CONNECTIONS IN WOOD AND MATERIAL EFFICIENCY:

WOOD FORMATION FOLLOWS MECHANICAL LOAD

VERBINDUNGEN IM HOLZ UND MATERIALEFFIZIENZ:

DIE HOLZBILDUNG FOLGT DER MECHANISCHEN BELASTUNG

➤ ULRICH MÜLLER, ALFRED TEISCHINGER // English translation: Mark Wilch

▲ Fig. 1 | Abb. 1:
Typical normalized load-slip
curves of different joints
(based on Larsen 1999)

The usable and maximum attainable dimensions of lumber are bound and limited by the dimensions of a tree trunk. The development of engineered wood products, such as composite lumber, has made it possible for this natural limitation on lumber to be overcome. The only limitation to the dimension of individual structural members arises from whether they can be transported to the construction site. To erect larger wooden structures, the individual structural

Die nutzbaren und maximal erreichbaren Dimensionen von Bauhölzern sind an die Dimension eines Baumstammes gebunden bzw. dadurch limitiert. Mit der Entwicklung von ingenieurmäßig konstruierten Holzbauanteilen (engineered wood products), wie Brettschichtholz, konnte diese naturbedingte Limitierung für Bauholz überwunden werden, und die einzige Einschränkung für die Dimension von einzelnen Bauteilen ergibt sich aus deren Transportierbarkeit zur Baustelle. Um größere Holzbauten zu errichten, müssen die einzelnen Bauteile mit entsprechenden Verbindungsmitteln zum gesamten Bauteil system zusammengesetzt werden. McLain spricht etwas überspitzt von einer „Struktur als Anordnung von Verbindungen, die durch Bauteile voneinander getrennt sind“.¹

Die Limits in der Verbindungstechnik waren und sind auch heute noch die größten Hürden in der Entwicklung von größeren Holzbauteilen. Der Entwicklungsprozess führt zu Verbindungen, die höhere Kräfte übertragen können und auch steifer sind als

members must be assembled into an overall structural system with corresponding joints. Exaggerating somewhat, McLain says that “a structure is a constructed assembly of joints separated by members.”¹

The limits in connection technology were, and still are, the biggest hurdles to developing larger wooden structures. The development process leads to connections that are able to transfer higher forces and are also stiffer than traditional fasteners such as nails, bolts or dowels. In a simplified diagram (Fig. 1*), the mechanical behavior of a fastener can be characterized by its strength, stiffness and deformation behavior.

Given the extremely intelligent, high-performance connection of a branch attachment to a tree trunk (Fig. 3), the comparably weak connectors in everyday wooden constructions are an anachronism. The moment a round trunk is cut into lumber with a rectangular cross section, the original branch attachments to the trunk become knots and thus features that determine the grade of the lumber. The structure of wood is distinctly orthogonal in orientation, so knots in cut lumber lead to substantial losses in strength because they distort the grain and cut into the longitudinally oriented wood fibers (Figs. 2a+b).

Various researchers have analyzed the highly intelligent branch-stem interface in wood as a natural composite² and taken it as a model for biometric

traditionelle Verbindungsmittel wie Nägel, Bolzen oder Dübel. In einer vereinfachten Darstellung (Abb. 1*) kann das mechanische Verhalten eines Verbindungsmittels durch seine Festigkeit, Steifigkeit und sein Verformungsverhalten charakterisiert werden.

Es gibt einen Anachronismus zwischen der sehr intelligenten Hochleistungsverbindung einer Astanbindung im Stamm eines Baumes (Abb. 3) und den vergleichsweise schwachen Verbindungsmitteln bei alltäglichen Holzbaukonstruktionen. Sobald ein runder Stamm in Bauhölzer mit rechteckigem

Querschnitt eingeschnitten wird, werden die ursprünglichen Astanbindungen im Stamm zu ‚Ästen‘ als qualitätsbestimmende Holzmerkmale im Bauholz.

Aufgrund der ausgeprägten orthogonalen Orientierung der Holzstruktur führen Äste im Schnittholz durch die Störung des Verlaufs und das

◀◀ Figs. 2a+b | Abb. 2a+b:

a) Fracture surface of a branch-stem junction with a pronounced zigzag pattern.
b) Microsection from the same region with changing orientation of tracheids and reinforcement by wood rays. Red symbols: Crosses mark areas where the tracheids are oriented out of plane and lines mark tracheids in the image plane, green symbols represent the orientation and twisting of the wood rays between the cross-aligned network of tracheids. Arrows mark resin ducts. In the case of overloading of the branch, the resin deposition provides biological protection. (Source Müller et al. 2015, 2018)
Note: Tracheids represent the main cell type found in the wood tissue of softwoods.

optimizations of engineered connection solutions.³ The stembranch interface has a surprising variety of features that can be traced to the evolution of trees as plants. The wood cells in this area are arranged in such a way that the physiological functions of transporting water and assimilates is retained even if the branch is overloaded. If a branch breaks, wound-healing mechanisms and resin deposition protect the tree from biotic attacks.

The mechanisms of these structures have been studied at different hierarchical levels.⁴ In his book *Design in Nature: Learning from Trees*, Claus Mattheck⁵ describes the branch-stem interface as an extraordinary example of biological design optimization. Mattheck's analyses of design optimization in trees with knots and burls concentrates on a macroscopic level. However, these external, macroscopically visible effects are based on micromorphological growth features, and the cell structure differs substantially from that of normal wood.⁶ The wood tissue in the trunk in the immediate area of the branch attachment shows a distinctly higher density of more than 900 kg/m³ and a larger microfibril angle (MFA) of the cellulose fibrils in the cell wall.⁷

Müller, Gindl und Jeronimidis⁸ investigated a mechanically loaded stem-branch junction directly by means of electronic speckle pattern interferometry (ESPI). To investigate the effect of an optimized external shape, they cast a polyester model with an external shape identical to that of the original natural model. These polyester models were investigated in the same test setup. In addition, non-shape-optimized polyester specimens were produced, with a thin cylinder representing the branch and a thicker cylinder, the stem. In the

Anschneiden der längsorientierten Holzfaser zu erheblichen Festigkeitsverlusten (Abb. 2a+b).

Verschiedene Forscher*innen haben die sehr intelligente Ast-Stammanbindung im natürlichen Holzverbund analysiert² und als Vorbild für biometrische Optimierungen technischer Verbindungslösungen genommen.³ Die Stamm-Astanbindung überrascht durch verschiedene Merkmale, die sich aus der Evolution der Pflanze Baum ableiten lassen. Die Holzzellen in diesem Bereich sind derart organisiert, dass sogar im Falle einer Überlastung des Astes die physiologische Funktion des Transportes von Wasser bzw. Assimilaten erhalten bleibt. Im Falle eines Bruches schützen Wundheilungsmechanismen und Einlagerung von Harzen den Baum vor biotischen Attacken.

Der Mechanismus dieser Strukturen wurde auf verschiedenen hierarchischen Ebenen untersucht.⁴ In seinem Buch *Design in der Natur. Der Baum als Lehrmeister* beschreibt Claus Mattheck⁵ die Stamm-Astanbindung als außergewöhnliches Beispiel für eine biologische Gestaltoptimierung. Matthecks Analysen zur Gestaltoptimierung von Bäumen mit Ästen und Wurzeln konzentrieren sich auf eine makroskopische Ebene. Diese äußerlichen, makroskopisch sichtbaren Effekte basieren jedoch auf mikromorphologischen Wachstumsmerkmalen, und die Zellstruktur unterscheidet sich deutlich vom Zellaufbau des normalen Holzes.⁶ Das Holzgewebe des Stammes in unmittelbarer Nähe der Astanbindung zeigt eine deutlich höhere Dichte von mehr als 900 kg/m³ und einen größeren Mikrofibrillenwinkel der Cellulosefibrillen in der Zellwand.⁷

Müller, Gindl und Jeronimidis⁸ untersuchten direkt eine belastete

tests, these specimens showed substantially higher strain concentrations in the area of the junction than the shape-optimized polyester models did and failed at just half the load that the natural wood specimen did. Moreover, the natural wood specimen also displayed substantially higher energy absorption all the way to failure (tensile energy absorption) compared to the shape-optimized polyester model. It was concluded that besides the external design optimization as posited by Mattheck, there also has to be an internal material optimization in the hierarchical wood structure.

In order to analyze this internal structural optimization, thin boards were cut from the area of the stem-branch junction of felled trees. For this area, the microfibril angle (MFA) of the cellulose fibrils in the cell wall was measured by means of the wide-angle X-ray scattering (WAXS) technique, and further specimens were subjected to mechanical loading to the point of failure. Then, the fracture planes were analyzed using micro-computer tomography and the branch tissue was examined in micro-cross-sectional images in a radial, tangential and axial direction using a transmitted-light microscope.⁹ The results of these studies indicate that the stem-branch interface is a biologically optimized structure on all hierarchical levels, both macro and micro.

Figure 2a shows the planed surface of a tested specimen from the stem-branch interface with a zigzag crack pattern. Due to the tracheid effect¹⁰, light and dark areas can be detected in the area of the crack. In the dark areas, the tracheids are oriented out of plane and absorb the impinging light. In the light areas, the tracheids are oriented in the image plane and therefore reflect the impinging light.

Stamm-Ast-Anbindung mit Hilfe einer elektronischen Specklemuster-Interferometrie (ESPI). Um den Effekt der Optimierung der äußerlichen Form zu untersuchen, wurde ein Modell aus Epoxidharz gegossen, das in der äußeren Form dem natürlichen Originalmodell glich. Diese Harzmodelle wurden in derselben Prüfanordnung untersucht. Weiters wurden Proben aus Epoxidharz ohne Formoptimierung hergestellt, wo ein dünner Zylinder den Ast repräsentiert und ein dicker Zylinder den Stamm. Diese Proben zeigten bei der Prüfung deutlich höhere Spannungskonzentrationen im Bereich der Anbindung als die formoptimierten Harzmodelle und versagten bereits bei der Hälfte der Belastung gegenüber der natürlichen Holzprobe. Zudem zeigte die natürliche Holzprobe auch gegenüber dem formoptimierten Harzmodell eine deutliche höhere Energieaufnahme bis hin zum Bruch (Brucharbeit). Daraus ergab sich, dass zusätzlich zur äußerlichen Gestaltoptimierung nach Mattheck eine innere Materialoptimierung in der hierarchischen Holzstruktur gegeben sein muss.

Um nun die innere Strukturoptimierung analysieren zu können, wurden dünne Bretter von gefällten Bäumen aus dem Bereich einer Stamm-Ast-Anbindung geschnitten. Für diesen Bereich wurde der Winkel der Mikro-fibrillen (MFA) der Cellulosefibrillen der Zellwand mit einer Röntgen-Weitwinkelstreuung (WAXS) gemessen, und weitere Proben wurden mechanisch bis zum Bruch belastet. Anschließend wurden die Bruchflächen mit einer Mikro-Computertomografie analysiert und das Astgewebe in Mikroschnitten in radialer, tangentialer und axialer Richtung mit einem Durchlichtmikroskop untersucht.⁹ Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass die Stamm-Ast-Anbindung auf sämtlichen

Figure 2b shows a micro-cross-sectional image from this region, where the tracheid orientation is altered locally, and the intensification effect from the wood rays is also detectable.

The model proposed by Shigo¹¹ illustrates the fiber grain in the area of the stem-branch interface and illustrates the transportation of water, nutrients and assimilates. However, a virtual cross-section through Shigo's model does not correspond to the micro-cross-sectional images presented by Müller et al. (2015, 2018). Therefore, Müller et al. (2018) developed an extension of Shigo's model (Fig. 3), which also includes the complex fiber orientation in the branch-stem area. The complex wood tissue in the transitional area from branch to stem shows extremely short tracheids with frequent localized alterations of their orientation and presumably contributes little to the transportation of water and nutrients. The tracheid orientation often varies multiple times within a single annual ring, a fact also proven in μ CT images not shown here. Numerous wood rays are embedded in the interwoven network of tracheids, which means the function of this tissue is almost exclusively dedicated to mechanically strengthening this area.

Based on the crack pattern assessment, one can conclude that the crack is propagated primarily in the area in which the tracheids are perpendicular to the initial crack formations. The wood structure fails in these zones on the one hand because of transverse tensile strain and on the other, because of shear strain perpendicular to the fiber direction. The wood rays, some of which are normally oriented to the fiber, act as crack stoppers of sorts. The propagation of the crack can be deter-

hierarchischen Ebenen (Makro- und Mikroebene) eine biologisch optimierte Struktur darstellt.

Die Abbildung 2a zeigt die gehobelte Oberfläche einer geprüften Stamm-Astanbindungsprobe mit einer zickzack-förmigen Bruchlinie. Aufgrund des Tracheid-Effektes¹⁰ sind im Bereich des Bruchs helle und dunkle Flächen erkennbar. In den dunklen Bereichen orientieren sich die Tracheiden aus der Ebene heraus und absorbieren das einfallende Licht. In den hellen Bereichen orientieren sich die Tracheiden in der Betrachtungsebene und reflektieren daher das einfallende Licht. Die Abbildung 2b zeigt einen Mikrausschnitt dieser Region, an der eine lokale Änderung der Orientierung der Tracheiden auftritt und zusätzlich der Verstärkungseffekt durch Holzstrahlen erkennbar ist.

Das von Shigo¹¹ vorgeschlagene Modell illustriert den Faserverlauf im Bereich der Stamm-Astanbindung und erklärt den Transport von Wasser, Nährstoffen und Assimilaten. Ein virtueller Schnitt durch das Modell von Shigo entspricht jedoch nicht den Mikroschnitten, wie sie bei Müller et al. (2015, 2018) dargestellt wurden. Daher entwickelten Müller et al. (2018) eine Erweiterung des Modells von Shigo (Abb. 3), das auch die komplexe Faserorientierung im Ast-Stamm-Bereich einbezieht. Das komplexe Holzgewebe in der Übergangszone vom Ast zum Stamm zeigt sehr kurze Tracheiden mit häufiger lokaler Änderung ihrer Orientierung und trägt vermutlich kaum zum Transport von Wasser und Nährstoffen bei. Die lokal oft mehrmals innerhalb eines einzigen Jahrringes variierende Orientierung der Tracheiden konnte auch in μ CT-Bildern nachgewiesen werden, die hier nicht gezeigt werden. In das verwobene Netzwerk von Tracheiden sind zahlreiche Holzstrahlen

mined from these spots in a nearby area with flat-lying tracheids. The crack pattern with its distinct zigzag structure (Figs. 2a+b) reveals not only the course of crack propagation, but fiber-bridging as well. With this bridging process, a large fracture plane is generated, which means more fracture energy is required for further crack propagation.

At the cell wall level, the microfibril angle (MFA) must be considered. The MFA of cell walls in the tissue of the branch-stem junction as measured by Müller et al. (2015) corresponds very closely with the measured values from the literature.¹² The cell walls of tracheids in the trunk near the pith, known as 'juvenile growth', have an MFA of 30° to 40°. By contrast, the MFA in the outer stem area, the mature wood, is about 10°. In the area of the branch-stem junction, MFAs of more than 45° were measured at the base of the branch attachment. The MFA above the branch attachment is somewhat less, at 35°. Thanks to the large MFA in the branch area, this wood tissue responds very elastically to bending stress. Moreover, the branch tissue itself is substantially denser at 0.95 g/cm³ than the stem wood at 0.45 g/cm³, which greatly increases the flexural strength of the branch wood. Branches are therefore perfectly adapted to the increased bending stress they are exposed to from wind, weather, and snow pressure.

Müller et al. (2015) have also measured the MFA in the transitional zone from branch to stem. The wood in this area has an average density of about 0.55 g/cm³. Due to the changes in fiber orientation and in cell morphology (shorter fibers), the MFA shows a strong variation of about 30°. The short and perpendicular tracheids directly above the branch therefore display highly elastic behavior,

eingebettet, sodass dieses Gewebe fast ausschließlich der mechanischen Verfestigung des betrachteten Bereichs dient.

Aufgrund der Bruchbildbeurteilung kann man schließen, dass der Bruchfortschritt primär in jenem Bereich erfolgt, in dem die Tracheiden quer zur Bruchinitiale liegen. Die Holzstruktur versagt in diesen Zonen einerseits durch Querkzugbeanspruchung und andererseits durch Schubbeanspruchung quer zur Faserrichtung. Die teilweise normal dazu liegenden Holzstrahlen wirken gewissermaßen wie Rissstopper. Der Rissfortschritt wird von diesen Stellen in einen nahen Bereich mit flachliegenden Tracheiden abgeleitet. Aus dem Bruchbild mit einer ausgeprägten Zickzack-Struktur (Abb. 2a+b) kann man neben dem Verlauf des Rissfortschrittes auch ein „fiber-bridging“ erkennen. Mit dem Bruchvorgang wird dadurch eine große Bruchfläche generiert, wodurch für einen weiteren Bruchfortschritt ein zusätzlicher Betrag an Bruchenergie benötigt wird.

Auf Ebene der Zellwand muss der MFA in Betracht gezogen werden. Der MFA von Zellwänden im Gewebe der Ast-Stammanbindung stimmt nach Messungen von Müller et al. (2015) sehr gut mit den Werten aus der Literatur überein.¹² Die Zellwände von Tracheiden im Stamm nahe dem Mark, dem sogenannten juvenilen Holz, zeigen einen MFA von 30° bis 40°. Demgegenüber liegt der MFA im äußeren Stammbereich, dem adulten Holz, bei circa 10°. Im Bereich der Ast-Stammanbindung wurden jedoch MFAs von mehr als 45° an der Unterseite der Astanbindung gefunden. Mit 35° ist der MFA an der Oberseite der Astanbindung etwas geringer. Durch den hohen Mikrofibrillenwinkel im Astbereich reagiert dieses Holzgewebe bei Biegebeanspruchung sehr

▲ Fig. 4 | Abb. 4:
Stress-strain curves of
unaffected (red and blue lines)
and pre-stressed branches
(magenta and green lines)
(Source: Müller et al. 2018).

acting as an easily deformable and dampening spring element when exposed to fluctuating bending stress. Overloading leads to the formation of a fracture with fiber bridging and to the generation of large fracture planes with changing orientation, which absorbs a high amount of fracture energy.

This high energy absorption also appears in the stress deformation diagram of a stem-branch junction recorded in experiments (Fig. 4). A small branch with a diameter of 10 mm was subjected to a load of nearly 1.2 kN, which translates into a bending stress on the base of the stem of 130 N/mm². In this test set-up, it was not possible to break the branch completely, and only a small crack became visible on the top side of the branch. This crack opening closed up again completely when the load was removed. On the underside of the branch, compression and fiber buckling were observed as the load increased. In a living tree, the crack that closed up again would immediately be sealed with resin, allowing the branch to retain its physiological functions. Over the subsequent growth period, all cracks of this kind would be covered over by active cambium and wood formation

elastisch. Zudem hat das Astgewebe selbst eine deutlich höhere Dichte von 0,95 g/cm³ gegenüber dem Stammholz mit 0,45 g/cm³, was die Biegefestigkeit des Astholzes deutlich erhöht. Somit sind die dem Wind, Wetter und Schneedruck ausgesetzten Äste perfekt an die erhöhte Biegebeanspruchung angepasst.

Müller et al. (2015) haben zudem den MFA in der Übergangszone von Ast zum Stamm gemessen. Die durchschnittliche Holzdichte liegt in diesem Bereich bei ungefähr 0,55 g/cm³. Aufgrund der wechselnden Faserorientierung und der sich ändernden Zellmorphologie (kürzere Fasern) ergibt sich hier eine sehr starke Streuung des MFA von etwa 30°. Die kurzen und querliegenden Tracheiden direkt oberhalb des Astes verhalten sich daher sehr elastisch und wirken unter einer schwankenden Biegebeanspruchung als ein gut verformbares und dämpfendes Federelement. Eine Überbeanspruchung führt zu einer Bruchformation mit „fiber-bridging“ und der Generierung von großen Bruchflächen mit wechselnder Orientierung, was ein hohes Maß von Bruchenergie absorbiert.

Die hohe Absorption von Energie zeigt sich auch in dem bei Versuchen aufgezeichneten Spannungs-Verformungsdiagramm einer Stamm-Ast-Abbildung (Abb. 4). Ein kleiner Ast mit einem Durchmesser von 10 mm wurde mit einer Last von annähernd 1,2 kN belastet, was umgerechnet einer Biegespannung an der Stammbasis von 130 N/mm² entspricht. In dieser Prüfanordnung war es nicht möglich, den Ast vollständig zu brechen, und auf der Oberseite des Astes wurde nur ein kleiner Riss sichtbar. Diese Rissöffnung schloss sich wieder vollständig bei Entlastung. Auf der Unterseite des Astes konnte mit zunehmender Belastung eine Verdichtung

in a self-repair process. As Müller et al. (2018) proved, a tree generates new wood tissue following excessive mechanical loading and the original strength of a branch-stem junction is virtually restored again after just one year.

und Faserausknickung beobachtet werden. In einem lebenden Zustand würde dieser nun wieder geschlossene Riss sofort mit Harz verschlossen werden, wodurch die physiologische Funktion als Ast erhalten bleibt. In der nächsten Wachstumsperiode würden alle Risse dieser Art durch das aktive Kambium und Holzbildung im Sinne einer Selbstheilung überwältigt werden. Wie bei Müller et al. (2018) nachgewiesen, erzeugt der Baum nach einer Überlastung ein neues Holzgewebe, und die ursprüngliche Festigkeit einer Ast-Stammanbindung ist schon nach einem Jahr praktisch wieder hergestellt.

- 1 McLain, T. E. (1998): "Connectors and fasteners: research needs and goals", in: Fridley, K. J. (ed.): *Wood Engineering in the 21st Century. Research Needs and Goals*, proceedings from a workshop of the same name offered in conjunction with the SEI/ASCE Structures Congress XV in Portland, Oregon, on April 16, 1997, (Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers).
- 2 Shigo, A. L. (1985): "How tree branches are attached to trunks", in: *Canadian Journal of Botany* 63(8): 1391–1401; Shigo (1990): *Die neue Baumbiologie*, Braunschweig: Thalacker; Reuschel, J. D. (1999): „Untersuchungen der Faseranordnung natürlicher Faserverbunde und Übertragung der Ergebnisse auf technische Bauteile mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode“, doctoral thesis, Universität Karlsruhe.
- 3 Mattheck, C. (1991): *Trees. The Mechanical Design*, (Berlin: Springer); Mattheck (1998): *Design in der Natur. Der Baum als Lehrmeister*, Berlin: Springer; Burns, L. A. (2010): "Tree joints. Biomimetic insights for aerospace composite joints", 27th International Congress of the Aeronautical Sciences, 19.–24. Sept. 2010, Nizza; Müller, U., et al. (2014): „Stamm-Astanbindung – eine biologisch optimierte Struktur mit hoher mechanischer Leistungsfähigkeit“, in: Reinhard Brandner (ed.): *Bionische Tragstrukturen im Holzbau*, Tagungsband Grazer Holzbau-Fachtagung 2014, Graz: Technische Universität Graz: 113–120.
- 4 Müller, U., Gindl, W., Jeronimidis, G. (2006): "Biomechanics of a branch. Stem junction in softwood", in: *Trees – Structure and Function* 20: 643–648; Buksnowitz, C. et al. (2010): "Tracheid length in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). Analysis of three databases regarding tree age, cambial age, tree height, inter-annual variation, radial distance to pith and log qualities", in: *Wood Research* 55(4): 1–13; Müller, U., et al. (2015): "Synergy of multi-scale toughening and protective mechanisms at hierarchical branch-stem interfaces", in: *Scientific Reports* 5: 14522; Müller, U., et al. (2018): "How softwood tree branches are attached to stems: hierarchical extension of Shigo's stem-branch model", in: *Trees – Structure and Function* 32(4): 1113–1121.
- 5 Mattheck 1998.
- 6 Shigo 1985.
- 7 Trendelenburg, R. (1955): *Das Holz als Rohstoff*, München: Hanser; Timell, T. E. (1986): *Compression Wood in Gymnosperms*, Berlin: Springer; Shigo 1985; Shigo 1990.
- 8 Müller, Gindl, Jeronimidis 2006.
- 9 Müller et al. 2015.
- 10 Nyström, J. (2003): 'Automatic measurement of fiber orientation in softwoods by using the tracheid effect', in: *Computers and Electronics in Agriculture* 41(1–3): 91–99.
- 11 Shigo 1985.
- 12 Reiterer, A., et al. (1999): "Experimental evidence for a mechanical function of the cellulose microfibril angle in wood cell walls", in: *Philosophical Magazine A* 79(9): 2173–2184; Färber, J., et al. (2001): "Cellulose microfibril angles in a spruce branch and mechanical implications", in: *Journal of Materials Science* 36: 5087–5092; Jungnickl, K., et al. (2009): "The role of material properties for the mechanical adaptation at branch junctions", in: *Trees – Structure and Function* 23: 605–610.
- * Diagram based on Larsen, H.J. (1999): "Influence of semi-rigidity of joints on the structure", in: Haller, P. (ed.): *COST CI. Semi-rigid Timber Joints – Structural Behaviour, Modelling and New Technologies*.