

Eurocode 5 – Eingeklebte Gewindestangen

Robert Jockwer
Division of Structural Engineering,
Chalmers University of Technology
Göteborg, Schweden



Eurocode 5 – Eingeklebte Gewindestangen

1. Hintergrund

1.1. Entwicklungen in der 2. Generation des Eurocode 5

Im Rahmen des Mandats M/515, Phasen 3 und 4, für die Entwicklung der 2. Generation der Eurocodes waren die Arbeitsaufträge an das Projektteam SC5.T5 zur Entwicklung des Kapitels 11 «Verbindungen» für den zukünftigen Eurocode 5 beschrieben. Darin ist der Auftrag zum Entwurf von Bemessungsangaben für eingeklebte Gewindestangen enthalten. In seiner Arbeit griff das Projektteam dabei auch auf Dokumente und bestehende Arbeiten in der Arbeitsgruppe für Verbindungen» CEN TC250/SC5/WG5 und CEN TC250/SC5/Ad-Hoc «Bonded-in Rods» zurück. Dabei waren alle relevanten Aspekte zur Bemessung von eingeklebten Stäben im Blick, von den Bemessungsgrundlagen, Werkstoffeigenschaften, Bemessungsgleichungen bis hin zu Regelungen zur Ausführung und Qualitätssicherung. Im Entwurf des Kapitels 11 «Verbindungen» des Eurocode 5 sind nur die Angaben enthalten, die für die Bemessung von Verbindungen mit eingeklebten Stäben von direkter Bedeutung sind. Das Kapitel muss daher im Zusammenspiel des gesamten Normensystems mit Test-, Produkt- und Bemessungsnormen sowie den weiteren Regelungen zu Ausführung und Qualitätssicherung verwendet werden. Die Norm EN 17334 zur Ermittlung der Klebfugenfestigkeit und Eurocode 5 Teil 3 zur Ausführung sind dabei zu nennen.

In diesem Beitrag sind einige Hintergründe zu den in Kapitels 11 «Verbindungen» des zukünftigen Eurocodes 5 gemachten Regelungen hinsichtlich Bemessung und sowie den in Eurocode 5 Teil 3 gemachten Angaben zur Ausführung von eingeklebten Gewindestangen zusammengefasst. Die Angaben auf den folgenden Seiten sind noch Gegenstand von Diskussionen und Überarbeitungen und sollten nicht direkt zur Bemessung verwendet werden. Darüber hinaus können die Angaben unvollständig sein und allfällige Änderungen und Fehler sind vorbehalten!

1.2. Historische Entwicklung

In Holz eingeklebte Stahlstangen werden seit fast 50 Jahren als Verbindungs- und Aussteifungselemente in Holzkonstruktionen verwendet. Frühe Entwicklungen von eingeklebten Stäben sind in [4,24,48] beschrieben und lassen sich auf die Notwendigkeit zurückführen, hohe Kräfte in Holzbauteile einzuleiten, insbesondere auch in Richtung parallel zur Faser. Nach den ersten experimentellen Studien an eingeklebten Gewindestangen in den 1970er Jahren entwickelten sie sich zu spezialisierten Systemen für moderne Holzstrukturen weiter. Seitdem wurde die Entwicklung fortgesetzt, um das Tragverhalten zu optimieren, z.B. in Richtung eines zuverlässigeren und duktilen Versagens durch die Vermeidung von Spannungsspitzen an der Oberfläche der Holzelemente [57,66]. Beispiele sind dabei unter anderem Entwicklungen mit abgestuften Durchmessern der Stahlstangen, Bereichen mit dickeren Klebfugen, oder verjüngten Fließzonen in den Stahlstäben.

Im Englischen und Deutschen existieren verschiedene Bezeichnungen. So findet sich «Glued-in Rod», was allenfalls der eingeleimten Stange entspricht, sowie «Bonded-in Rod» wo sich das Äquivalent der eingeklebten Stange im Deutschen findet. Gerade in Hinblick auf das Ziel der Hochleistungsverbindungen ist die Bezeichnung «eingeklebte Stange» («Bonded-in Rod») passender und setzt sich von alten Typen eingeleimter Stäbe mit begrenzter Leistung und Fertigungsqualität ab. Darüber hinaus umfasst die «Bondline» neben der reinen Klebstoffdicke auch die Übergangs- und Verankerungsbereiche des Klebstoffs im Holz und den Fügeteilen.

1.3. Bestehende Regelungen zu eingeklebten Stäben

Erste Schritte in der Entwicklungen von Bemessungsregeln für eingeklebte Stäbe wurde in [48–50] berichtet und z.B. im Rahmen des so genannten GIROD-Projekts [5,62] fortgeführt. Während der Entwicklung der ersten Version des Eurocode 5 von 2004 war

beabsichtigt, Bemessungsvorschriften für eingeklebte Gewindestangen aufzunehmen. Während des weiteren Ausarbeitungsprozesses und der Diskussion kamen jedoch verschiedene Fragen, Unstimmigkeiten und Bedenken auf, die schließlich dazu führten, dass die Bemessungsvorschriften für eingeklebte Gewindestangen aus dem im Jahr 2004 publizierten Eurocode 5 gestrichen wurden.

Trotz des Fehlens einheitlicher europäischer Bemessungsrichtlinien werden eingeklebte Stäbe in verschiedenen Ländern und bei einer Vielzahl von Projekten erfolgreich eingesetzt. So konnten weitere Erfahrungen in der Anwendung gesammelt werden.

Regelungen zu eingeklebten Stäben sind in verschiedenen nationalen Normen und Handbüchern enthalten, wie u.a.:

- DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08 Abschnitt NA.11 (bzw. ehemaligen DIN 1052) [22,23]
- SIA 265:2012, Abschnitt 6.10 [54]
- Swedish Glulam Handbook Part 2 [59]
- CNR-DT 206-2007 Kapitel 7.10 [16]

Darüber hinaus existieren verschiedene Zulassungsdokumente für die Verwendung von eingeklebten Stäben, wie etwa:

- Z-9 1-705 2K-EP-Klebstoff WEVO-Spezialharz [20]
- Z-9.1-896 2K-PUR Klebstoff LOCTITE CR 821 PURBOND [21]
- Z-9 1-778 2K-EP-Klebstoff GSA-Harz [19]
- Z-9.1-791 Studiengemeinschaft Holzleimbau [18]
- Technische Bewertung 3/12-716 Societe SIMONIN SAS [17]

Seit kurzem werden auch Europäische Technische Bewertungen (ETA) für Produkte verschiedener Hersteller erstellt.

2. Grundlagen der Bemessung in Eurocode 5

Das Versagen von eingeklebten Gewindestangen kann im Grundwerkstoff Holz, im Stahl, im Klebstoff sowie in den Klebfugen zwischen Klebstoff und Holz als auch zwischen Klebstoff und Stahl auftreten. Für die Beurteilung des Versagensverhaltens ist dabei das unterschiedliche Verhalten des Materials an den verschiedenen Orten zu berücksichtigen. So ist ein Versagen in Holz und Klebstoff und in den Klebfugen größtenteils spröde und durch große Streuung geprägt, wohingegen ein Erreichen des Fließens im Stahl eher duktil ist und auch die Zugfestigkeit im Stahl eine sehr gut prognostizierbare Größe ist (sofern die genaue Stahlfestigkeit bekannt ist). Daher werden für die verschiedenen Versagensarten auch verschiedene Teilsicherheitsbeiwerte berücksichtigt.

Für ein Versagen im Holz, Klebstoff und der Klebfuge wird der allgemein empfohlene Teilsicherheitsbeiwert für Verbindungen mit $\gamma_M = 1,3$ vorgeschlagen. Für das Erreichen der Zugfestigkeit in Gewindestangen ist dagegen ein etwas geringerer Werte mit $\gamma_{M,2} = 1,25$ aus EN 1993-1-8:2005 vorgeschlagen. Ist das Fließen des Stahls maßgebend, wird $\gamma_{M,0} = 1,1$ vorgeschlagen, was zwischen Werten in EN 1993-1-1:2005, EN 1992-1-1:2004 (Betonstahl) und verschiedenen nationalen Anhängen (z.B. SN EN 1993-1-1-NA:2016) liegt.

3. Umgebungseinflüsse auf eingeklebte Gewindestangen

Der Tragwiderstand und das Langzeitverhalten von Verbindungen im Holzbau sind von den Umgebungs- und Randbedingungen am Einsatzort abhängig. Insbesondere die folgenden Parameter haben einen Einfluss und müssen für eingeklebte Gewindestangen berücksichtigt werden:

- Beanspruchungsdauer und zugehörige Holzfeuchte \Rightarrow Tragwiderstand
- Luft- und Holzfeuchte sowie Umgebungsbedingungen \Rightarrow Dauerhaftigkeit
- Holzfeuchteveränderungen \Rightarrow Feuchteinduzierte Spannungen
- Holzfeuchte und Temperatur bei der Verklebung \Rightarrow Ausführung und Qualitätssicherung

3.1. Einflüsse auf den Tragwiderstand

Eingeklebte Gewindestangen dürfen nur in Feuchtekategorie 1 und 2 eingesetzt werden. Bereits von Riberholt [50] wurde in den 80er Jahren bei Proben unter Langzeitbelastung im Aussenklima eine Halbierung der Auszugsfestigkeit im Vergleich zur Kurzzeitfestigkeit von trockenen Proben beobachtet und auch in [62] wird von einer deutliche Abnahme der Festigkeit bei hohem Feuchtigkeitsgehalt berichtet. Insbesondere bei faserparallel einklebten und axial beanspruchten Gewindestangen unter langen Lasteinwirkungsdauern ist dabei zu beachten, dass es nur wenige ähnliche Fälle gibt, in denen ein Scherversagen nach langer Zeit katastrophal wäre.

Neben der mittleren Feuchte sollte insbesondere auch die Schwankung der Holzfeuchte klein gehalten werden. Daher sollte das Holz stets auf eine Holzfeuchte nah am erwarteten, mittleren Wert am späteren Einsatzort konditioniert werden.

Bei der Bestimmung der Werte der Klebfugenfestigkeit gemäß EN 17334 werden Langzeitversuche mit zyklische Feuchtebeanspruchungen zwischen 8% und 20% gefahren. Dies repräsentiert etwa den maximalen Feuchtigkeitsgehalt in Nutzungskategorie 2 und einen durchschnittlichen niedrigen Wert in Nutzungskategorie 1. Es wurde daher festgelegt, dass diese im Versuch geprüften Feuchtebeanspruchungen eine entsprechende Holzfeuchteschwankung in der Anwendung von $\pm 3\%$ -MC in Feuchtekategorie 1 abdecken. Größere Schwankungen sollten durch sorgfältige Planung und Fertigung vermieden werden.

Gemäß [50] ist der Einfluss der Holzfeuchte auf den Tragwiderstand von rechtwinklig zur Faserrichtung eingeklebten Gewindestangen geringer, wobei in diesem Fall jedoch die großen Schwind- und Quellverformungen im Holz berücksichtigt werden müssen.

3.2. Einflüsse auf die Dauerhaftigkeit

Das Holz ist zwar normalerweise nicht hinsichtlich aggressiver salzhaltiger oder chlorierter Umgebungen sensibel, jedoch sind Verbindungen mit Stahlteilen diesbezüglich besonders gefährdet. Zwar sind die Stahlstangen durch den verwendeten Epoxidharz- oder PUR-Klebstoffe teilweise vor Korrosion geschützt, in den Anschlussbereichen ist dies aber nicht der Fall und für Bewehrungsstangen kann auch nicht von einem Schutz im basischen Milieu wie im Beton profitiert werden. Für den Einsatz in entsprechend aggressiven Umgebungen sollte daher eine geeignete Verzinkung oder (Duplex-) Beschichtung der Gewinde- oder Bewehrungsstangen vorgesehen werden.

3.3. Feuchteinduzierte Spannungen

Bei wechselnder Holzfeuchte kommt es zu großen Schwind- oder Quellverformungen im Holz, insbesondere rechtwinklig zur Faserrichtung. Dabei können Scherspannungen in der Klebfuge von eingeklebten Gewindestangen entstehen, insbesondere wenn diese unter einem Winkel zur Faserrichtung eingeklebt sind [37]. Einige Berechnungen zu den zu erwarteten Spannungen sind in [36] durchgeführt. Wie auch bereits für eingeschraubte Vollgewindestangen und Schrauben untersucht wurde, können diese Beanspruchungen theoretisch sogar zu einem Fließen im Stahl führen.

Ein Verfahren zur Berücksichtigung der feuchteinduzierten Spannungen in der Klebfuge wurde in [32] vorgeschlagen, hat sich jedoch nicht durchgesetzt. Generell sollte jedoch die zu erwartende Schwindverformung begrenzt werden. Die dazu notwendigen Schwind- und Quellwerte α für Massivholz für eine langfristige Änderung der Holzfeuchte unterhalb der Fasersättigung findet sich in diversen Regelwerken wie z.B. in [53].

Gerade beim Anschluss von Holzbauteilen an starre Anschlusspunkte, wie Stahl- oder Betonteile, sollte die Gefahr von feuchteinduzierten Querschnittsrissen besonders untersucht werden. In [14] wird die Möglichkeit der Verstärkung in diesem Fall beschrieben, wobei die Querschnittsverstärkung durch eingeklebte Gewindestangen in einem Abstand von etwa 50mm vom Hirnholzende und mit einer Querschnittsfläche von mindestens 1/25 der Querschnittsfläche der faserparallelen Gewindestangen im Hauptanschluss erfolgen sollte.

4. Materialeigenschaften

4.1. Holz

Gewindestangen sollten primär in Brettschichtholz, Konstruktionsvollholz, Funierschichtholz oder Brettsperrholz eingeklebt werden. Insbesondere in Brettsperrholz sollte auf eine Schmalseitenverklebung geachtet werden, um einen unkontrollierten Klebstoffverlust beim Verpressen zu vermeiden. Eingeklebte Gewindestangen in Vollholz sollten vermieden werden, da es gerade bei größeren Querschnitten häufiger zu Schwindrissen kommen kann. Gerade im Sanierungsbereich können Gewindestangen auch in gerissenes Vollholz eingeklebt werden, sofern die Risse verpresst sind bzw. die Mindestabstände zu den gerissenen Bereichen eingehalten werden.

4.2. Profilierte Stahlstangen

Es muss stets eine mechanische Verzahnung zwischen Stahlstab und Klebstoff bestehen, weshalb sich die Norm auf die Verwendung metrischer Gewindestangen oder Bewehrungsstahl beschränkt. Auf die reine Adhäsion zwischen Stahl und Klebstoff sollte sich daher nicht verlassen werden. In [50] wird dies damit begründet, dass «die Erfahrung gezeigt hat, dass eine gute und zuverlässige Verbindung zwischen Klebstoff und einer glatten Stahloberfläche solche Maßnahmen erfordert, die in der Praxis kaum jedes Mal hergestellt werden können». Gründe hierfür sind unter anderem mögliche Verunreinigung des Stahlstabes durch Fett o.ä. Ohne eine ausreichende Profilierung des Stahlstabes durch ein Gewinde oder einer Baustahlprofilierung würde der unzureichende Verbund zwischen Stahl und Klebstoff die zuverlässige Kraftübertragung gefährden. Doch selbst profilierte Stäbe sollten vor dem Verkleben entfettet und gründlich gereinigt werden. Die Auswirkungen einer unzureichenden Entfettung von Gewindestangen, die zu einer Ablösung des Gewindes der Stange und des Klebstoffs führt, werden in [44] diskutiert.

Der Durchmesser der Gewindestangen soll zwischen $d = 6 - 30\text{mm}$ liegen.

4.3. Klebstoff

Die Festigkeit der Klebefuge wird durch die Scherfestigkeit des Holzes und die Scherfestigkeit des Klebstoffs begrenzt. Die Scherfestigkeit von Epoxidklebstoffen liegt gemäß [29] im Bereich zwischen etwa 16 und 20 N/mm². Diese hohen Werte können nur beim Einsatz in Laubhölzern ausgenutzt werden [11]. Bei Nadelholz wird die Klebefugenfestigkeit im allgemeinen durch die Scherfestigkeit des Holzes begrenzt [6] und die Klebefuge kann nur bis zu einer Scherfestigkeit von etwa 6 bis 8 N/mm² ausgenutzt werden.

Bei auf Zug beanspruchten, faserparallel einklebten Gewindestangen tritt das Versagen durch einen unregelmäßigen Ausbruchzylinders in Abhängigkeit der lokalen Festigkeitseigenschaften des Holzes auf. Für die Bemessung wird daher eine effektive Klebfugenfestigkeit verwendet, die für die individuelle Kombination aus Klebstoff, Holz und Gewindestangen- bzw. Bewehrungstyp gemäß EN 17334 [15] bestimmt werden muss.

Dabei wird eine Mindestanforderung an die Klebfugenfestigkeit gestellt, die den Werten aus der DIN EN 1995-1-1/NA:2010 [23] entnommen ist. Diese Mindestwerte können daher insbesondere auch für die Vorbemessung verwendet werden. Je nach gewählten Klebstoff-Produkt können jedoch auch vorteilhaftere Werte verwendet werden.

Die in EN 17334 beschriebene Abhängigkeit der Klebfugenfestigkeit von der eingeklebten Länge wurde nach der DIN 1052 gewählt. In [1] werden verschiedene andere Funktionen für die Reduktion der Klebfugenfestigkeit in Abhängigkeit von der Einklebelänge diskutiert und mit Versuchsergebnissen abgeglichen.

Für parallel und rechtwinklig zur Faser eingeklebte Gewindestangen wird gemäß [7,50] die gleiche Klebfugenfestigkeit angenommen. In früheren Entwürfen der 2004er Version des Eurocode 5 wurde jedoch für rechtwinklig zur Faser eingeklebte Gewindestangen eine 10%ige Reduktion vorgenommen. Andere Untersuchungen deuten jedoch an, dass dies eine sehr konservative Annahme ist und der Einfluss der Klebfugenlänge rechtwinklig zur Faser deutlich geringer ist.

5. Tragwiderstand

5.1. Versagensarten

Eingeklebte Stäbe beruhen auf der Wechselwirkung zwischen dem Grundmaterial Holz, dem Stahlstab und dem Klebstoff. Die Wirksamkeit der Verbindung hängt von der Verbindung zwischen dem Holzwerkstoff und dem Stahlstab mit Hilfe des Klebstoffs ab. Eine sorgfältige Planung, Bemessung, Vorbereitung, Ausführung und Qualitätskontrolle sind erforderlich, um die Integrität und den Tragwiderstand der eingeklebten Gewindestange während der gewünschten Lebensdauer des Bauwerks zu gewährleisten. Im Zusammenspiel von Holz, Klebstoff und Gewindestange können verschiedene Versagensarten auftreten. Für axial beanspruchte eingeklebte Gewindestangen wurden diese z. B. in [56,61] wie folgt diskutiert:

- a) Zugversagen des Stabes
- b) Druckversagen (Knicken) des Stabes
- c) Versagen des Klebstoffs innerhalb der Klebfuge oder in Verbindung zu Stab und Holz
- d) Scherversagen des Holzes in der Nähe der Klebfuge
- e) Aufspalten des Holzes ausgehend von den eingeklebten Gewindestangen
- f) Versagen des Holzes in der Umgebung der Verbindung (z.B. Nettoquerschnitts oder Blockscherversagen in einer Verbindung mit mehreren eingeklebten Gewindestangen)

Die Versagensarten a), c), d) und auch e) und f) werden in der überwiegenden Anzahl der in der Literatur berichteten Versuche beobachtet. Die Versagensart a) wird durch den Stahlquerschnitt bestimmt, die Versagensart c) wird durch die Klebfugenfestigkeit gemäß EN 17334 beeinflusst, und die Versagensarten d)-f) treten im Holz auf. Der Versagensart b) ist nur bei Druckbeanspruchungen relevant, wie z.B. in [44] beschrieben.

5.2. Axialer Tragwiderstand des eingeklebten Stabes

Der axiale Tragwiderstand einer eingeklebten Gewindestange wird als das Minimum des Tragwiderstands der Klebfuge und der Gewindestange berechnet. Der maßgebende Tragwiderstand der Gewindestange ist dabei je nach Stahlqualität entweder durch die Streckgrenze oder die Zugfestigkeit beschränkt. Der Tragwiderstand der Klebfuge wird neben die Klebfugenfestigkeit und auch durch die Dehnungen in der Klebfuge begrenzt, da die Versagensdehnung im Holz nicht überschritten werden dürfen. In [27] wird für die Klebfuge eine maximale Dehnung von 2,4‰ für faserparallel eingelegte Gewindestangen in Nadelholz angegeben, was einer effektiven Spannung von etwa 500 N/mm² entspricht. Diese maximale Dehnung und daraus folgende Spannung ist vor allem für Gewindestangen höherer Festigkeiten und Klassen maßgebend. So können zum Beispiel 8.8 Gewindestangen unabhängig von der Klebfugenlänge in Nadelholz nicht mehr voll ausgenutzt werden, weshalb diese für duktile Verbindungen nicht geeignet sind.

Bei der Bestimmung des axialen Tragwiderstands und der entsprechenden Ausbildung der Verbindung sollten die Überlegungen zur Duktilität beachtet werden. So stellt allein das Fließen der Gewindestange eine duktile Versagensart dar, die ausreichend Potential zur Lastumlagerung zwischen Gewindestangen innerhalb einer Verbindung aber auch in der Gesamtstruktur erlaubt. Um einen duktilen Versagensmodus zu gewährleisten, muss eine ausreichende Kapazitätsreserve für den spröden Versagensmodus vorhanden sein. Wie in [29,46,62] beschrieben, ist bei den .8er Stahlsorten und generell bei hohen Stahlfestigkeiten Duktilität schwerer zu erreichen und eine ausreichende Kapazitätsreserve ist zu berücksichtigen, um eine mögliche unbeabsichtigte Überfestigkeit der Gewindestangen abzudecken. Dieses Thema einer möglichen unbeabsichtigten Überfestigkeit des Stahls im Vergleich zu den deklarierten Werten wurde z.B. in [45] diskutiert.

Bei der Bestimmung der Kapazitätsreserve, um ein duktiles Versagen des Stahlstabes zu erreichen, muss die relativ große Streuung in der Klebfugenfestigkeit und die weitaus geringere Streuung in den Stahlfestigkeiten berücksichtigt werden. Dafür ist in [29] die folgende Anforderung angegeben:

$$F_{R,dukt,95\%} \leq F_{R,spröd,5\%}$$

Darin gibt $F_{R,dukt,95\%}$ den 95%-Fraktilewert des duktilen Versagensmechanismus an (d.h. das erwünschte Fließen in der Gewindestange) und $F_{R,spröd,5\%}$ den 5%-Fraktilewert (charakteristischen Wert) des spröden Versagensmechanismus (z.B. die Klebfugenfestigkeit). Da der 95%-Fraktilewert der Streckgrenze in den Bemessungsnormen nicht definiert ist und um unerwünschte Überfestigkeiten im Stahl zu erkennen und zu vermeiden, müssen hierfür entsprechende Zugversuche an den eingesetzten Gewindestangen durchgeführt werden. Sofern die Streckgrenze der Gewindestangen ausreichend genau bekannt ist, kann die Anforderung an die Duktilität auch durch einen Sicherheitsfaktor berücksichtigt werden. Gemäß [31] können in der Literatur für verschiedene Verbindungsarten und Konstruktionen Verhältniswerte von $F_{R,spröd}/F_{R,dukt} \approx 1,2 - 2,1$ gefunden werden. In [28,38] ist ein Wert von $F_{R,spröd,d}/F_{R,dukt,d} \approx 1,6$ angegeben, weshalb ein ähnlicher Wert gewählt wurde.

In [39] wird über die Bemessung von eingeklebten Gewindestangen hinsichtlich Duktilität durch [55,64] gesagt: «Im Wesentlichen haben sie uns gezeigt, dass wir, wenn wir die erforderliche Einklebelänge festlegen, die ein Fließen des eingeklebten Stabes bewirkt, und wenn wir diese Einklebelänge in unseren Entwürfen noch überschreiten, wir die Verbindungen so entwerfen können, als ob sie Stahlverbindungen wären». Dies gibt das Potential wieder, das in der Bestrebung hinsichtlich duktiler Versagensmechanismen liegt. Für druckbeanspruchte, eingeklebte Gewindestangen kann auf den Bemessungsansatz wie für druckbeanspruchte Schrauben zurückgegriffen werden. In [37,50] wird generell empfohlen, eine Druckspannung von 400 N/mm^2 in den Gewindestange nicht zu überschreiten, um Knicken zu vermeiden.

5.3. Holzversagen parallel zur Faserrichtung

Neben dem Tragwiderstand der einzelnen Gewindestange muss sichergestellt werden, dass die zu übertragende Kraft auch im umgebenden Holzteil aufgenommen werden kann und nicht durch dieses beschränkt wird. Für eine Gruppe von eingeklebten Gewindestangen kann dabei gemäß [50] die Zugfestigkeit in der effektiv beanspruchten Fläche im Holzteil hinter den Gewindestangen betrachtet werden. Diese effektiv beanspruchte Fläche einer Gruppe von faserparallel eingeklebten Gewindestangen wird dabei gemäß [29,50,62] pro Gewindestange durch das Minimum aus den vorhandenen Abständen und der Fläche $36 \cdot d^2$ begrenzt. Die Fläche von $36 \cdot d^2$ entspricht dabei einem Kraftausbreitungswinkel von ca. 15° bei einer eingeklebten Länge von $10d$.

Das Holzversagen bei faserparallel eingeklebten und auf Zug beanspruchten Gewindestangen kann gemäß [27] durch eine Kombination aus Schub- und Querkzugversagen beschrieben werden. Eine Vermeidung des Holzversagens kann dabei sowohl durch Querkzugbewehrung als auch durch die Verwendung eines unverklebten Bereiches der eingeklebten Gewindestange am Hirnholzende erreicht werden.

- Die Querkzugbewehrung beeinflusst die hohen lokalen Spannungen im Anschlussbereich kaum, erhöht aber die Querkzugfestigkeit und verhindert Aufspalten.
- Die Rückversetzung der Klebfuge durch einen unverklebten Bereich hat einen signifikanten Einfluss auf den Spannungszustand im Anschlussbereich: Die maßgebenden Querkzugspannungen nehmen deutlich ab, wohingegen die Schubspannungen leicht ansteigen. Empfohlen wird in [27] eine unverklebte Länge l_{nb} mindestens 30% der Klebfugenlänge l_b . Im Normenentwurf wird eine unverklebte Länge $l_{nb} \geq 5d$ gefordert.

Die folgenden, allgemeinen Empfehlungen zur Vermeidung des Holzversagens in Verbindungen mit eingeklebten Gewindestangen sind in [27] beschrieben:

- Ein optimales, ausgeglichenes Verhältnis der Steifigkeiten $E \cdot A$ von Holz und Stahl reduziert die Spannungsspitzen am äußeren Ende der eingeklebten Gewindestangen.
- Ein optimaler Kraftfluss ins gesamte Holzbauteil wird erreicht, indem die ähnlich beanspruchten Gewindestangen möglichst gleichmäßig über den Querschnitt des zu verbindenden Holzes verteilt werden.

Es werden die folgenden Vorschläge zur Anschlussoptimierung in [27] gemacht:

- Kleinere Gewindestangen wie etwa M10-M14 sollten bevorzugt werden.
- Übermäßig große Einbindelängen sollten vermieden werden, um Spannungsspitzen zu reduzieren und höhere mittlere Scherspannungen in der Klebfuge zu erzielen.

- Für eine gleichmäßige Krafteinleitung durch eine größere Anzahl von Stäben müssen diese Stäbe eine ausreichende Duktilität aufweisen, was durch das Herstellen von speziellen Fließbereichen erreicht werden kann.

5.4. Holzversagen in einem Winkel zur Faserrichtung

Werden Kräfte durch eingeklebte Gewindestangen unter einem Winkel zur Faserrichtung in ein Bauteil eingeleitet, so ist die Gefahr des Querkzugversagens im Holz und Aufreißen am Ende der Gewindestangen zu beachten. Der bekannte Bemessungsansatz für Querschlüsse kann dafür verwendet werden, wobei die pro Gewindestange effektiv aktivierte Bauteilbreite nach [29] nicht mehr als $b_{ef} \leq 6d$ beträgt. Indem bei angehängten Lasten die Gewindestangen bis auf mindestens 70% der Trägerhöhe hinaufgeführt werden, kann gemäß [63] ein Großteil der Lasten durch Druck in den Träger eingeleitet werden und damit ein Aufreißen oftmals vermieden werden. Für den Einsatz als Querkzugverstärkung in gekrümmten Trägern empfiehlt [63] die Verwendung von eingeklebten Gewindestangen Durchmesser von $d = 10 - 12\text{mm}$ und einer Länge von mindestens 80% der Balkenhöhe (eingeklebt von der Biegedruckseite).

Wenn Lasten zwischen benachbarten eingeklebten Gewindestangen durch das Holz übertragen werden sollen, müssen gemäß [29] die Schubspannungen in einem von den Stangen aktivierten, effektiven Scherfeld betrachtet werden, das pro Gewindestange eine Breite von $b_{ef} \leq 6d$ einnimmt.

5.5. Rechtwinklig zur Stabachse beanspruchte Gewindestangen

Rechtwinklig zur Stabachse beanspruchte Gewindestangen zeigen das für Stabdübel typische Tragverhalten in Abhängigkeit der Lochleibungsfestigkeit des Holzes und Biegemomentes der Gewindestangen. Von [51] wurde jedoch bei rechtwinklig zur Faserrichtung eingeklebten Gewindestangen ein höherer Tragwiderstand im Vergleich zu Stabdübeln beobachtet. Dies wurde vor allem auf die durch die Verklebung hervorgerufene bessere Kraftübertragung der Gewindestange im Bohrloch zurückgeführt. Der Anstieg ist bei rechtwinklig zur Faser beanspruchten Gewindestangen grösser als bei parallel zur Faser beanspruchten. [37] empfiehlt daher eine Erhöhung der Lochleibungsfestigkeit um 25% für rechtwinklig zur Stabachse beanspruchte und rechtwinklig zur Faserrichtung eingeklebte Gewindestangen. Dabei wird die Lochleibungsfestigkeit mit dem Nenn Durchmesser der Gewindestangen berechnet.

Bei faserparallel eingeklebten und rechtwinklig zur Stabachse beanspruchten Gewindestangen ist dagegen ein gegenteiliger Effekt zu beobachten. So bieten die auf Querdruck und Rollschub beanspruchten Holzfasern nur einen geringen Widerstand, weshalb die Lochleibungsfestigkeit auf 10% des oben genannten Wertes reduziert wird. Dies ist eine konservative Abschätzung der in [25] beschriebenen Versuchsergebnisse. Die unverklebte Länge der Gewindestange und auch eine Exzentrizität der Krafteinleitung müssen bei der Bestimmung des Tragwiderstands besonders berücksichtigt werden. Dazu sind im neuen Kapitel «Verbindungen» entsprechende Ansätze angegeben, die in [8] beschrieben sind.

5.6. Verbindungen mit mehreren Stäben

Aufgrund der sehr hohen Steifigkeit der geklebten Verbindungen können eingeklebte Gewindestangen eine Umverteilung der Lasten nicht ohne weiteres gewährleisten, es sei denn, die Gewindestangen selbst geben nach. Wenn die Streckgrenze der Gewindestangen jedoch höher ist als der Tragwiderstand in der Klebfuge des einzelnen Stabes, dann kann es bei einer ungleichmäßigen Belastung in einer Gruppe von Verbindungselementen zu einem vorzeitigen spröden Versagen einzelner Gewindestangen kommen.

Insbesondere bei Verbindungen mit mehreren gleichzeitig beanspruchten Stäben ist daher eine hohe Duktilität der Stäbe erforderlich, um einen Ausgleich und eine Umverteilung der Last zu ermöglichen. Dies wurde eindrücklich in [13,30] für Zuganschlüsse gezeigt. Größere Versuchsreihen mit Mehrfachverbindungen wurden in [46] beschrieben, wobei der Einfluss von niedriger und hoher Stahlqualität auf den Versagensmodus, die Kapazität und die Duktilität untersucht wurden. In [58] wird festgestellt, dass die Verwendung von «Baustahl sowie mehr Stäbe mit kleinerem Durchmesser wirksame Maßnahmen zur Erhöhung der Duktilität der Verbindung sind».

Eine Abminderung für den Tragwiderstand infolge ungleichmäßiger Kraftverteilung wird von [63] auf Grundlage der sowjetischen Norm von 1982 angegeben. Dort wird der Tragwiderstand infolge ungleichmäßiger Kraftverteilung zwischen den Stäben um 10% für 2 Stäbe und 20% für 3 Stäbe in einer Reihe parallel zur Faser angewandt. Dieser Koeffizient verringert sich um 0,1, wenn die Stäbe in zwei Reihen (senkrecht zur Faser-richtung) angeordnet sind. In [14] wird eine Reduktion des Tragwiderstands für «eng beieinanderliegende» Stäbe vorgeschlagen: für 1 oder 2 Stäbe kann der volle Tragwiderstand ausgenutzt werden, für 3 oder 4 Stäbe muss dieser um 10% reduziert werden, für 5 oder 6 Stäbe um 20%. Außerdem wird empfohlen, bei Gruppen von Gewindestangen deren Enden um mindestens 75 mm zu versetzen, um das Risiko eines Holzversagens aufgrund von Spannungskonzentrationen an den Stabenden zu minimieren. Für Eurocode 5 wird eine Reduktion um 10% für 3-4 Stäbe und 20% für mehr als 5 Stäbe vorgeschlagen, sofern eine gleichmäßige Kraftverteilung nicht garantiert werden kann.

5.7. Steifigkeit und Verschiebungsmodul

Axial beanspruchte eingeklebte Gewindestangen zeigen durch die schlupflose Verklebung eine sehr hohe Steifigkeit und Verschiebungsmodul. Verschiedene Zulassungen bezeichnen Verbindungen mit eingeklebte Gewindestange daher generell als steif.

Eine Herausforderung bei der Bestimmung des Verschiebungsmodul im Versuch stellt die richtige Anordnung der Messeinrichtung dar, um die maßgebende Verformung auch richtig zu messen. So hat die freie, unverklebte Länge der Gewindestange einen bedeutenden Anteil an der Gesamtverformung und im Versuch muss der Abstand zu den Referenzpunkten im Holz berücksichtigt werden. Es finden sich verschiedene Quellen mit Messwerten in der Literatur [33–35,44,52,65]. In [33,34] wird ein allgemeiner Verschiebungsmodul von 100 kN/mm vorgeschlagen. Dies ist ein ähnlicher Wert wie der in der Zulassung von Simonin/Ducret [17] mit 71 kN/mm. Diese Werte liegen etwas höher als die von [10] für eingeschraubte Gewindestangen ermittelten Verschiebungsmodule, welche die Grundlage für den Ansatz im neuen Kapitel «Verbindungen» für Eurocode 5 darstellen.

6. Allgemeine Konstruktionsanforderungen

6.1. Minimale und maximale Klebfugenlängen

In den Bemessungsangaben im neuen Kapitel «Verbindungen» für Eurocode 5 sind verschiedene Mindest- und Maximallängen der Klebfugenlänge von eingeklebten Gewindestangen angegeben. Die Mindestlängen von $0,4d^2$ und $8d$ (es ist der größere Werte zu wählen) beziehen sich dabei auf das erforderliche Minimum bei axialer Beanspruchung bzw. das erforderliche Minimum bei Beanspruchung rechtwinklig zur Stabachse. Dabei ist es angestrebt zum einen ein allzu sprödes Versagen in der Klebfuge und zum anderen die Ausbildung eines Fließgelenks in der Gewindestange zu gewährleisten. In der Literatur finden sich dabei eine Vielzahl von verschiedenen Angaben zu diesen Mindestlängen, die alle einen ähnlichen quadratischen und linearen Ansatz verwenden.

Neben diesen Mindestlängen sind auch maximale rechnerisch ansetzbare Längen angegeben. Aufgrund der Spannungskonzentration an den Enden der Klebfuge, nimmt die Traglaststeigerung mit zunehmender Klebfugenlänge ab. Daher ist die rechnerisch ansetzbare Länge gemäß [26,32] auf das Minimum von $40d$ und 1000mm beschränkt. Größere Längen können z.B. für Verstärkungen ausgeführt, nicht aber rechnerisch angesetzt werden.

6.2. Abstände

Grundsätzlich ist es oft das Ziel die Gewindestangen im Holzquerschnitt möglichst eng anzuordnen, um eine umso größere Kraft einleiten zu können und die Verbindung umso effizienter zu machen. Der dabei zu erzielende Tragwiderstand der Verbindung ist jedoch durch das Versagen im Holz infolge Aufspaltens begrenzt. Die Abstände zwischen den Stäben müssen daher ausreichend groß gewählt sein, um ein duktilen Versagen in der Gewindestange vor dem Aufspalten im Holz zu gewährleisten.

Verschiedene Zwischen- und Randabstände wurden z.B. in [40,50,63] angegeben. Eine Zusammenfassung der geforderten Abstände aus verschiedenen Normen und Richtlinien findet sich in [56]. Der Einfluss von kleinen Zwischenabständen wurde in [9] untersucht,

und für Abstände $a_4 \geq 2,5d$ wurde keine Verringerung des axialen Tragwiderstands beobachtet. Ähnliche Beobachtungen wurden in [57] für Verbindungen mit einer rückversetzten Klebfuge gemacht. Die Ergebnisse von [9] sind in DIN 1052 [23] eingeflossen. Für die Angaben zu den Abständen im neuen Kapitel in Eurocode 5 wurde ein abgestuftes Vorgehen gewählt: Die allgemeinen, eher großen Abstandswerte (mit $a_2 \geq 5d$) sind aus [23] entnommen und gelten generell für alle Klebstoffe mit einer Klebfugenfestigkeit von nicht mehr als 150% des Mindestwertes (aus [23]). Falls die Klebfugenfestigkeit den angegebenen Mindestwert nicht übersteigt, dürfen die Abstände auf die in [18] angegebenen Werte (mit $a_2 \geq 3,5d$) reduziert werden. Wird eine, wie in [57] beschriebene, unverklebte Länge von $l_{nb} \geq 5d$ vorgesehen, können das Risiko des Aufspaltens deutlich verringert werden und die geringen Abstände auch bei einer bis zu 25% höheren Klebfugenfestigkeit eingesetzt werden. Dies steigert die Effizienz der Verbindung deutlich! Ein mögliches Netto-Querschnitts- oder Blockschersversagen ist unabhängig davon zu kontrollieren.

6.3. Ausführung und Qualitätssicherung

Geklebte Verbindungen sind sehr anspruchsvoll in der Ausführung, da bereits kleine Fehler und Mängel in der Herstellung den Klebverbund entscheidend beeinträchtigen können. Es ist daher auf eine gewissenhafte und genaue Produktion und Qualitätssicherung zu achten. Die Auswirkungen verschiedener Produktionsmängel auf den Tragwiderstand wurden unter anderem von [47] genauer untersucht. Es wurde festgestellt, dass unzureichende Verpressung und Hohlräume entlang der Klebfuge den größten Einfluss auf die Reduzierung des Tragwiderstands haben. Andere Mängel sind z.B. verbleibende Holzspäne im Bohrloch oder unzureichend entfettete Gewindestangen.

Neben den Angaben zur Bemessung von eingeklebten Gewindestangen im neuen Kapitel «Verbindungen» sind daher auch die Regelungen zur Ausführung und Qualitätssicherung im entsprechenden Teil der Norm einzuhalten. Detaillierte Informationen über die relevanten Parameter bei der Herstellung von eingeklebten Gewindestangen ist unter anderem in [56] aufgeführt. In den Regelungen zur Ausführung sind daher die folgenden Kontrollen durchgeführt werden:

- Mischungsverhältnis:
 - Abwiegen der Komponenten
- Vollständige Füllung des Raums zwischen Bohrloch und Stange:
 - Berechnung der benötigten Sollmenge des Klebstoffs
 - Anmischen des benötigten Klebstoffs unter Berücksichtigung eines Überschusses gemäß den Richtlinien des Klebstoffherstellers;
 - Visuelle Kontrolle der vollständigen Füllung des Bohrlochs und Überprüfung, dass mindestens die Sollmenge aufgetragen wurde
- Kontrolle der relativen Luftfeuchtigkeit und Temperatur bei der Verklebung:
 - Messung der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit
 - Messung der Holzfeuchte und Temperaturen aller Bauteile bei der Herstellung
- Aushärtung:
 - Überprüfung der Aushärtung gemäß den Anweisungen des Klebstoffherstellers
- Auszugsversuch:
 - Überprüfung der Klebfugenfestigkeit

Je nach Einsatz der eingeklebten Gewindestangen in Bauwerken mit verschiedener Schadenskonsequenz können die verschiedenen Anforderungen an die Produktion, Ausführung und Überwachung klassifiziert werden:

Anforderung	Beispiel für Anwendungen
Höher	Gruppen von faserparallel eingeklebten Gewindestangen mit höherer Komplexität (z.B. große Anzahl Gewindestangen, kombinierte Axial-, Quer-, und/oder Momentenbeanspruchung) in: <ul style="list-style-type: none"> – Rahmenecken – Biegesteifen Verbindungen von Trägern und Stützen – Fachwerke

Normal	<p>Kleine Gruppen ($n \leq 4$) von fasernparallel eingeklebten Gewindestangen mit ausschließlich axialer Beanspruchung:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Wandverankerung – Zuganker <p>Schräg zur Faser eingeklebte Gewindestangen mit höherer Komplexität:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Holz-Beton-Verbund – Schubverstärkung <p>Gewindestangen mit ausschließlicher Querbeanspruchung:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Konsolen
Geringer	<p>Rechtwinklig zur Faser verlaufende Verstärkungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Querdruckverstärkung an Auflagern und Lasteinleitung – Querzugverstärkung in Verbindungen und gekrümmten Trägern – Verstärkung an Ausklinkungen und Durchbrüchen – Verbindungen mit einzelnen Gewindestangen parallel und rechtwinklig zur Faserrichtung – Lagesicherung z.B. von Pfettenauflagern auf Stützen

7. Weitere Herausforderungen

Besondere Bemessungssituationen für eingeklebte Gewindestangen, wie die Thematik der Ermüdung oder das Verhalten unter seismischen Beanspruchungen, sind bisher noch nicht zufriedenstellend im neuen Entwurf des Eurocode 5 berücksichtigt.

Erste Entwicklungen und Untersuchungen zur Ermüdung von eingeklebten Gewindestangen wurden in [2,3] beschrieben. Verschiedene Versagensarten werden in [60] diskutiert und neuere Untersuchungen zu eingeklebten Stäben in Laubholz wurden von [12,41–43] durchgeführt. Es wurden verschiedene hochfeste Stahlstangen, Inox und Bewehrungsstäbe getestet und Ermüdungsparameter für die Stahlstangen abgeleitet.

Unter seismischen Beanspruchungen stellt die Quantifizierung der in diesen Fall tatsächlich vorhandene Duktilität sowie die zu erwartende Abnahme des Tragwiderstands und des Verformungsvermögens mit zunehmenden Beanspruchungszyklen eine besondere Herausforderung dar. Erste Untersuchungen dazu sind in u.a. [44,46] zu finden.

Es findet sich also noch bedeutender Forschungsbedarf!

8. Zusammenfassung

Im neuen Kapitel «Verbindungen» für die 2. Generation des Eurocode 5 sind umfassende Angaben und Regelungen zur Bemessung von Verbindungen mit eingeklebten Stäben enthalten. Zusammen mit Angaben zu Test-, Produkt-, und Ausführungsnormen umfassen diese das gesamte Zusammenspiel von Werkstoffeigenschaften, Bemessungsgleichungen bis hin zu Regelungen zur Ausführung und Qualitätsüberwachung. Damit leistet das Kapitel einen Beitrag zu leistungsfähigen Verbindungen in effizienten Holztragwerken.

Nichtsdestotrotz besteht weiterhin großes Potential zur Weiterentwicklung der Verbindungstechnologie zur Erreichung hoher Tragwiderstände, zuverlässigen Tragverhaltens, sowie vorteilhaften Verformungsverhaltens. Darüber hinaus müssen auch Bemessungsansätze weiterentwickelt werden um die komplexen Versagensmechanismen in den Verbindungen, kombinierte Beanspruchungen, spröde Versagensmechanismen im Holz, oder das Verhalten in neuen Materialien besser zu berücksichtigen.

9. Literatur

- [1] S. Aicher and G. Stapf. 2017. Eingeklebte Stahlstäbe – state-of-the-art – Einflussparameter, Versuchsergebnisse, Zulassungen, Klebstoffnormung, Bemessungs- und Ausführungsregeln. In *Internationales Holzbau-Forum (IHF 2017)*, Garmisch-Partenkirchen, Germany.
- [2] R. J. Bainbridge, C.J. Mettem, K. Harvey, and M. P. Ansell. 2000. Fatigue performance of bonded-in rods in glulam, using three adhesive types. In *Proc. of the CIB-W18 Meeting 33*, Delft, The Netherlands, CIB-W18/33-7-12.

- [3] R. Bainbridge, C. Mettem, K. Harvey, and M. Ansell. 2002. Bonded-in rod connections for timber structures – development of design methods and test observations. *International journal of adhesion and adhesives* 22, 1 (2002), 47–59.
- [4] A. Baumeister, H. Blumer, H. Brüninghoff, J. Ehlbeck, B. Koehlen, P. Köster, G. Maier, K.-H. Meyer, D. Steinmetz, and J. Wenz. 1972. Neuere Karlsruher Forschungsarbeiten und Versuche im Ingenieurholzbau. *Bauen mit Holz* 74, 6 (1972), 298–317.
- [5] C. Bengtsson and C.-J. Johansson. 2002. *GIROD-Glued in rods for timber structures. SMT4-CT97-2199*.
- [6] A. Bernasconi. 1996. Tragverhalten von Holz senkrecht zur Faserrichtung mit unterschiedlicher Anordnung der Schub- und Biegearmierung. Doctoral Thesis. ETH Zurich. DOI:<https://doi.org/10.3929/ethz-a-001616146>
- [7] H.J. Blaß, O. Eberhart, J. Ehlbeck, and M. Gerold. 1996. *Wirkungsweise von eingeleimten Gewindestangen bei der Aufnahme von Querkugkräften in gekrümmten Biegeträgern und Entwicklung von Bemessungsgrundlagen, Teil 3*. Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abteilung Ingenieurholzbau, Universität Fridericiana Karlsruhe, Karlsruhe, Germany.
- [8] H.-J. Blaß, J. Ehlbeck, H. Kreuzinger, and G. Steck. 2005. *Erläuterungen zu DIN 1052: 2004-08. Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken. 2.Aufl. inkl. Originaltext der Norm*. Bruderverlag, Karlsruhe, Germany.
- [9] H.J. Blaß and B. Laskewitz. 2001. *Glued-in Rods for Timber Structures: Effect of Distance Between Rods and Between Rods and Timber Edge in the Axial Strength*. Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abteilung Ingenieurholzbau, Universität Fridericiana Karlsruhe, Karlsruhe, Germany.
- [10] H.J. Blaß and Y. Steige. 2018. Steifigkeit axial beanspruchter Vollgewindeschrauben. DOI:<https://doi.org/10.5445/KSP/1000085040>
- [11] O. Bletz-Mühdorfer, L. Bathon, D Grundwald, T. Vallee, S. Myslicki, and F. Walther. 2017. Eingeklebte Stäbe in Laubholzkonstruktionen. *Bauen mit Holz* 4 (2017), 34–39.
- [12] O. Bletz-Mühdorfer, F. Diehl, L. Bathon, S. Myslicki, F. Walther, C. Grunwald, and T. Vallée. 2018. Ermüdungsverhalten von eingeklebten Stäben – Teil 1. *Bauen mit Holz* 5 (2018), 30–35.
- [13] R. Bouchard, A. Salenikovich, C. Frenette, and G. Bedard-Blanchet. 2021. Experimental investigation of joints with multiple glued-in rods in glued-laminated timber under axial tensile loading. *Construction and Building Materials* 293, (July 2021), 122614. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122614>
- [14] A. Buchanan. 2007. *NZW 14085 SC, New Zealand Timber Design Guide*. Timber Industry Federation Inc., Wellington, New Zealand.
- [15] CEN. 2021. *EN 17334 - Glued-in-rods in glued structural timber products – Testing, requirements and bond shear strength classification*. European Committee for Standardization CEN, Brussels, Belgium.
- [16] CNR. 2007. *CNR-DT 206-2007, Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo delle Strutture di Legno*. Consiglio Nazionale delle Richerch, CNR, Commissione di studio per la predisposizione e l'analisi di norme tecniche relative alle costruzioni.
- [17] CSTB. 2012. *Technical Assessment 3/12-716: RBF glued-in rods, Connection for timber structures, Holders: Societe SIMONIN SAS, Societe DUCRET-ORGES*. Champs-sur-Marne, France.
- [18] DiBt. 2016. *Z-9.1-791 Verbindungen mit faserparallel in Brettschichtholz eingeklebten Gewindestangen für den Holzbau, Studiengemeinschaft Holzleimbau e. V*. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, Germany.
- [19] DiBt. 2017. *Z-9.1-778 2K-EP-Klebstoff GSA-Harz und GSA-Härter für das Einkleben von Stahlstäben in Holzbaustoffe, neue Holzbau AG*. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, Germany.
- [20] DiBt. 2018. *Z-9.1-705 2K-EP-Klebstoff WEVO-Spezialharz EP 32 S mit WEVO-Härter B 22 TS zum Einkleben von Stahlstäben in Holzbaustoffe, WEVO-CHEMIE GmbH*. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, Germany.
- [21] DiBt. 2020. *Z-9.1-896 2K-PUR Klebstoff LOCTITE CR 821 PURBOND zum Einkleben von Stahlstäben in tragende Holzbauteile, Henkel & Cie. AG*. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, Germany.
- [22] DIN. 2008. *DIN 1052: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau*. DIN Deutsche Institut für Normung e.V., Berlin, Germany.

- [23] DIN. 2013. *DIN EN 1995-1-1/NA: National Annex – Nationally determined parameters - Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings*. DIN Deutsche Institut für Normung e.V., Berlin, Germany.
- [24] G. Edlund. 1975. In Brettschichtholz eingeleimte Gewindestangen. *Svenska Trgforskningsinstitutet, Med. Serie B 33* (1975).
- [25] J. Ehlbeck and M. Gerold. 1989. End Grain Connections with Laterally Loaded Steel Bolts A draft proposal for design rules in the CIB Code. In *Proc. of the CIB-W18 Meeting 22/22-7-1*, Berlin, German Democratic Republic.
- [26] J. Ehlbeck and W. Siebert. 1987. *Praktikable Einleimmethode und Wirkungsweise von eingeleimten Gewindestangen unter Axialbelastung bei Übertragung von grossen Kräften und bei Aufnahme von Quersugkräften in Biegeträgern: Einleimmethode, Messverfahren, Haftspannungsverlauf*. Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abteilung Ingenieurholzbau, Universität Fridericiana Karlsruhe, Karlsruhe, Germany.
- [27] A. F. Fabris. 2001. Verbesserung der Zugeigenschaften von Bauholz parallel zur Faser mittels Verbund mit profilierten Stahlstangen. Doctoral Thesis. ETH Zurich. DOI:<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004130046>
- [28] M. Follesa, M. Fragiaco, D. Vasallo, M. Piazza, R. Tomasi, S. Rossi, and D. Casagrande. 2015. A proposal for a new Background Document of Chapter 8 of Eurocode 8. In *Proc. of the INTER Meeting 2/Paper 48-102-1*, Sibenik, Croatia.
- [29] E. Gehri. 1995. Krafteinleitungen mittels Stahlanker. In *Brettschichtholz – Material, Bemessung, Ausführung, Qualitätssicherung*, Weinfelden, Switzerland.
- [30] E. Gehri. 2016. Performant connections – A must for veneer-based products. In *Proc. of the World conference on timber engineering WCTE*, Vienna, Austria.
- [31] M. Geiser. 2018. Erdbebenbemessung von Holztragwerken nach dem duktilen Tragwerksverhalten – Die schwierige Frage der Überfestigkeit. Weinfelden, Switzerland.
- [32] M. Gerold. 1992. Verbund von Holz und Gewindestangen aus Stahl. *Bautechnik* 69, 4 (1992), 167–178.
- [33] E. Gonzales, T. Tannert, and T. Vallee. 2016. The impact of defects on the capacity of timber joints with glued-in rods. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 65, (March 2016), 33–40. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.11.002>
- [34] E. Gonzalez, C. Avez, and T. Tannert. 2016. Timber joints with multiple glued-in steel rods. *The Journal of Adhesion* 92, 7–9 (2016), 635–651.
- [35] F. Hunger, M. Stepinac, V. Rajčić, and J.-W. van de Kuilen. 2016. Pull-compression tests on glued-in metric thread rods parallel to grain in glulam and laminated veneer lumber of different timber species. *European Journal of Wood and Wood Products* 74, 3 (2016), 379–391.
- [36] R. Jockwer and E. Serrano. 2021. Glued-in Rods as Reinforcement for Timber Structural Elements. In *Reinforcement of Timber Elements in Existing Structures: State-of-the-Art Report of the RILEM TC 245-RTE*, J. Branco, P. Dietsch and T. Tannert (eds.). Springer International Publishing, Cham, 29–49. DOI:https://doi.org/10.1007/978-3-030-67794-7_3
- [37] C.J. Johansson. 1995. Glued-in rods (eingeleimte Stäbe). In *STEP 1, Holzbauwerke nach Eurocode 5 - Bemessung und Baustoffe*, H.J. Blass, R. Görlacher and G. Steck (eds.). Fachverlag Holz der Arbeitsgemeinschaft Holz e.V., Düsseldorf, Germany, C14/1-7.
- [38] A. Jorissen and M. Fragiaco. 2011. General notes on ductility in timber structures. *Engineering structures* 33, 11 (2011), 2987–2997.
- [39] B. Madsen. 1992. *Structural behavior of timber*. Timber Engineering Ltd.
- [40] K. Möhler and K. Hemmer. 1981. Eingeleimte Gewindestangen. *Bauen mit Holz* 5 (1981), 296–299.
- [41] S. Myslicki, O. Bletz-Mühldorfer, F. Diehl, C. Lavarec, T. Vallée, R. Scholz, and F. Walther. 2019. Fatigue of glued-in rods in engineered hardwood products – part I: experimental results. *The Journal of Adhesion* 95, 5–7 (June 2019), 675–701. DOI:<https://doi.org/10.1080/00218464.2018.1555477>
- [42] S. Myslicki, F. Walther, O. Bletz-Mühldorfer, F. Diehl, C. Lavarec, V. C. Beber, and T. Vallée. 2019. Fatigue of glued-in rods in engineered hardwood products – Part II: Numerical modelling. *The Journal of Adhesion* 95, 5–7 (June 2019), 702–722. DOI:<https://doi.org/10.1080/00218464.2018.1555478>
- [43] S. Myslicki, F. Walther, T. Vallée, L. Bathon, F. Diehl, and O. Bletz-Mühldorfer. 2018. Ermüdungsverhalten von eingeklebten Stäben – Teil 2. *Bauen mit Holz* 6 (2018), 38–43.
- [44] J. Ogrizovic, R. Jockwer, and A. Frangi. 2018. Seismic Response of Connections with Glued-in Steel Rods. In *Proc. of the INTER Meeting 5/Paper 51-7-5*, Tallinn, Estonia.

- [45] J. Ogrizovic, F. Wanninger, and A. Frangi. 2017. Experimental and analytical analysis of moment-resisting connections with glued-in rods. *Engineering Structures* 145, (August 2017), 322–332. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.05.029>
- [46] G. Parida, H. Johnsson, and M. Fragiaco. 2013. Provisions for Ductile Behavior of Timber-to-Steel Connections with Multiple Glued-In Rods. *J. Struct. Eng.* 139, 9 (September 2013), 1468–1477. DOI:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000735](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000735)
- [47] Nils Ratsch, Stefan Böhm, Morten Voß, Marvin Kaufmann, and Till Vallée. 2019. Influence of imperfections on the load capacity and stiffness of glued-in rod connections. *Construction and Building Materials* 226, (November 2019), 200–211. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.278>
- [48] H. Riberholt. 1979. *Eingeleimte Gewindestangen*. Danmarks Tekniske Højskole, Afdelingen for Baerende Konstruktioner, Lyngby, Denmark.
- [49] H. Riberholt. 1986. Glued bolts in glulam. In *Proc. of the CIB-W18 Meeting 19*, Florence, Italy, CIB-W18 19-7-2.
- [50] H. Riberholt. 1988. Glued Bolts in Glulam – Proposal for CIB Code. In *Proc. of the CIB-W18 Meeting 21*, Parksville, Canada.
- [51] P. D. Rodd, B. O. Hilson, and R. A. Spriggs. 1989. Resin Injected Mechanically Fastened Timber Joints. In *Proc. of the Second Pacific Timber Engineering Conference*, Auckland, New Zealand, 131–136.
- [52] M. del Senno, M. Piazza, and R. Tomasi. 2004. Axial glued-in steel timber joints – experimental and numerical analysis. *Holz Roh Werkst* 62, 2 (April 2004), 137–146. DOI:<https://doi.org/10.1007/s00107-003-0450-1>
- [53] SIA. 2009. *Standard SIA 265/1 – Timber Structures – Supplementary Specifications*. SIA Swiss Society of Engineers and Architects, Zurich, Switzerland.
- [54] SIA. 2012. *Norm SIA 265:2012 – Holzbau*. SIA – Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein: Zürich, Schweiz.
- [55] Y. Slavik, A.A. Tsvetkov, and N.D. Denesh. 1983. Problems in evaluation of timber structure reliability. In *Present state and future prospects in the field of timber structures, Collected Scientific Papers*, Moscow, USSR, 94–105.
- [56] R. Steiger. 2012. In Brettschichtholz eingeklebte Gewindestangen – Stand des Wissens zu einer leistungsfähigen Verbindungstechnik. In *Proc. of the Internationales Holzbau-Forum*, Garmisch-Partenkirchen, Germany.
- [57] R. Steiger, E. Gehri, and R. Widmann. 2007. Pull-out strength of axially loaded steel rods bonded in glulam parallel to the grain. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 40, 1 (2007), 69–78.
- [58] R. Steiger, E. Serrano, M. Stepinac, V. Rajčić, C. O’Neill, D. McPolin, and R. Widmann. 2015. Strengthening of timber structures with glued-in rods. *Construction and Building Materials* 97, (October 2015), 90–105. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.097>
- [59] Svenskt Trä. 2016. *Limträhandbok, Projektering av limträkonstruktioner, Del 2*. Svenskt Trä, Föreningen Sveriges Skogsindustrier, Stockholm, Sweden.
- [60] T. Tannert, H. Zhu, S. Myslicki, F. Walther, and T. Vallée. 2017. Tensile and fatigue investigations of timber joints with glued-in FRP rods. *The Journal of Adhesion* 93, 11 (2017), 926–942. DOI:<https://doi.org/10.1080/00218464.2016.1190653>
- [61] G. Tlustochowicz, E. Serrano, and R. Steiger. 2011. State-of-the-art review on timber connections with glued-in steel rods. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 44, 5 (2011), 997–1020.
- [62] TRADA. 2001. *GIROD -Glued-in Rods For Timber Structures WP 8 – Draft Design Rules For Eurocode 5 – 36th Month Progress Report*. UK.
- [63] S. Turkowsky. 1989. Designing of glued wood structures joints on glued-in bars. In *Proc. of the CIB-W18 Meeting 22*, Berlin, Germany.
- [64] S. Turkowsky. 1991. Prefabricated joints of timber structures on inclined glued-in bars. In *Proceedings of the 1991 International Timber Engineering Conference, TRADA, London, UK*.
- [65] M. Verdet, A. Salenikovich, A. Cointe, J.-L. Coureau, P. Galimard, Williams Munoz Toro, Pierre Blanchet, and Christine Delisée. 2016. Mechanical Performance of Polyurethane and Epoxy Adhesives in Connections with Glued-in Rods at Elevated Temperatures. *BioResources* 11, 4 (August 2016), 8200–8214.
- [66] R. Widmann, R. Steiger, and E. Gehri. 2007. Pull-out strength of axially loaded steel rods bonded in glulam perpendicular to the grain. *Materials and Structures* 40, 8 (2007), 827–838.