

Ermüdungsverhalten von eingeklebten Gewindestangen im Holzbrückenbau

Bruno Zumbrunn-Maurer
neue Holzbau AG
Lungern, Schweiz



Ermüdungsverhalten von eingeklebten Gewindestangen im Holzbrückenbau

1. Einleitung

Materialermüdung ist ein schleichender Schädigungsprozess, welcher durch zyklische mechanische Belastungen verursacht wird und letztlich zum Versagen eines Bauteils führen kann. Einen Überblick über den Stand des Wissens zum Ermüdungsverhalten von Holz und insbesondere von geklebten Holzbauteilen und -anschlüssen gab Simon Aicher am IHF 2015 [1]. Zu unterscheiden ist die hochzyklische Ermüdung von der niedrigzyklischen Ermüdung, wie sie durch Erdbebenbeanspruchung auftreten kann. Erdbeben und entsprechende Normen für zyklische Prüfungen, wie die EN 12512 [2], führen zu Beanspruchungen bis weit in den plastischen Bereich des Prüfkörpers. Solch extreme Kräfte und Verschiebungen treten folglich nur in aussergewöhnlichen Situationen auf. Ganz alltäglich sind hingegen die dynamischen Einwirkungen, wie Strassenverkehr oder Kranbetrieb, welche durch ihre enorm grosse Anzahl an Wiederholungen (Lastwechsel) zu einem Ermüdungsversagen führen können.

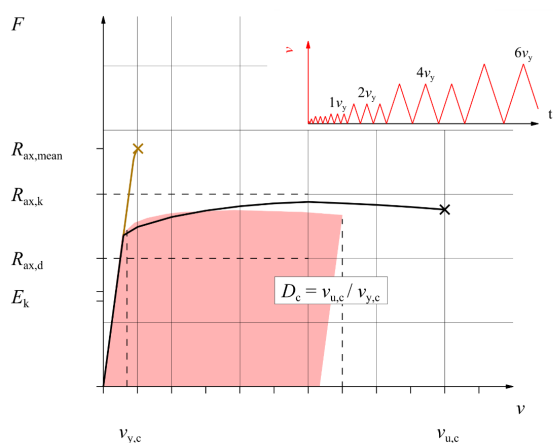


Abbildung 1: Schematische Diagramme von Prüfungen zur zyklischen Duktilität (niedrigzyklische Ermüdung)

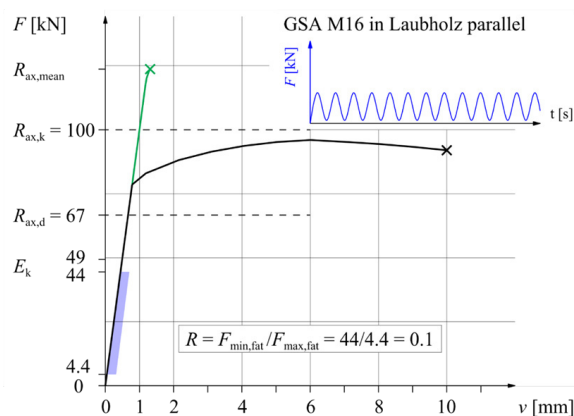


Abbildung 2: Schematische Diagramme von Prüfungen zur Betriebsfestigkeit (hochzyklische Ermüdung) für einen parallel in Laubholz eingeklebten GSA M16.

Verbindungen mit eingeklebten Gewindestangen haben sich wegen ihren hohen Tragwiderständen und Steifigkeiten sowie ästhetischer Vorteile im Ingenieurholzbau bewährt und werden im Hochbau häufig eingesetzt z.B. bei biegesteifen Verbindungen, Fachwerkträgern, Stützenverankerungen [3] und Verstärkungen diverser Art [4]. Die Leistungsfähigkeit dieser Verbindungen hängt von einem sorgfältig abgestimmten Zusammenspiel zwischen Holz, Stahl, Klebstoff und der Geometrie der Verbindungen ab. Insbesondere bei vielen Verbindungsmitteln in einem Anschluss, ist die Duktilität durch das planmässige Versagen der Stahlstäbe zu gewährleisten. Mit der Einführung der zweiten Generation von europäischen Tragwerksnormen für den Holzbau, dem Eurocode 5, wird die Verbindungstechnologie endlich auch normativ abgedeckt [5]. Zudem ist erfreulich, dass die Regeln bis hin zu den Ermüdungsparametern ($\alpha_{fat} = 6.7$ and $\beta_{fat} = 1.3$) reichen.

Anstoss für das nachfolgend beschriebene Forschungsprojekt und somit auch für diesen Beitrag gab eine Ausschreibung in der Schweiz. Für den Ersatzneubau einer Strassenbrücke wurde im Leistungsverzeichnis ein Holzfachwerk beschrieben. In den Bedingungen war jedoch zu lesen, dass sämtliche statisch-dynamisch beanspruchten Verbindungen mechanisch erfolgen müssen und NICHT geklebt werden dürfen. Als Grund, weshalb die geklebten Verbindungen auszuschliessen seien, wurde angegeben, dass das Tragwerk in einem Klima zu stehen komme, welches mindestens teilweise am oberen Ende der Feuchteklasse 2 (nach Norm SIA 265) liege. Aus dieser Diskussion wurde klar, dass es nicht genügt, Ermüdungsprüfungen (wie die mechanischen Verbindungsmittel) im trockenen Holz zu machen. Es galt zu beweisen, dass eingeklebte Gewindestangen Millionen von Lastwechseln auch im feuchten Holz überstehen.

2. Forschungsprojekt WHFF 2022.10

Die meisten der bisherigen Untersuchungen zur Ermüdungsfestigkeit wurden an Verbindungen in trockenem Holz (Nutzungsklasse bzw. Feuchteklasse 1) durchgeführt. Die Übertragbarkeit auf Anwendungen im Brückenbau, wo höhere Feuchten (Feuchteklasse 2 nach Norm SIA 265) vorherrschen, ist beschränkt. Erhöhte Holzfeuchten (ω) beeinflussen die mechanischen Eigenschaften von Holz erheblich, was den Tragwiderstand und die Ermüdungsfestigkeit von Verbindungen mit eingeklebten Gewindestangen beeinträchtigen kann.

Im kürzlich in der Schweiz durchgeführten Forschungsprojekt WHFF-CH 2022.10 [6] untersuchte die Abteilung Ingenieur-Strukturen der Empa gemeinsam mit der neuen Holzbau AG (n'H) das Tragverhalten von Verbindungen mit eingeklebten Gewindestangen (GSA) bei Ermüdungsbeanspruchung. Gleichzeitig wurden die mechanischen Eigenschaften (Anschlusssteifigkeit und Tragwiderstand bei axialer Zugbeanspruchung) vor und nach bestandener Ermüdungsprüfung mit einer differenzierten Methodik untersucht. Das Tragverhalten und die Versagensarten wurden in Versuchen an Verbindungen mit rein statischer Beanspruchung verglichen. Es wurden Versuche in vier Prüfkörpergruppen gemäss Tabelle 1 durchgeführt. Dabei wurden die Belastungsart und die Holzfeuchte variiert und es wurden zwei Einkleberichtungen der Stangen in Bezug auf die Faserrichtung des Holzes in je einer Holzart geprüft.

Tabelle 1: Die durchgeführten Prüfungen im Überblick.

Gruppe Serie	Einkleberichtung / Holzfeuchte / Art des Experiments	BSH	Prüfkörper
A	A1 GSA $\parallel$ / trockenes Holz / Ermüdung ¹⁾	Esche (<i>Fraxinus excelsior</i>)	3
	A2 GSA $\parallel$ / erhöhte ω / Tragwiderstand statisch		3
	A3 GSA $\parallel$ / erhöhte ω / Ermüdung & Resttragwiderstand statisch		4
B	Optimierung der Prüfanordnung GSA $\perp$ / trockenes Holz / Tragwiderstand statisch	Fichte (<i>Picea abies</i>)	3
C	C1 GSA $\perp$ / trockenes Holz / Tragwiderstand statisch		3
	C2 GSA $\perp$ / trockenes Holz / Ermüdung & Resttragwiderstand statisch		4
D	D1 GSA $\perp$ / erhöhte ω / Tragwiderstand statisch		3
	D2 GSA $\perp$ / erhöhte ω / Ermüdung & Resttragwiderstand statisch		6

¹⁾ Die Testserie A1 wurde im Rahmen eines früheren Projekts durchgeführt [7].

Für die A-Serien mit GSA $\parallel$ zur Faser (Abbildung 3) wurde Laubholz gewählt, da sich hier höhere Kräfte aufbringen lassen. Im Vergleich zu Nadelholz führt dies zu höheren Spannungen in der Klebefuge. Die Prüfkörper mit GSA $\perp$ zur Faser (Gruppen B-D, Abbildung 4) wurden mit zwei Stangengruppen (oben 3 GSA in 1 Reihe und unten 4 GSA in 2 Reihen) so konstruiert, dass ein Versagen auf Rollschub zu erwarten war.

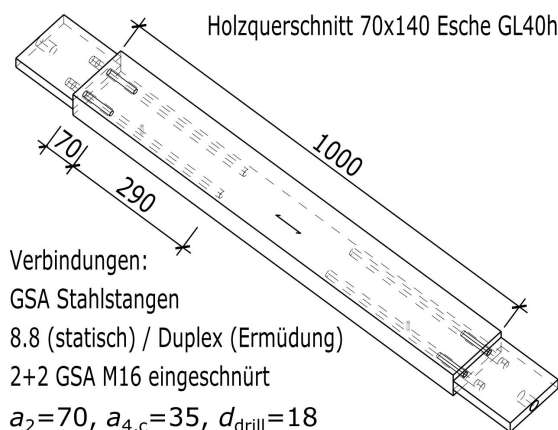


Abbildung 3: Prüfkörper mit 2 Paar GSA auf beiden Seiten für Ermüdungsprüfungen $\parallel$ zur Faser in Eschen-Brettschichtholz. Alle Masse in [mm].

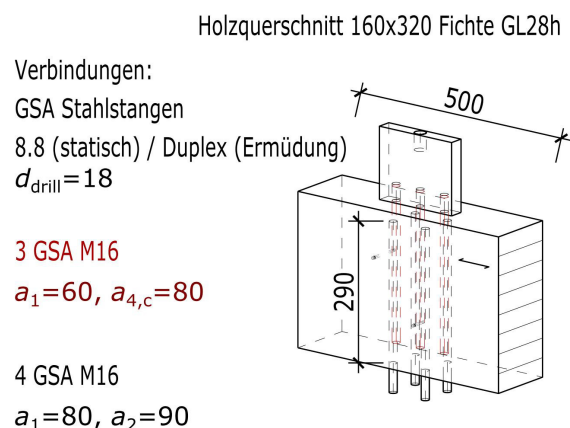


Abbildung 4: Prüfkörper mit 2 Gruppen von GSA für Ermüdungsprüfungen $\perp$ zur Faser in Fichten-Brettschichtholz. Alle Masse in [mm].

Zentrale Elemente der Methodik waren die Herstellung von Brettschichtholz für die Anwendung in der Feuchteklasse 2 und die Klimatisierung der Prüfkörper nach dem Einkleben der Gewindestangen, um die Holzfeuchte gezielt auf das gewünschte Niveau zu bringen.

Zur Erzielung einer der Feuchtekategorie 2 entsprechenden Holzfeuchte, wurde eine spezielle Klimakiste entwickelt. Damit konnte gezeigt werden, dass solche Untersuchungen auch mit einfachen Mitteln, also ohne teure Klimakammern, realisierbar sind. Die Holzfeuchteentwicklung in den Prüfkörpern wurde indirekt durch Wiegen von Kontrollstäben (Fichten- und Eschenstäbe mit Querschnitten zwischen 70 x 70 mm² und 160 x 160 mm²) überwacht. Wie die Abbildung 5 zeigt, vergingen 200 Tage bis auch die grössten Querschnitte die Zielfeuchte erreicht hatten. Die Klimatisierung auf eine Holzfeuchte von etwa 20 % wurde jedoch als essenziell erachtet für die Simulation realer Bedingungen, wie sie sich im Brückenbau ergeben. Nach der Klimatisierung und noch vor den Ermüdungsprüfungen erfolgte eine Probelastung zur Qualitätskontrolle, um sicherzustellen, dass alle Prüfkörper den Versuchsanforderungen entsprechen.

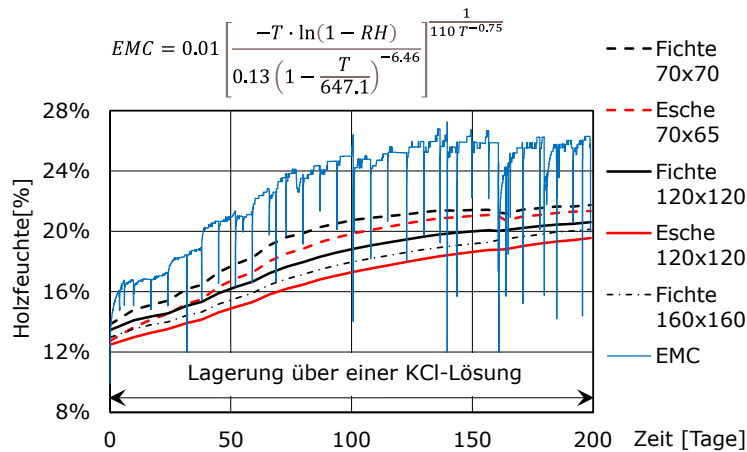


Abbildung 5: Entwicklung der Holzfeuchte der Kontrollstäbe (rechnerische Ausgleichsfeuchte (EMC) anhand des gemessenen Klimas in den Kisten).

Die Ermüdungsprüfungen wurden mit einer Verhältniszahl $R (= F_{\min} / F_{\max})$ von 0.1 und mit Frequenzen von 4 – 7 Hz durchgeführt. In der Regel wurden $2 \cdot 10^6$, in einem Fall gar $3 \cdot 10^6$ Lastwechsel aufgebracht. Dabei wurden die Temperaturen in den Klebfugen, die Verformung der Prüfkörper (Maschinenweg) und die Kraft kontinuierlich gemessen. Die Überwachung der Temperatur in den Klebfugen war wichtig, um Überhitzung und Veränderungen der Klebstoffeigenschaften auszuschliessen. Die Abbildung 6 zeigt einen Prüfkörper mit installierter Messtechnik zur Ermittlung der Steifigkeiten. In Abbildung 7 ist ein Schwindriss zu erkennen, wie er typischerweise während der Ermüdungsprüfung auftrat, obwohl die Stirnholzflächen mit Kunststoff-Klebeband abgedeckt wurden.



Abbildung 6: Prüfkörper A3-1 während der statischen Prüfung mit Messung der Anschlussverformungen und der Holzsteifigkeit in Prüfkörpermitte.

Abbildung 7: Prüfkörper D2-4 während der Ermüdungsprüfung (nach gut $1.02 \cdot 10^6$ Lastwechseln).

Nach den Ermüdungsprüfungen wurden statische Belastungsversuche durchgeführt, um den Resttragwiderstand und die Reststeifigkeiten der Verbindungen zu bestimmen. Nach Abschluss aller Versuche wurden sämtliche Prüfkörper zerlegt und detailliert analysiert, um die Versagensarten wie Holzbruch, Klebfugenversagen oder Stahlversagen zu identifizieren. Die Abbildung 8 zeigt beispielhaft die Prüfkörper mit parallel in Eschen-BSH eingeklebten GSA, welche bei erhöhter Holzfeuchte geprüft wurden (Serie A3). Bei den Prüfkörpern mit rechtwinklig zur Faserrichtung eingeklebten GSA war das Versagensbild auf Rollschub immer identisch, egal ob der Prüfkörper auf Ermüdung oder nur statisch geprüft wurde. Die Abbildung 9 zeigt die bei erhöhter Holzfeuchte geprüfte Serie D2, welche sich bezüglich Versagensart auch nicht von den trocken geprüften Serien unterschied.



Abbildung 8: Prüfkörper der Serie A3 nach den Prüfungen. Besonders ist der Prüfkörper A3-4 mit Ermüdungsversagen der Duplex-Gewindestange.



Abbildung 9: Prüfkörper der Serie D2-4 nach der Zerlegung. An der oberen Stangengruppe haftet stets der Holzbereich zwischen den Rollschub-Versagensebenen.

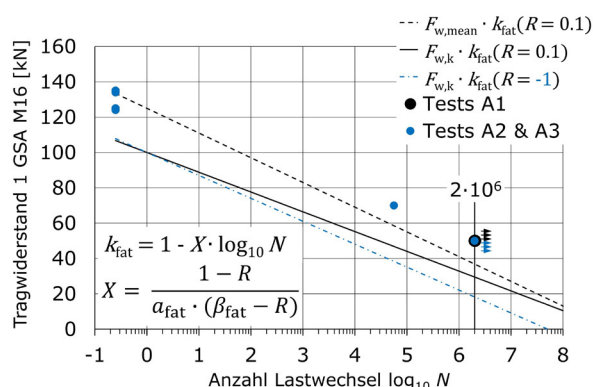
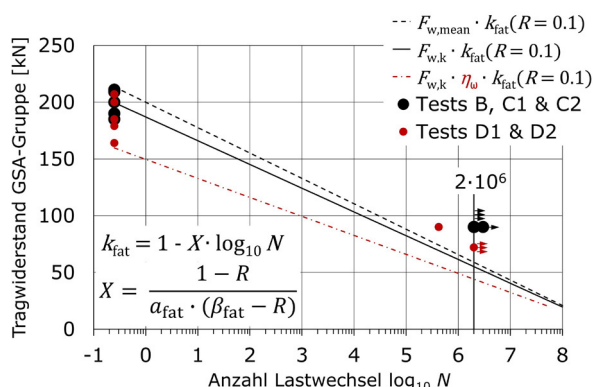
Die Ergebnisse der umfangreichen Versuche sind im Schussbericht zum Forschungsvorhaben detailliert festgehalten [6]. Die Texte sind mit zahlreichen Abbildungen (Kraft in Funktion der Anschlussverformung, Temperatur in den Klebfugen und Raumtemperatur während der Ermüdungsbeanspruchung, Versagensart) und Tabellen (Anschlussverformungen und Anschlusssteifigkeiten, Materialeigenschaften (Dichte und E-Modul), Tragwiderstand, Kenndaten der Ermüdungsprüfungen) unterstützt. Zudem hat René Steiger am INTER-Meeting 58 darüber berichtet und detaillierte Folgerungen formuliert [8].

Die im Rahmen des Projekts durchgeführten Versuche zeigten, dass mit in BSH eingeklebten Gewindestangen auch in Bauteilen mit Holzfeuchten bis 20 % dauerhaft tragfähige und steife Verbindungen realisiert werden können. Das schrittweise Vorgehen in mehreren Versuchsreihen hat sich bewährt. Wie die Tabelle 2 zeigt, ist es schliesslich gelungen, dass in allen Serien mit Ermüdungsprüfungen mindestens 3 Prüfkörper die angestrebten $2 \cdot 10^6$ Lastwechsel ohne Versagen erreichten. Dabei liess sich feststellen, dass die Klebfugen in keinem der untersuchten Prüfkörper die schwächste Komponente darstellten.

Tabelle 2: Ergebnisse der Ermüdungsprüfungen.

Gruppe	$\Delta\sigma_s$ [MPa]	$\tau_{\max}$ [MPa]	Lastwechsel N	Bemerkungen
Esche GSA $\parallel$ $\omega \approx 9\%$	287	3.4	$2 \cdot 10^6$ ✓ $2 \cdot 10^6$ ✓ $2 \cdot 10^6$ ✓	Siehe ICTB [7]
Esche GSA $\parallel$ $\omega \approx 20\%$	287	3.4	$2 \cdot 10^6$ ✓ $2 \cdot 10^6$ ✓ $2 \cdot 10^6$ ✓	5-6 Hz
	401	4.8	56'175 *	5 Hz, $\Delta\sigma_s$ sehr hoch, Ermüdung Stahl
Fichte GSA $\perp$ $\omega \approx 9\%$	172	2.1	$2 \cdot 10^6$ ✓ $2 \cdot 10^6$ ✓ $2 \cdot 10^6$ ✓	5.5 – 6.9 Hz
			$3 \cdot 10^6$ ✓✓	7 Hz, $+10^6$ Lastwechsel
Fichte GSA $\perp$ $\omega \approx 20\%$	172	2.1	422'834 *	6.25 Hz, $F_{\min}$, $F_{\max}$ nicht reduziert, Ermüdung Holz (Rollschub)
	138	1.6	$2 \cdot 10^6$ ✓ $2 \cdot 10^6$ ✓ $2 \cdot 10^6$ ✓	4 – 5.9 Hz, $F_{\min}$, $F_{\max}$ um 20% reduziert ($\eta_w = 0.8$)
$\Delta\sigma_s$ Zugspannungsdifferenz in den Gewindestangen (2 GSA M16, $A_s = 157 \text{ mm}^2$) // in den Gewindestangen am oberen Anschluss (3 GSA M16) $\tau_{\max}$ Schubspannung in den Klebfugen bei Oberlast $F_{\max}$ (bezogen auf den Nenndurchmesser der Stange und die Verankerungslänge)				

In Abbildung 10 und Abbildung 11 werden die Prüfergebnisse mit den Wöhlerlinien (Zeitfestigkeitsgeraden) gemäss dem Formal-Vote-Entwurf des Eurocode 5 [5] verglichen. Bei der ersten Konfiguration mit Prüfkörpern aus Eschen-BSH wurde in den Ermüdungsprüfungen eine hohe nominelle Schubspannung in der Klebfuge erzeugt. Unabhängig von der Holzfeuchte, für diese Konfiguration und mit $R = 0.1$ führt der Bemessungsansatz zu konservativen Werten, was die Anzahl der Lastwechsel und die gewählten Werte der Ermüdungsbelastung betrifft.

Abbildung 10: Experimentelle Ergebnisse von GSA $\parallel$ zur Faser im Vergleich zum Bemessungsmodell der FprEN 1995-1-1.Abbildung 11: Experimentelle Ergebnisse von GSA $\perp$ zur Faser im Vergleich zum Bemessungsmodell der FprEN 1995-1-1.

Gemäss der normierten Wöhlerlinie für $R = -1$ (blaue Gerade in Abbildung 10) darf ein GSA zukünftig $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln unter vollständiger Wechselbeanspruchung von $\pm 18.2 \text{ kN}$ (Zug/Druck) ausgesetzt werden. Die getestete Kraftamplitude von $\pm 45 \text{ kN}$ im Zug-Zug-Schwellbereich legt die Vermutung nahe, dass das Bemessungsmodell auch für dieses Spannungsverhältnis konservativ ist. Prinzipiell wäre dies allerdings noch durch Experimente zu belegen.

Die zweite Konfiguration mit Prüfkörpern aus Fichten-BSH erfüllte die Erwartungen ebenfalls. In allen Versuchsreihen (feucht und trocken, statisch und dynamisch belastet) erwies sich das Versagen der zwischen den Stangenreihen liegenden, auf Rollschub beanspruchten Holzschicht als kritisch. Dabei zeigte sich ein negativer Einfluss der erhöhten Holzfeuchte auf die Steifigkeit, den Tragwiderstand und damit auch auf die Zeitfestigkeit. Aus diesem Grund enthält die Abbildung 11 eine rote Gerade, welche den Vorschlag eines Reduktionsfaktors $\eta_w = 0.8$ visualisiert.

Zusammenfassend lässt sich über das Projekt sagen, dass dank sorgfältiger Sortierung, hochwertigen Stahlstangen und geeignetem Klebstoffsystem Prüfkörper mit homogenen Eigenschaften hergestellt werden konnten. So liessen sich die Effekte beobachten, wie

dies mit den gewählten, über die Versuchsreihen gezielt veränderten Parametern angestrebt worden war. Folglich darf festgestellt werden, dass die Untersuchung zur weiteren Normierung von Ermüdungsprüfungen und statischen Prüfungen an Holzverbindungen beiträgt. Bei der Bemessung von (GSA-)Verbindungen für Anwendungen mit erhöhter Holzfeuchte sollten die Steifigkeit, der Auszieh Widerstand und die Ermüdungsfestigkeit reduziert werden. Die Werte der Holzfeuchte-Reduktionsfaktoren sind jedoch an die in der Norm gewählten Ausgangswerte anzupassen. Wenn Reihen von axial belasteten Verbindungsmitteln Rollschub im Holz verursachen, ist diese Beanspruchung nachzuweisen. Darum arbeitet die n'H darauf hin, dass ein geeigneter Bemessungsansatz in den Eurocode 5 aufgenommen wird.

3. Hinweise für die Praxis

3.1. Kraftfluss

Für Tragwerke mit ermüdungswirksamen Lasten sind axial beanspruchte Verbindungsmittel besonders interessant, da sie bei zweckmässiger Anordnung einen sehr gleichmässigen Kraftfluss ermöglichen. Die Abwesenheit von Spannungsspitzen gilt allgemein als Schlüssel für eine hohe Betriebsfestigkeit. Bezogen auf den einfachen Fall von Zugstössen in Faserrichtung werden in Abbildung 12 drei Verbindungstypen einander gegenübergestellt.

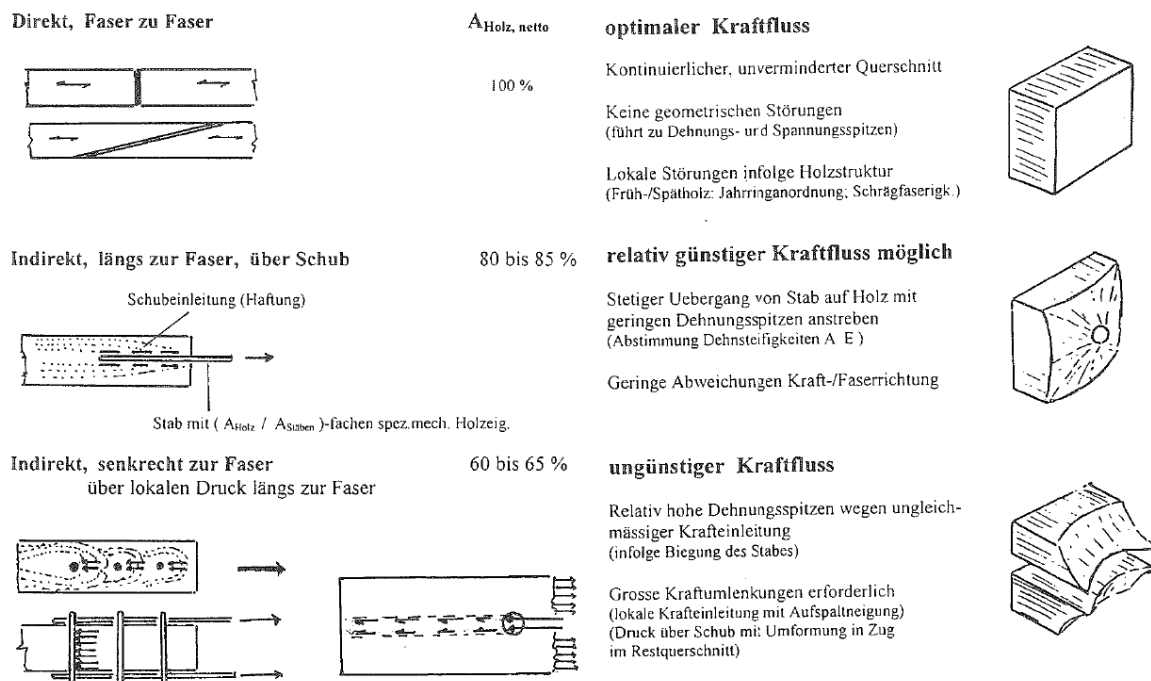


Abbildung 12: Kriterium Kraftfluss für Stösse in Faserrichtung aus [9].

Wichtig für ein sorgfältig abgestimmtes Zusammenspiel und damit für eine hohe Leistung ist, dass die Verbindung keinen Steifigkeitssprung darstellt ($E_{\text{Holz}} \cdot A_{\text{Holz}} = E_{\text{Stahl}} \cdot A_{\text{Stahl}}$). Gemäss diesem Grundsatz sind die Verbindungsmittel stets gleichmässig über den gesamten Holzquerschnitt zu verteilen.

3.2. Lastniveau

Der Eurocode 5 bezeichnet Spannungen und Festigkeiten im Ermüdungsnachweis mit dem Index d für «Design». Das ist formell korrekt, weil im Eurocode 0 [11] auch die Lastkombination für Ermüdung so bezeichnet wird (siehe Abbildung 13). Bei der Nachweisführung sind die Auswirkungen im Tragwerk jedoch nicht mit den höheren Werten aus dem Grenzzustand der Tragsicherheit zu verwechseln.

(1) The design value of a fatigue action $F_{\text{fat,d}}$ should be calculated from Formula (8.11):

$$F_{\text{fat,d}} = \gamma_{\text{Ff}} F_{\text{fat}} \quad (8.11)$$

where

F_{fat} is the fatigue action;

γ_{Ff} is a partial factor for fatigue actions.

NOTE 1 The value of γ_{Ff} depends on the models for fatigue actions and on the models for the effects of the fatigue actions.

NOTE 2 The National Annex gives the partial factors for models for fatigue actions. The value of γ_{Ff} is 1.0 when the models for fatigue actions are safesided such that uncertainties of the action effects up to 10 % are covered. Otherwise, the value is 1.1.

$$\Sigma F_{\text{d}} = \sum_i G_{\text{k},i} + \sum_j \psi_{2,j} Q_{\text{k},j} + (P_{\text{k}}) + F_{\text{fat,d}} \quad (8.17)$$

Abbildung 13: Bemessungswert der Einwirkung und Lastkombination für Ermüdung aus EN 1990:2023 [11].

Auf der Widerstandsseite ist ebenfalls ein Teilsicherheitsfaktor vorgesehen, um aus der Zeitfestigkeit einen Bemessungswert zu machen. Für die Schweiz ist aktuell vorgesehen, diesen Parameter im nationalen Anhang auf $\gamma_{\text{R,fat}} = 1.0$ festzulegen. Gemäss den Erwägungen der SIA-Normkommission 265 sollte der Faktor β für ausreichende Sicherheit sorgen. Dieser erhöht bei der Berechnung des Reduktionsfaktors für Ermüdung k_{fat} (Formel 10.3 in [5]) die Anzahl Lastwechsel auf das Dreifache und ist in praktisch allen relevanten Fällen so zu wählen. Denn gemäss den Beispielen in der ausführlichen Anmerkung zur Ziffer 10.2(12) in [5] gibt es kaum Versagen mit «leichten» Konsequenzen.

3.3. Modellierung

Für den Nachweis auf Ermüdung werden die Spannungen durch eine elastische Tragwerksanalyse unter Berücksichtigung der Nachgiebigkeit von Verbindungen bestimmt. Dies ist zwingend, weil unter den ermüdungsrelevanten Einwirkungen (Gebrauchslasten gemäss Abschnitt 3.2) keine plastischen Kraftumlagerungen auftreten. Die Norm SIA 265 [9] weist in Ziffer 4.4.2.2 zusätzlich darauf hin, dass Spannungsanteile infolge Einspannungen und Zwang, ebenso Sekundärwirkungen, verursacht durch Verschiebungen und Verzerrungen, im Modell angemessen zu berücksichtigen sind. Für ein Fachwerk bedeutet dies, dass die Knotenpunkte mit einer realistischen Biegesteifigkeit modelliert werden müssen. Im Gegensatz zur üblichen Bemessung im Grenzzustand der Tragsicherheit, wo sich Biegemomente (vielleicht) dank duktilen Verbindungsmitteln abbauen, verteilt sich die Kraft im Ermüdungsnachweis immer ungleichmässig auf eine Verbindungsmittelgruppe. Die Abbildung 14 zeigt schematisch, wie sich die Auswirkungen im massgebenden GSA ermitteln lassen.

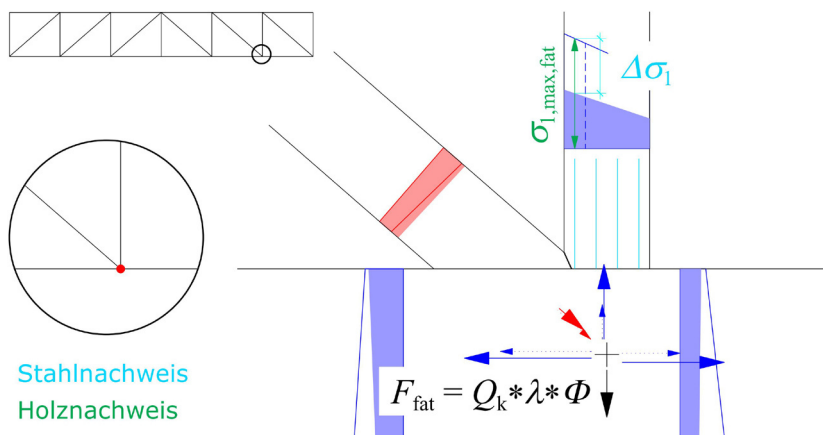


Abbildung 14: Spannungen für den Ermüdungsnachweis an einem biegesteif modellierten Fachwerkknoten.

Zur Berechnung der ermüdungswirksamen Last F_{fat} gibt es in Normen wie der SIA 261 [12] noch einen Schadensäquivalenzfaktor λ . Ob dieser nur für den (Beton-)Stahlnachweis oder auch für den Holznachweis Gültigkeit hat, ist sorgfältig zu evaluieren. Für Bemessungsbeispiele wird auf Michael Flach [13] und Ulrike Kuhlmann [14] verwiesen. Sicher zu berücksichtigen sind dynamische Beiwerte ϕ , wie sie beispielsweise die Ziffer 10.3.4 in [12] für Tragwerksteile in der Nähe von Fahrbahnübergängen definiert.

3.4. Eurocode 5

Die zweite Generation des Eurocode 5 hebt das bisher in einem informativen Anhang enthaltene Konzept für den Ermüdungsnachweis im Holzbau in den normativen Status. Die Methode unterscheidet sich erheblich vom Stahl- und Betonbau, weil unterschiedliche Parameter in die Bemessung einbezogen werden. Während die Nachweismethode in der aktuell noch gültigen Norm SIA 265 [9] ebenfalls auf der wirkenden Spannungsdifferenz $\Delta\sigma$ basiert, verwendet diejenige der FprEN 1995-1-1 [5] das Spannungsverhältnis R und die Maximalspannungen bzw. -kräfte.

Entgegen den Ausführungen im Abschnitt 3.1 sind die Ermüdungsparameter gemäss Tabelle 10.1 in [5] für lateral beanspruchte stiftförmige Verbindungsmittel progressiver als für axial beanspruchte eingeklebte Stäbe (BiR), wie die Abbildung 15 illustriert. Einerseits muss man zur Zeile 2 wissen, dass die Ermüdungsprüfungen an gedungenen Stabdübeln durchgeführt wurden. Diese Bemessung auf Lochleibungsversagen ist zwar zulässig und in gewissen Ländern üblich, jedoch inkompatibel mit der Ausgestaltung einer duktilen Verbindung ($D_s < 3$ nach SIA 256, Tabelle 20 [9]). Ausserdem wird in der Publikation [15] darauf hingewiesen, dass der Einfluss von Feuchtigkeitsschwankungen in den Prüfergebnissen nicht enthalten ist und dass der Effekt der Holzfeuchte in Zukunft wahrscheinlich berücksichtigt werden sollte. Andererseits wurde für die erstmalige Normierung der eingeklebten Stäbe (Zeile 3) eine bewusst konservative Festlegung gemacht, indem die Parameter für auf Schub beanspruchte Bauteile übernommen wurden. Wird das Thema Holzfeuchte ignoriert, bietet die Literatur auch Vorschläge zum Ermüdungsverhalten von eingeklebten Stäben, welche die Überlegungen zum Kraftfluss bestätigen (Zeile 1).

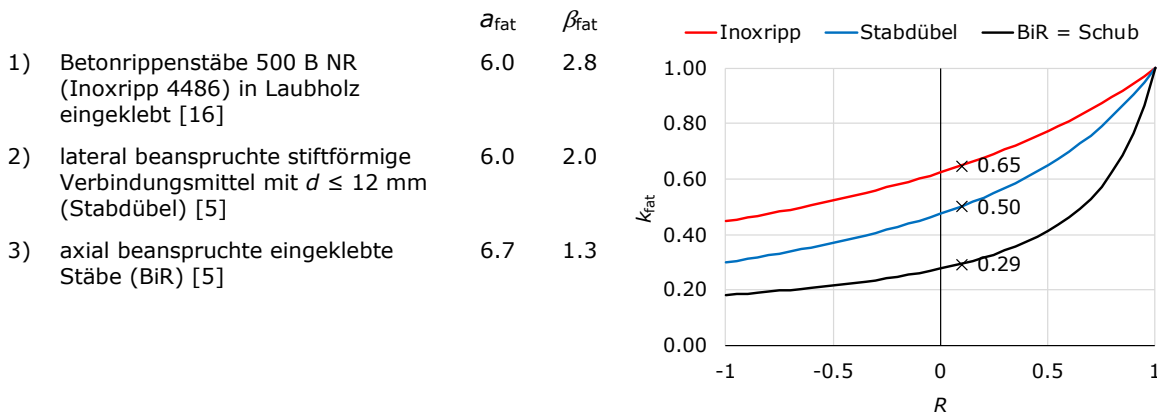


Abbildung 15: Vergleich des Ermüdungsbeiwerts k_{fat} für mit 2 Mio. Lastwechseln lateral belastete Stabdübel und für eingeklebte Anker mit axialer Beanspruchung in Funktion des Spannungsverhältnisses R .

In seinem Beitrag zur ICTB 2022 [17] zeigte K.A. Malo auf, dass die Formel für X gemäss Abbildung 10, zur Bestimmung der Steigung der Wöhlerlinie, nur begrenzt allgemeingültig ist und in einigen Bereichen offensichtlich fehlerhafte Werte liefert. Die beschriebenen Mängel der Parameter für Schubspannungen betreffen somit auch axial beanspruchte eingeklebte Stäbe. Die in Abbildung 16 gezeigten Kurven stellen ein Interaktionsdiagramm für statische Beanspruchung (x-Achse) und Wechselbeanspruchung (y-Achse) dar, wobei ein linearer Zusammenhang als konservativ angenommen werden darf. Nach dieser Logik liefert die Kalibrierung offensichtlich konservative Ergebnisse für kleine Lastwechselzahlen (bis $N = 10^6$), da die Kurven konkav verlaufen. Für grosse Lastwechselzahlen ist die Steigung der Festigkeitslinie teilweise positiv. Das würde bedeuten, dass mit zunehmender statischer Last eine grössere Wechsellast aufnehmbar wäre. Für eine Korrektur dieser Ungereimtheiten fehlten jedoch bisher die Ressourcen.

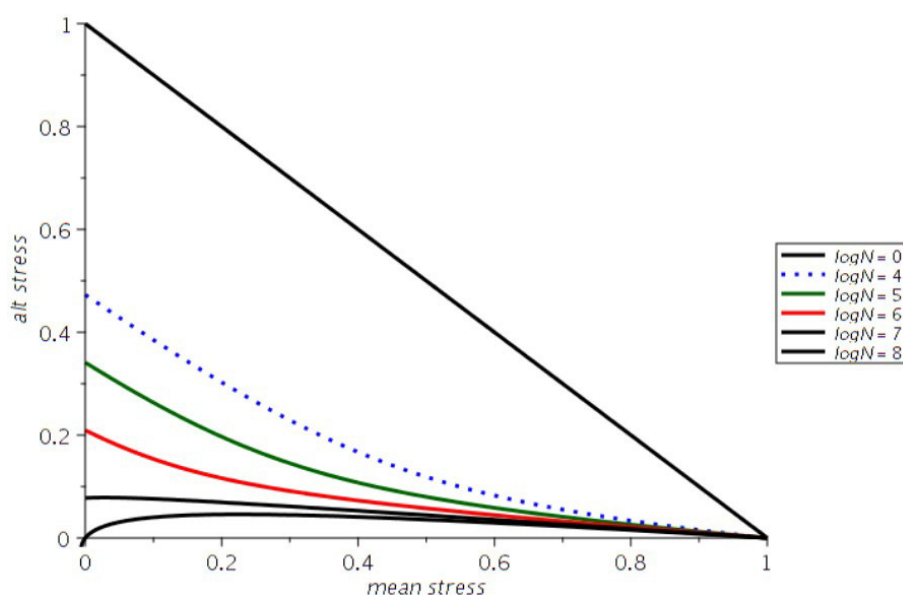


Abbildung 16: Konstante-Lebensdauer-Diagramme für Schubspannungen (und BiR) aus [17].

4. Fazit

Neuste Forschungsergebnisse zeigen, dass GSA-Verbindungen unter Ermüdungsbeanspruchung eingesetzt werden können, auch wenn eine Umgebung mit erhöhter Luftfeuchtigkeit angenommen wird (z. B. beim Bau von Strassenbrücken). Damit sich das Potential der Verklebung ausschöpfen lässt, müssen jedoch die Stahlteile (Stangen) ebenfalls für die Ermüdung optimiert sein.

Seit Jahren wird geschrieben, dass in der Thematik «Ermüdung im Holzbau» das Forschungspotential noch gross wäre. Das mit über 270'000 CHF nicht ganz so kleine Forschungsprojekt zeigt, dass Ermüdungsprüfungen ausgesprochen aufwändig sind. Verlockend ist es deshalb für Forschende und Industriepartner, hohe Prüfkräfte zu wählen, um schnelle und zahlreiche Ergebnisse zu erzielen. Damit befriedigt man jedoch nicht die Stimmen aus der Planung, welche noch mehr als $2 \cdot 10^6$ Lastwechsel fordern. Möge also der neue Eurocode 5 die ganze Holzbaubranche (Planung, Ausführung und Forschung) weiter voranbringen, damit zukünftig mehr personelle und finanzielle Ressourcen in Forschung und Normenarbeit fließen können.

5. Literatur

- [1] Aicher S., Christian Z. (2015). Ermüdungsverhalten von Holz und geklebten Holzbauteilen. In: 21. Internationales Holzbau-Forum IHF, Garmisch, Deutschland.
- [2] SN EN 12512:2001/A1:2005 Holzbauwerke – Prüfverfahren – Zyklische Prüfungen von Anschlüssen mit mechanischen Verbindungsmitteln, Zürich, Schweiz.
- [3] Tlustochowicz G., Serrano E., Steiger R. (2010). State-of-the-art review on timber connections with glued-in steel rods. *Materials and Structures* 44(5), 997-1020.
- [4] Steiger R., Serrano E., Stepinac M., Rajcic V., O'Neill C., McPolin D., Widmann R. (2015). Strengthening of timber structures with glued-in rods. *Construction and Building Materials* 97, 90-105.
- [5] FprEN 1995-1-1:2025 Design of timber structures, Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings; Formal Vote Version; Document CEN/TC 250/SC 5/N2259. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- [6] Steiger R., Zumbrunn-Maurer B. (2024). Bericht zum Projekt WHFF-CH 2022-10: Ermüdungsverhalten von in BSH eingeklebten Gewindestangen mit Einsatz im Brückenbau. <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=57787>
- [7] Maurer B., Gehri E., Strahm T., Steiger R., Affolter C. (2022). Fatigue strength of axially loaded steel rods bonded in European ash glulam. 4th International Conference on Timber Bridges ICTB. Biel/Bienne, Switzerland.
- [8] Steiger R., Zumbrunn-Maurer B., Kramer L., Strahm T., Gehri E. (2025) INTER/58-7-3: Fatigue behaviour of threaded rods bonded into glued-laminated timber for application in bridge construction. INTER Meeting Fifty-Eight, Istanbul, Turkey.
- [9] Gehri E., (2000) Klassische Verbindungen neu betrachtet. In: HOLZ ART 2000, Luzern, 17. Dreiländer-Holztagung, 43-50.
- [10] SIA 265:2021 Holzbau. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich, Schweiz.
- [11] EN 1990:2023 Eurocode – Basis of structural and geotechnical design. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- [12] SIA 261:2020 Einwirkungen auf Tragwerke. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich, Schweiz.
- [13] Flach M. (2012) Ermüdungsverhalten von Verbindungen im Holzbrückenbau. In: 2. Internationale Holzbrückentage, Bad Wörishofen, Deutschland.
- [14] Kuhlmann U., Kudla K., Mönch S. (2016) Holz-Beton-Verbundstrassenbrücken mit Kernen – Einfacher Nachweis für Ermüdungsbeanspruchung. In: 4. Internationale Holzbrückentage, Filderstadt, Deutschland.
- [15] Malo K. A., Holmestad A., Larsen P. (2006): Fatigue strength of dowel joints in timber structures. World Conference on Timber Engineering WCTE, Portland, Oregon, USA.
- [16] Bletz-Mühldorfer O., Diehl F., Bathon L., Myslicki S., Walther F., Grunwald C., Vallée T. (2018): Ermüdungsverhalten von eingeklebten Stäben. *Bauen mit Holz* (5). 30 - 35.
- [17] Malo K. A., Massaro F. M., Stamatopoulos H., (2022) Exploring fatigue rules for timber structures in Eurocode 5. 4th International Conference on Timber Bridges, Biel/Bienne, Switzerland.