

Verbindungstechniken für auf Laubhölzer basierte Holzwerkstoffe – mit besonderer Berücksichtigung von BSH und LVL aus Buche

Connections for veneer-based hardwood products

Techniques d'assemblage pour des matériaux bois issus de feuillus, en tenant particulièrement compte du BLC et du LVL de hêtre

Ernst Gehri
Emer. Professor
CH-Rüschlikon



Verbindungstechniken für auf Laubhölzer basierte Holzwerkstoffe – mit besonderer Berücksichtigung von BSH und LVL aus Buche

1. Einleitung

Bei der Bewertung von Verbindungstechniken kommt man nicht um die Kriterien: Tragfähigkeit / Steifigkeit / Duktilität herum. Dies dürfte inzwischen zwar bekannt sein, wird aber in der Praxis (und der Forschung) immer noch zu wenig beachtet.

Grund hierfür mag die unzeitgemässe Verschwendung von Holz als GL24 (über 90% der Produktion) trotz den wesentlich besseren natürlichen Eigenschaften des Rohstoffes. Mit der Verwendung von auf Laubholz basierten Holzwerkstoffen, mit z.T. mehr als der doppelten Leistung besteht die Chance für ein Umdenken, hin zu einer verbesserten Nutzung der Rohstoffeigenschaften.

Diese neuen Baustoffe bedingen eine angepasste Bauweise: dies wirkt sich auf verschiedene Bereiche aus: Entwurf (Planer, Architekten/Ingenieure), Ausbildung (insbesondere im Bereich Verbindungstechnik), Ausführung (Zuverlässigkeit, Qualitätssicherung).

Im Rahmen des Vortrages werden folgende Teilaspekte behandelt:

- Zuverlässigkeit der Werkstoffe auf LH-Basis
- Bedeutung der Verbindungseigenschaften
- Stahl-Holz-Verbindungen mittels Stabdübel
- Verbindungen mittels eingeklebter Anker

2. Zuverlässigkeit der Werkstoffe auf LH-Basis

2.1. BSH aus Buche und Esche

Aufgrund früherer Erfahrung (Strassenbrücke Eggwil 1984) und intensiver Forschung in der BRD im letzten Jahrzehnt (dies führte 2009 zur Zulassung von BSH-Buche) sollte eigentlich dem breiten Einsatz von BSH aus Laubholz (Buche, Esche, Robinie) für hochbeanspruchte Tragwerke oder Tragwerksteile nichts im Wege stehen. Der enorme Forschungsaufwand im Bereich BSH-Buche führte zu einer Vielzahl von Forschungsberichten; der Widerhall in der Praxis war jedoch gering. Die Anwendung beschränkte sich auf Einzelobjekte. In der Zwischenzeit hat das LVL aus Buche am Markt (als Produkt: Bau-Buche) rasch Eingang und Akzeptanz gefunden.

2.2. Woher diese Diskrepanz zwischen Forschung und Praxis?

Die höheren Produktionskosten lassen sich z.T. durch die geringere Holzmenge, sowie durch einen angepassten (anspruchsvolleren) Entwurf inkl. Verbindungen kompensieren. Dennoch hat der Einsatz von BSH aus LH noch Seltenheitswert.

Gründe hierfür wurden u.A. gefunden: in fehlender oder wenn vorhanden komplizierter Regelungen, in ungeeigneter Information für Planer, in ungesicherter Produktion (Zeit, Preis und insbesondere bezüglich Qualität). Zwar darf ein BSH GL48 in Buche eingesetzt werden; praktisch wird in Deutschland nur ein GL28 angeboten!

Die meisten Probleme werden heute zu wissenschaftlich behandelt. Resultat: zu kompliziert, zu abstrakt. Als einfaches Beispiel hierfür die Festlegungen bezüglich Biegeeigenschaften von BSH-Trägern.

Bekanntlich ergibt sich das Biegeversagen durch ein **Zugversagen der Randlamellenbänder** (ein Holzversagen und/oder ein Keilzinkstossversagen). Massgebend sind somit im Wesentlichen nur zwei Grössen: die Zugfestigkeit der Bretter $f_{t,0}$ und die Zugfestigkeit der Bretterstösse $f_{t,j}$.

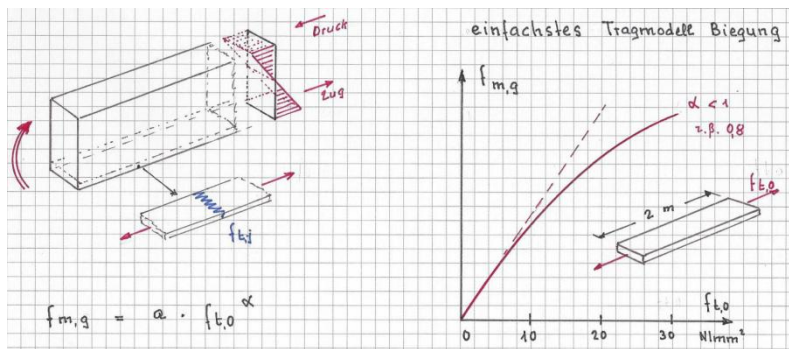


Abbildung 1: Einfachstes Tragmodell Biegung

Die Biegefestigkeit $f_{m,g}$ lässt sich direkt in Funktion der Zugfestigkeit darstellen:

$$f_{m,g} = a \cdot f_{t,0}^{\alpha}$$

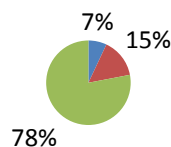
Erforderlich (und entscheidend!) ist die zuverlässige Kenntnis von $f_{t,0}$. Aufgrund vorliegender Untersuchungen erscheint ein Ansatz $f_{m,g} = 2,5 \cdot f_{t,0}^{0,8}$ angebracht. Es ist müßig über die Faktoren a und α zu diskutieren (Kommastellen), wenn die Zugfestigkeit der Bretter in der Praxis nicht gewährleistet ist!

Zwar erhalten Sie heute dank der CE-Marke – zumindest auf dem Papier – ein zuverlässiges Produkt. Dass dies z.T. nicht zutrifft, zeigen meine persönlichen Erfahrungen. Dies dürfte daran liegen, dass die «Neue Holzbau Lungern» über eine eigene Zugprüfanlage verfügt und für hochfestere Sortimente systematische Annahmeprüfungen durchführt. Da andere Betriebe keine entsprechenden Annahmeprüfungen durchführen, erfüllt das gelieferte Produkt Brett stets der CE-Markierung!

Vielleicht erhellt die nachstehende Darstellung die heutige Problematik. Hier das Sortierergebnis zweier weitgehend identischer Stichproben, ausgeführt mit den (europäisch zugelassenen) Sortiermaschinen X und Y. Gewisse Abweichungen sind, da unterschiedliche Sortierkriterien verwendet, zu erwarten. Die Unterschiede sind jedoch frappant!

Sortiermaschine X

■ MS 17 ■ MS 13 ■ MS 10



Sortiermaschine Y

■ MS 17 ■ MS 13 ■ MS 10

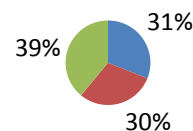


Abbildung 2: Festgestellte unterschiedliche Sortierergebnisse

Die Ausbeute für das hochwertige Sortiment MS17 erreicht im Falle der Sortiermaschine X nur 7%; eine günstigere Sortierung (hier Ausbeute 31 % MS17) wird mit dem Einsatz der Sortiermaschine Y erreicht! Aus dieser Sicht ist eher diese Sortieranlage zu empfehlen! Allerdings ergibt die Überprüfung, dass hier nicht einmal die Kriterien für ein MS13 erfüllt werden! Nicht erstaunlich, dass hier auch die Anforderungen für MS 13 und MS 10 bei Weitem nicht erreicht werden. Bei der Sortierung X erfolgt eine korrekte Zuordnung für das MS 17, nicht jedoch für MS13 und MS10. Dies das Ergebnis einer Untersuchung (publiziert 2009) für die Brettsortierung von Fichtenholz. Natürlich lagen damals noch besondere Verhältnisse insbesondere eine (un)-geeignete Stichprobe vor! Somit heute sicher nicht mehr repräsentativ!

Im Hinblick auf obige Erkenntnisse erscheint mir die heutige Formulierung für die Biegefestigkeit überspitzt und täuscht eine nicht vorhandene Genauigkeit vor.

The characteristic bending strength shall be calculated using the following expression.

$$f_{m,g,k} = -2,2 + 2,5 f_{t,0,l,k}^{0,75} + 1,5 \left(f_{m,j,k} / 1,4 - f_{t,0,l,k} + 6 \right)^{0,65}$$

The expression shall only be used for a characteristic flat wise bending strength of the finger joint in the range:

$$1,4 f_{t,0,l,k} \leq f_{m,j,k} \leq 1,4 f_{t,0,l,k} + 12$$

The formula is also applicable to glulam without finger joints provided $f_{m,j,k}$ is taken as:

$$f_{m,j,k} = 1,4 f_{t,0,l,k} + 12$$

2.3. Einfache und verständliche Tragmodelle

Geht man von der bisherigen EN-Anforderung bezüglich der Zugfestigkeit des KZ-Stosses von $f_{t,j,k} = f_{t,0,l,k} + 5$ aus, so ergibt sich unter (der üblichen, allerdings unkorrekten Annahme $f_{m,j,k} = 1,4 f_{t,j,k}$) die Biegefestigkeit zu $f_{m,g,k} = 4,93 + 2,5 f_{t,0,l,k}^{0,75}$, unter dem korrekten – und versuchsmässig begründeten – Ansatz $f_{m,j,k} = 1,6 f_{t,j,k}$ eine Biegefestigkeit die eigentlich dem Biegeträger ohne Stösse entspricht!

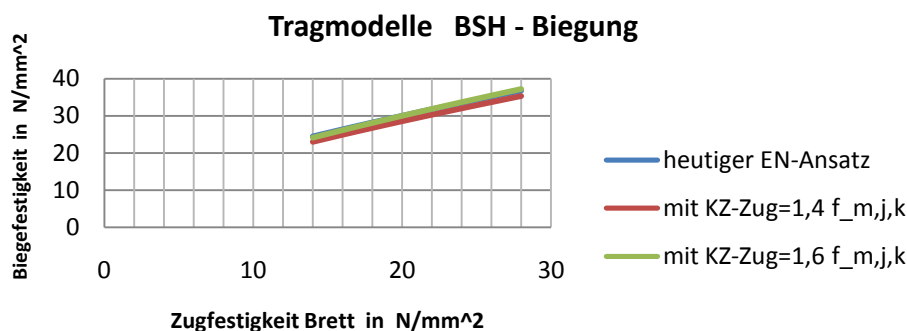


Abbildung 3: Vergleich heutiger EN-Ansatz (ohne KZ-Stösse) mit KZ-Zug $f_{t,j,k} = f_{t,0,l,k} + 5$

Wie ersichtlich, führen die bisherigen KZ-Zuganforderungen weitgehend zu Eigenschaften wie von Trägern ohne Stösse. Im Ergebnis könnte obige EN-Beziehung – bei der bisherigen Festlegung der Zugfestigkeit des KZ-Stosses zu $f_{t,j,k} = f_{t,0,l,k} + 5$ – durch eine einfache Beziehung wie $f_{m,g,k} = 5 f_{t,0,l,k}^{0,6}$ ersetzt werden.

PS: Die Anmerkungen betreffen die zu präzisen Formulierungen, die sich wesentlich vereinfachen lassen. Dieser Weg wurde schon früher durch die Arbeiten von Schickhofer und Brandner – die direkt auf Auswertungen von Versuchen beruhen – aufgezeigt.

2.4. Bedeutung der Zugfestigkeit der Keilzinkenstösse

Neben der Zugfestigkeit der Bretter hat die **Zugfestigkeit der Keilzinkenstösse** eine ebenso grosse Bedeutung. Durch prinzipielle höhere Ansetzung gegenüber dem Brett (schwacher Stoss ist auch spröder) erhält man nachfolgende Beziehung:

$$f_{t,j} = 1,2 \cdot f_{t,0} \quad \text{bzw.} \quad \geq f_{t,0} + 5 \quad [\text{in N/mm}^2]$$

Dieser Ansatz erscheint grosszügig, aber mit heutiger Technologie eigentlich unproblematisch erfüllbar. Voraussetzung für die hohe Qualität der KZ-Stösse ist die laufende Kontrolle – diese ist nur zuverlässig über Zugprüfung durchführbar – und die jeweilige Absicherung durch eine vorgängige Verfahrensprüfung. Da die Produktion immer noch mehrheitlich auf Nadelholz ausgerichtet ist, bedingt dies jeweils eine Umstellung der gesamten Produktionslinie auf Laubholz mit entsprechenden spezifischen Anforderungen.

Hier ein Beispiel für die Bedeutung von vorgängiger Verfahrensprüfung.

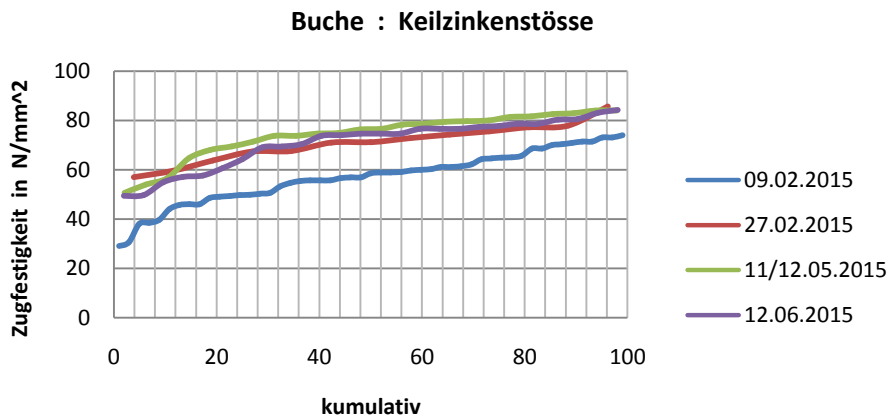


Abbildung 4: Ergebnisse von Verfahrensprüfungen der Fa. Neue Holzbau, Lungern

Ausgehend von Brettmaterial **Buche** 29/160 der Festigkeitsklasse FK40 erfolgte – aufgrund geeigneter Parametereinstellungen für **Esche** – die Herstellung einer Serie Keilzinkenstösse am 09.02.2015. Das Resultat der anschliessenden Zugprüfung war enttäuschend; die anvisierten Zugwerte von $f_{t,j,5\%} = 1,2 \cdot 40 = 48 \text{ N/mm}^2$ wurden nicht erreicht. Nach Analyse erfolgte eine Anpassung des Verfahrens (bzw. des Steuerungsprogrammes des automatisierten Verfahrens) mit den vorliegenden Ergebnissen (Herstelldatum: 27.02.2015). Mit dem angepassten Programm «**Buche**» erreichte man – auch bei späteren Umstellungen, wie die Überprüfungen vom 11/12.05 und 12.06.2015 zeigten – stets ähnliche Ergebnisse (Voraussetzung ähnliches Brettmaterial).

2.5. Fazit: Zuverlässigkeit des Produktes BSH Laubholz

Durch 2 einfache Massnahmen erreichbar:

- Überprüfung (bzw. Gewährleistung) von $f_{t,0,k}$ durch Annahmekontrolle und laufender, stichprobenweiser Prüfung der Bretter auf Zug
- Kontrolle der KZ-Produktion (ebenfalls auf Zug)

Damit steht dem Planer und Anwender ein BSH-Laubholz mit gesicherter Leistung zur Verfügung.

Sofern dies nicht möglich ist, steht seit kurzem ein industriell hergestelltes Produkt, LVL-Buche bzw. die BauBuche zur Verfügung. Dieses weist z.T. höhere Leistungen auf. Von Bedeutung ist dabei die Gleichmässigkeit des Produktes bzw. der gewährleisteten Eigenschaften.

3. Bedeutung der Verbindungseigenschaften

3.1. Formänderungsverhalten

Bei Holz und den Holzwerkstoffen geht man generell von einem linearen Zusammenhang Spannung/Dehnung aus. Siehe hierzu Norm SIA 265, Art. 3.1.2 – Stoffgesetze:

Die charakteristischen Werte werden unter der Annahme einer linearen Beziehung zwischen Spannung und Dehnung bis zum Bruch gewonnen. Für Bauteile, die in der Lage sind, plastische Stauchungen zu entwickeln, darf im Druckbereich ein nichtlineares (elastisch-plastisches) Stoffgesetz verwendet werden.

Holzverbindungen weisen generell ein nichtlineares Verhalten auf; entscheidend ist neben dem Verhältnis F_u/F_y das Verhältnis w_u/w_y , das sogenannte Duktilitätsmass D_s , hier gemäss Definition in SIA 265, Art. 6.1.2.1:

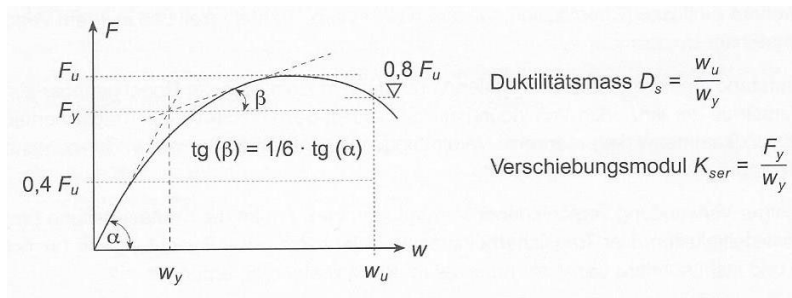


Abbildung 5: Definition von Steifigkeit und Duktilität

Schwierigkeiten bereitet die zahlenmässige Festlegung von D_s , da diese eine Funktion des gewünschten Tragverhaltens ist. Hierzu SIA 265, Art. 6.1.2.2: *Das erforderliche Duktilitätsmass der Verbindung ist in Funktion des gewünschten Tragverhaltens und der gewünschten Ausnützung plastischer Kraftumlagerungen im System festzulegen.*

3.2. Robustheit

Durch die Verwendung duktiler Verbindungsarten ergeben sich auf Überbeanspruchungen unempfindliche Holztragwerke, somit auch robustere Tragwerke.

3.3. Wirkungsgrad

Mit dem Wirkungsgrad wird ein Bezug auf die Leistung der zu verbindenden Bauteile (Festigkeit/Steifigkeit) hergestellt, wobei stets auf den ungeschwächten – somit auf den Bruttoquerschnitt – Bezug zu nehmen ist.

Das Potential der HWS aus Laubholz liegt – im Vergleich zu HWS aus Nadelholz – rund 80% bis 100% höher; dementsprechend – falls man dieses Potential nutzen will – kommen nur Verbindungsarten in Frage, die einen hohen Wirkungsgrad ermöglichen. Hierzu zählen (nach möglichem Wirkungsgrad geordnet): Klebverbindungen (hier nicht weiter behandelt); Verbindungen mit eingeklebten verformten Stahlteilen; Verbindungen mit Stabdübeln (Stahl/Holz-Verbindungen) sowie Verbindungen mit Schrauben (da noch fehlende spezifische Entwicklungen für Laubholz; hier nicht behandelt).

3.4. Welche Verbindungsart weist ideale Eigenschaften auf?

Nachstehend wird das prinzipiell unterschiedliche Leistungsvermögen eingeklebter Anker zu Stabdübeln aufgezeigt. Bedingt durch die grosse Querschnittverminderung bei den SD-Verbindungen (Schlitze und Bohrungen) beträgt der wirksame Querschnitt weniger als 70% des Bruttoquerschnittes. Zudem liegt ein ungünstigerer Kraftfluss vor. Dies führt dazu, dass SD-Verbindungen maximal Wirkungsgrade gegen 0,65 erreichen. Demgegenüber sind bei eingeklebten Ankern Werte von 0,90 erreichbar und bei ausreichender Duktilität – Nutzung des plastischen Verhaltens – sind sogar Werte um 1,0 erreichbar!

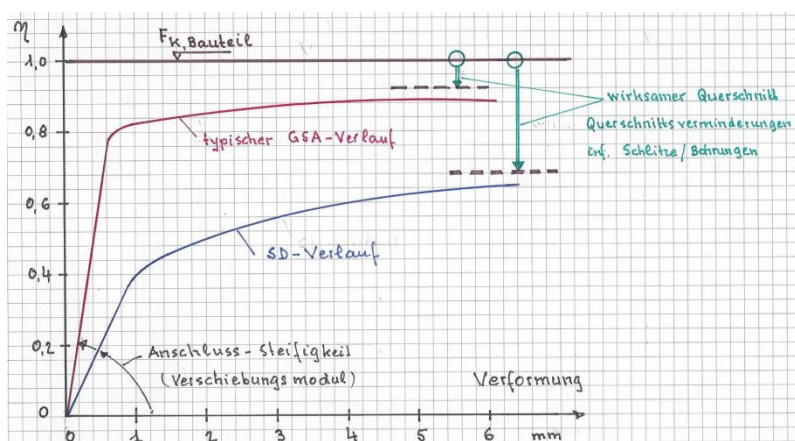


Abbildung 6: Leistungspotential – Vergleich: SD-Verbindung zur GSA-Verbindung

4. Stahl-Holz-Verbindungen mittels Stabdübel

4.1. Normal-(Sonderfall) einer Beanspruchung parallel zur Faser

Heute mit HWS aus Nadelholz die klassische Verbindungsart. Umfassende Regelungen bezüglich konstruktiver Ausbildung und Bemessung werden für diesen Sonderfall in den Normen festgelegt (EC5 / DIN 1042). Die dortigen Festlegungen beruhen auf den Ansatz von Johanson bzw. dem EYM (Europäisches Yield Model). Dieser Ansatz geht von einem starr-plastischen Verhalten von Holz und SD aus; vorausgesetzt wird dabei, dass kein vorzeitiges Aufspalten des Holzes auftritt. Das EYM gilt für den Einzelstift; wirken mehrere Verbindungsmittel in Kraftrichtung vor, so ist ein Gruppeneffekt zu beachten. Dies wird mittels eines Reduktionsfaktors k_{red} berücksichtigt.

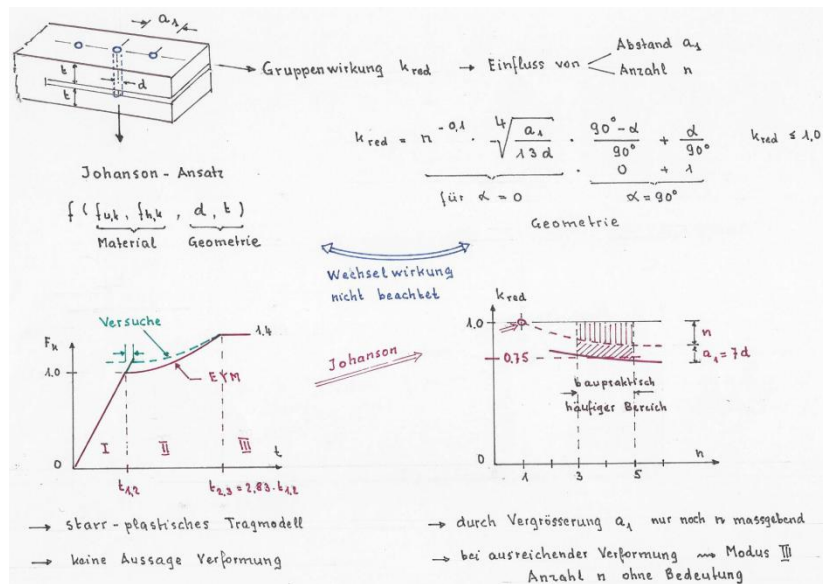


Abbildung 7: Zusammenhänge Einzelstift/Verbindung

Im praktischen Anwendungsbereich (3 bis 5 SD hintereinander) ergibt sich somit eine Reduktion – gegenüber dem Einzelstift – von rund 25%. Dieser Gruppeneffekt wird durch ungleichmässige Beanspruchung individueller Stifte in der Verbindung sowie durch ein frühzeitiges Aufspalten bei abnehmenden Zwischenabständen a_a begründet. Liegt jedoch ein duktileres Verhalten vor, wird eine gleichmässiger Beanspruchung erzielt; dadurch entfällt der Teilfaktor $n^{-0,1}$. Voraussetzung ist allerdings, dass a_1 genügend gross angesetzt wird, so dass ein sprödes Versagen über Aufspalten ausgeschlossen ist.

Die heutigen Regelungen beachten leider nicht diese Wechselwirkung (duktileres Verhalten des Einzelstiftes und dessen Bedeutung auf Gruppenwirkung). Entsprechende angepasste Formulierungen sind notwendig, um eine angemessene Leistung mit Laubholz zu erzielen. Zugleich ist EYM soweit zu modifizieren, um eine bessere Übereinstimmung mit den Versuchsdaten zu ermöglichen.

Aufbauend auf den Grundsätzen für die BSB-Verbindung – noch heute nach über 30 Jahren leistungsfähigste Verbindung für HWS aus Nadelholz – lassen sich analoge Verbindungen für HWS aus Laubholz entwickeln. Hier das Ergebnis einer Vorserie mit SD \varnothing 6 mm (mehrschnittige Verbindung mittels 3 Blechen) und unterschiedlicher Anzahl von SD hintereinander (Einzel bis 5 SD hintereinander). Dank hohen Stabschlantheiten lag ein duktileres Verhalten vor; Bruchursache – bei Verformungen über 8 mm – war häufig ein Stahlbruch der SD. Wie aus dem nachstehenden Diagramm ersichtlich, war hier der Kraft-Verformungs-Verlauf (pro SD und Schnitt) weitgehend unabhängig vom Anschlussbild. Somit dürfte für diese Holzart eine optimale Abstimmung der Geometrie (Abstände) vorliegen.

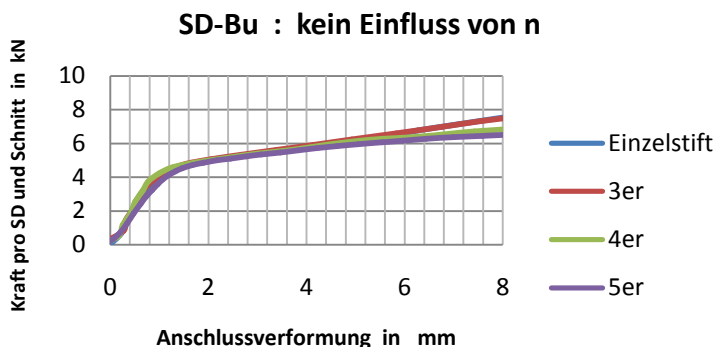
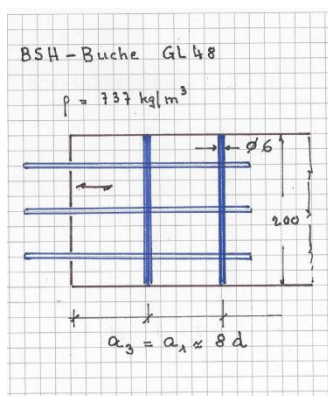


Abbildung 8: Duktile Ausbildung – Kein Gruppeneinfluss

Die Anschlussleistung – bezogen auf den Bruttoquerschnitt – erreichte rund 30 N/mm². An sich bemerkenswert hoch, aber zu vergleichen mit der möglichen Zugleistung von BSH-Buche von über 40 N/mm².

4.2. Einfluss «kleiner» Exzentrizität

Prüfungen von Verbindungen erfolgen in der Regel zentrisch. Dies vereinfacht Prüfung sowie Analyse der Resultate und entspricht den Normanforderungen. In der Praxis lassen sich Abweichungen vom Sonderfall «zentrischer» Beanspruchung nicht vermeiden, so dass stets mit gewissen Anschlussmomenten zu rechnen ist. Im Falle von Fachwerkträgern treten derartige Momente (sog. Zwangsmomente) insbesondere in den Strebenanschlüssen auf. Diese – da meist relativ klein – werden in den Nachweisen vernachlässigt, obwohl SD-Anschlüsse auf derartige Einwirkungen ungünstig reagieren. Dies führte dazu, dass bei einer Vernachlässigung der Zwangsmomente, die Tragwiderstände (unter Annahme zentrischer Beanspruchung) nur zu 75% auszuschöpfen sind. Siehe hierzu Norm SIA 265, Art. 5.3.6.2.2: *Beim Nachweis der Stabanschlüsse auf Normalkraft (d.h. bei Vernachlässigung der Zwangsmomente) ist der Tragwiderstand der Verbindungsmittel und des Holzes im Anschlussbereich der Diagonalen zu reduzieren; bei Anschlüssen mit grosser Biegesteifigkeit ist der Reduktionsfaktor mit 0,75 festzulegen.*

Bezüglich SD-Verbindungen unter Kombination Normalkraft/Moment (und Querkraft) liegen für BSH-Fichte Untersuchungen von Pedersen (2002) vor. Diese zeigen bereits bei geringen Zusatzmomenten einen starken Abfall an Zugtragfähigkeit auf. Ein Nachfolzug nur infolge Normalkraft/Moment zeigte ein etwas günstigeres Verhalten auf; allerdings trat stets ein spröder Bruch auf. Anschliessend wurden Abtastversuche mit BauBuche durchgeführt. Erwartungsgemäss lagen die Werte – bei gleichen geometrischen Verhältnissen – wesentlich höher, wobei einzig die BauBuche mit Querlagen zu befriedigen vermochte. Nebst höheren Werten liegt hier auch eine ausreichende Duktilität vor.

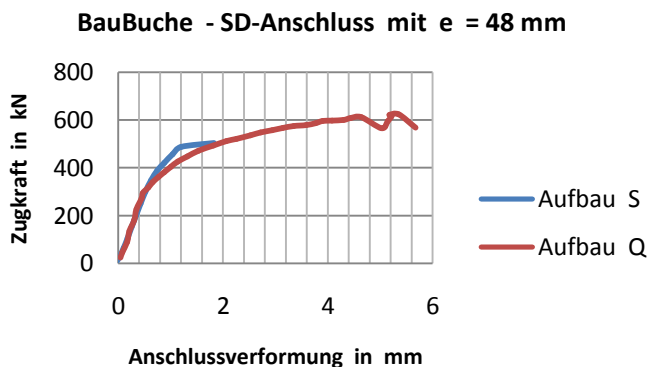
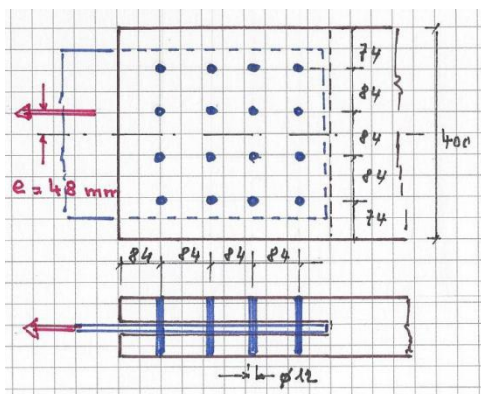


Abbildung 9: Unterschiedliches Verhalten von BauBuche S und Q

Duktile Versagensformen (somit Ausschaltung des spröden Holzversagens) führen generell zu einem robusteren Tragverhalten. Dies zu bewerten und zu quantifizieren bereitet allerdings den Normenschaffenden Probleme. Einzig die CH gibt für duktilen Verhalten einen generellen Bonus von 13% bezüglich den Bemessungswerten.

5. Verbindungen mittels eingeklebter Anker

5.1. Generelles

Angestrebt wird eine hohe Leistung, insbesondere für Anschlüsse parallel zur Faser. Die Verbindung ist äusserst steif, die Anschlussverformung innerhalb des d-Niveaus ist geringer als 0,4 mm.

Bei einem spröden Versagen – Bruch innerhalb des Klebbereiches Harz/Holz bei Verformungen von knapp über 0,5 mm mit anschliessendem Aufspalten des Anschlussbereiches – ist die Verbindung äusserst empfindlich auf ungleichmässige Ankerbeanspruchung. Hier somit ein starker Gruppeneinfluss zu erwarten. Voraussetzung für einen effizienten Einsatz ist somit ein ausreichend duktilen Verhalten, insbesondere für die üblichen Verbindungen mit mehreren Ankern.

Dies gilt für Verbindungen mit Nadelholz als auch Laubholz. Die Notwendigkeit einer Abstimmung der massgebenden Parameter wurde bereits 1996 aufgezeigt (Gehri/1996): *Das Tragvermögen ist allgemein durch die Festigkeit des Stahls und nicht durch das Tragvermögen des Klebers, noch der Verbindung mit dem Stahl und dem Holz, oder der Festigkeit des Holzes zu begrenzen.* Damit wurde ein duktilen Verhalten angestrebt

Im Rahmen der Diskussionen zum Eurocode 5 wurde nochmals die Bedeutung der Duktilität veranschaulicht, direkt ausgehend von Prüfergebnissen an einem Anschluss mit 4 eingeklebten Ankern Typ GSA16.Serie C weist abgestimmte Parameter (Geometrie und Materialkennwerte) auf, Serie D eine fehlende Abstimmung. Trotz höherer Tragkraft ist diese Ausbildung nicht zweckmässig: ein elastisches Verhalten bis zum schlagartigen Bruch (durch Ausziehen) mit kleinster Verformung von < 1 mm! Beachte: Werte auf Ausziehen weisen generell eine stärkere Streuung als auf Stahlversagen auf.

Fichte 120x120 - 4 GSA 16 (Gehri 2003/EC5)

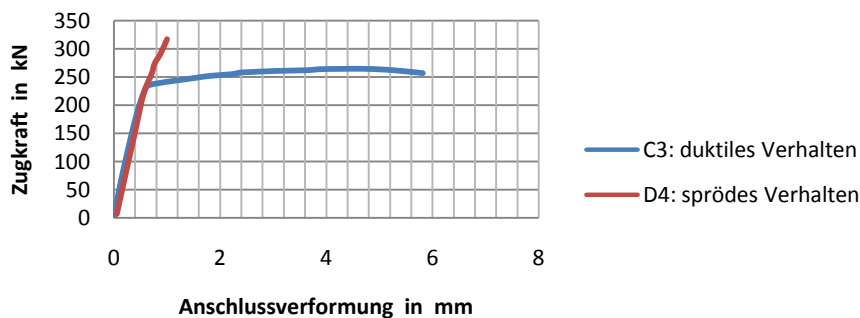


Abbildung 10: Bedeutung der Abstimmung der Stahleigenschaften auf die Versagensart

5.2. Erfassung des Auszieh Widerstandes

Zur Bestimmung des Ausziehwertes wurde für die GSA-Anker folgende konservative Beziehung vorgeschlagen:

$$F_{ax} = \alpha \cdot A_{ef}^{\beta} \quad A_{ef} = \pi \cdot d_{Loch} \cdot l_{ad}$$

Die Faktoren α und β ergeben sich empirisch aus Versuchen und erfassen die holzartspezifischen Eigenschaften als auch die Kraft -und Faserrichtung.

Baupraktisch «vernünftige» Verhältnisse für die Ankerschlankheit $\lambda = l_{ad} / d$ liegen bei 12 bis 15 vor. Durch eine einfache Umformung kann die Scherfestigkeit (auf Ausziehen) auch in Funktion von l_{ad} dargestellt werden (übliche Darstellung in DIN 1042), Nachstehend das Ergebnis (wobei hier analog deutscher Gepflogenheit die Stahlumhüllende als Bezugsfläche verwendet wird).

Meines Erachtens ist der Bezug auf die umhüllende Fläche (beide Abmessungen l_{ad} und d_{Loch} abgedeckt) sinnvoller, da identisch mit der Bruchfläche.

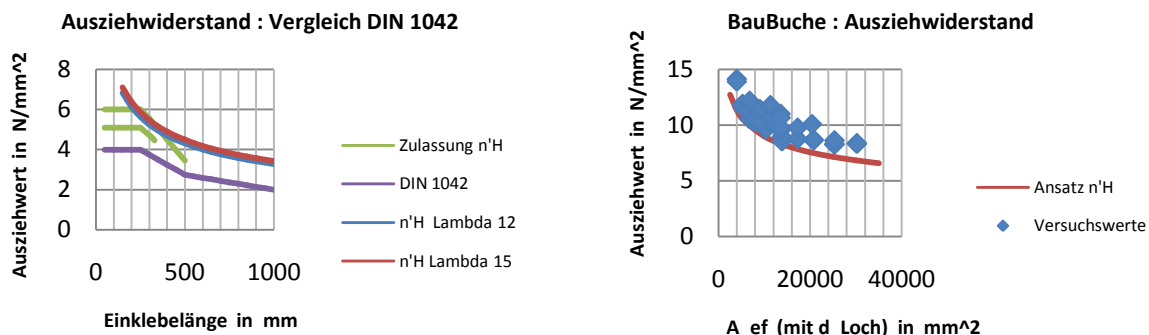


Abbildung 11: Ausziehwiiderstand in Funktion der Länge bzw. der Bruchfläche

Für Laubholz ist ein analoges Vorgehen zweckmässig. Das Ergebnis der BauBuche zeigt gegenüber der Fichte einen deutlich höheren charakteristischen Auszugswiiderstand. Beachte: die Prüfungen wurden als Einzelstabprüfungen (jeweils mit zwei weitgehend identischen Anschlüssen, wobei nur ein – der untere – Bruchwert erfasst wird). Die Verhältnisse a/d betragen dabei bloss 3,3 bis 3. Eine weitere Reduktion infolge dichter Anordnung ist somit nicht erforderlich.

5.3. Gruppenversuche

Der Ansatz hat sich in den nachfolgenden Prüfungen mit Ankergruppen aus sehr zuverlässig erwiesen.

Bei der GSA-Technologie ist die optimale Einstellung der massgebenden Parameter gewährleistet. Voraussetzung sind genaue Kenntnisse über das Ausziehverhalten und eine korrekte Abregelung der GSA-Anker.

Nachstehend zwei typische Kraft-Verformungsdiagramme:

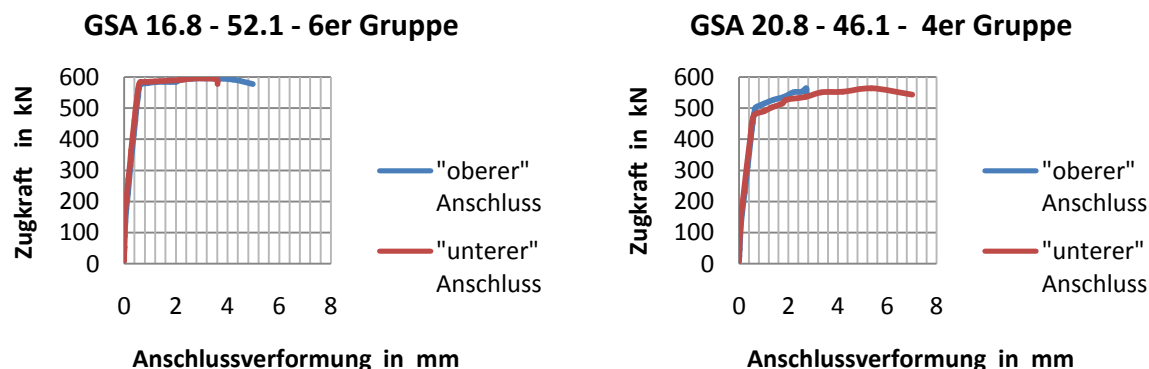


Abbildung 12: Typische Kraft-Verformungsdiagramme für Ankergruppen GSA16.8 bzw. GSA20.8

Die Anschlussleistung von Prüfkörper 52.1 – auf den **Bruttoquerschnitt** 100×150 bezogen – beträgt: $\sigma_{t,0,brutto} = 40 N/mm^2$; beim Prüfkörper 46.1 – auf den **Bruttoquerschnitt** 120×120 bezogen – $\sigma_{t,0,brutto} = 39,1 N/mm^2$.

Obwohl die Einstellung der Abregelung der GSA-Anker nahe des Bereiches des charakteristischen Wertes erfolgte, trat kein einziges Holzversagen auf. Alle bisher (über 50) geprüften Anschlüsse zeigten ein duktiler Versagen auf sehr hohem Niveau auf.

Vergleich: Einzel zu Gruppen

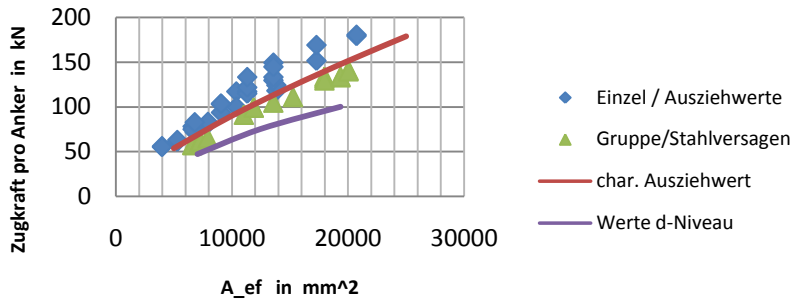


Abbildung 13: Vergleich Ausziehwerte (Einzel) zu Stahlversagen (Gruppe)

5.4. Bedeutung von Fertigungstoleranzen

Bei einigen Prüfkörpern wurden – bewusst – grössere Abweichungen eingebaut. Ein Teil der Schrauben wies jeweils ein Spiel auf.

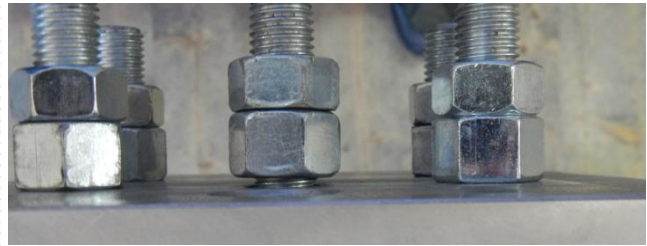
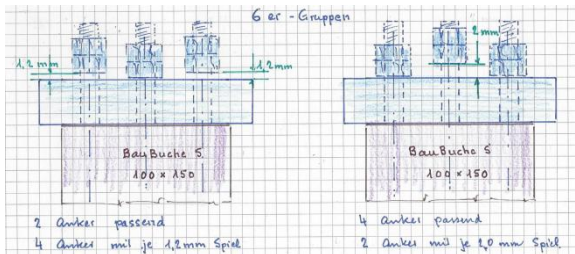


Abbildung 14: Eingebaute Fertigungstoleranzen

Dadurch entstanden die nachstehenden Kraft-Verformungsverläufe

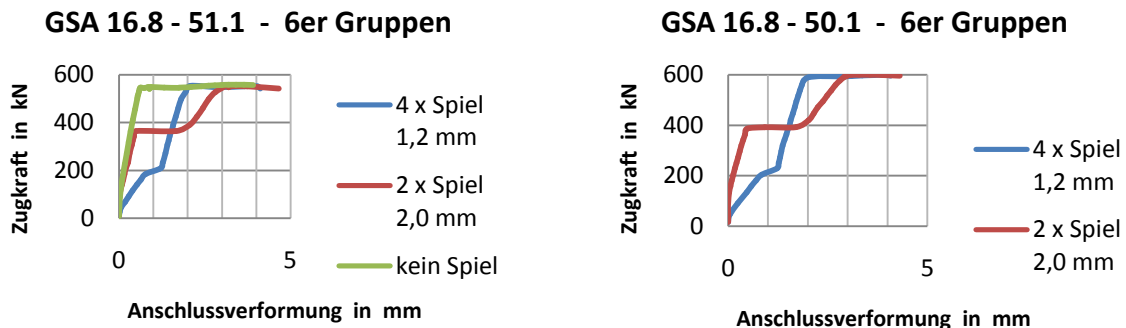


Abbildung 15: Beachte: gleiches Tragvermögen und weiterhin genügendes Verformungsvermögen.

5.5. Duktilität und plastisches Tragverhalten

Gemäss Norm SIA 265, Art. 6.1.2.2 gilt: *Das erforderliche Duktilitätsmass der Verbindung ist in Funktion des gewünschten Tragverhaltens und der gewünschten Ausnützung plastischer Kraftumlagerungen im System festzulegen.* Wie gezeigt, ermöglicht dies bei zentrischer Beanspruchung zu einer Kraftausgleich innerhalb der Ankergruppe; eine Reduktion infolge Gruppenwirkung entfällt.

Bei der häufigen Kombination Normalkraft + Biegung ermöglicht dies aber auch die Ausnützung plastischer Tragmodelle. Ausgehend von den vereinfachenden Voraussetzungen (Dubas / 1983):

- Spannungs-Dehnungsdiagramm bestehend aus einer Hook'schen Gerade und einem Fließplateau (Verfestigungsbereich somit vernachlässigt).
- Ebenbleiben der Querschnitte, d.h. ebene Verteilung der Dehnungen auch in elasto-plastischen Bereich gültig,

wird das plastische Tragvermögen von Stabanschlüssen unter Normalkraft mit Biegung abgeschätzt. Für eine symmetrische Ausbildung (und unbehinderter Verdrehung) ergibt sich in Analogie zum I-Querschnitt – symmetrischer Querschnitt unter einaxiger Biegung mit Längskraft – die alleinige Aufnahme des Biegemomentes durch die äusseren Querschnittsbereiche.

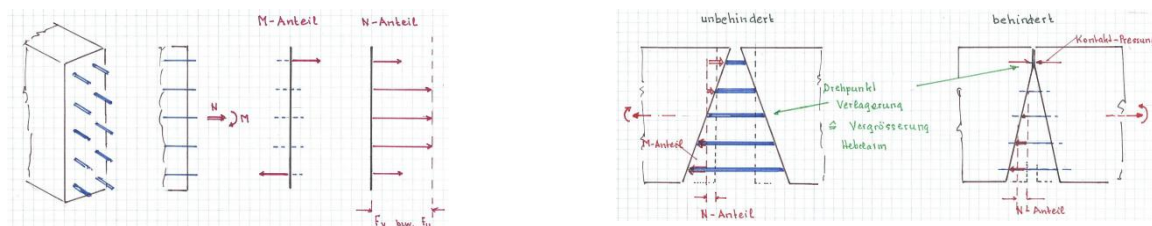


Abbildung 16: Plastische Gleichgewichtszustände

Voraussetzungen für die Übertragung des Tragmodells auf Holzverbindungen sind:

- Kein vorzeitiges Versagen des Holzes im Anschlussbereich
- Kein vorzeitiges Versagen der Verbindung Anker/Holz (Ausziehen/Aufspalten)

Wie unter 5.3 aufgezeigt, können obige Anforderungen mit der GSA-Technologie zuverlässig erfüllt werden. Bei einer Übertragung des allgemeinen Tragmodells auf Stabanschlüsse ist weiter zu beachten, dass meist eine behinderte Verdrehung vorliegt. Dadurch vergrössert sich der Hebelarm und entsprechend der Tragwiderstand.

Umfassende Untersuchungen liegen vor mit BSH Fichte (Gehri/2014); im Hinblick auf die heutige Tagung wurde noch eine kleine ergänzende Serie mit BauBuche durchgeführt, welche die Anwendbarkeit bestätigte.

5.6. Fazit

Mit der GSA-Technologie ergeben sich:

- Zuverlässige, robuste Verbindungen
- Hohe Leistung (Festigkeit und Steifigkeit) ohne Schädigung des Grundmaterials
- Plastisches Tragverhalten nutzbar

Diese Technologie eignet sich in Verbindung mit HWS hoher Leistung, insbesondere mit LVL-Buche (BauBuche). Beginne mit einem Hinweis auf die Tagung Garmisch 09 (Gehri/2009). Dort wurde folgendes (im Hinblick auf Stösse in BSH-Fichte) notiert:

Biegestösse werden im Holzbau – infolge der geringen Leistung derartiger Stösse und des üblicherweise spröden Versagensmodus – nach Möglichkeit gemieden. Mit der GSA-Anker-Technologie ist dies nicht mehr erforderlich. Für praktische Ausbildungen werden in der Regel die Anker nicht durchgehend, sondern 2-teilig ausgebildet. Der Stoss erfolgt dann auf Montage durch eine reine Steckverbindung.

Obiger Hinweis gilt ab heute auch auf Laubholzverbindungen. Biegestösse in BauBuche erreichten (bei gleichzeitig duktilem Verhalten) das charakteristische Biegemoment des ungeschwächten Querschnittes (mit $f_{m,k} = 70 \text{ N/mm}^2$)!

6. Skelettbau in Holzbauweise

Die bisherigen Ausführungen im Skelettbau erfolgten mit BSH Fichte; vielversprechender sind hier Lösungen mit dem Einsatz von Laubholz. Wegen der möglichen höheren Leistung der Verbindungen sind hier auch biegesteife Ausbildungen denkbar.

Obwohl reine Skelettbauten – mit Rahmenwirkung in zwei orthogonalen Richtungen – keine ökonomische Lösung darstellen (die räumliche Stabilisierung wird einfacher und kostengünstiger durch Anordnung von Scheiben oder Treppenhauskernen erreicht) können ästhetische Gründe oder gewünschte Flexibilität in der Raumaufteilung dennoch für derartige Skelettbauten sprechen.

Zwei mögliche Alternativen für die Ausbildung der biegesteifen Knotenverbindungen werden nachstehend dargelegt und diskutiert:

- Vorgespannte Knoten
- Biegesteife Knoten mit GSA-Technologie

Der vorgespannte Knoten – bisher in Neuseeland propagiert – hat auch in der CH Eingang gefunden, mit dem «House of Natural Resources» an der ETH Zürich. In diesem Zusammenhang wurden auch umfassende Untersuchungen durchgeführt. Die Ergebnisse dürften durch erfolgte Vorträge und Publikationen weitgehend bekannt sein. Als wesentliche Vorteile werden hier der geringe Stahlverbrauch und die Fähigkeit einer «Selbstaufrichtung» nach Erdbebenwirkungen genannt. Allerdings ist die Anschlussleistung gering und somit der Einsatz von Laubholz (für die Träger) nicht sinnvoll.

Die biegesteife Knotenausbildung (mit GSA-Technologie) erlaubt eine bessere Nutzung der Laubholzeigenschaften. Trotz wesentlich schlanker Bauteile erzielt man dadurch eine hohe Steifigkeit (über einen grossen elastischen Bereich) mit anschliessenden hohen Verformungsvermögen (Duktilität). Der höhere Aufwand für die (vorgefertigten) Anschlüsse wird durch die wesentlich höhere Leistung und der Anpassungsfähigkeit aufgewogen.

Um einen direkten Vergleich beider Alternativen zu ermöglichen, wurden gleichartige Knoten gleichen Prüfbedingungen unterworfen. Nachstehend das Ergebnis des Vergleiches: die Moment-Rotations-Diagramme zeigen frappante Unterschiede auf.

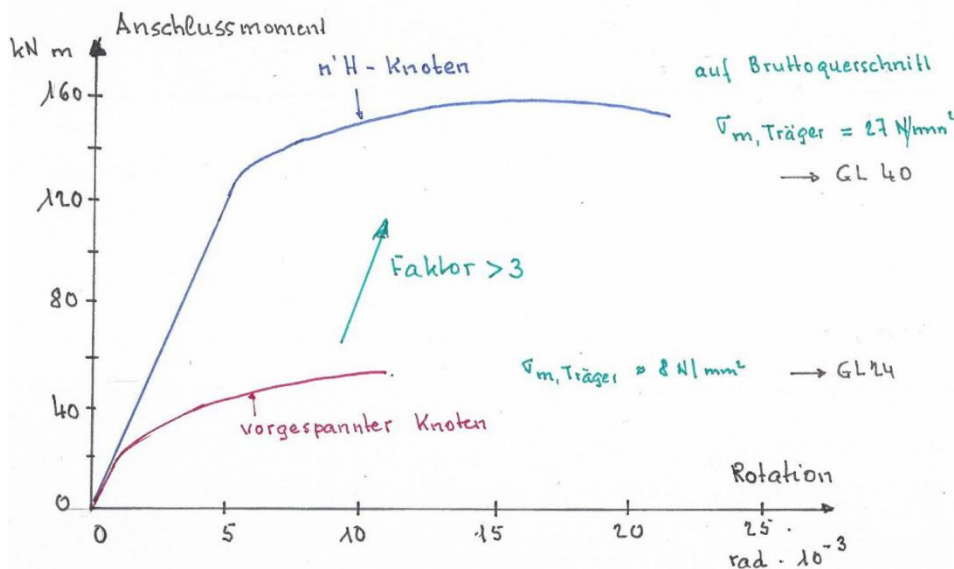


Abbildung 17: Moment-Rotationsdiagramme für vorgespannten und für n'H-Knoten (GSA-Technologie)

In beiden Fällen gewisse «Steuerungsmöglichkeiten» vorhanden: beim vorgespannten Knoten durch Variation der Vorspannung (bei höherer Vorspannung sind allerdings Kriecherscheinungen zu erwarten); bei GSA-Lösung durch Variation der Stahlquerschnitte, ohne wesentlichen Einfluss auf das Verhalten der Stütze.

Die Alternative n'H eignet sich auch gut für eine Kombination mit BauBuche, werden doch hier höchste Anschlussleistungen erreicht.

7. Danksagung

Der Autor bedankt sich für die Mitwirkung seines Freundes Peter Haas, für die Mitarbeit von Jan Cometta sowie bei der Fa. neue Holzbau AG, Lungern, für die zur Verfügung Stellung sämtlicher Prüfkörper und der Prüfeinrichtungen.

8. Literatur

- [1] Dubas, P. (1983): Baustatik I, Skript zur Vorlesung, Publikation Nr. 83-4, Baustatik und Stahlbau, ETH Zürich.
- [2] Gehri, E. (1996): Verbindungen – Grundlagen. In «Brettschichtholz», SAH-Kurs Weinfelden 1996.
- [3] Gehri, E. (2009): Eingeklebte Anker – Anforderungen und Umsetzungen, Garmisch IHF 2009.
- [4] Gehri, E. (2014): Exzentrische Anschlüsse. Interner Bericht n'H, Lungern, 2014.
- [5] Pedersen, M.U. (2002): Dowel type timber connections – strength modelling. Danmarks Tekniske Universitet, Rapport BYG·DTU R-039.