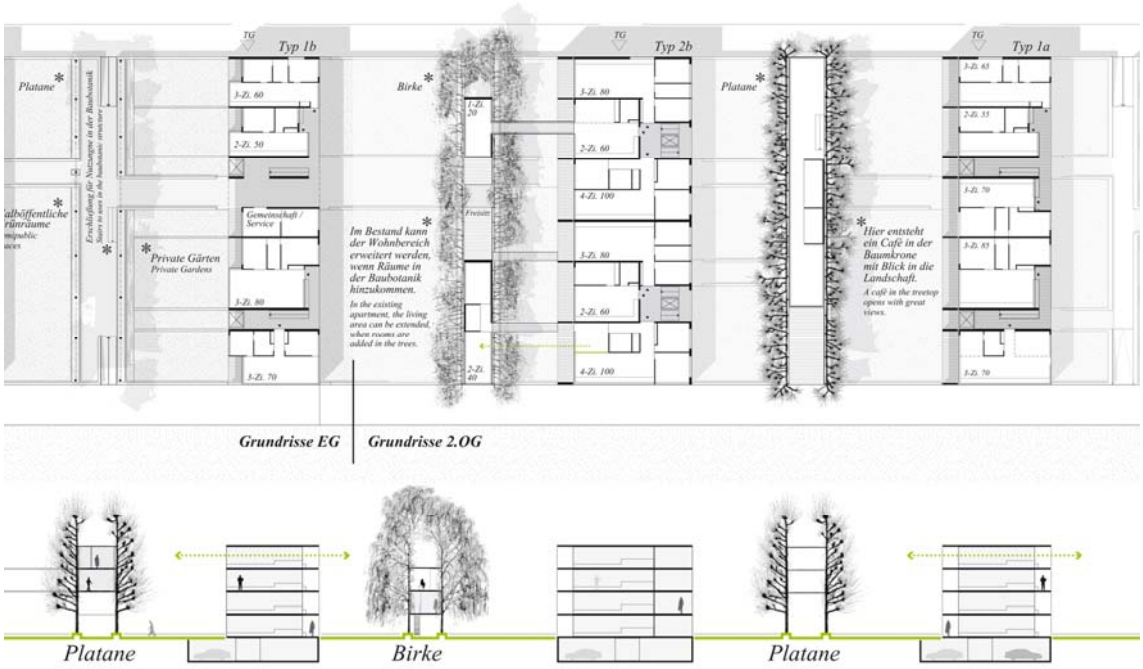


Abbildung 138 Planausschnitte des Entwurfs „Grow!“, oben Grundriss, unten Schnitte, jeweils mit baubotanischen Strukturen aus Birke und Platane (selbsttragender Zustand). (D. Schönle, I. Finkenberger, F. Ludwig)

Die städtebauliche Struktur sieht an einem terrassierten Hang eine Zeilenbebauung vor, bei der in den halböffentlichen Zwischenräumen der Gebäude ebenfalls zeilenartig gegliederte baubotanische Strukturen platziert sind, die bereits mit der Wohnbebauung in der Dimension der Bauwerke realisiert werden. Anders als beispielsweise beim Platanenkubus sind diese Strukturen jedoch nicht von Anfang an begehbar, sondern gliedern zunächst als künstlich gebildete Baumreihen die halböffentlichen Flächen, spenden genauso wie ausgewachsene Bäume Schat-

[459] Wettbewerbsentwurf von Daniel Schönle, Isabel Finkenberger und Ferdinand Ludwig (Mitarbeit: Gregory Tarkhounian und Andreas Ernst) im Rahmen des Wettbewerbs „Europan 11“, Wettbewerbsgebiet Würzburg-Hubland.

ten und dienen (ebenerdig) als Treffpunkte der Bewohner. Die temporär notwendigen Gerüststrukturen können dementsprechend leicht konstruiert werden (sie müssten keine Verkehrslasten übernehmen) und sollen aus Bambusrohren oder anderen natürlichen Materialien gebildet werden, die so lange eine ausreichende Stabilität gewährleisten, bis die im Luftraum angeordneten Pflanzcontainer entfernt werden können und die Struktur selbsttragend geworden ist. (Abbildung 138)

Je nach Baumart und Anfangsstruktur wird dieser Punkt voraussichtlich nach 10 bis 15 Jahren erreicht werden und es kann dann damit begonnen werden, Nutzungsmodule und Erschließungen in die künstlich gebildeten Baumkronen einzubauen. Für die kommenden Jahrzehnte (je nach Baumart voraussichtlich mindestens 30 bis 50 Jahre) wird dann dank des Dickenwachstums und der Selbstreparatur (Wundheilung) mit einer weiteren Zunahme der Tragfähigkeit gerechnet, und die Nutzung kann sukzessive gesteigert werden.[460] Angedacht ist, neben Platanen u. a. auch Birken zu verwenden, wobei versucht wurde, im Entwurf der baubotanischen Strukturen auf Arteigenschaften zu reagieren[461] und durch Unterschiede in Wuchsform, Belaubung und Schnitt verschieden Aufenthaltsqualitäten zu erzeugen. Wie in Abbildung 139 angedeutet sollen langfristig in den baubotanischen Strukturen Nutzungen wie Gästezimmer oder Studios entstehen oder Nutzungen von den Gebäuden in die Baumkronen verlagert werden.

Neben dieser ästhetisch-räumlich Verknüpfung baubotanischer Strukturen mit einer Wohn- bzw. Wohnmischbebauung sollen die Pflanzen ähnlich wie bei dem Ansatz der Baumfassade auch in die Wasser- und Nährstoffkreisläufe des Stadtviertels einbezogen werden, sodass aus den baubotanischen Strukturen und den Baukörpern bzw. technischen Anlagen ein gemeinsames Wirkungsgefüge entsteht: Auf den extensiv begrünten Dächern und den Dachterrassen soll Regenwasser gesammelt und teils vorgefiltert werden, das dann zusammen mit dem Grauwasser der Häuser (Dusche, Spüle) in ein Wassermanagementsystem eingespeist wird. Lineare Regenwasserbecken (Tiefbeete) entlang der baubotanischen Strukturen dienen der weiteren Wasseraufbereitung (natürliche Klärung und Pufferung der Wassermengen). Sie sind so mit dem Wurzelraum der Pflanzen verbunden, dass immer eine bedarfsgerechte Wassermenge für ein optimales Wachstum zur Verfügung gestellt werden kann.

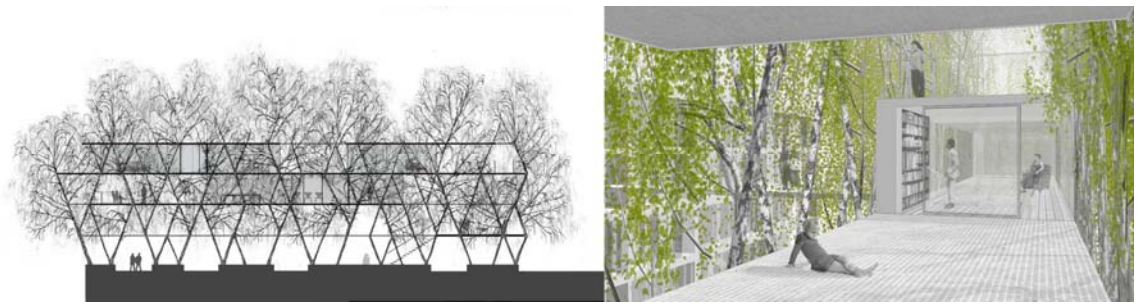


Abbildung 139 Ansicht und Innenraumperspektive einer baubotanischen Pflanzenstruktur aus Birke, als Wohnraumerweiterung genutzt.

[460] Hierbei handelt es sich um erste Abschätzungen. Für genauere Angaben und Begründungen fehlen bislang sowohl Prognosemodelle als auch praktische Erfahrungen über längere Zeiträume. Zu klären sind auch eine ganze Reihe baurechtlicher Fragen.

[461] Beispielsweise wurde versucht, die Pflanzabstände und Neigungswinkel an die Arteigenschaften (Konkurrenzkraft, Schattenverträglichkeit, neg. Geotropismus, ökologisches Verhalten etc.) anzupassen. Dabei wurde jedoch deutlich, dass hier eine systematische Aufarbeitung der Arteigenschaften fehlt, die im Zuge eines baubotanischen Artenkatalogs erfolgen sollte (vgl. Abschnitt 3.1.4)

5.4 Fazit

Die oben dargestellten baubotanischen Projektebeispiele zeigen nicht nur unterschiedliche Anwendungsmöglichkeiten des Ansatzes der Pflanzenaddition auf, sondern machen auch deutlich, dass die Suche nach einer gestalterisch, ökologisch, funktionell und konzeptionell schlüssigen Lösung immer eine Gratwanderung darstellt, bei der die unterschiedlichen Anforderungen und Zielsetzungen gegeneinander abgewogen werden müssen. Eine von Anfang an hohe Nutzbarkeit, wie z. B. beim Platanenkubus, bedingt es, dass das Bauwerk aufgrund der anfangs stark dominierenden Stützstruktur aus Stahl unter Umständen nicht als lebendes, sondern als begrüntes Bauwerk wahrgenommen wird. In vielen Fällen wird hier ein weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf deutlich. Durch eine konsequente Fortführung der im Rahmen der vorliegenden Arbeit begonnenen Forschungsarbeiten werden die Möglichkeiten baubotanischen Entwerfens und Bauens zukünftig mit Sicherheit zunehmen. Die grundsätzlichen Limitierungen, die sich aus den biologischen Grundprozessen und Gesetzmäßigkeiten ergeben, werden jedoch dauerhaft erhalten bleiben. Und trotz eines wissenschaftlichen Ansatzes und einer botanischen Fundierung wird die Entwicklung der Bauten immer durch Zufälle geprägt sein und kann deshalb nie exakt vorhergesagt werden – was gerade auch den Reiz des baubotanischen Entwerfens ausmacht.

Anhang

Abkürzungsverzeichnis

cm	Zentimeter
CO_2	Kohlenstoffdioxid
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
D	Durchmesser
dpi	Dots per Inch
DR	Dunkelrot, siehe FR
E	E-Modul
EI	Flächenträgheitsmoment
E_{struk}	Strukturelles E-Modul
F	Kraft
FCA	Fuchsin-Chrysoidin-Astrablau
FR	Far red (Licht in einem Wellenlängenbereich um 735 nm)
H	Höhe
H2O	Wasser
HCl	Salzsäure
IGMA	Institut Grundlagen Moderner Architektur und Entwerfen
ILPÖ	Institut für Landschaftsplanung und Ökologie
ITKE	Institut für Tragkonstruktion und konstruktives Entwerfen
K	Krümmung
L	Liter
LED	Light Emitting Diode
LMGC	Laboratoire de Mécanique et Génie Civil de Montpellier
m	Meter
M	Monat
M	1.) Moment
	2.) Masse
MESZ	Mitteleuropäische Sommerzeit
mm	Millimeter
MPa	Megapascal
N	Newton

nm	Nanometer
O_2	Sauerstoff
PAR	Photosynthetic Acitve Radiation
PBMG	Plant Biomechanics Group Freiburg
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PVC	Polyvinylchlorid
r	Radius
R	1.) Radius 2.) rot/red (Licht mit einer Wellenlänge im Bereich von 660 nm) 3.) Widerstand (in Analogie zur Elektrotechnik
SO_2	Stickstoffdioxid
UV	Ultraviolett
VP	Vegetationsperiode
VR	Versuchsreihe

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Konstruktionszeichnungen baubotanischer Steg (Ansichten und Schnitt). Durch den Verbund von Pflanzen und horizontal angeordneten, technischen Bauelementen entsteht ein stabiler Verbund. 16

Abbildung 2 Links: Erster Blattaustrieb im Frühjahr 2005. Rechts: Ansicht im Sommer des gleichen Jahres:. Aus der Stützenstruktur ist eine dichte Blätterwand geworden. ... 17

Abbildung 3 Entwicklung des Verbindungsdetails Pflanzenstütze-Handlauf. Von links nach rechts: Frühjahr 2005, Sommer 2005, Sommer 2010. Erkennbar sind der entstehende Formschluss und die Dickenzunahme der Pflanzen, aber auch die Strangulation im Bereich der Polyesterbänder (rechts). 17

Abbildung 4 Entwicklung des Stegs im Verlauf von 6 Vegetationsperioden. Von links nach rechts: Frühjahr 2005, Frühjahr 2006, Sommer 2006, Winter 2007-08, Sommer 2008, Herbst 2010. 18

Abbildung 5 Größenvergleich zwischen baubotanischen Konstruktionen, die sich mit der beim Steg angewandten Weidenbautechnik realisieren lassen, und einem ausgewachsenen Baum. 20

Abbildung 6 Links: Mehrgeschossige und multifunktionale, bäuerliche Gehölznutzung. Die geschnittene Hecke unten dient als Abgrenzung und zur Laubheuproduktion, die Bäume der Wertholzproduktion (Steffen Heinz/ Wikimeida Commons). Rechts: Schneitelbäume zur Gewinnung von Viehfutter (Kurz and Machatscheck, 2008) S. 37). 28

Abbildung 7 Unterschiedliche Typen lebender Flechtzäune bzw. Flechthecken. Links: Einfache, „ungeordnete“ Form. Mitte: Gitterartig ausgebildete Flechthecke mit systematisch angelegten Verwachsungen. Rechts: Anleitung zur Herstellung bzw. Pflanzung und Pflege einer derartigen Hecke (alle Abbildungen aus Kurz et al., 2001; Links nach Lengerke, 1847; rechts: Original aus: Schenk, 1833) 29

Abbildung 8 Links: Zaunhecke als Verbundkonstruktion aus Rundhölzern und lebenden Pflanzen. Mitte: Mit Wein beranktes lebendes Spalier aus gezogenen Bäumen. Rechst: Der Flechtrutenproduktion dienende Weiden mit bogenförmig verwachsenen Hauptästen. (Alle Abbildungen aus Kurz et al., 2001) 30

Abbildung 9 Zweistöckige lebende Brücken der Khasi in der Nähe von Cherrapunjee, Indien. Erkennbar sind die aus Luftwurzeln gebildete Verwachsungsstruktur (links und Mitte) sowie die einwachsenden Steine, die eine begehbare Fläche bilden (rechts). (www. Cherrapunjee.com /19.09.2011) 31

Abbildung 10 Links: Zeichnung eines zweigeschossigen Laubengangs von Vredeman de Vries, vermutlich aus Hainbuchen (Fitzwilliam Museum, University of Cambridge, UK / The Bridgeman Art Library). Rechts: Für den Barock typische Imitation steinerner Architektur durch Formschnitt im Schlossgarten Schwetzingen (Immanuel Giel/Wikipedia)..... 33

Abbildung 11 Tanzlinde Peesten. Links: Historischer Zustand mit kubisch geschnittener Baumkrone, wie er bis 1947 bestand. Rechts: Aktueller Zustand nach Neupflanzung des Baumes in den 1950er Jahren und Rekonstruktion der Holzkonstruktion 2001. (Deutsches Tanzlindenmuseum Limmersdorf)..... 34

Abbildung 12 Ideen zu lebenden Bauwerken von Friedrich Küffner. Links: Pfropftechniken und Anleitungen zum Bau einer Laube aus Obstbäumen. Rechts: Lebende Sonnenuhr, aus einem einzigen Baum gepfropft, die „in sich selbst die Stunde zeigen“ sollte. (Küffner, 1716, Bildanhang)..... 35

Abbildung 13 Lebende Bauten aus Obstbäumen von Nicolas Gaucher. Links: Spalier-Laubengang mit Apfelbäumen in einem Demonstrationsgarten in Stuttgart-Nord. Mitte: Zeichnung für eine runde Gartenlaube. Rechts: Darstellung einer

laubengangartigen Struktur an einer gemauerten Wand. (v.l.n.r.: Gaucher 1908, Bildanhang; Gaucher 1908, S. 835 und 426) 36

Abbildung 14 Der „Baskettree“ war und ist eine der populärsten Baumskulpturen des Tree Circus, der in den 1940er Jahren von Axel Erlandson angelegt wurde. Links: Zustand 1967; im Hintergrund sind weitere Baumskulpturen erkennbar. Rechts: Zustand im Jahr2004, nach Umpflanzung in den Erlebnispark Bonfant Gardens im Jahr 1984 (Reams 2005, S. 67f.) 37

Abbildung 15 Links: Beispiel einer Spreitlage (Schemazeichnung). Mitte: Eine vergleichbare Spreitlage beim Einbau (oben) und nach 2 Jahren (unten). Rechts: Beispiel einer aus Faschinen gebildeten Stützwand. (Florineth 2004, S. 133,134,137) 39

Abbildung 16 Links: Ansicht und Schnitt von kreuzweise verwachsenen Trieben, ohne Rinde. Mitte: Schematische Darstellung, wie die kreuzweise verbundenen Triebe zu einer geschlossenen Wand verwachsen sollen. Rechts: Detail-Querschnitt durch eine derartige Wand (Wiechula 1925, S. 60f; S. 69; S. 90) 40

Abbildung 17 Beispiele der von Wiechula angedachten lebenden Bauten. Links: „Ein Hochstand im Jagdgebiet, mit einer bequemen, gewachsenen Treppe.“ Rechts: Ein Wirtschaftsgebäude, bei dem die lebende Holzwand zur besseren Wärmedämmung dreischalig ausgeführt werden sollte. (Wiechula 1925, S. 190; S. 226)....41

Abbildung 18 Links: Die Hängenden Gärten von Babylon nach einer Rekonstruktion von Robert Koldewey. Die benötigten Erdmassen wurden von massiven Gewölben getragen. (Heinrich 1984, S. 209) Rechts: Entwurf von Hennebique für ein Wohnhaus mit Dachgärten (1901): Die Dachlasten werden von einer vergleichsweise leichten Stahlbetonstruktur aufgenommen. (Polonyi und Brandt 2002, S. 16) 44

Abbildung 19 Zeichnungen von Le Corbusier. Links: Der Dachgarten als einer der wichtigsten Aspekte der „Fünf Punkte zu einer neuen Architektur“(Curtis 1987, S. 81). Rechts: Darstellung eines „Villen-Blocks“, bei dem jeder Wohnung ein in der Fassade angeordneter „Garten“ zugeordnet ist (Le Corbusier 1922, S. 185)....45

Abbildung 20 Links: Vision eines „vertikalen Dorfplatzes“ von Rudolph Doernach, entworfen als „Selbstversorgerhaus aus Lehm und Holz mit eigener Entsorgung.“ (Doernach and Heid 1982, S. 82) Rechts: Bau der Stadt-Laube in Freiburg als eine aus Rundholz gebildete, bepflanzte und bewachsene Struktur. (Der Spiegel 1984, S. 233) 46

Abbildung 21 Bauten der Gruppe „Sanfte Strukturen“. Links: Weidendom Rostock mit eingespannten Zeltdächern. (User Schiwago/Wikipedia) Mitte und rechst: Weidenkirche Kaiserslautern. (Immanuel Giel/Wikipedia) 48

Abbildung 22 Links: Illustration von James Hall zum Ursprung gotischer Formen in Weidenbauten.((Pieper 1989, S. 94) Mitte: Modell einer Weidenarchitektur von Luc Schuiten. Rechts: Zeichnung der „Baumhausstadt“ (vegetal city) von Luc Schuiten in Anlehnung an Motive des Jugendstils. (www.vegetalcity.net) 48

Abbildung 23 Links: Hochwiesenhäuser von Hundertwasser. Rechts: Hundertwassers Konzept der Baummieter, die integraler Bestandteil eines häuslichen Nährstoffkreislaufs sein sollten. (Hundertwasser 1997, S. 94 und 85) 50

Abbildung 24 Links: Eine von Kirsch angelegte Gitterwand aus Buchen (angelegt 1997, Zustand 2008). Mitte: Eine vergleichbare Struktur aus Esche (angelegt 1993, Zustand 2008). Rechts: Ausschnitt aus der gleichen Wand mit einem zugewachsenen Feld der Gitterstruktur. (Fotos: Ferdinand Ludwig)....50

Abbildung 25 Visualisierung der Entstehung des „Fab Tree Hab“ von Mitchell Joachim/Terreform 1. Die dargestellte Aufwärtsbewegung der Stammbögen würde mit einem Längenwachstum der verholzten Bereiche einhergehen, die botanisch nicht möglich ist. (Terreform 1 2009, Anhang S.5) 51

Abbildung 26 Links und Mitte: „Hängende Gärten“ des Acros Buildings (Fukuoka, Japan). (Foto: Hiromi Watanabe) Rechts: Innenansicht des MFO Parks, Zürich. (Foto: Ferdinand Ludwig) 52

Abbildung 27 Links: „Air Trees“ im EcoBoulevard, Madrid (Ecosistema Urbano). Rechts: Die bepflanzte und bewachsene Fassade des Instituts für Physik der Humboldt-Universität in Berlin dient der Klimatisierung des Gebäudes (Foto: Sebastian Timmermann / www.archinoah.com) 53

Abbildung 28 Vertikale Gärten von Patrick Blanc. Links: Caixa Forum Madrid (Architekten: Herzog & de Meuron, Foto: Óscar Carnicero/wikimedia commons) Rechts: Musée du quai Branly, Paris (Architekten: Jean Nouvel, Foto: User:Kaldari/wikimedia commons)..... 54

Abbildung 29 Entwicklung der E-Moduln von selbsttragend wachsenden Bäumen (links) und nicht selbstratend wachsenden Lianen (rechts) im Verlauf der Ontogenie. (Speck 2009, S. 68) 59

Abbildung 30 Wachstumsmuster von Würgfeigen. Links: Keimung in der Baumkrone und Wachstum der Luftwurzeln. Mitte: Entstehung einer verwachsenden Struktur um den Stamm des Wirtsbaums und Übergang zu terrestrischer Lebensweise. Rechts: Selbstragende, fachwerkartige Stammstruktur. (nach Corner, 1998 (verändert))..... 60

Abbildung 31 Erste Ideenskizze zur Pflanzenaddition: Junge Pflanzen mit biegsamen Trieben (1) werden vertikal übereinander angeordnet und zu einer fachwerkartigen Struktur verbunden (2). Durch Verwachsungsprozesse und Dickenwachstum entstehe eine physiologische Einheit und eine selbsttragende Struktur, sodass die im Luftraum angeordneten Wurzelbereiche und anfangs notwendige Gerüststrukturen entfernt werden können (3)..... 61

Abbildung 32 Links: Spektrale Zusammensetzung des Sonnenlichts (gelb) und des Grünschattens (grün). Rechts: Steigerung des Längenwachstums durch in der spektralen Zusammensetzung modifiziertes, von Blättern reflektiertes oder gefiltertes Licht. (nach Taiz and Zeiger, 1998 (ergänzt und verändert) 65

Abbildung 33 Längs- und Queransicht des Anzuchtgewächshauses (Versuchsdesign 2008). 66

Abbildung 34 Umhüllung der Pflanzenachsen mit Filterfolie. In der Mitte Filterfolie zur Demonstration des Aufbaus einseitig entfernt. Rechts ist die Austrittsöffnung eines Blattstils erkennbar..... 68

Abbildung 35 Übersicht Versuchsdesign 2008. Erklärung siehe Text..... 69

Abbildung 36 Übersicht Versuchsdesign 2009. Legende siehe Abbildung 35, Erklärung siehe Text. 70

Abbildung 37 Links: 2-Punkt Biege-Bruchapparatur; Rechts: Apparatur zur 4-Punkt-Biegung (nach Speck, 1990); Erklärung siehe Text. 72

Abbildung 38 Entwicklungszustand Mitte September 2008 exemplarisch in einigen Anzuchtkammern. 74

Abbildung 39 Entwicklung von Trieblängen und Basisdurchmessern (links) sowie die jeweiligen Ergebnisse am Ende der Vegetationsperiode (rechts)..... 75

Abbildung 40 Entwicklung der Schlankheitsgrade (links) und Ergebnis am Ende der Vegetationsperiode (rechts), Legende siehe Abbildung 39. 76

Abbildung 41 Durchmesserentwicklung (mm) entlang der Achsen (normierte Länge); Legende siehe Abbildung 39; Berechnungsmethode: Lineare Interpolation der gemessenen Werte in 10%-Intervallen, basierend auf der für jede einzelne Pflanze berechneten normierten Länge. 77

Abbildung 42 E-Moduln im mittleren Achsenabschnitt (F = im Freiland gewachsene Triebe). 78

Abbildung 43 Oben: Querschnitte einer im Licht gewachsenen (Kontrolle, Kammer 9) und einer im Schatten gewachsenen Pflanze (Kammer 4). Darunter die gleichen Querschnitte mit normierten Durchmesser (vgl. hierzu Abbildung 45, Abbildung 46). Versagenstypen und Bruchverhalten. Darunter: Gebogene, gebrochene, bzw. genickte Proben der jeweiligen Achsenabschnitte. Ganz unten: zugehöriges Biegemoment-Krümmungs-Diagramm. 79

Abbildung 44 Krümmung zum Zeitpunkt des Versagens für einige Anzuchtkammern und Freilandpflanzen; Erklärung siehe Text. 80

Abbildung 45 Anteil der Gewebe Xylem, Cortex und Mark am Flächenträgheitsmoment bezogen auf die normierte Länge der Triebe; exemplarisch für die Kammern 1, 4 und 9. 82

Abbildung 46 Querschnittsfläche des Marks in den Kammern 1, 4 und 9. Mit größerem primären Wachstum (Längenwachstum) nimmt die Querschnittsfläche zu. Zur Veranschaulichung siehe auch die normierten Querschnitte in Abbildung 43 oben.....83

Abbildung 47 Prozentualer Anteil von Xylem und Cortex am Flächenträgheitsmoment im mittleren Achsendrittel (Legende siehe Abbildung 39) 83

Abbildung 48 Trieblängen und Schlankheitsgrade am Ende der Versuchsreihe 2009. 84

Abbildung 49 Halbkommerzielle Produktion von Platanen für baubotanische Anwendungen im Gewächshaus. Links: Aufstellung in einer Bodendeckerkultur. Rechts: Ausschnitt. Durchschnittliche Trieblänge ca. 2,3 m. (Fa. Helix Pflanzen, Leipzig) 91

Abbildung 50 Gewächshausbeleuchtung mit blauen und roten LEDs. Rechts eine Art Lichtvorhang, bei dem die Lichtquelle sehr nah an den photosynthetisch aktiven Organen platziert werden können. (Fotos: Osram) 92

Abbildung 51 Links: Natürliche Verwachsung von Platanenästen.(Foto: Ferdinand Ludwig) Rechts: Grundrissdarstellung durch Wurzelverwachsungen miteinander verbundener Bäume (Beddie, 1942)....95

Abbildung 52 Abgeflachter Bereich einer Kontaktstelle (Hedera helix) vor Einsetzen des ersten Verwachsungsschritts (Millner, 1932)....96

Abbildung 53 Entstehung einer Rindenverwachsung (Hedera helix). Links: Im Korkkambium entstehender Rindenhöcker. Rechts: Rindenhöcker, die punktuelle zu einem Gewebekontinuum verwachsen sind.(Millner, 1932) 97

Abbildung 54 Entstehung einer Xylemverwachsung (Hedera helix). Links: Aufeinander zu wachsende Xylemhöcker, dem Kambium entspringend. Rechts: Fusion der Xylemhöcker, Entstehung eines durchgehenden Kambiummantels. (Millner, 1932).....98

Abbildung 55 Vollständige Verwachsung. Links: Im Querschnitt ist ein gemeinsamerer Jahrring zu erkennen und an der Verwachsungsstelle ein Bereich unverholzter Gewebe (weiß). Rechts: In der Ansicht sind kallusartige Gewebe und nach außen gedrückte Rindenreste zu erkennen. (Millner, 1932) 98

Abbildung 56 Links: Typische Veredelungsmethoden (Pfropfen und Kopulation), bei denen das Reis ein kleiner Pflanzenabschnitt ist, während die Unterlage eine vollständige Pflanze darstellt. Rechts: Methode das Ablaktierens, bei der in der Regel sowohl Reis als auch Unterlage vollständige Pflanzen sind. (Jansen et al. 1998, S. 268) 100

Abbildung 57 Schematische Darstellung des Verwachsungsprozesses bei Veredelungen. 1+2: An der Verbindungsstelle stehen sich zwei Wundflächen gegenüber. 3+4: Zwischen den Wundflächen bestehende Hohlräume werden durch Wundgewebe (Kallus) gefüllt. 5: Zwischen den sich gegenüberstehenden Kambien entstehet eine „kambiale Brücke“ (schwarze Linie). 6: Verbindender Kambiummantel, der einen gemeinsamen Jahrring hervorbringt.(Fink 1999, S. 321)....101

Abbildung 58 Links: Nagelverbindung von A. Wiechula. Rechts: Verbindung mit Federstahlbügel nach K. Kirsch.(Kirsch, 1996) 104

Abbildung 59 Aufstellplan der Pflanzen in der Versuchsreihe 2008. Die gelben Felder markieren Entnahmen nach der ersten Vegetationsperiode. Wo alle Pflanzen einer Containerhälfte entnommen wurden, wurde 2009 neu gepflanzt. Erklärung der Abkürzungen siehe Abschnitt 3.2.5 (X = Kreuzverbindung; II = Parallelverbindung; Y = Tangentialverbindung) 112

Abbildung 60 Verbindungsvarianten (vlnr) oben: Parallelverbindung mit Drahtseil (Robinie), Parallelverbindung mit Buddy-Tape (Weide), Parallelverbindung mit Gewebeband (Weide), Parallelverbindung mit vier Pflanzen (Drahtseil, Weide). Unten: einfache Kreuzverbindung mit Drahtseil (Esche), Paar-Kreuzverbindung durchdringend (1-1-1) (Platane, Drahtseil), Paar-Kreuzverbindung (2-2) (Platane, Drahtseil) 114

Abbildung 61 Typischer Zustand nach der ersten Vegetationsperiode. Links: Brückenartige Verwachsung. Mitte: Umfangreiche Bildung miteinander fusionierender Rindenhöcker. Rechts: Nahaufnahme der fusionierten Rindenhöcker..... 123

Abbildung 62 Links: Entstehung eines Rindenhöckers. Mitte: Miteinander fusionierte Rindenhöcker. Rechts: Verwachsene Rindengewebe. Färbung: Safranin-Astrablau... 124

Abbildung 63 Links: Nach der zweiten Vegetationsperiode wieder aufgebrochene Verbindung. Rechts: Überdie gesamte Länge verwachsene Verbindung. Jeweils Winter 08/09 und Winter 09/10 aufgenommen. 124

Abbildung 64 Querschnitte durch typische Verwachsungen. a. Trennender Streifen unverholzter Gewebe. b. unverholzte, braun verfärbte Gewebe an der Verwachsungsstelle. c. Eingewachsene bzw. einwachsende Rinde.(Phloroglucin-Färbung) 125

Abbildung 65 Links: Aufgebrochene Verbindung nach Versagen der Seilverbindung. Mitte: Typisches bis gutes Beispiel einer Verwachsung am Ende der 1. VP. Zu erkennen ist ein Knick der Achsen an der Verbindungsstell. Rechts: Detail der gleichen Verbindung am Ende der 1. VP 126

Abbildung 66 Links: Gegenseitiges Überwallen ohne sichtbare Rindenverwachsung (1. VP). 2. v. links: Deutliche, brückenartige Rindenverwachsung (1. VP). 3. v. links: Einseitige Überwallung mit leichtem Spalt. Das Gewebeband gab hier nicht, wie bei den anderen Verbindungen, nur an der Klebefläche nach, sondern es rissen auch die Fasern. (2. VP) Rechts: Verwachsungsstelle nach Entfernen der des Gewebebandes. Deutlich erkennbar sind die Rindenverfärbungen und Klebstoffreste sowie ein leicht reduziertes Dickenwachstum (2. VP)..... 127

Abbildung 67 Links: Typischer Zustand das Buddy-Tapes nach der ersten Vegetationsperiode. (Alle weiteren Abbildungen am Ende der zweiten Vegetationsperiode) 2. v. links: Gut entwickelte Verwachsung. 3. v. links: schwach entwickelte und nach Reißen des Buddy-Tapes wieder aufgebrochene Verwachsung. Rechts: Über die gesamte Verbindungslänge verwachsenes Pflanzenpaar. 128

Abbildung 68 Links: Saftstau und partielles Einwachsen bei einer II-4er-Verbindung. Mitte: Aufgebrochene II-8er-Verbindung. Rechts: Querschnitt durch eine II-8er-Verbindung mit überdurchschnittlich guter Verwachsung. 5 Pflanzen sind hier miteinander verwachsen, 3 bzw. 4 deutlich im Wachstum zurückgeblieben. 130

Abbildung 69 Links Typische Verbindung (Dyneema 2) am Ender der ersten Vegetationsperiode (2009). Mitte: Eine vergleichbare Verbindung Mitte 2010. Rechts: Quer- und Längsschnitte im Bereich der Verwachsung. Im Bereich der Anschwellung (oben) ist das Gewebe in weiten Bereichen nicht verholzt (helle Bereiche). Im Längsschnitt ist rechts zu erkennen, dass das Seil noch nicht überall vollständig eingewachsen ist.(Quershnitte: Phloroglucin-Färbung)..... 132

Abbildung 70 Typische Morphologie der Verbindungen mit Schrauben. Die beiden Abbildungen links zeigen verheilte Rindenrisse an den Schraubenköpfen und

Austrittsstellen. Vergleichbare Risse traten auch bei den Muttern/Unterlegscheiben der Gewindestangenverbindungen auf. Mitte-Rechts: Gegenseitige Überwallung ohne äußerlich erkennbare Rindenverwachsung, wie sie auch bei Gewindestangenverbindungen auftrat. Rechts: Gegenseitige Überwallung mit von außen sichtbarer Rindenverwachsung. 134

Abbildung 71 Querschnitte ca. 5mm oberhalb der Verbindungsstelle (Phloroglucin-Färbung). Links: Schraubverbindung mit sehr deutlicher Verfärbung und Spaltung des Holzes. Rechts: Gewindestangenverbindung ohne Spalt und mit etwas schwächerer, bräunlicher Verfärbung (bei anderen Proben auch tief schwarz verfärbt). 134

Abbildung 72 Serienschnitte mit typischen Verfärbungsmustern. Oben: Schraubverbindung. Unten: Gewindestangenverbindung. (Angegeben ist der axiale Abstand des Schnittes von der Verbindungsstelle) 135

Abbildung 73 Ganz links: Starke Rindennekrose im Bereich unterhalb eines Schraubenkopfs, teilweise verheilt. 2. v. links: Typisches Beispiel eins kleinen, verheilten Risses (Gewindestange). Rechts: Längsschnitte mit freigelegten Verbindungsmitteln. Oben rechts (Schraubverbindung) ist zu sehen, wie die Fasern beim (partiellen) Ausreißen der Schraube deformiert werden. Bei der Gewindestangenverbindung (unten) sind die braun verfärbten Gewebe deutlich zusammengedrückt. 136

Abbildung 74 Links: Typische Verwachsung. Mitte: Aufgebrochene Verwachsung nach Versagen der Seilverbindung. Rechts: Oberste Verwachsung eines Pflanzenpaars mit teils geringem Dickenwachstum, Seile nicht gerissen. (Fotos nach erster VP) 138

Abbildung 75 Links: Ansicht und Querschnitt einer vollständigen Verwachsung, mit entstehenden gemeinsamem Jahrring (2. VP). Rechts: Verwachsung mit einem äußerlich erkennbaren borkigen Spalt ohne Xylemverwachsung (Phloroglucin-Färbung) 139

Abbildung 76 Entstehung einer Xylemverwachsung. Links: Bereich, in dem die Verwachsung entsteht (Pfeil). Mitte: Aufeinander zu wachsende Xylemhöcker. Rechts: Miteinander fusionierte Xyxlemhöcker (Mitte und rechts: FCA-Färbung) 139

Abbildung 77 Links: Beispiel einer sich gut entwickelnden Kreuzverwachsung am Ende der ersten Vegetationsperiode. Mitte: Die gleiche Verwachsung am Ende der zweiten Vegetationsperiode. Rechts: Partielle Verwachsung bei Verbindung mit gerissenem Seil (2. VP). 141

Abbildung 78 Serienschnitte durch eine Kreuzverwachsung. Zu erkennen sind Rindeneinschlüsse im mittleren Bereich (2) und fast vollständige Verwachsungen an den Rändern (1 und 4). 141

Abbildung 79 Typische Verwachsungsergebnisse am Ende der zweiten Vegetationsperiode. Deutlich erkennbar sind die Rindenveränderungen und Klebstoffreste. Links: Brückenartige, vollständige Verwachsung. Mitte: Minimale, wieder aufgebrochene Verwachsungsansätze. Rechts: Minimale Verwachsungsansätze (Verwachsene Rindenhöcker). 142

Abbildung 80 Serienschnitte durch die parallel verwachsenen Achsen einer X-Verbindung (2-2). Fast im gesamten Bereich liegen Xylemverwachsungen vor, bei den Schnitten 1 und 2 mit nur minimalen Rindeneinschlüssen. 145

Abbildung 81 Links: Typischer Zustand einer X-Verbindung (2-2) nach der zweiten Vegetationsperiode. Die Kreuzverbindung ist aufgebrochen, die parallelen Achsen sind über weite Bereiche verwachsen. Rechts: Typischer Zustand einer X-Verbindung (1-1-1-1). Verwachsung an der Kreuzungsstelle mit einem deutlichen Saftstau der innenliegenden Pflanzen. 146

Abbildung 82 Links: Relativ typische Morphologie einer sich kräftig entwickelnden Verbindung mit Dyneema 1. Rechts: Vergleichbare Situation bei einer Variante mit Dyneema 2. Bei allen vier Pflanzen ist kaum Safstau zu erkennen. Lediglich das

Seil der schwächer wachsenden Pflanzen rechts ist noch nicht vollständig eingewachsen (leichter Saftstau). 148

Abbildung 83 Mitte: Längs- und Querschnitt einer Verbindungstelle mit Dyneema-Seil. Im Bereich der Anschwellung besteht das Holz hauptsächlich aus Grundgewebe (weißlich, nicht bzw. schwach angefärbt). Rechts ein Ausschnitt des Querschnitts, der eine extreme Verbreiterung der Holzstrahlen im Bereich der Verwachsungsstelle zeigt. Links ein Ausschnitt des Längsschnitts, das vollständig und ohne größere Störungen eingewachsene Seil zeigend.((Phloroglucin-Färbung)... 148

Abbildung 84 Links: Wulstbildung bei einer sich stärker entwickelnden Verbindung. Mitte: Nur leichte Anschwellung bei einer eher schwach wachsenden Verbindung. Rechts: Ausgerissene Schraube (außermittig platziert). 149

Abbildung 85 Serienschnitte. Oben: Schraubverbindung. Unten: Gewindenstangenverbindung. Die Pfeile markieren Verfärbungen, die durch äußere Verletzungen (Hagelschlag) verursacht wurden und in keinem Zusammenhang mit der Verbindungstechnik stehen. 151

Abbildung 86 Typische Ergebnisse nach der ersten Vegetationsperiode. Links: Keine Verwachsungsreaktion bei eingewachsenen, aber gerissenem Seil. Mitte: Deutliche gegenseitige Überwallung/Abplattung bei eingewachsenem, intaktem Seil. Rechts: Brückenartige Verwachsung mit borkigem Spalt bei eingewachsenem, gerissenem Seil. 152

Abbildung 87 Links: Brückenartige Verwachsung bei gerissenen Drahtseilen. Im Schnitt sind Einschlüsse von Rindenresten und unverholzter Gewebe erkennbar. Rechts: Sehr weit bzw. gut entwickelte Verwachsung (vermutlich intakte Seile) mit äußerlich erkennbaren, umfangreichen Rindenverwachsungen. Im Schnitt (3mm oberhalb der Verbindungsstelle) sind hier so gut wie keine Rindeneinschlüsse erkennbar. 153

Abbildung 88 Links: Typisches Ergebnis am Ende der Vegetationsperiode 2009. Deutliches Anschwellen der Achsen oberhalb der Seilverbindung, Überwallung der Seile von oben, ohne dass diese eingewachsen sind; kaum Verwachsungsreaktion. Mitte-Links: Brückenartige Verwachsung mit gerissenem, eingewachsenem Seil (Mitte 2010). Mitte-Rechts: Umfangreiche Verwachsung mit eingewachsenem, vermutlich intaktem Seil (Mitte 2010). Rechts: Aufgerissene Verbindung mit teilweise eingewachsenen Seil und extremer Schwellung (Mitte 2010, Reaktion auf Seil relativ typisch). 155

Abbildung 89 Links: Morphologie einer typischen Verwachsungsstelle und des Schrauben-Austrittspunkts. Mitte: Die gleiche Verwachsung im Quer- und Längsschnitt. Der Pfeil markiert kallusartige, in den Schraubenspalt hineingewachsene Gewebe. Rechts: Vergrößerung des mit Kallusgewebe angefüllten Spalts. 156

Abbildung 90 Schnitte im Abstand von 6 mm zum Verbindungsmittel. Links: Gewindestangenverbindung mit nur minimaler Xylemverfärbung. Rechts: Schraubverbindung mit Spalt und sehr geringer Xylemverfärbung. 157

Abbildung 91 Linke Bildhälfte: Typische Drahtseilverbindung. Nach der ersten Vegetationsperiode (links) noch leichter Saftstau bei der schwächer wachsenden Pflanze. Vollständig eingewachsenes Drahtseil und umfangreiche Rindenverwachsung nach der zweiten Vegetationsperiode (rechts). Rechte Bildhälfte: Typische Verbindung mit Dyneema-Seil. Links: Deutlicher Saftstau bei schwächer wachsender Pflanze und vollständig eingewachsenem Seil bei stärker wachsender. Rechts: Stark wachsendes Pflanzenpaar mit umfangreicher Rindenverwachsung. 160

Abbildung 92 Links: Typische Morphologie einer Schraubverbindung mit umfangreicher Rindenverwachsung und ohne erkennbare Rindenrisse. Rechts: Querschnitt knapp oberhalb der Schraube. Xylemverwachsung mit gemeinsamem Jahrring;

umfangreiche Xylemverfärbungen und Spaltung vor allem bei der schwächeren Pflanze. 161

Abbildung 93 Linke Bildhälfte: Leichter Saftstau und Verwachsungsansätze am Ende der 1. VP (links). Die gleiche Verbindung zeigt am Ende der zweiten VP recht umfangreiche Verwachsungen und keinen Saftstau mehr (rechts). Rechte Bildhälfte: Aufgebrochene Verbindung mit borkigem Spalt (Ende 1. VP) Die gleiche Verbindung zeigt am Ende der 2. VP eine brückenartige Verwachsung. 163

Abbildung 94 Querschnitte durch eine brückenartige Verwachsung (knapp ober- und unterhalb des Drahtseils). Deutlich zu erkennen sind die an der Verbindungsstelle eingewachsenen Rindengewebe, um die herum sich zumindest einseitig ein durchgehender Jahrring gebildet hat. 163

Abbildung 95 Typische Morphologie der Kreuzverbindungen bei Erle. Links: An der Verbindungsstelle abgeknickte und bogenförmig aufgerichtete Pflanze. Rechts: Insbesondere die von rechts unten nach links oben verlaufende Pflanze weist an der Verwachsungsstelle einen deutlichen Durchmessersprung auf. 164

Abbildung 96 Linke Bildhälfte: Typische Entwicklung einer Verbindung, bei der es zu keiner Verwachsung kam. Deutlicher Saftstau und intakte Seile in der ersten VP (links). Am Ende der zweiten VP sind die Seile gerissen, nur teilweise eingewachsen und die Verbindung ist auseinandergebrochen. Rechte Bildhälfte: In der ersten VP sind die Seile teilweise eingewachsen und es kam zu Verwachsungsansätzen. Dennoch ist die Verbindung nach der zweiten VP wieder aufgebrochen. 166

Abbildung 97 Oben: Typische Verfärbungen bei einer Schraubverbindung. Besonders in der etwas dünneren Pflanze sind ein deutlicher Spalt und sich radial, tangential und axial weit ausbreitende Verfärbungen zu erkennen. Unten: Typische Verfärbungen bei Gewindestangenverbindung: Im Bereich des Verbindungsmittels waren gleich große oder sogar größere Verfärbungen wie bei den Schraubverbindungen zu erkennen, die sich axial meist jedoch weniger weit ausbreiteten. 168

Abbildung 98 Links: Typische Parallelverbindung. Seile aufgerissen und nicht eingewachsen, Achsen teilweise leicht abgeknickt und stark angeschwollen. Mitte: Typische Kreuzverbindung. Seile aufgerissen und nicht eingewachsen, Achsen stark abgeknickt und tlw. stark angeschwollen. Rechts: Ausnahme einer Verbindung mit intaktem Seil, Saftau und leichten Ansätzen von Rindenverwachsungen. 170

Abbildung 99 Links: Typische Morphologie am Ende der ersten VP. Die teilweise einschneidenden Seile verursachten einen deutlichen Saftstau und ein Überwallen von oben, ohne dass das Seil dabei einwuchs; die stärker wachsende Pflanze links überwallte die schwächer wachsende. Mitte und rechts: Morphologie und Anatomie einer Verbindung nach der zweiten VP. Deutliche Anschwellung der Achsen und auch starke Verdickung der Rinde. Im Querschnitt ist eine Art Xylemhöcker zu erkennen, der in die verwachsene Rinde wächst, ohne dass es dabei zu einer Xylemverwachsung gekommen wäre. Bei anderen vergleichbaren Verbindungen liegen hier jedoch Xylemverwachsungen vor. 171

Abbildung 100 Links: Typische Kreuzverwachsung bei intaktem Seil mit deutlicher gegenseitiger Überwallung und Ansätzen sichtbarer Rindenverwachsungen. Unten links im Bild ist ein typischer Knick der Achse zu sehen (Ende 2009). Mitte und rechts: Typische Morphologie und Anatomie einer sich kräftiger entwickelnden Parallelverwachsung (Mitte 2010). Umfangreiche Xylemverwachsung (gemeinsamer Jahrring) 174

Abbildung 101 Links: Typische Situation am Ende der ersten VP. Die Seil schneiden in die Rinde ein und sind teilweise schon vollständig eingewachsen. Mitte-links: Typische Situation am Ende der zweiten VP: Wegen vieler Knicke nur punktuelle Berührung, dort gegenseitige Überwallung und tlw. Ansätze sichtbarer Rindenverwachsung. Mitte-rechts: Gegenseitige Überwallung ohne äußerlich

sichtbare Rindenverwachsung. Rechts: Querschnitt der gleichen Verbindung im Bereich der gegenseitigen Überwallung. Im unteren Bereich umfangreiche Xylemverwachsung, oben Rindenverwachsung mit entstehender Xylemverwachsung. 176

Abbildung 102 Übersicht über die Durchmesserentwicklung der Versuchsreihen 2008 und 2009. (v.l.n.r. jeweils Anfang VP 1, Ende VP1 und Ende VP 2) 177

Abbildung 103 Axiale Ausdehnung der Verfärbungen bei Verbindungen mit Gewindestangen und Schrauben (zus. Verbindungen 2009) Die Ergebnisse bei Erle (ganz rechts) und Birke (nicht wiedergegeben) erlauben noch keine Schlussfolgerungen..... 186

Abbildung 104 Veränderung des Xylemstroms bei einer Kreuzverwachsung..... 188

Abbildung 105 Selbstdurchforstungslinien (nach Pretzsch, 2000; doppelt-logarithmisches Koordinatensystem). Sobald die Pflanzen eines Bestandes einer bestimmten Pflanzendichte eine kritische Biomasse erreicht haben, nimmt die Pflanzendichte entsprechend der Selbstdurchforstungslinie (schwarz) ab. Die gestrichelte Linie repräsentiert eine Selbstdurchforstungslinie bei suboptimalen Standortbedingungen. 201

Abbildung 106 Links: Darstellung der Raumverhältnisse in einem Baumbestand (nach Norberg 1988, S. 224, verändert). Rechts: Vereinfachte Darstellung der räumlichen Verhältnisse und Abnahme der Pflanzenzahl mit zunehmender Größe der Einzelvolumen (stereometrische Beziehung, nach Pretzsch, 2000) 202

Abbildung 107 Konsequenzen von Verwachsungen für Konkurrenzbetrachtungen: Durch kreuzweises Verbinden verändert sich das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen und damit der Ressourcenbedarf im Vergleich zu zwei Einzelpflanzen nicht. Demgegenüber haben parallel verwachsene Pflanzen bei gleicher Querschnittsfläche eine geringere Oberfläche und damit eher den Ressourcenbedarf einer Einzelpflanze der gleichen Gesamtmasse..... 204

Abbildung 108 Schematische Darstellung des Verzweigungsmusters von Bäumen. Zu beachten sind insbesondere die Längen der Einzelnen Triebe. (Wilson 1984, S. 12).. 205

Abbildung 109 Veränderung der Verzweigungsmuster durch Neigen und Biegen. Weitere Erklärungen siehe Text. (nach Wareing und Nasr, 1961, verändert)..... 207

Abbildung 110 Reduktion der an der Oberfläche auftretenden Spannungen durch adaptives Dickenwachstum nach dem „Axiom der konstanten Spannung“ (Mattheck, 2006). 210

Abbildung 111 Links und Mitte: Ein Baumstamm kann mechanisch als eine eingespannte Stütze betrachtet werden. Bei den vorherrschenden Biegebelastungen (Wind) treten in den Randbereichen (Kambium) große Zug- und Druckspannungen auf. Rechts: In der Baubotanik werden fachwerkartige Strukturen gebildet, bei denen die Biegespannungen in axiale Zug- und Druckkräfte aufgelöst werden. Diese können vom Kambium nicht detektiert und daher auch nicht adaptiv in Dickenwachstum umgesetzt werden. 211

Abbildung 112 Weg des Wassers vom Boden in die Atmosphäre entlang eines abnehmenden Wasserpotentialgradienten. (nach Mohr und Schopfer 1992, S. 500, verändert)..... 213

Abbildung 113 Darstellung der Widerstände des Wassertransports als Ersatzschaltplan (in 2 Abstraktionsstufen). Weitere Erklärungen siehe Text. 214

Abbildung 114 Darstellung der Entwicklung eines Baumes nach der Pipe-Model-Theorie (nach Shinozaki et al., 1964b, verändert und ergänzt)..... 215

Abbildung 115 Ersatzschaltpläne baubotanischer Verwachsungsstrukturen. Links: Aufspaltung des Hauptstammes in zwei gleich lange, parallele Stämme. Wenn entsprechend der Pipe-Model-Theorie in allen horizontalen Ebenen die gleiche leitenden Querschnittsfläche bzw. der gleiche Gesamt-Leitungswiderstand vorhanden ist, gilt: $R_2=2*R_1$. In den Verwachsungsstrukturen Mitte und Links sind

alle Achsenabschnitte (a-b-c-d) gleich lang und zunächst gleich dick. Bei der Struktur in der Mitte wird sich der Xylemstrom gleichmäßig aufteilen und es ist mit einem gleichmäßigen Dickenwachstum zu rechnen. In der Abbildung rechts ist der Widerstand des rechten Wegs doppelt so groß wie der des geraden (Reihenschaltung von zwei Widerständen). Zwischen den Abschnitten c und d wird sich der Xylemstrom daher wie 2:1 verteilen. Daher ist auch damit zu rechnen, dass sich ein Dickenwachstum einstellt, dass zu einer Relation der Querschnittsflächen (A_c:A_d)von ebenfalls 2:1 führt. 217

Abbildung 116 Flächige Muster baubotanischer Verwachsungsstrukturen. Nur bei Rauten- und Sechseckmustern ist mit einer gleichförmigen Entwicklung zu rechnen (oben und unten links). Weitere Erklärungen siehe Text. 218

Abbildung 117 Pipe-Model-Darstellung der Pflanzenaddition. Links: Zustand unmittelbar nach dem Verbinden der Pflanzen; in Rot dargestellt ein möglicher „Kurzschluss“ zwischen Wurzel- und Kronenbereichen, der durch das Verwachsen lokal entstehen kann. Rechts: Angestrebter Zustand mit von unten nach oben durchgehenden Leitungsbahnen (rot) nach erfolgter Verwachsung und Entfernen der Wurzelbereiche in der Luft. 220

Abbildung 118 Vorversuch Pflanzenaddition. Links und Mitte: Zustand unmittelbar nach Fertigstellung (Juli 2007). Rechts: Unterste Additionsstelle nach Entfernen des Wurzelbereichs (Januar 2009.)....222

Abbildung 119 Struktureller Aufbau des Turms. Links: Temporäres Gerüst aus Rundohren mit Zugdiagonalen; Mitte: Dauerhaft verbleibende und einwachsende Bauteile (Geschossebnen und aussteifende Zwischenebenen; grau). Im unteren Bereich sind einige Pflanzcontainer dargestellt. Rechts Pflanzenstruktur und Einwachsende Bauteile (ohne Pflanzcontainer. (Maßstabsgetreue Darstellung im Anhang) 224

Abbildung 120 Ansicht Süd-West-Seite (Maßstab 1:50) mit Darstellung der Pflanzenanordnung (Erklärung der rot markierten Bereichen siehe Abschnitt 4.5.1.1). 225

Abbildung 121 Pflanzenverbindung am Turm. Oben: Vorbohren und Eindrehen der Edelstahlschraube. Unten: Fertig montierte Kreuz- und Parallelverbindung (Additionsstelle). 226

Abbildung 122 Detail Pflanzenanschluss(Einwachspunkt). Ansicht und Horizontalschnitt. (Maßstab 1:5) 227

Abbildung 123 Oben links: In Pflanzcontainern vorkultivierte Pflanzen. Oben rechts: Schraubfundamentierung. Unten links: Montage der Gerüststruktur und der Pflanzen mithilfe eines Raupenkrans. Unten rechts: Abschließendes Verbinden der Pflanzen.229

Abbildung 124 Ermittlung von Durchmessern, bei denen es zu einer Selbstdurchforstung kommen müsste. Dies ist bei Durchmessen von knapp 1,5 bis knapp 3 cm der Fall (Phase I). Selbstdurchforstungslinien (roter Balken) nach Daten von Pretzsch (2000). (Phase III siehe Abschnitt 4.5.3.2)....232

Abbildung 125 Angenommene Kronenvolumina der Pflanzen im Turmes und einer vergleichbaren Referenzpflanze in den ersten beiden Entwicklungsjahren.(Jeweils Schnitt und Grundriss). 234

Abbildung 126 Links: Prognostizierte Durchmesser der Einzelpflanzen nach zwei Vegetationsperioden (Süd-West-Seite). Rechts: Gegenüberstellung der prognostizierten Durchmesser der Referenzpflanze mit Pflanzen am Turm.....236

Abbildung 127 Prognostizierter Zustand am Ende der Entwicklungsphase II. Die Stämme haben nach voraussichtlich ca. 8 Jahren an der Basis einen Durchmesser von durchschnittlich 8 cm erreicht. Die Pflanzenaddition ist abgeschlossen und es kann damit gerechnet werden, dass die Struktur selbsttragend ist (Maßstab 1:100).....240

Abbildung 128 Einteilung der verwachsenen Pflanzenstruktur in physiologische Einheiten bzw. zick-zack-förmige Einzelbäume. Deutlicher erkennbar sind der stark eingeschränkte, sehr schlanke Kronenraum und die Unterschiede zwischen Wandflächen und Eckbereichen (Maßstab 1:100)..... 244

Abbildung 129 Oben: Entwicklung der Stammquerschnitte unter Idealbedingungen. Unten: Konsequenzen des Absterbens von Kronen- Wurzel- und Stammbereichen. Legende: Rote Kreuze: Absterbende Bereiche. Grün: Stärker wachsende Achsenabschnitte. Gelb: Schwächer wachsenden Achsenabschnitte..... 246

Abbildung 130 Drei verschiedene Entwicklungszustände, die durch das Zusammenwirken von Wachstum und dem Absterben von Kronen- Wurzel- und Stammbereichen entstehen könnten. Links und Mitte: Anstrebenswerte, relativ stabile Strukturen. Rechts: Durch Pflegemaßnahmen zu vermeidende, mechanisch eher unstabile Struktu,r bei der sich ein „Haupttrieb“ in der Entwicklung durchgesetzt hat..... 247

Abbildung 131 Zusammenstellung der prognostizierten Entwicklung. Von links nach rechts: Alle Pflanzen mit Pflanzcontainern (2009-2011); Pflanzcontainer auf den obersten 2 Ebenen entfernt (2012/2013); Pflanzcontainer auf 4 Ebenen entfernt, beginnende Effekte der apikalen Kontrolle (2014/2015); Additionsprozess abgeschlossen, selbsttragende Struktur mit baumtypischem Austriebsmuster (2017/18); Durch Absterben von Stammabschnitten und verstärktes Dickenwachstum geprägte Struktur (z. B. 2026). 248

Abbildung 132 Entwicklungszustand des Turms im Juli 2010 und Vergleich mit prognostizierter Krone (gestrichelte Linie). 249

Abbildung 133 Links: Grundriss und Lageplan des Platanenkubus Nagold. Mitte: Schnitt zum Zeitpunkt unmittelbar nach Fertigstellung. Rechts: Schnitt des selbstragenden Zustands. (F. Ludwig und D. Schönle)..... 254

Abbildung 134 Visualisierung des selbstragenden Zustands als Schnitt (links) und Innenperspektive (rechts) (F. Ludwig und D. Schönle) 255

Abbildung 135 Links: Montage der vorgefertigten baubotanischen Konstruktionselemente. Mitte: Außenansicht der „Blattfassade“ unmittelbar nach Fertigstellung. Rechts: Innenansicht mit Besucherplattform und Treppen zum gleichen Zeitpunkt. (Fotos: F. Ludwig)..... 255

Abbildung 136 Links: Schematische Darstellung der Verknüpfung von Grau-und Abwassersystemen mit einer baubotanischen Baumfassade, die hier so ausgebildet ist, dass im oberen Bereich ein Baumkronen-Dachgarten entsteht. Rechts: Belichtungssituation im Sommer und Winter. (Ludwig und Ernst) 257

Abbildung 137 Links: Baumwand unmittelbar nach baulicher Fertigstellung. Rechts: Die gleiche Wand nach erfolgter Verwachsung und Ausbildung einer Baumkrone, die in diesem Fall dachförmig gezogen wurde. Im Boden sind jeweils die Kunststoffrigolen des Wassermanagements zu erkennen. (F. Ludwig und Ch. Roesler) 258

Abbildung 138 Planausschnitte des Entwurfs „Grow!“, oben Grundriss, unten Schnitte, jeweils mit baubotanischen Strukturen aus Birke und Platane (selbsttragender Zustand). (D. Schönle, I. Finkenberger, F. Ludwig) 259

Abbildung 139 Ansicht und Innenraumperspektive einer baubotanischen Pflanzenstruktur aus Birke, als Wohnraumerweiterung genutzt..... 260

Abbildung 140 Salix alba (Safranin-Astrablau). In der Rinde sind die in mehreren Bändern angeordneten Bastfasern (rot) deutlich erkennbar. 281

Abbildung 141 Platanus acerifolia (FCA-Färbung). Charakteristisch sind die breiten Holzstrahlen und die von Parenchymgeweben und eingestreuten Steinzellen (orange) geprägte Rindenstruktur..... 281

Abbildung 142 Fraxinus excelsior (Safranin-Astrablau). Im Holz ist die ringförmige Verteilung der Poren erkennbar, in der Rinde ein durchgehendes Band aus

Steinzellen und Fasern (rot bzw. hellrot), im äußeren Bereich überwiegen Parenchymgewebe.....282
Abbildung 143 Betula pendula (FCA-Färbung). Tangential aufgereihte Steinzellklumpen (rot), keine Bastfasern. 282
Abbildung 144 Acer platanoiedes (Safranin-Astrablau). Deutlich ausgebildete, anhaftende Borke, annährend durchgehender tangentialer Streifen Bastfasern (rot) sowie einige Steinzellnester (hellrot). 283
Abbildung 145 Alnus glutinosa (FCA-Färbung). Deutlich erkennbar ist ein tangentiales Band an Steinzellen; Bastfasern fehlen. 283
Abbildung 146 Robinia pseudoacacia (Safranin-Astrablau). Die in 4 bis 5 tangenitalen Reihen angeordneten Bastfasern werden von den Strahlen radial unterteilt. Die Borke ist bereits weit entwickelt. 284
Abbildung 147 Quercus robur (Safranin-Astrablau). Erkennbar sind einzelne Steinzellneste, ein tangentiales Bastfaserband (hellrot) und die bereits recht deutlich ausgebildete, tangential aufgerissene Borke.....284
Abbildung 148 Carpinus betulus (FCA-Färbung). Rinde leicht bogenförmig, bei dem rot gefärbten, tangentialen Band handelt es sich vermutlich nicht um Bastfasern, sondern um verholzte Parenchymzellen.....285
Abbildung 149 Fagus sylvatica (FCA-Färbung). Deutlich erkennbar sind die Holzstrahlen, die in verholzte Bereiche der Rinde übergehen. Breites, tangentiales Band an Steinzellen, keine Bastfasern. 285
Abbildung 150 Gerüststruktur, Aufbau der Pflanzbehälter und Pflanzenstruktur des Turms.(1:100).....286
Abbildung 151 Entwicklung 2010, von Anfang April bis Anfang Oktober (ca. alle 5 Wochen). 287
Abbildung 152 Entwicklung 2011, von Anfang April bis Anfang Oktober (ca. alle 5 Wochen). 288

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Übersicht Varianten und Wiederholungen Versuchsreihe 2008. Legende: Rot = Drahtseil; Hellgrün = Gewebeband; Gelb = Buddy-Tape. Die Zahlen in Klammern geben die Anzahl der Paare bzw. Bündel an. Weitere Erklärung siehe Text. 116
Tabelle 2 Übersicht Varianten und Wiederholungen Versuchsreihe 2009. Legende: Grün = Dyneema 1 (dünnere Variante); Blau = Dyneema 2 (stärkere Variante); Hellblau = Schraube; Magenta = Gewindestange. Weitere Erklärung siehe Text. 117
Tabelle 3 Übersicht erfolgreicher Verwachsungen mit Gewebebandverbindung (Versuchsreihe 2008, nach erster und zweiter Vegetationsperiode) 182
Tabelle 4 Vorläufige Empfehlung für die Verwendung von Seil- und Schraubverbindungen bei den 10 untersuchten Arten (+++ = sehr gut verträglich; ++ = gut verträglich; + = ohne Risiken anwendbar; - = mit gewissen Risiken anwendbar; -- = deutliche negative Beeinträchtigung, wenn möglich nicht anwenden) 193
Tabelle 5 Exemplarische Übersicht der berechneten Kronenvolumina (Einzelpflanzen) und Korrekturfaktoren sowie der daraus ermittelten Durchmesser nach einer Wachstumsdauer von 2 Vegetationsperioden (angenommener Anfangsdurchmesser = 10 mm) 235

Glossar

Die Begriffe werden so erklärt, wie sie in der vorliegenden Arbeit verwendet werden bzw. definiert wurden, d.h. teilweise abweichend von allgemeinen Definitionen.

Ablaktieren	Methode des seitlichen Ein- bzw. Anpfropfens beim Veredeln.
Abschottung	Pflanzlicher Mechanismus, bei dem nach einer Verletzung des Holzes Schichten gebildet werden, die eine Ausbreitung von Fäulniserregern verhindern.
Adventivwurzeln	Wurzeln, die sich sekundär an Pflanzenachsen bilden.
Allokation, Biomasseallokation	Verteilung der Biomasse (insb. Photosyntheseprodukte) innerhalb einer Pflanze.
Allometrie, allometrische Beziehung	Beschreibt das Verhältnis zwischen der Größe bzw. Masse von Pflanzen- bzw. Körperteilen und dem Gesamtorganismus.
Anatomie, Pflanzenanatomie	Beschreibt den strukturellen Aufbau der Grundorgane (→ Blattanatomie, Achsenanatomie, Wurzelanatomie).
Apikale Dominanz	Kontrollmechanismus in der Pflanze, bei dem der Haupttrieb das Wachstum und den Neigungswinkel untergeordneter Triebe steuert.
Apikale Kontrolle	Kontrollmechanismus in der Pflanze, bei dem der Haupttrieb das Austreiben von Knospen steuert.
Apoxogenese	Durchmesserentwicklung des Marks entlang einer Pflanzenachse.
Arboristik	Wissenschaft vom Pflanzen und Pflegen von Bäumen.
Assimilate	Von der Pflanze aufgenommene und in körpereigene Stoffe umgewandelte Stoffe; insb. Photosyntheseprodukte.
Assimilatstau	Siehe Saftstau.
Assimilattransport	Transport insb. der Photosyntheseprodukte in der Rinde.
Ästung (natürliche)	Absterben bzw. Abstoßen von Ästen und Zweigen im Verlauf der Entwicklung.
Bast	Lebender Teil der Rinde, siehe Phloem.
Bastfasern	Im Bast eingelagerte, zugfeste Festigungsgewebe.
Biomasse	Summe der Masse aller Gewebe einer Pflanze, inkl. des toten Holzkerns eines Stammes.

Cortex	Siehe Rinde.
Druckholz	Reaktionsholz, das bei einseitiger Bildung in einer Pflanzenachse durch axiale Ausdehnung zu einer Krümmung der Achse führt.
Dyneema	Hochfeste Polyethylen-Faser.
Edelreis, Reis	Teil eines Triebes, aus dem beim Veredeln i.d.R. sämtliche oberirdischen Pflanzenteile entstehen.
Embolie	Eindringen von Luft in ein Gefäß und damit Zusammenbruch der Saugspannung.
E-Modul	Materialkennwert, der den Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung bei der Verformung eines Körpers beschreibt.
E-Modul, strukturelles	E-Modul heterogen aufgebauter Körper, insb. Pflanzenachsen.
Epiphyt	Pflanze, die auf einer anderen Pflanze wächst.
Ersatzschaltplan	Darstellung des Leitsystems (Xylemstrom) einer Pflanze mit den Darstellungsmethoden der Elektrotechnik.
Feinwurzel	Dünne Wurzeln bzw. Wurzelspitzen, die im Wesentlichen die Funktion der Wasseraufnahme erfüllen.
Festigungsgewebe	Gewebe, die maßgeblich zur Stabilität beitragen, z. B. Bastfasern, Steinzellen.
Flächenträgheitsmoment	Mechanische, aus dem Querschnitt eines Körpers abgeleitete Größe, die beeinflusst, welchen Widerstand ein Körpers Biegung und Torsion entgegensetzt.
Fuchsin-Chrysoidin-Astrablau (nach Etzold)	Färbelösung, die u.a. unverholzte Gewebe blau und verholzte rot färbt.
Gefäß	Siehe Trachee
Gravimorphismus	Wachstumsreaktion einer Pflanze auf Veränderung des Schwerereizes z. B. durch Neigen, das Austriebsmuster von Trieben betreffend.
Gravitropismus	Wachstumsreaktion einer Pflanze auf Veränderung des Schwerereizes z. B. durch Neigen, Biegungen der Achsen bzw. Wurzeln (Richtungsänderung) betreffend.
Grundgewebe	Siehe Parenchym.
H/D-Verhältnis	Verhältnis aus Höhe (H) bzw. Länge und Durchmesser (D) einer Pflanzenachse bzw. Wurzel.
Heister	In der Regel zweimal verpflanzter, bereits verzweigter Jungbaum.

Hemiepiphyt	Pflanze, die im Verlauf der Ontogenie teils als Aufsitzerpflanze (Epiphyt), teils auf dem Boden wächst.
Holzstrahl	Radiale Gewebe im Holz, hauptsächlich aus Parenchymgewebe bestehend.
Huber-Wert	Blattflächenspezifische Leitfägigkeit; Verhältnis zwischen der Leitfähigkeit der Pflanzenachse (btr. Xylemstrom) und der von dieser Achse versorgten Blattmasse.
Kallus	Undifferenziertes Gewebe.
Kambium	Wachstumsschicht zwischen Rinde und Holz, das sekundäre Dickenwachstum verursachend.
Kapillare	Siehe Trachee.
Kompartimentierung	Siehe Abschottung.
Kork	Teil des sekundären Abschlussgewebes der Rinde, durch Einlagerung von Suberin und Gerbstoffen entsteht eine je nach Pflanzenart mehr oder weniger dicke Schutzschicht.
Kork-Kambium	Wachstumsschicht in der Rinde, die hauptsächlich den Kork hervorbringt.
Kurzumtriebsplantage	Anpflanzung schnell wachsender Bäume oder Sträucher mit dem Ziel, innerhalb kurzer Umtriebszeiten Holz als nachwachsenden Rohstoff zu produzieren.
Lignin	Biopolymere, die in der pflanzlichen Zellwand die Verholzung bewirken.
Mark	Innerstes, weiches Gewebe von Spross bzw. Pflanzenachse und Wurzel.
Markstrahl	Siehe Holzstrahl.
Morphologie	Lehre von der Struktur und Form von Organismen; in Abgrenzung zur Anatomie insb. auf Form bezogen verwendet.
Okulation	Veredelungsmethode, bei der eine einzelne Knospe als Edelreis dient.
Ontogenie/Ontogenese	Individuelle Entwicklungsgeschichte einer einzelnen Pflanze
Parenchym	Gewebe aus dünnwandigen, unverholzten und teilungsfähgien Zellen.
Periderm	Sekundäres Abschlussgewebe der Rinde.
Pflanzenachse, Achse	Übergeordneter Begriff für Äste, Zweige und Stämme.
Pflanzendichte	Anzahl an Pflanzen je Grundflächeneinheit.

Pflanzenhormon	Siehe Phytohormon
Phänotypische Plastizität	Variabilität der Morphologie und Anatomie einer Pflanze durch Umwelteinflüsse.
Phloem	Teil der Rinde, in dem der Assimilattransport stattfindet.
Phloroglucin bzw. Salzsaure-Phloroglucin- Lösung	Nachweisreagenz für Lignin. Verholzte Gewebe werden stark violett angefärbt.
Phytohormone	Biochemisch wirksame Botenstoffe der Pflanzen, die Wachstum und Entwicklung koordinieren.
Pipe-Model-Theorie	Modellvorstellung der Leitsysteme von Pflanzen (Xylemstrom), bei der die Achsen als Bündel parallel angeordneter Rohre interpretiert werden.
Poren	Im Querschnitt des Xylems erkennbare Tracheen.
Reaktionsholz	Siehe Zugholz und Druckholz.
Rinde	Gesamtheit aller Gewebe einer Pflanzenachse außerhalb des Kambiums.
Ringporer	Pflanze, bei der die Poren bzw. Tracheen hauptsächlich im Frühholz gebildet werden und daher in konzentrischen Kreisen angeordnet sind.
Saftstau	Blockade des Assimilattransports in der Rinde und damit einhergehendes Anschwellen der Achse.
Schattenfluchtreaktion	Wachstumsreaktion einer Pflanze auf bestimmte Lichtverhältnisse, bei der das Längenwachstum gefördert und das Dickenwachstum sowie die Verzweigung unterdrückt werden.
Schlafende Knospe	Knospe, die nicht ausgetrieben ist, aber potentiell dazu in der Lage ist.
Schlankheitsgrad	Siehe H/D-Verhältnis.
Selbstdurchforstung	Siehe Self-Thinning.
Self-Thinning	Absterben von Pflanzen durch Konkurrenz in einem Pflanzenbestand.
Sink-Source-Theorie	Modellvorstellung, nach der Photosyntheseprodukte von ihrer Quelle (source) immer zu den Orten des Verbrauchs (sink) transportiert werden.
Sklerenchym	Siehe Festigungsgewebe.
Standardabweichung	Maß für die Streuung der Werte einer Zufallsvariablen um ihren Mittelwert.
Steifigkeit	Beschreibt den Widerstand eines Körpers gegen Verformung durch eine Kraft.
Steinzellen	Meist tote, polygonale Zellen mit stark verdickter

	Zellwand.
Stereometrie, stereometrische Beziehung	Raumgeometrie, u.a. Verhältnisse zwischen Längen, Oberflächen und Volumina beschreibend.
Stomata	Schließzellen der Blätter, den Gaswechsel regulierend.
Strangulation	Einen Saftstau hervorrufende Beeinträchtigung einer Pflanzenachse.
Suberin	Pflanzliches Biopolymer, das insbesondere für die wasserabweisende Eigenschaft des Korks verantwortlich ist.
Taper	Kegelartige Durchmesserabnahme einer Pflanzenachse.
Thigmomorphogenese	Veränderung des Wachstumsmusters durch Berührungsreize.
Trachee	Langgestrecktes Gefäßelement im Xylem, in dem der Wassertransport (Xylemstrom) erfolgt.
Umwallen	Umwachsen eines Freundkörpers durch eine Pflanzenachse durch lokale Wachstumsaktivität des Kambiums.
Unterlage	Beim Veredeln die Pflanze bzw. der Pflanzenteil, aus dem in der Regel alle unterirdischen Pflanzenteile hervorgehen.
Vigor	Gärtnerischer Ausdruck, die Wüchsigkeit bzw. Vitalität einer Pflanze beschreibend.
Wasserpotential	Ein Maß dafür, wie weit das Wasser eines Systems für ein anderes System verfügbar ist.
Widerstandsmodell	Modellvorstellung, bei der der Wassertransport in einer Pflanze in Analogie zum Stromfluss in der Elektrotechnik beschrieben wird.
Wundkallus	Kallusgewebe, die bei Verletzung einer Pflanzenachse entstehen und die Wunde verschließen.
Wundkork	Wundkallus der Rinde, der sich zu Korkgeweben ausdifferenziert hat.
Xylem	Holzteil der Pflanze.
Xylemstrom	Der Teil des Wasserstroms zwischen Boden und Blatt, der im Xylem stattfindet.
Zerstreutporer	Pflanze mit einer mehr oder weniger gleichmäßigen Verteilung der Poren/Tracheen im Xylem.
Zugholz	Reaktionsholz, das bei einseitiger Bildung in einer Achse durch Verkürzung der Gewebe zu einer Krümmung der Achse führt.

Standardschnitte Verwachsungsversuche

Im Winter 2008/2009 wurden bei allen Arten Standardschnitte angefertigt. Material und Methoden sind in Abschnitt 3.2.7.3 beschrieben. Die Identifizierung der Gewebe erfolgte mit Hilfe der dort beschriebenen Färbemethoden und unter Bezugnahme auf (Holdheide, 1951).

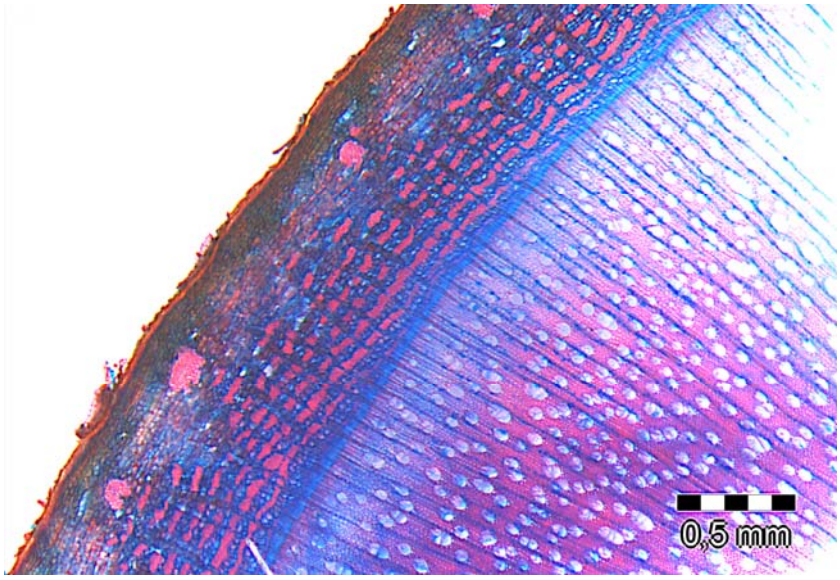


Abbildung 140 Salix alba (Safranin-Astrablau). In der Rinde sind die in mehreren Bändern angeordneten Bastfasern (rot) deutlich erkennbar.

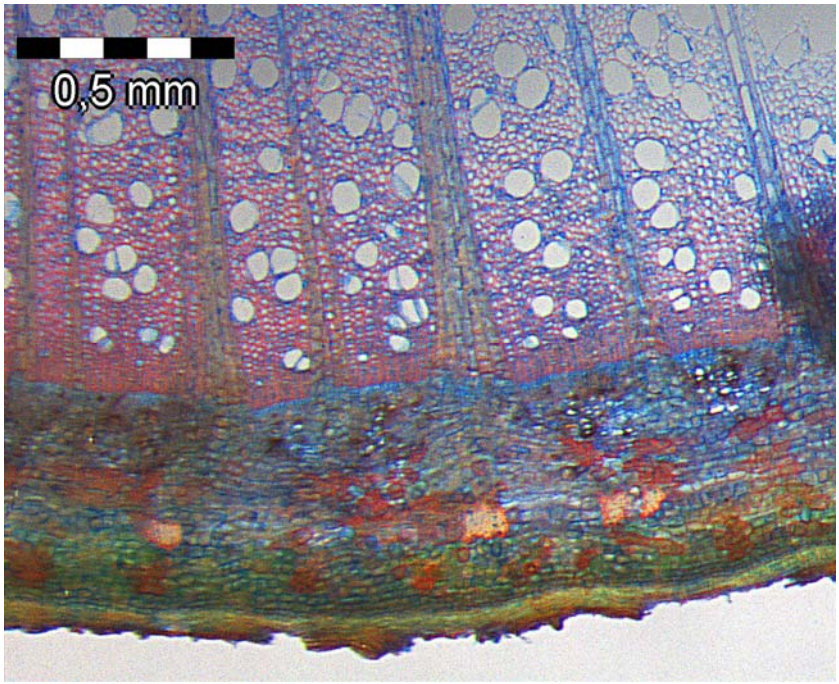


Abbildung 141 Platanus acerifolia (FCA-Färbung). Charakteristisch sind die breiten Holzstrahlen und die von Parenchymgeweben und eingestreuten Steinzellen (orange) geprägte Rindenstruktur.

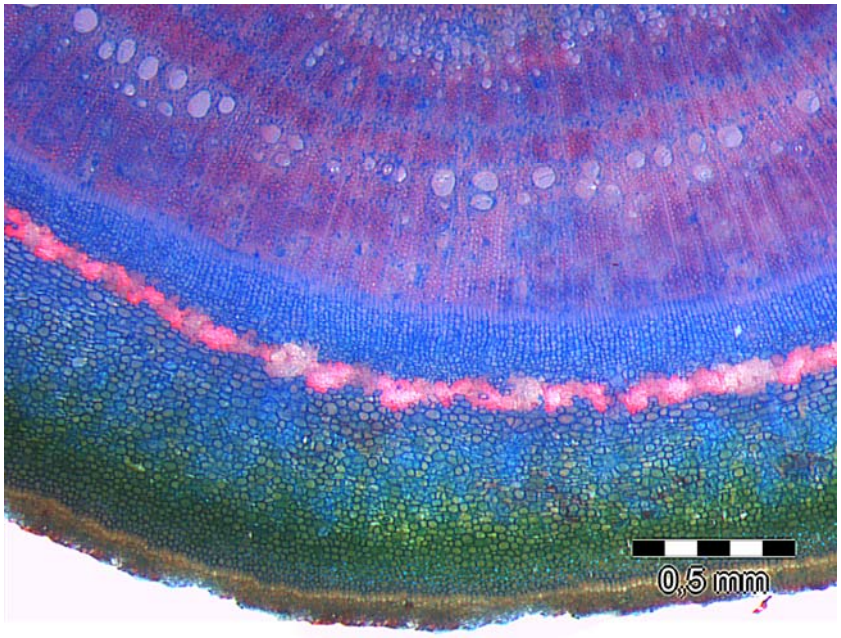


Abbildung 142 Fraxinus excelsior (Safranin-Astrablau). Im Holz ist die ringförmige Verteilung der Poren erkennbar, in der Rinde ein durchgehendes Band aus Steinzellen und Fasern (rot bzw. hellrot), im äußeren Bereich überwiegen Parenchymgewebe.

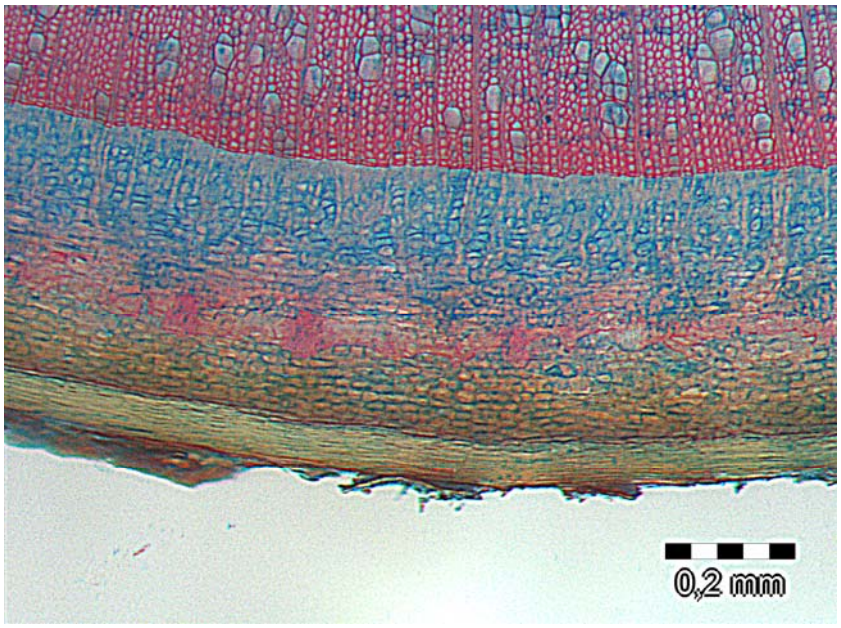


Abbildung 143 Betula pendula (FCA-Färbung). Tangential aufgereihte Steinzellklumpen (rot), keine Bastfasern.

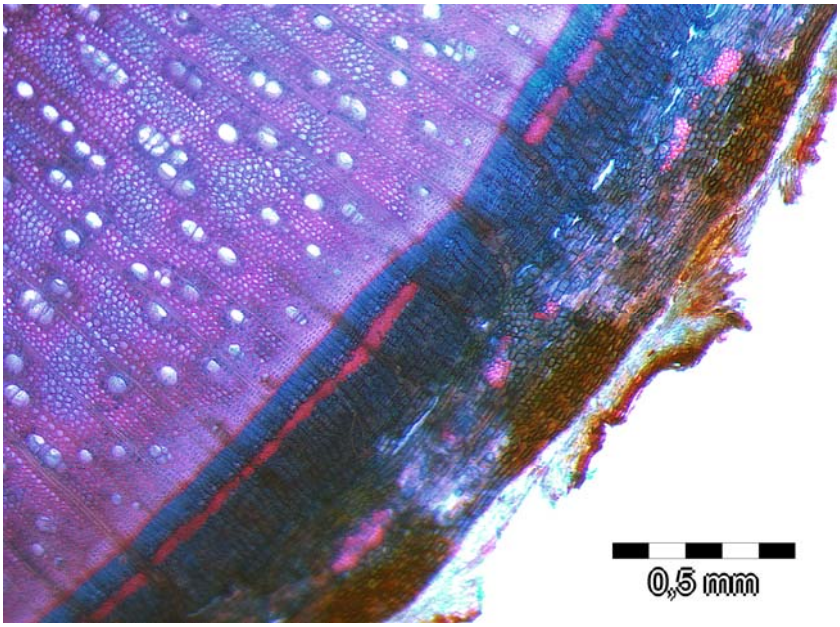


Abbildung 144 Acer platanoiedes (Safranin-Astrablau). Deutlich ausgebildete, anhaftende Borke, annährend durchgehender tangentialer Streifen Bastfasern (rot) sowie einige Steinzellnester (hellrot).

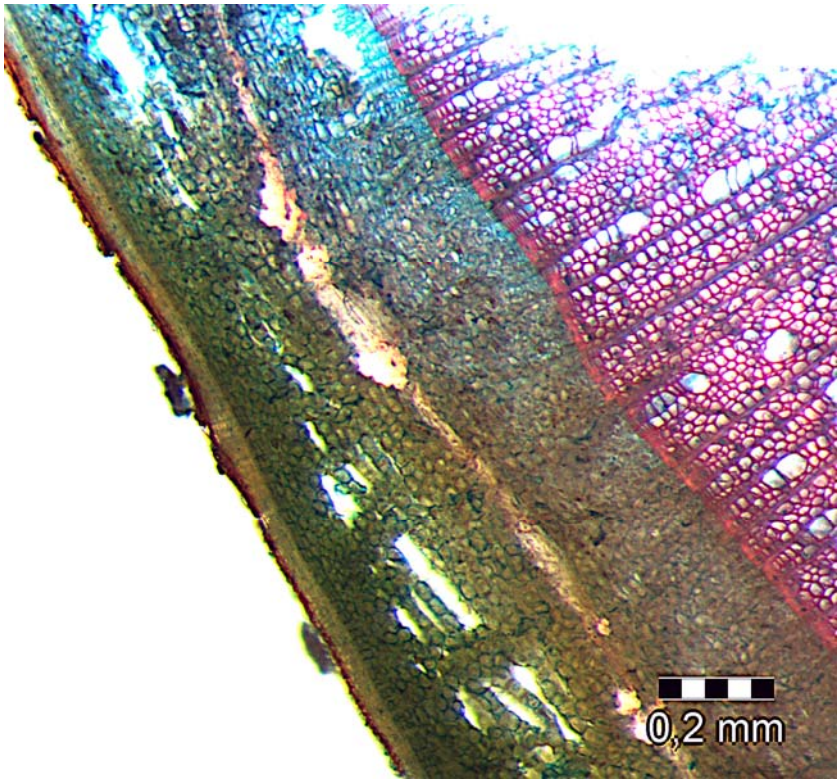


Abbildung 145 Alnus glutinosa (FCA-Färbung). Deutlich erkennbar ist ein tangentiales Band an Steinzellen; Bastfasern fehlen.

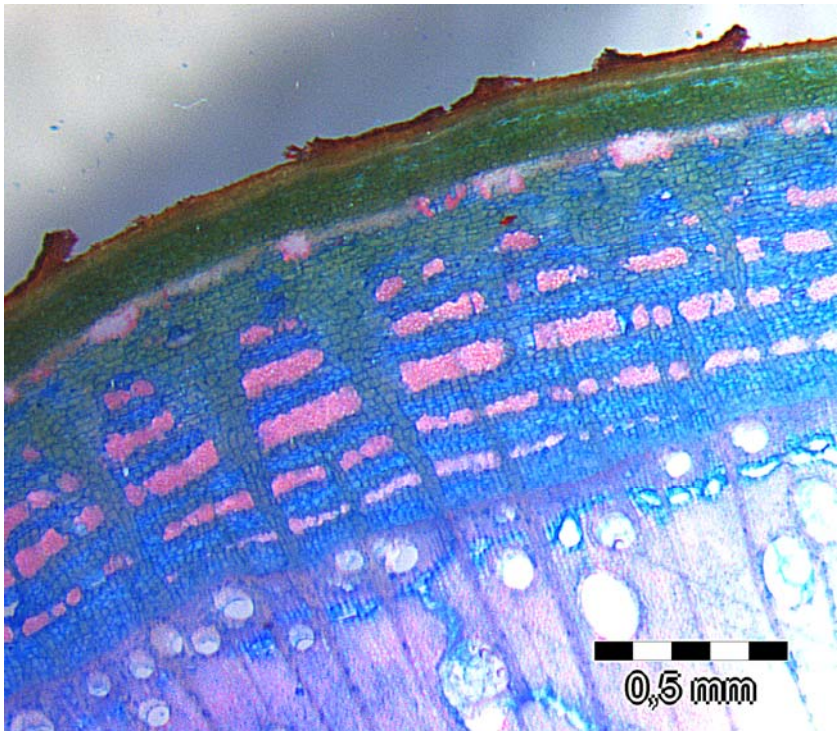


Abbildung 146 Robinia pseudoacacia (Safranin-Astrablau). Die in 4 bis 5 tangenitalen Reihen angeordneten Bastfasern werden von den Strahlen radial unterteilt. Die Borke ist bereits weit entwickelt.

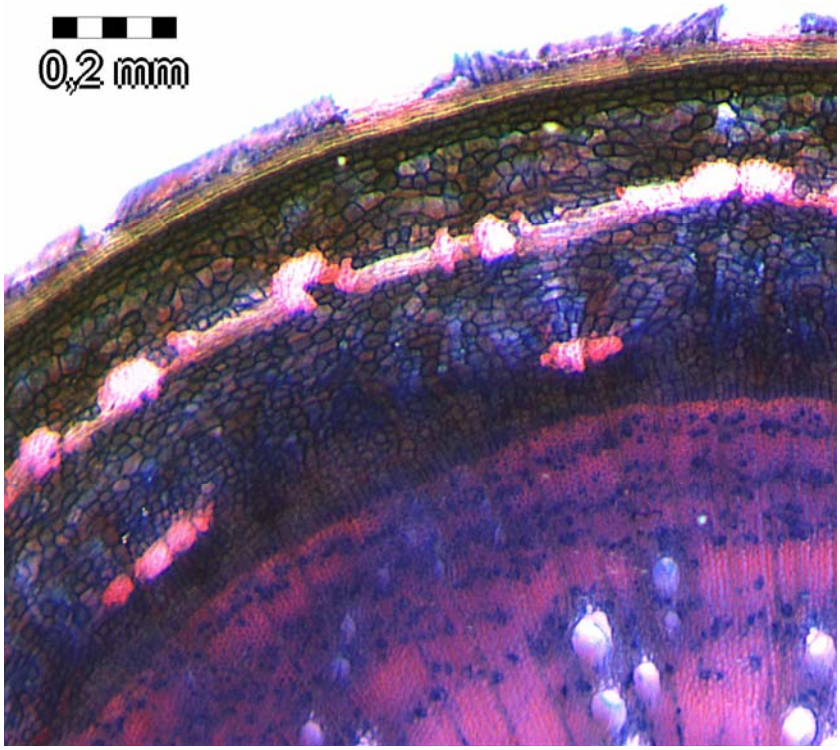


Abbildung 147 Quercus robur (Safranin-Astrablau). Erkennbar sind einzelne Steinzellneste, ein tangentiales Bastfaserband (hellrot) und die bereits recht deutlich ausgebildete, tangential aufgerissene Borke.

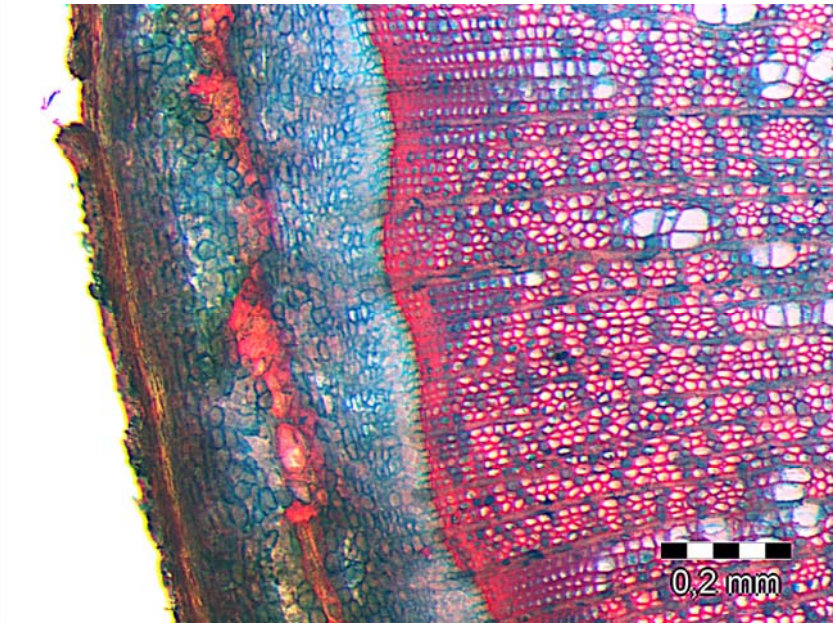


Abbildung 148 Carpinus betulus (FCA-Färbung). Rinde leicht bogenförmig, bei dem rot gefärbten, tangentialen Band handelt es sich vermutlich nicht um Bastfasern, sondern um verholzte Parenchymzellen.

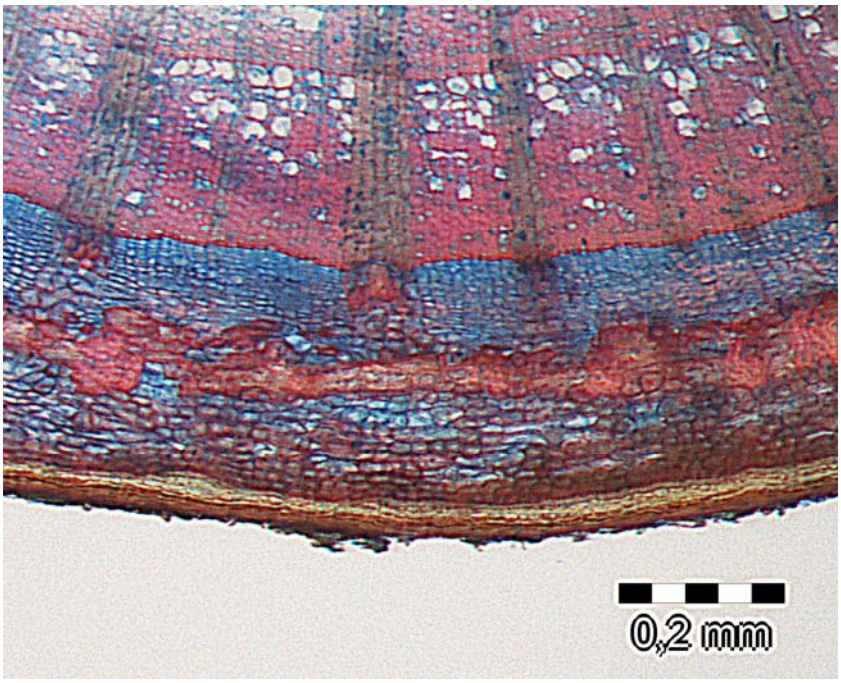


Abbildung 149 Fagus sylvatica (FCA-Färbung). Deutlich erkennbar sind die Holzstrahlen, die in verholzte Bereiche der Rinde übergehen. Breites, tangentiales Band an Steinzellen, keine Bastfasern.

Übersichtszeichnungen Turm

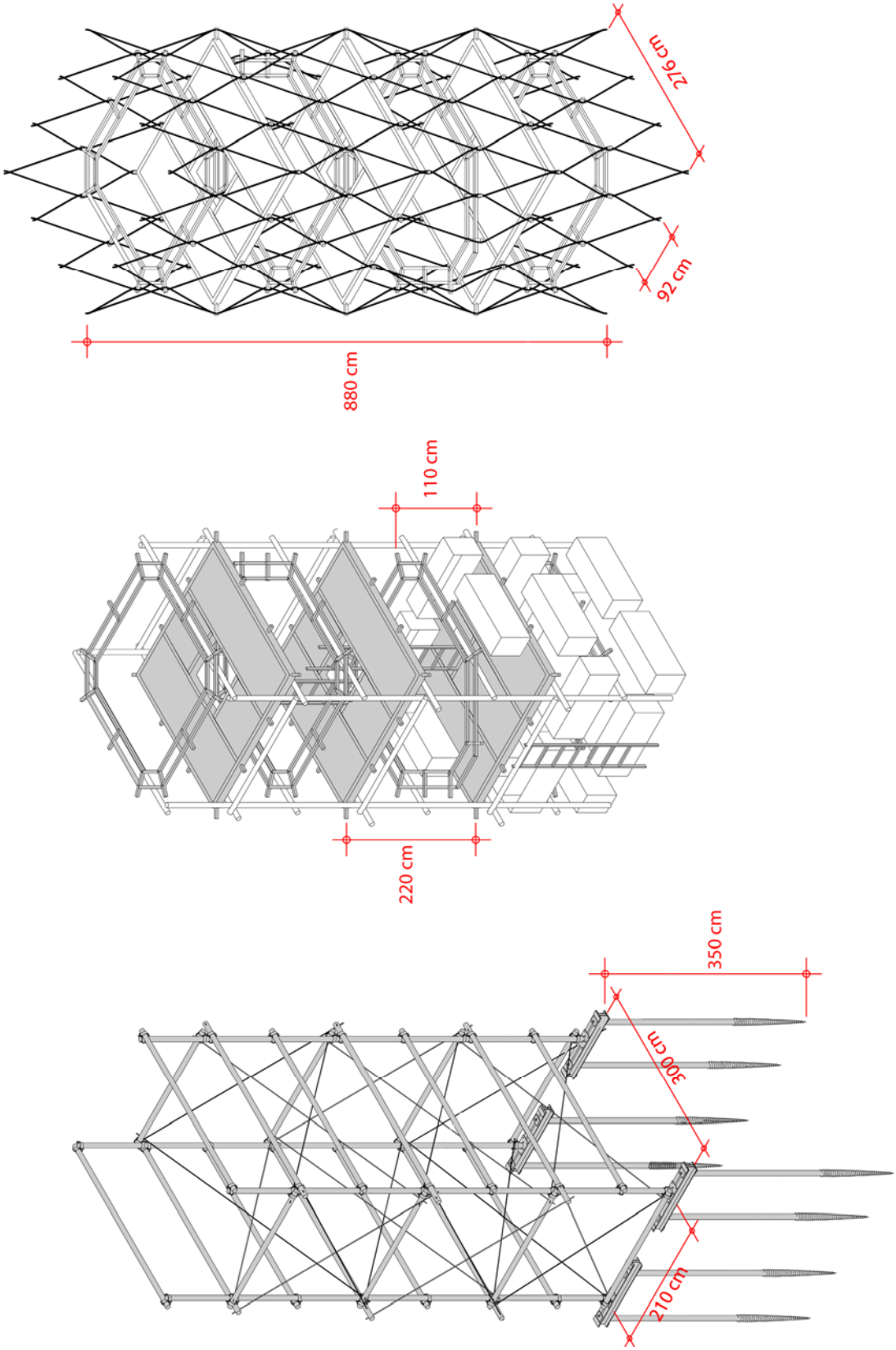


Abbildung 150 Gerüststruktur, Aufbau der Pflanzbehälter und Pflanzenstruktur des Turms.(1:100)

Entwicklungsprozess Turm

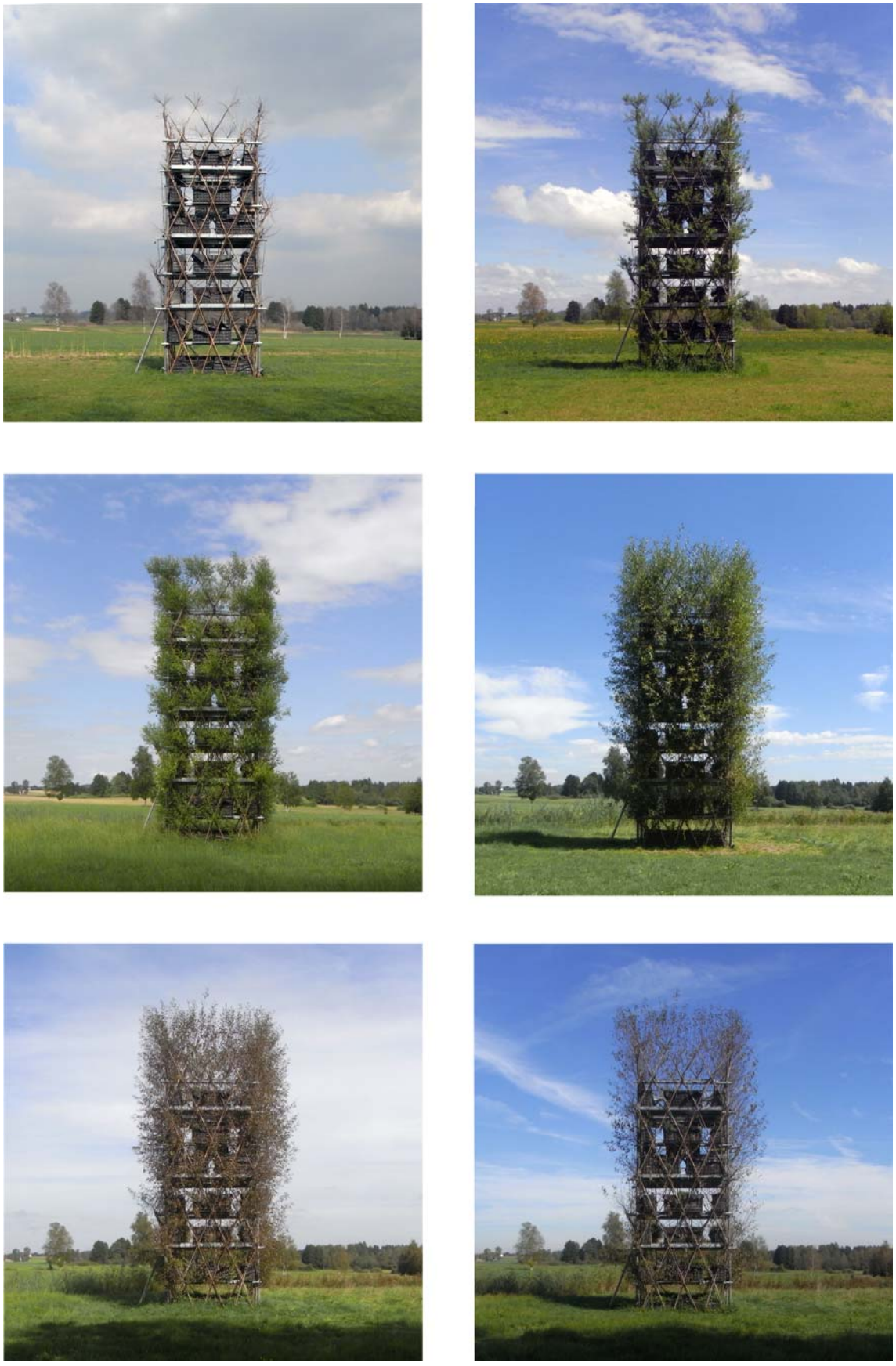


Abbildung 151 Entwicklung 2010, von Anfang April bis Anfang Oktober (ca. alle 5 Wochen).

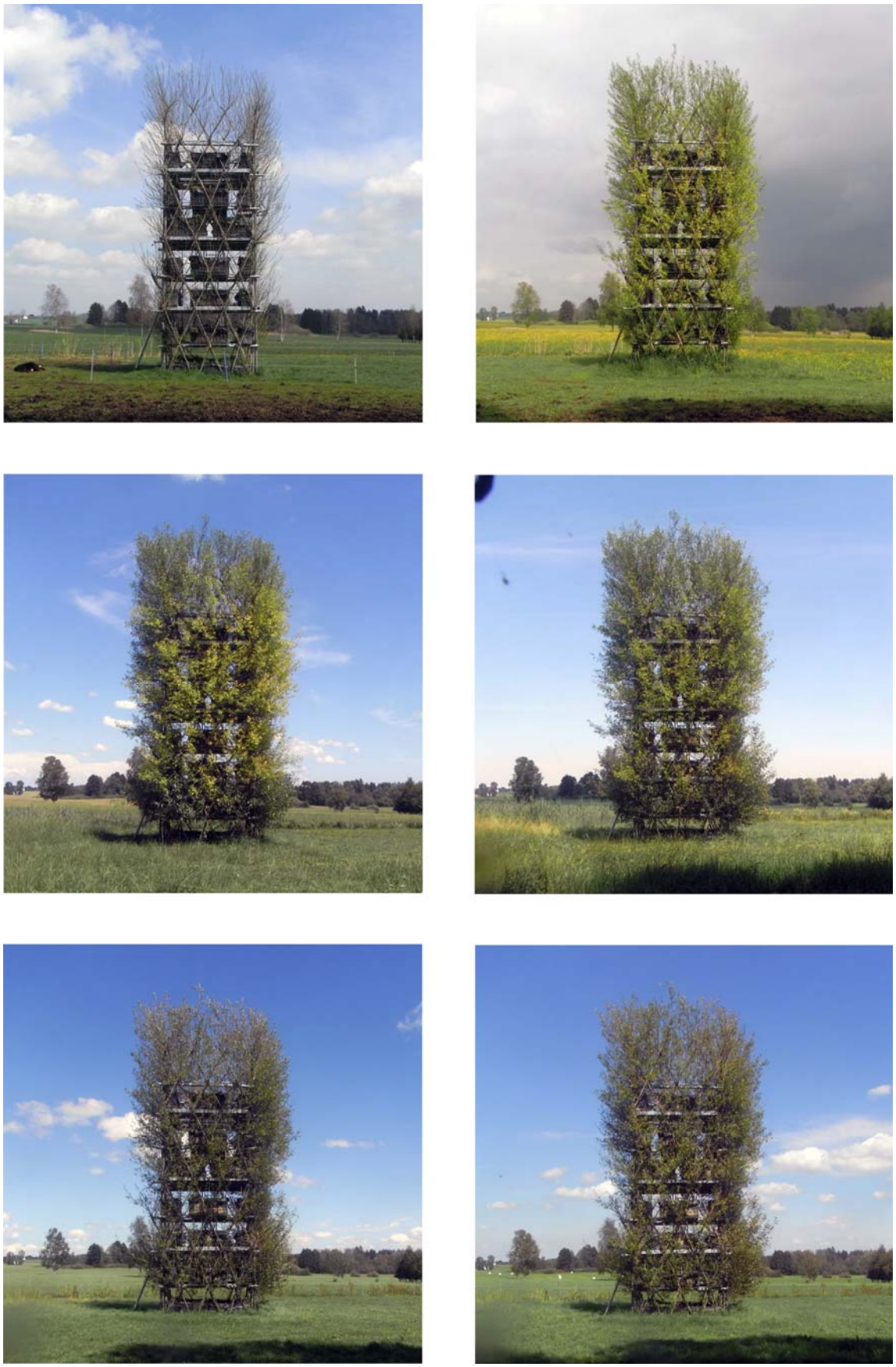


Abbildung 152 Entwicklung 2011, von Anfang April bis Anfang Oktober (ca. alle 5 Wochen).

Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich bei meinem Doktorvater, Prof. Dr. Gerd de Bruyn ganz herzlich bedanken. Er hat es mir ermöglicht, die Baubotanik an seinem Institut entwickeln und die vorliegende Arbeit verfassen zu können. Von den ersten Anfängen bis zum Abschluss der Promotion hatte ich das große Glück, das Thema selbstständig erarbeiten zu können und dabei jede nur denkbare Unterstützung zu erhalten. Dazu zählt insbesondere auch die konzeptionelle Auseinandersetzung, die in vielen persönlichen Gesprächen die Grundlage für eine Präzisierung und Weiterentwicklung des Ansatzes legte. Immer wieder kam das Vorhaben ins Straucheln, denn oft war für Außenstehende – und teilweise auch für mich selbst – unklar, mit welcher Zielsetzung die Baubotanik vorangetrieben werden sollte. Gerd de Bruyn ließ jedoch nie einen Zweifel daran, dass die Baubotanik einen wertvollen Beitrag zum Diskurs der Architekturtheorie leisten kann und dass es deshalb auch immer lohnend ist, sie aus botanischer und praktischer Sicht zu erforschen. Denn erst als gebaute Projekte werden baubotanische Bauten im wahrsten Sinne des Wortes zum Leben erweckt und können die Qualitäten entfalten, die sie zu einem interessanten Gegenstand architekturtheoretischer Reflexion machen.

Nicht weniger möchte ich meinem Zweitbetreuer, Prof. Dr. Thomas Speck danken. Thomas Speck hat es mir ermöglicht, in der Plant Biomechanics Group Freiburg mitzuarbeiten, um die botanischen Aspekte der Arbeit adäquat bearbeiten zu können. Dank dieser Zusammenarbeit konnten die anfänglich hoch spekulativen Ansätze in präzise Forschungsfragen übersetzt werden. Thomas Speck möchte ich hier jedoch nicht nur für die Betreuung der botanischen Aspekte danken, sondern auch für seine Offenheit, sich auf das Thema Baubotanik als ein architektonisches Forschungsfeld insgesamt einzulassen.

Ein herzlicher Dank gilt auch der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU), die die Arbeit im Rahmen des Stipendienschwerpunkts Bionik gefördert und damit die finanzielle Basis gelegt hat. Hier möchte ich auch die persönliche Betreuung hervorheben, die ich von vielen Seiten in der DBU erfahren habe.

Für die vielfältige Unterstützung, die ich im Verlauf des Projekts bekommen habe, möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des IGMA und der Plant Biomechanics Group Freiburg bedanken. Besonderer Dank gilt Marc Thielen für die Unterstützung der anatomischen und biomechanischen Versuche und Andreas Ernst für die grafische Aufarbeitung der Ergebnisse. Ebenso danken möchte ich allen Mitarbeitern des ILPÖ für die anregenden Diskussionen, die die Arbeit insbesondere gegen Ende bereichert haben. Ein Dank gilt auch Oliver Storz und Hannes Schwertfeger für die Zusammenarbeit in vielen baubotanischen Projekten, die den Ausgangspunkt der Arbeit bilden. Daniel Schönle möchte ich für die fruchtbare Kooperation danken, die erste Anwendungen der Forschungsergebnisse in Entwurfsprojekten ermöglichte.

Für die praktischen Versuche musste die notwendige Infrastruktur großteils erst geschaffen werden. Mein Dank gilt hier der KBW GmbH, namentlich Stephan Karle, der die notwendigen Flächen auf dem Gelände der Wagenhallen zur Verfügung stellte. Für konkrete Hilfe vor Ort möchte ich mich bei Sebastian Scherbaum, Bernd Neumann und der Firma Gartenbau Jakob aus Stuttgart sowie allen weiteren Helfern bedanken.

Die Umsetzung des Projekts „baubotanischer Turm“ war nur dank vielfältiger Unterstützung möglich. Persönlich möchte ich mich hier vor allem bei Cornelius Hackenbracht bedanken, der nicht nur das Bauland zur Verfügung stellte, sondern vor allem auch unverzichtbarer Partner bei der Entwicklung des Entwurfs und der Ausführung war. Ihm und allen freiwilligen Helfern gilt

ein großer Dank. Unter den vielen Sponsoren, die das Projekt unterstützt haben, möchte ich persönlich Hans Müller (Helix Pflanzensysteme), Christoph Roesler (Galatech/SecOp) und Christoph Blattmacher hervorheben. Weitere Unterstützer waren: Krinner Schraubfundamente, uplifter, Verzinkerei Kopf, Schlosserei Staneker, Volksbank Überlingen, Baumschule Karl Schlegel.

Abschließend möchte ich mich von ganzem Herzen bei meiner Familie, meinen Freunden und insbesondere bei Ragani Haas bedanken, die mich in der Zeit der Promotion mit großem persönlichem Verständnis begleitet und unterstützt haben. Meinen Eltern gilt darüber hinaus ein großer Dank für das Korrigieren des Textes.

Publikationsliste

DE BRUYN, G., LUDWIG, F. & SCHWERTFEGER, H. 2008. Baubotanik – Wie Technik, Natur- und Kulturwissenschaften zu einer neuen Architekturform verwachsen. *Themenheft Forschung,* 4**,** 52-61.

DE BRUYN, G., LUDWIG, F. & SCHWERTFEGER, H. (eds.) 2009. *Lebende Bauten - Trainierbare Tragwerke,* Berlin: Lit-Verlag.

LUDWIG, F. 2007. Bau(m)bionik - Baubotanik, Tragstrukturen aus lebenden Holzpflanzen. *In:* BRICKWEDE, E. H. F., ERB, R., LEFÈVRE, J. & SCHWANKE, M. (eds.) *Bionik und Nachhaltigkeit - Lernen von der Natur.* Berlin: Erich Schmidt Verlag.

LUDWIG, F. 2008. Baubotanik - Möglichkeiten und Grenzen des Konstruierens lebender Tragwerke. *In:* BAIER, B., KOENEN, R., MÜLLER, J. & SCHERBACH, S. (eds.) *Konstruktion und Gestalt - leichte Konstruktionen.* Aachen: Universität Duisburg-Essen.

LUDWIG, F. 2009. Baubotanik - Trainierbare Tragwerke? Grundriss-Skizze einer Bauweise. *In:* DE BRUYN, G., LUDWIG, F. & SCHWERTFEGER, H. (eds.) *Lebende Bauten - Trainierbare Tragwerke.* Berlin: Lit-Verlag.

LUDWIG, F., DE BRUYN, G., THIELEN, M. & SPECK, T. 2009. Plant stems as building material for living plant constructions. *In:* THIBAUT, B. (ed.) *Sixth Plant Biomechanics Conference.* Cayenne, French Guyana, France: UMR EcoFoG.

LUDWIG, F. & SCHWERTFEGER, H. 2008a. Botanistic Architecture – Arthur Wiechula. *junkjet,* 2.

LUDWIG, F. & SCHWERTFEGER, H. 2008b. Emanzipierte Bauwerke. *ach,* 35.

LUDWIG, F. & STORZ, O. 2005. Baubotanik - Mit lebenden Pflanzen konstruieren. *Baumeister, Zeitschrift für Architektur,* 11/2005**,** 72-75.

LUDWIG, F. & STORZ, O. 2007. Baubotanik. *In:* VAN DER VEEN, H. (ed.) *Archiprix - World's bes graduation projects.* Rotterdam: 010 Publishers.

LUDWIG, F. & STORZ, O. 2009a. Der Steg, ein baubotanischer Prototyp. *Bauwelt,* 1-2**,** 60.

LUDWIG, F. & STORZ, O. 2009b. Verwachsende Konstruktionen. *tec 21,* 29-30**,** 19-22.

LUDWIG, F., STORZ, O. & SCHWERTFEGER, H. 2012. Living Systems. Designing Growth in Baubotanik. *Architectural Design Journal,* (in prep.).

Literaturverzeichnis

AGRICOLA, G. A. & KÜFFNER, F. A. 1718. *Gründliche Wiederlegung An statt der Duplic, Betreffend Die boßhafftige Wieder-Antwort Des Tit. Herrn Friedrich Küffners, Pfarrers zu Lichtenberg, Sammt einer nachdrücklichen Vermahnung,* Regensburg.

AHRENDT, J. 2007. Historische Gründächer: Ihre Entwicklung bis zur Erfindung des Eisenbetons. (Dissertation) Teil I. Berlin: Technische Universität Berlin.

ALMERAS, T. 2001. Acquisition de la forme chez des axes ligneux d'un an de trois variétés d'abricotier : confrontation de données expérimentales à un modèle biomécanique. PhD Thesis. Montpellier: Agro-Montpellier, Univ.

BALLARE, C. L. & SCOPEL, A. L. 1990. Far-red radiation reflected from adjacent leaves: An early signal of competition in plant canopies. *Science,* 247**,** 329-332.

BALLARE, C. L., SCOPEL, A. L. & SANCHEZ, R. A. 1989. Photomodulation of Axis Extension in Sparse Canopies. *Plant Physiolgy,* 89(4)**,** 1324-1330.

BAUCH-TROSCHKE, Z. 1998. *Begrünte Wände, Lauben und Pergolen : Gestaltung mit Kletterpflanzen und Spalierobst,* München, Callwey.

BAUMANN, M. 2002. *Freiraumplanung in den Siedlungen der zwanziger Jahre am Beispiel der Planungen des Gartenarchitekten Leberecht Migge,* Halle, Trift-Verl.

BAUMÜLLER, J., REUTER, U., HOFFMANN, U. & ESSWEIN, H. 2008. *Klimaatlas Region Stuttgart,* Stuttgart, Verband Region Stuttgart.

BECKER, H. 1987. Architektur aus gezogenen Bäumen: Wiechulas "Lebende Häuser". *Daidalos. Architektur, Kunst, Kultur,* 23: Baum und Architektur / Tree and Architecture**,** 70-81.

BEDDIE, A. D. 1942. Natural Root Graft in New Zealand Trees. *Transactions and Proceedings of the Royal Society of New Zealand,* 71**,** 5.

BEISMANN, H., WILHELMI, H., BAILLÈRES, H., SPATZ, H.-C., BOGENRIEDER, A. & SPECK, T. 2000. Brittleness of twig bases in the genus *Salix*: fracture mechanics and ecological relevance. *Journal of Experimental Botany,* 51**,** 617-633.

BERTALANFFY, L. V. 1951. *Theoretische Biologie 2. Stoffwechsel, Wachstum,* Bern, Francke.

BLOCK, F. H. 2008. *Wir Pflanzen eine Laube,* Staufen bei Freiburg, Ökobuch Verlag.

BORMANN, F. H. 1962. Root grafting and non-competitive relationships between trees. *In:* KOZLOWSKI, T. T. (ed.) *Tree Growth.* New York: Ronald Press Company.

BROWN, C., MC ALOINE, RG, KORMAK, PP 1967. Apical Dominance and Form in woody Plants : a reappraisal. *American Journal of Botany,* 54**,** 153-162.

BRUDER, G. R. 1998. Finite-Elemente-Simulation und Festigkeitsanalysen von Wurzelverankerungen. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe.

BÖHM, J. 1893. *Capillarität und Saftsteigen*. *Berichte Deutschen Botanischen Gesellschaft***,** 203-212.

BÜSGEN, M., MÜNCH, E. 1927. *Bau und Leben unserer Waldbäume,* Jena, Verlag Gustav Fischer.

CASAL, J. J. & SMITH, H. 1989. The function, action and adaptive significance of phytochrome in light-grown plants. *Plant, Cell & Environment,* 12**,** 855-862.

CORNER, E. J. H. 1998. *Wayside Trees of Malaysia*, Malayan Nature Society.

CURTIS, W. J. R. 1987. *Le Corbusier - Ideen und Formen,* Stuttgart, Deutsche Verlags-Anstalt.

DAVILA, J. H., TORRES, V. R., MENDOZA, A. B., RODRIGEZ, H. R., VILLA, V. Z., VELAZQUEZ, J. F. & MAITI, R. K. 2004. Use of photoselective plastic covers for the control of photomorphogenesis in transplanted horticultural crops. *Crop Research,* 28**,** 50 - 59.

DE BRUYN, G. 2009. Der Dornröscheneffekt. Architekturtheoretische Überlegungen zur Baubotanik. *In:* DE BRUYN, G., LUDWIG, F. & SCHWERTFEGER, H. (eds.) *Lebende Bauten - Trainierbare Tragwerke.* Berlin: Lit-Verlag.

DE BRUYN, G., LUDWIG, F. & SCHWERTFEGER, H. (eds.) 2009. *Lebende Bauten - Trainierbare Tragwerke,* Berlin: Lit-Verlag.

DER SPIEGEL 1984. Öko-Architektur. Bauen mit der Natur. Hamburg: Telegramm Spiegelverlag.

DOERNACH, R. 1990. *Handbuch für bessere Zeiten. Bauen und Wohnen - Kleidung - Heimwerk - Wasser,* Stuttgart, Klett-Cotta.

DOERNACH, R. & HEID, G. 1982. *Biohaus für Dorf und Stadt. Lebensgemeinschaft von PFlanzen, Tieren und Menschen,* Frankfurt am Main, Fischer Taschenbuchverlag.

DUJESIEFKEN, D. & LIESE, W. 2008. Das CODIT-Prinzip. *Von den Bäumen lernen für eine fachgerechte Baumpflege.* Braunschweig: Haymarket Media.

ERLANDSON, W. 2001. *My Father "Talked to Trees"*, W. Erlandson.

FINK, S. 1999. *Pathological and regenerative plant anatomy,* Berlin ; Stuttgart, Borntraeger.

FLORINETH, F. 2004. *Pflanzen statt Beton. Handbuch zur Ingenieurbiologie und Vegetationstechnik,* Berlin, Patzer Verlag.

FRÜH, T. 1995. Entwicklung eines Simulationsmodells zur Untersuchung des Wasserflusses in der verzweigten Baumarchitektur. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme der Universität Göttingen,* A - 131.

FÖRDERKREIS TANZLINDE PEESTEN. 2003. Die historische Tanzlinde in Peesten. Available from: http://www.tanzlinde-peesten.de/.

GARNER, R. J. 1988. *The grafter´s handbook,* London, Cassell.

GAUCHER, N. 1908. Handbuch der Obstkultur : aus der Praxis für die Praxis bearbeitet. 3 ed. Berlin: Parey.

GIEDION, S. 2000. *Raum Zeit Architektur,* Berlin, Birkhäuser.

GILBERT, I. R., JARVIS, P. G. & SMITH, H. 2001. Proximity signal and shade avoidance differences between early and late successional trees. *Nature,* 411**,** 792.

GILBERT, J. R., SEAVERS, G. P., JARVIS, P. G. & SMITH, H. 1995. Photomorphogenesis and canopy dynamics. Phytochrome-mediated proximity perception accounts for the growth dynamics of canopies of Populus trichocarpa x deltoides 'Beaupré'. *Plant, Cell & Environment,* 18**,** 475-497.

GIVONI, B. 1991. Impact of planted areas on urban environmental quality: A review. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere,* 25**,** 289-299.

GRAEFE, R. 1987. Geleitete Linden. *Daidalos. Architektur, Kunst, Kultur,* 23: Baum und Architektur**,** 17-29.

GROSSE-BÄCHLE 2003. *Eine Pflanze ist kein Stein. Strategien für die Gestaltung mit der Dynamik von Pflanzen. Untersuchungen an Beispielen zeitgenössischer Landschaftsarchitektur,* Hannover, Leibniz Universität Hannover Institut für Landschaftsarchitektur.

GRUBER, P. 2010. *Biomimetics in Architecture: Architecture of Life and Buildings,* Wien, Springer.

HALL, J. 1797. *Essay on the Origin and Principles of Gothic Architecture,* Edinburgh.

HALLE, F., CLEYET-MARREL, D. & EBERSOLT, G. 2004. *Über den Wipfeln des Regenwaldes. Ein Expeditionsbericht,* München, Frederking u. Thaler.

HARBISON, R. 1991. *Das Gebaute, das Ungebaute und das Unbaubare: auf der Suche nach der architektonischen Bedeutung.,* Berlin, Birkhäuser.

HARTUNG, K. (ed.) 1997. *Boulevards. Die Bühnen der Welt,* München: Siedler-Verlag.

HEINRICH, E. 1984. *Die Paläste im alten Mesopotamien,* Berlin, De Gruyter.

HENSEL, M., MENGES, A. & WEINSTOCK, M. (eds.) 2004. *Emergence: Morphogenetic Design Strategies, Architectural Design,* London: Wiley.

HLAWATSCH, S., ARNO, B. & SPECK, T. 1988/89. Funktionsanatomie und Biomechanik der Grau-Erle (Alnus incana): Vergleich von Pflanzen aus unterschiedlichen Höhenlagen im südlichen Schwarzwald. *Naturf. Ges. Freiburg i. Br.,* 88/89**,** 249-276.

HOLDHEIDE, W. 1951. Anatomie der Gehölzrinden (mit mikroskopischem Atlas). *In:* FREUND, H. (ed.) *Handbuch der Mikroskopie in der Technik.* Frankfurt am Main: Umschau Verlag.

HUBER, B. 1928. Weitere quantitative Untersuchungen über das Wasserleitungssystem der Pflanzen. *Jahrb. Wiss. Bot.,* 67**,** 877-959.

HUNDERTWASSER, F. 1997. *Hundertwasser Architektur,* Köln, Benedikt Taschen Verlag.

JACCARD, J. 1913. Eine neue Auffassung über die Ursachen des Dickenwachstums. *Naturw. Z. Forst Landwirtschaft,* 241-279.

JANSEN, H., BACHTHALER, E., FÖLSTER, E. & SCHARPF, H.-C. 1998. *Gärtnerischer Pflanzenbau*

Grundlagen des Anbaus unter Glas und Kunststoffen, Stuttgart, Ulmer.

KALBERER, M. 2010. Grüne Kathedralen, Weidenburgen und Weidenschlösser für eine sozial-ökologische Gesellschaft. Theoretische und ideelle Grundlagen der Arbeit der Gruppe Sanfte Strukturen. *Natur & Garten. Die Mitgliederzeitschrft des Naturgarten e.V.,* 02/2010**,** 76-79.

KALBERER, M. & REMANN, M. 1999. *Das Weidenbaubuch. Die Kunst, lebende Bauwerke zu gestalten,* Aarau, AT Verlag.

KARAFYLLIS, N. C. 2003. *Biofakte. Versuch über den Menschen zwischen Artefakt und Lebewesen,* Paderborn, Mentis-Verlag.

KARAFYLLIS, N. C. 2009. Lebende Bauten: Artefakte, Biofakte, Natur. *In:* DE BRUYN, G., LUDWIG, F. & SCHWERTFEGER, H. (eds.) *Lebende Bauten - Trainierbare Tragwerke.* Berlin: Lit-Verlag.

KIESLER, F. J., BOGNER, D. & NOEVER, P. 2001. *Frederick J. Kiesler, Endless Space,* Ostfildern, Hatje Cantz.

KIRSCH, K. 1996. *Naturbauten aus lebenden Gehölzen,* Xanten, Organischer Landbau-Verl. Lau.

KIRSCH, K. 2009. Metallfreie Baumverbindung. *Konstantin-Kirsch Blog* [Online]. Available from: http://www.konstantin-kirsch.de/2009/10/metallfreie-baumverwachsung.html.

KRAUSE, J., LICHTENSTEIN, CLAUDE 1999. *Your Privat Sky. R. Buckminster Fuller. Design als Kunst einer Wissenschaft,* Basel CH, Lars Müller.

KREMER, S. 1982. Hugo Häring (1882-1958) Bauten, Entwürfe, Schriften, Dissertation. München: TU München.

KRUEDENER, A. F. V. 1941. *Atlas standortkennzeichnender Pflanzen: für Bauingenieure und Landeswirtschaftler,* Berlin, Wiking-Verlag.

KRUEDENER, A. V. 1951. *Ingenieurbiologie,* München, Reinhardt.

KRUMFOLZ, L. A. & WILSON, S. B. Growth Control of Salvia x "Indigo Spires" by photselecitive Plastic Films. Annual Meeting of the Florida State Horticultural Society, 2001 Florida. Florida State Horticultural Society, 241 - 242.

KRÜSSMANN, G., THON, H. E. & WENNEMUTH, G. 1997. *Die Baumschule,* Berlin, Blackwell Wissenschaftsverlag.

KURZ, P. & MACHATSCHECK, M. 2008. *Alleebäume. Wenn Bäume ins Holz, ins Laub und in die Frucht wachsen sollen,* Wien, Böhlau Verlag.

KURZ, P., MACHATSCHECK, M. & IGLHAUSER, B. 2001. *Hecken. Geschichte und Ökologie. Anlage, Erhaltung und Nutzung,* Graz, Leopold Stocker Verlag.

KUTTLER, W. 1993. Stadtklima. *In:* SUKOPP, H., WITTIG, G. (ed.) *Stadtökologie.* Stuttgart: G. Fischer Verlag.

KUTZKI, R. 1996. Ökologische Stadterneuerung. *Bundesbaublatt,* 10**,** 783 ff.

KÖHLER, M., BARTH, G. & BRANDWEIN, T. 1993. *Fassaden- und Dachbegrünung,* Stuttgart, Ulmer-Verlag.

KÜFFNER, F. 1716. *Der neu erfundenen Bau-Kunst derer lebendigen Baum-Gebäuden. II: Durch das Pfropfen in die Quere zu lebendig-fruchtbaren Sonnen-Zeigern,* Hof, Mintzel.

LAMBERTINI, A. & CIAMPI, M. 2007. *Vertical Gardens,* London, Thames & Hudson.

LE CORBUSIER 1922. *Ausblick auf eine Architektur,* Braunschweig/Wiesbaden, Friedr. Vieweg & Sohn.

LEAKEY, R. R. B. & LONGMAN, K. A. 1986. Physiological, environmental an genetic variation in apical dominance as determined by decapitation in Triplochiton scleroxylon. *Tree Physiology***,** 193-207.

LENGERKE 1847. Anleitung zur Anlage, Pflege und Nutzung lebendiger Hecken. Berlin.

LOEHLE, C. & JONES, R. H. 1990. Adaptive significance of root grafting in trees. *Functional ecology,* 4.

LUDWIG, F. 2007. Bau(m)bionik - Baubotanik, Tragstrukturen aus lebenden Holzpflanzen. *In:* BRICKWEDE, E. H. F., ERB, R., LEFÈVRE, J. & SCHWANKE, M. (eds.) *Bionik und Nachhaltigkeit - Lernen von der Natur.* Berlin: Erich Schmidt Verlag.

LUDWIG, F. 2009. Baubotanik - Trainierbare Tragwerke? Grundriss-Skizze einer Bauweise. *In:* DE BRUYN, G., LUDWIG, F. & SCHWERTFEGER, H. (eds.) *Lebende Bauten - Trainierbare Tragwerke.* Berlin: Lit-Verlag.

LUDWIG, F. & STORZ, O. 2005. Baubotanik - Mit lebenden Pflanzen konstruieren. *Baumeister, Zeitschrift für Architektur,* 11/2005**,** 72-75.

LYR, H. (ed.) 1992. *Physiologie und Ökologie der Gehölze,* Jena; Stuttgart: Fischer.

MACHATSCHECK, M. 2002. *Laubgeschichten: Gebrauchswissen einer alrten Baumwirtschaft, Speise- und Futterlaubkultur,* Wien, Böhlau.

MARSCH, M. 1989. *Biomechanische Modelle zur Quantifizierung der Tragfähigkeit von Einzelbäumen und Beständen gegenüber Schnee- und Windbelastung sowie darauf aufbauende Bestandesbehandlungsmaßnahmen mit Hilfe eines Simulationsmodells, dargestellt am Beispiel der Fichte. Dissertation.* Techn. Univ. Dresden.

MASSELTER, T. & SPECK, T. 2008. Quantitative and qualitative changes in primary and secondary stem organization of *Aristolochia macrophylla* during ontogeny: functional growth analysis and experiments. *Journal of Experimental Botany,* 59**,** 2955-2967.

MASSELTER, T., SPECK, T. & ROWE, N. P. 2006. Ontogenetic Reconstruction o the corboniferous Seed Plant *Lyginopteris Oldhamia*. *International Journal of Plant Science,* 167**,** 147-166.

MATTHECK, C. 1995. Biomechanical optimum in woody stems. *In:* GARTNER, B. L. (ed.) *Plant stems. Physiology and functional morphology.* San Diego: Academic Press.

MATTHECK, C. 2006. *Design in der Natur : Der Baum als Lehrmeister,* Freiburg, Rombach.

MATTHECK, C., HUBER-BETZER, H. & KEILEN, K. 1989. Die Anpassung eines Baumes an die Kontaktbelastung durch einen Stein. Karlsruhe: Kernforschungszentrum Karlsruhe.

MATTHECK, C. & HÖTZEL, H.-J. 1997. *Baumkontrollen mit VTA,* Freiburg, Rombach.

MATTHECK, C. & KUBLER, H. 1997. *Wood - The internal Optimization of Trees,* Heidelberg, Springer Verlag.

MCLEAN, F. T. 1940. A Lop Method of Dwarfing Plants and Inducing Flowering.: Contr. Boyce Thompson Ins.

MEADOWS, D. H., MEADOWS, D. L., RANDERS, J. & BEHRENS II, W. 1972. *The Limits to Growth,* New York, Universe Books.

METZGER, K. 1893. Der Wind als maßgeblicher Faktor für das Wachsthum der Bäume. Mündener forstl. Hefte.

MIGGE, L. & BURCKHARDT, L. 1981. Leberecht Migge : 1881 - 1935; Gartenkultur des 20. Jahrhunderts. Kassel: Gesamthochschule Kassel / Fachbereich Stadtplanung, Landschaftsplanung.

MILLNER, E. M. 1932. Natural grafting in hedera helix. *The new phytologist,* 31**,** 2-25.

MITCHELL, C. A. & MYERS, P. N. 1995. Mechanical Stress Regulation of Plant Growth and Development. *Horticultural Reviews,* 17**,** 1 - 42.

MOHR, H. & SCHOPFER, P. 1992. Pflanzenphysiologie. 4 ed. Berlin: Springer-Verlag.

MOLLIK, K., REINING, H. & WURZER, R. 1980. *Die Wiener Ringstrasse. Bild einer Epoche,* Stuttgart, Steiner Franz Verlag.

MUDGE, K., JANICK, J., SCOFIELD, S. & GOLDSCHMIDT, E. E. 2009. *A History of Grafting*, Wiley & Sons.

MURACH, D., KNUR, L. & SCHULTZE, M. (eds.) 2008. *DENDROM -Zukunftsrohstoff Dendromasse : Endbericht,* Remagen-Oberwinter: Verlag Dr. Norbert Kessel.

NORBERG, A. 1988. Theory of Growth Geometry of Plants and Self-Thinning of Plant Populations: Geometric Similarity, Elastic Similarity, and Different Growth Modes of Plant Parts. *The American Naturalist,* 131**,** 220-256.

OTTO, F. & KLENK, F. 1998. *Form, Kraft, Masse ; 4. Prinzip Leichtbau,* Stuttgart, Krämer.

PFISTERER, J. A., SPATZ, H.-C., EFORTH, D. & HEINZ, M. 2003. Untersuchungen zur Biegebruchfestigkeit von Astgabeln und Reiteraten der Hasel (*Corylus avellana L.*). *In:* BAUMPFLEGETAGE, D. (ed.) *Jahrbuch der Baumpflege 2003.* Braunschweig: Heymarket Media.

PIEPER, J. 1987. Die Natur der hängenden Gärten. *Daidalos. Architektur, Kunst, Kultur,* 23: Baum und Architektur / Tree and Architecture**,** 94-109.

PIEPER, J. 1989. Steinerne Bäume und künstliches Astwerk - die gotischen Theorien des James Hall (1761 - 1832. *In:* GRAEFE, R. (ed.) *Zur Geschichte des Konstruierens.* Wiesbaden: Fourier Verlag.

POLLEY, H. & KROIHER, F. 2006. Struktur und regionale Verteilung des Holzvorrates und des potentiellen Rohholzaufkommens in Deutschland im Rahmen der Clusterstudie Forst- und Holzweritschaft. *Arbeitsbericht des Instituts für Waldökolgie und Waldinventuren 2006/3* [Online].

POLONYI, S. & BRANDT, J. 2002. *Beton-Atlas. Entwerfen mit Stahlbeton im Hochbau,* Berlin, Birkhäuser.

PRETZSCH, H. 2000. Die Regeln von Reineke, Yoda und das Gesetz der räumlichen Allometrie. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung,* 2000**,** 205-210.

PRETZSCH, H. 2002. *Grundlagen der Waldwachstumsforschung,* Berlin, Parey.

QUIRK, J. T. & FREESE, F. 1976a. Effect of mechanical stress on growth and anatomical structure of red pine: Compression stress. *Can. J. For.,* 195-202.

QUIRK, J. T. & FREESE, F. 1976b. Effect of mechanical stress on growth and anatomical structure of red pine: stem vibration. *Can. J. For.,* 375-381.

QUIRK, J. T., SMITH, D. & FREESE, F. 1975. Effect of mechanical stress on growth and anatomical structure of red pine (Pinus resinosa Ait): Torque Stress. *Can. J. For.,* 195-202.

REAMS, R. 2005. *Arborsculpture. Solutions for a small planet,* Williams Oregon, Arborsmith Studios.

REINEKE, L. H. 1933. Perfecting a Stand-Density Index for even aged Forests. *Journal of Agricultural Research,* 46**,** 627-638.

REZNIK, G. & SCHMIDT, E. 2009. Immissionsminderung durch Pflanzen - Abscheidung und Abwaschung von Feinstaub an Efeu. *Gefahrstoffe : Reinhaltung der Luft,* Oktober**,** 434-438.

ROLOFF, A. 2004. *Bäume. Phänomene der Anpassung und Optimierung,* Landsberg am Lech, ecomed verlagsgesellschaft.

ROTH, A. 1927. *Zwei Wohnhäuser von LeCorbusier und Pierre Jeanneret : Fünf Punkte zu einer neuen Architektur von LeCorbusier und Pierre Jeanneret / durch Alfred Roth,* Stuttgart, Karl Krämer (Neudruck der Ausgabe von 1927: 1977).

ROWE, N. P., ISNARD, S. & SPECK, T. 2004. Diversity of mechanical architecture in climbing plants: an evolutionary perspective. *Journal of Plant Growth Regulation,* 23/2**,** 108-128.

ROWE, N. P. & SPECK, T. 2005. Plant growth forms: an ecological an evolutionary perspective. *New Phytologist,* 166**,** 61-72.

SCHENK, E. G. V. 1833. Der lebende Weißdorn-Spalierzaun oder wie man bei geringem Konstenaufwande einen über 200 Jahre dauernden lebenden Weißdorn-Zaun anzupflanzen, zu pflegen und aufzuziehen vermöge. Lemberg.

SCHOPFER, P., BRENNICKE, A. & MOHR, H. 2010. *Pflanzenphysiologie,* Heidelberg, Spektrum Akademischer Verlag.

SCHWEINGRUBER, F. H. 2007. *Wood Structure and Environment,* New York, Springer-Verlag.

SHIGO, A. L. 1994. *Moderne Baumpflege: Grundlagen der Baumbiologie,* Braunschweig, Thalacker.

SHINOZAKI, K., YODA, K., HOZUMI, K. & KIRA, T. 1964a. A quantitative Analysis of Plant Form - The Pipe Model Theory : I. Basic Analyses. *Japanese Journal of Ecology,* 14**,** 97-105.

SHINOZAKI, K., YODA, K., HOZUMI, K. & KIRA, T. 1964b. A quantitative Analysis of Plant Form - The Pipe Model Theory : II. Further Evidence of the Theory ans its Application in Forest Ecology. *Japanese Journal of Ecology,* 14**,** 133-139.

SLOBODA, B. & GAFFREY 1999. Dynamik der Stammorphologie. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt Az.: SI 11/6-1. Göttingen: UniversitätGöttingen, Institut für Forstliche Biometrie und Informatik.

SPECK, O. & SPATZ, H. C. 2003. Mechanical Properties of the Rhizome of *Arundo donax* L. *Plant Biology,* 5**,** 661-669.

SPECK, T. 1990. *Biomechanische Untersuchungen an Aufrechten Pflanzenachsen unter besonderer Berücksichtigung der frühen "Gefäß"-Pflanzen sowie selbsttragender und nicht selbsttragender Lebensformen. Dissertation an der Fakultät Biologie der Universität Freiburg,* Freiburg, Universität Freiburg.

SPECK, T. 1994. Bending stability of plant stems: ontogenetical, ecological, and phylogenetical aspects. *Biomimetics,* 2**,** 109-128.

SPECK, T. 2009. Baubotanik, Bionik, Biotechnologie. *In:* DE BRUYN, G., LUDWIG, F. & SCHWERTFEGER, H. (eds.) *Lebende Bauten - Trainierbare Tragwerke.* Berlin: Lit-Verlag.

SPECK, T. & ROWE, N. P. 1999. A quantitative approach for analytically defining size, form and habit in living and fossil plants. *In:* KURMANN, M. H. & MEMSLEY, A. R. (eds.) *The Evolution of Plant Architecture.* Kew: Royal Botanic Gardens Kew.

SPECK, T. & ROWE, N. P. 2003. Modelling primary and secondary growth processes in plants: a summary of the methodology and new data for the early lignophyte T*etraxylopteris schmidtii*. *Transactions of the Royal Society London,* B**,** 1473-1485.

SPECK, T., ROWE, N. P., CIVEYREL, L., CLAßEN-BOCKHOFF, R., NEINHUIS, C. & SPATZ, H.-C. 2003. The potential of plant biomechanics in functional biology and systematics. *In:* STUESSEY, T., HÖRANDL, F. & MAYER, V. (eds.) *Deep Morphology: Towards a Renaissance of Morphology in Plant Systematics.* Königstein: Koeltz.

STORZ, O. 2009. Wachstum und Tragfähigkeit in der Baubotanik. *In:* DE BRUYN, G., LUDWIG, F. & SCHWERTFEGER, H. (eds.) *Lebende Bauten - Trainierbare Tragwerke.* Berlin: Lit-Verlag.

SULLIVAN, L. H. 1967. *A System of Architectural Ornament,* Texas, Eakin Press.

TAIZ, L. & ZEIGER, E. 1998. *Physiologie der Pflanzen,* Heidelberg, Spektrum Akademischer Verlag.

TERREFORM 1 2009. Business Plan FAB TREE HAB Inc. Brooklyn, NY: terreform1.org [online].

THOMAS, P. 2000. *Trees: Their natural history,* Cambridge, Cambridge University Press.

THOMPSON, D. A. W. 1961. *On Growth and Form: The Complete Revised Edition,* Cambridge, Cambridge University Press.

TIRÉN, L. 1928. Einige Untersuchungen über die Schaftform. *Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Schweden,* 24**,** 81-152.

TYREE, M. T. & ZIMMERMANN, M. H. 2002. *Xylem structure and the ascent of sap,* Heidelberg, Springer.

VAN DOOREN, N. in Arbeit. Drawing Time. Investigations into how time in landscape can be represented. Dissertation an der University of Amsterdam.

VAUCHER, H. 1997. *Baumrinden : Aussehen, Struktur, Funktion, Eigenschaften,* Augsburg, Naturbuch-Verlag.

VOß, S. 2005. Biomasseproduktion und morphologische Plastizität junger Eichen bei Konkurrenzbelastung durch unterschiedlich dichte Altholzschirme. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme der Universität Göttingen*.

VÖCHTING, H. 1878. *Organbildung im Pflanzenreich : Physiologische Untersuchungen über Wachstumsursachen und Lebenseinheiten,* Bonn, FR Cohen.

WAGENFÜHR, R. 1996. *Holzatlas,* Leipzig, Fachbuchverlag.

WAREING, P. F. & NASR, T. A. A. 1961. Gravimorphism in Trees. 1. Effects of Gravity on Growth and Apical Dominance in Fruit Trees. *Anals of Botany,* 25**,** 321-340.

WEISGERBER, H., LANG, U. M., ROLOFF, A. & STIMM, B. (eds.) 2006. *Enzyclopädie der Holzgewächse,* Landsberg am Lech: ecomed.

WEIß, C. 2011. Grüne Wände. Staudengärten in der Senkrechten. *DEGA GaLaBau,* 2/2011**,** 31-35.

WIECHULA, A. 1925. *Wachsende Häuser aus lebenden Bäumen entstehend,* Berlin-Fridenau, Naturbau-Gesellschaft.

WILSON, F. B. 1984. *The growing tree,* Amherst, University of Massachusetts Press.

WIMMER, C. A. 1987. Der beschnittene Baum vom Mittelalter bis zum Barock. *Daidalos. Architektur, Kunst, Kultur,* 23: Baum und Architektur / Tree an Architecture**,** 62-67.

WIMMER, C. A. 1989. *Geschichte der Gartentheorie,* Darmstadt, Wissenschaftliche Buchgesellschaft.

YODA, K., KIRA, T., OGAWA, H. & HOZUMI, K. 1963. Self-thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions. *Journal of the Institute of Polytechnics,* Series 14**,** 107-128.

ZIMMERMANN, M. H. 1978. Hydraulic architectureof some diffuse-porous trees. *Canadian Journal of Botany,* 56**,** 2286-2295.

ZIMMERMANN, M. H. & BROWN, C. L. 1971. *Trees : Structure and Function,* New york, Springer-Verlag.