

ERMÜDUNGSVERHALTEN VON IN BSH EINGEKLEBTEN GEWINDESTANGEN MIT EINSATZ IM BRÜCKENBAU

Technischer Schlussbericht

zum

WHFF-CH Projekt 2022.10

René Steiger

Empa – Materials Science and Technology

Abt. Ingenieur-Strukturen

CH-8600 Dübendorf

Bruno Zumbrunn-Maurer

neue Holzbau AG

Obseestrasse 11

CH-6078 Lungern

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
Zusammenfassung	iii
Summary	vi
1. Einleitung	1
1.1 Einsatz von eingeklebten Gewindestangen im Holzbau	1
1.2 Leistungsfähigkeit von Gewindestangen-Verbindungen	1
1.3 Massnahmen zur Gewährleistung des Tragwiderstands	2
1.4 Verfügbare Bemessungsansätze für statische Beanspruchung	2
1.5 Erweiterung des Anwendungsbereichs des Holzbaus	2
1.5.1 Hochbau	2
1.5.2 Brückenbau	3
1.6 Ziele des Forschungsprojekts	6
1.7 Bedeutung des Projekts für Forschung und Praxis	6
1.8 Projekt-Team	7
1.9 Literatur zum Kapitel 1	7
2. Ermüdungsverhalten von Bauteilen und Verbindungen im Holzbau	9
2.1 Materialermüdung	9
2.2 Stand der Forschung auf dem Gebiet	10
2.2.1 Bemessungsansätze für Ermüdungsbeanspruchungen im Holzbau	10
2.2.2 Ermüdungsverhalten von eingeklebten Gewindestangen	12
2.3 Folgerungen für die Versuchsplanung und -durchführung	14
2.4 Literatur zum Kapitel 2	15
3. Versuchsmethodik	17
3.1 Grundsätzliches Vorgehen	17
3.2 Durchgeführte Versuche	17
3.3 Prüfplan	18
3.3.1 Prüfkörper	18
3.3.2 Auslegung der Versuche	19
3.4 Prüfeinrichtungen und Prüfprocedere bei der neuen Holzbau AG	20
3.4.1 Herstellung der Prüfkörper	20
3.4.2 Klimatisierung der Lamellen	21
3.4.3 Abbund des BSH, Einkleben der Gewindestangen, Stahladapterteile	23
3.4.4 Klimatisierung der Prüfkörper	24
3.4.5 Statische Zugversuche (Probebelastungen nach der Produktion)	28
3.5 Prüfeinrichtungen und Prüfprocedere an der Empa	31
3.5.1 Klimatisierung der Prüfkörper	31
3.5.2 Umgebungsklima während den Belastungsversuchen	32
3.5.3 Temperatur in den Klebfugen	32
3.5.4 Montage der Stahladapterteile	32
3.5.5 Statische Belastungsversuche und Ermüdungsversuche	33
3.6 Zerlegen der Prüfkörper nach Abschluss des Versuchsprogramms	38
3.7 Literatur zum Kapitel 3	39

4.	Versuchsergebnisse	41
4.1	Einleitung	41
4.2	Versuchsgruppe A	41
4.2.1	Versuchsreihe A1	41
4.2.2	Versuchsreihe A2	49
4.2.3	Versuchsreihe A3	53
4.3	Versuchsgruppe B	62
4.3.1	Ausziehversuche	62
4.3.2	Versagensbilder	63
4.4	Versuchsgruppe C	65
4.4.1	Versuchsreihe C1	65
4.4.2	Versuchsreihe C2	67
4.5	Versuchsgruppe D	76
4.5.1	Versuchsreihe D1	76
4.5.2	Versuchsreihe D2	79
4.6	Holzfeuchteabnahme der Prüfkörper und Kontrollstäbe während der Versuche	88
4.7	Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse	91
4.7.1	Parallel zur Faserrichtung in Eschen BSH eingeklebte Gewindestangen	91
4.7.2	Rechtwinklig zur Faserrichtung in Fichten-BSH eingeklebte Gewindestangen	93
4.8	Literatur zum Kapitel 4	96
5.	Schlussfolgerungen	97
5.1	Klimatisierung der Prüfkörper	97
5.2	Versuchskonfiguration und Versuchsprocedere	97
5.2.1	Ermüdungsfeste Stahlteile zur Krafteinleitung	98
5.2.2	Klebfugen-Temperaturen und Prüffrequenzen bei den Ermüdungsversuchen	98
5.2.3	Prüfkörper mit rechtwinklig zur Faserrichtung eingeklebten Gewindestangen	98
5.3	Tragwiderstand von eingeklebten Gewindestangen	99
5.3.1	Steifigkeit und Festigkeit bei statischer Belastung	99
5.3.2	Tragwiderstand bei Ermüdungsbelastung	100
5.3.3	Reststeifigkeit und Restfestigkeit nach den Ermüdungsversuchen	100
5.3.4	Einfluss der Holzfeuchte	101
5.4	Fazit	102
5.5	Literatur zum Kapitel 5	102

Anhänge

Anhang A: Pläne der Prüfkörper

Anhang B: Pläne der Stahlteile

Anhang C: Pläne der Klimakisten

Anhang D: Bemessung von GSA-Stangen parallel zur Faserrichtung in Laubholz und rechtwinklig zur Faserrichtung in Nadelholz

Anhang E: Messung der Verformungen

Zusammenfassung

Verbindungen mit eingeklebten Gewindestangen haben sich wegen ihren hohen Tragwiderständen und Steifigkeiten, der Korrosions- und Brandbeständigkeit sowie ästhetischer Vorteile im Ingenieurholzbau bewährt und werden häufig eingesetzt z.B. bei Stützenverankerungen, biegesteifen Verbindungen, Fachwerkträgern und Verstärkungen diverser Art. Die Leistungsfähigkeit dieser Verbindungen hängt von einem sorgfältig abgestimmten Zusammenspiel zwischen Holz, Stahl, Klebstoff und der Geometrie der Verbindungen ab. Profilierte Stahlstäbe wie Gewindestangen oder Bewehrungsstäbe sorgen in Kombination mit speziell entwickelten Klebstoffen (z. B. 2K-Epoxidharzen) für eine sichere Kraftübertragung durch die mechanische Verzahnung zwischen Stahl und Klebstoff. Die Bemessung kann zudem sicherstellen, dass spröde Versagensarten wie Holzbruch oder Klebstoffversagen ausgeschlossen werden. Insbesondere bei grossen Bauteilen mit vielen Verbindungsmitteln in einem Anschluss, ist die Duktilität der Verbindung durch das planmässige Versagen der Stahlstäbe zu gewährleisten.

Der sparsame Umgang mit natürlichen Ressourcen und die vermehrte Anwendung nachhaltiger Baumaterialien stehen derzeit hoch im Kurs. Leistungsfähige Verbindungssysteme sind im Holzbau essentiell, weil die Querschnittsdimensionen oft von den Verbindungen bestimmt werden. Im Brückenbau wird Holz als Baustoff noch vergleichsweise wenig eingesetzt. Ein Grund dafür sind die gegenüber dem Hochbau erschwerten klimatischen Bedingungen (erhöhte Holzfeuchten) und die Ermüdungsbeanspruchung durch grosse Verkehrslasten. Im vorliegenden Forschungsprojekt sollte deshalb die Ermüdungsfestigkeit von Verbindungen mit eingeklebten profilierten Stäben unter praxisnahen Bedingungen mit Fokus auf den Brückenbau ermittelt werden. Die Ziele des Projekts umfassten die Entwicklung von Methoden zur einfachen Klimatisierung der Prüfkörper und die Durchführung von Ermüdungsversuchen mit bis zu zwei Millionen Lastwechseln. Dabei wurden die kombinierten Einflüsse der Holzfeuchte und der dynamisch wirkenden Wechsellasten auf die Festigkeit und Steifigkeit untersucht. Das Projekt fokussierte auf zwei Einkleberrichtungen der Gewindestangen in Bezug auf die Faserrichtung des Holzes (parallel und rechtwinklig). Dazu wurden jeweils die im Hinblick auf leichte Fachwerke relevanteste Holzart (Eschen-BSH und Fichten-BSH) gewählt.

Materialermüdung ist ein schleichender Schädigungsprozess, welcher durch zyklische mechanische Belastungen verursacht wird und letztlich zum Versagen eines Bauteils führen kann. Diese Problematik ist besonders relevant für Tragwerke, die hohen zyklischen Belastungen wie Verkehrslasten ausgesetzt sind. Die Lebensdauer von Bauteilen und Verbindungen unter Ermüdungsbeanspruchung kann anhand von Wöhlerversuchen quantifiziert werden, indem die Spannungsdifferenzen mit der Anzahl Lastwechsel bis zum Versagen in Beziehung gesetzt wird.

Die derzeitigen Kenntnisse zum Verhalten von Bauteilen und Verbindungen im Holzbau stammen vorwiegend aus Untersuchungen im Stahlbau, die für den Holzbau angepasst wurden. Im Eurocode 5 und in der Norm SIA 265 sind unterschiedliche Ermüdungsnachweise angegeben, die jedoch vor allem für Bemessung von Bauteilen entwickelt wurden und nur ausgewählte Verbindungsmittel wie Nägel und Stabdübel abdecken. Im Falle von Stabdübeln ist der Ermüdungsnachweis sogar inkompatibel mit der Ausgestaltung einer duktilen Verbindung. Für eingeklebte Gewindestangen fehlten bisher umfassende normative Regelungen für die Bemessung, welche auch Ermüdungsnachweise beinhalten. Für Tragwerke mit ermüdungswirksamen Lasten sind axial beanspruchte Verbindungsmittel jedoch besonders interessant, da sie bei zweckmässiger Anordnung einen sehr gleichmässigen Kraftfluss ermöglichen. Die Abwesenheit von Spannungsspitzen gilt allgemein als Schlüssel für eine hohe Betriebsfestigkeit.

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

Bezüglich der Planung und Durchführung von Versuchen, ist der Temperaturentwicklung in den Klebfugen (Verankerung der Gewindestangen) besondere Beachtung zuzumessen. Bei hohen Prüffrequenzen kann Überhitzung der Klebfugen die Klebstoffeigenschaften verändern und die Ergebnisse verfälschen. Um praxisnahe Ergebnisse zu erzielen, sollten Versuche unter möglichst realistischen Bedingungen durchgeführt werden. Verbindungsmitteldurchmesser und Verankerungslängen sind wie in der Praxis oder so gross wie aufgrund der verfügbaren Prüfeinrichtung möglich zu wählen. Der Lastbereich soll dem Niveau der ermüdungswirksamen Gebrauchslasten entsprechen und die Holzfeuchte soll den für die Nutzung erwarteten Bereich abdecken. Um die Wirkungen der kombinierten Einflüsse auch mit kleiner Prüfkörperanzahl untersuchen zu können, sind geringe Streuungen anzustreben. Dies kann erreicht werden mit nach einheitlicher Dichte (je Holzart) sortierten Brettschichtholzlamellen, ermüdungs-festen Stahlstäben und mit einem hochwertigen, qualitätskontrollierten Klebstoffsystem.

Im vorliegenden Forschungsprojekt wurde das Tragverhalten bei Ermüdungsbeanspruchung und die mechanischen Eigenschaften (Anschlusssteifigkeit und Tragwiderstand bei axialer Zugbeanspruchung) nach bestandenen Ermüdungsversuch mit einer differenzierten Methodik untersucht. Das Tragverhalten und die Versagensarten wurden mit Versuchen an Verbindungen mit rein statischer Beanspruchung verglichen. Es wurden Versuche in vier Gruppen von Prüfkörpern (A-D) gemäss nachfolgender Auflistung durchgeführt. Dabei wurden die Belastungsart und die Holzfeuchte variiert und zwei Einkleberichtungen der Stangen in Bezug auf die Faserrichtung des Holzes in je einer Holzart geprüft.

- Gruppe A: Versuche an parallel zur Faserrichtung in Eschen-BSH eingeklebten Gewindestangen
 - Reihe A1: Ermüdungsversuche in der Feuchteklasse 1
 - Reihe A2: Statische Belastungsversuche in der Feuchteklasse 2
 - Reihe A3: Ermüdungsversuche und Bestimmung der Restfestigkeit statisch in der Feuchteklasse 2
- Gruppen B, C und D: Versuche an rechtwinklig zur Faserrichtung in Fichten-BSH eingeklebten Gewindestangen
 - Gruppe B und Reihe C1: Statische Belastungsversuche in der Feuchteklasse 1
 - Reihe C2: Ermüdungsversuche und Bestimmung der Restfestigkeit statisch in der Feuchteklasse 1
 - Reihe D1: Statische Belastungsversuche in der Feuchteklasse 2
 - Reihe D2: Ermüdungsversuche und Bestimmung der Restfestigkeit statisch in der Feuchteklasse 2

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 Feuchteklasse 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 Klimatisierung auf eine Holzfeuchte von etwa 20 % war essenziell für die Simulation realer Bedingungen, wie sie sich im Brückenbau ergeben. Nach der Klimatisierung und noch vor den Ermüdungsversuchen erfolgte eine Probelastung zur Qualitätskontrolle, um sicherzustellen, dass die Prüfkörper den Versuchsanforderungen entsprechen.

Die Ermüdungsversuche wurden mit einem R-Wert von 0.1 und Frequenzen von in der Regel 4 – 7 Hz durchgeführt, und es wurden in der Regel 2 Mio., in einem Fall gar 3 Mio. Lastwechsel gefahren. Dabei wurden die Temperatur in den Klebfugen, die Verformung der Anschlüsse (Maschinenweg) und die Kraft kontinuierlich gemessen. Die Überwachung der Temperatur in den Klebfugen war wichtig, um sicherzustellen, dass die Ermüdungsbeanspruchung nicht zu einer unzulässigen Überhitzung des Klebstoffs und damit zu einer negativen Beeinflussung des Tragverhaltens der Verbindungen führen würde. Nach den Ermüdungsversuchen wurden statische Belastungstests durchgeführt, um den Rest-Tragwiderstand 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 Ergebnisse der umfangreichen Versuche sind im Kapitel 4 dieses Berichts, unterstützt 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 Ermüdungsversuche) dargestellt. Für die statischen Belastungsversuche und für die Ermüdungsversuche sind die Ergebnisse je Versuchsreihe detailliert beschrieben und am Ende des Kapitels in Tabellen vergleichend zusammengefasst.

Die im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Versuche zeigten, dass mit in BSH eingeklebten Gewindestangen auch in Bauteilen mit Holzfeuchten bis 20 % tragfähige und steife Verbindungen realisiert werden können. Das schrittweise Vorgehen in mehreren Versuchsreihen hat sich bewährt. So ist es schliesslich gelungen, dass in allen Versuchsreihen mit Ermüdungsversuchen mindestens 3 Prüfkörper die angestrebten 2 Mio. Lastwechsel erreichten. Dabei liess sich feststellen, dass die Klebfugen in keinem der untersuchten Prüfkörper die schwächste Komponente darstellten. Bei der ersten Konfiguration mit Prüfkörpern aus Eschen-BSH wurde in den Ermüdungsversuchen eine hohe nominelle Scherspannung in der Klebfuge erzeugt und die ausreichende Ermüdungsfestigkeit von parallel zur Faserrichtung eingeklebten Stäben konnte aufgezeigt werden. 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. Bezüglich der Planung ähnlicher Versuche wird auf die lange Zeitdauer hingewiesen, welche für die Herstellung von BSH mit besonderer Holzfeuchte und für die Klimatisierung der Prüfkörper benötigt wurde. Dank sorgfältiger Sortierung, hochwertigen Stahlstangen und geeignetem Klebstoffsystem konnten Prüfkörper mit homogenen Eigenschaften produziert werden. So liessen sich die Effekte beobachten, wie dies mit den gewählten, über die Versuchsreihen gezielt veränderten Parametern angestrebt worden war.

Die Ergebnisse des vorliegenden Projekts leisten einen wichtigen Beitrag zur Weiterentwicklung des Holzbaus, indem es fundierte Grundlagen für die Anwendung einer modernen im Hochbau bewährten Verbindungstechnik auch für den Brückenbau liefert. Die Forschung legt den Grundstein für weitere Innovationen in einem zunehmend gefragten Anwendungsbereich des Baustoffs Holz.

Das Projekt liefert wichtige Beiträge zur Erweiterung bestehender Normen wie dem Eurocode 5. Die Ergebnisse unterstützen die Entwicklung von Bemessungsansätzen, die spezifische Anforderungen des Brückenbaus berücksichtigen. Dies schliesst die Berücksichtigung von Feuchteklasse-2-Bedingungen, die Duktilität der Verbindungen und die Langzeittragfähigkeit unter Wechsellasten ein.

Die Bedeutung des Projekts erstreckt sich sowohl auf die Forschung als auch auf die Praxis. Es schliesst bestehende Wissenslücken, insbesondere in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit von Holzverbindungen unter realistischen Bedingungen. Für die Praxis bietet das Projekt Grundlagen für die sichere Anwendung von Holz im Brückenbau, insbesondere für hochbeanspruchte Tragwerke. Die Forschungsergebnisse könnten dazu beitragen, den Holzbau im Brückenbau zu etablieren und so die Nachhaltigkeit moderner Infrastrukturen zu fördern.

Summary

Connections with bonded-in threaded rods have been applied successfully in timber construction due to their high load-bearing resistance and stiffness, corrosion and fire resistance as well as aesthetic advantages and are frequently used, for example, for column anchoring, rigid connections, trusses and reinforcements of various kinds. The performance of these connections depends on a carefully coordinated interaction between wood, rod, adhesive and the geometry of the connections. Profiled steel rods such as rods with metric threads or reinforcing bars, in combination with specially developed adhesives (e.g. 2-component epoxy resins), ensure reliable force transfer through the mechanical interlocking between the rod and the adhesive. By careful design, it can also be ensured that brittle failure modes such as wood fracture or adhesive failure do not occur. Particularly in the case of large components with many fasteners in a connection, the ductility of the connection must be ensured by designing for failure of the steel bars.

The economical use of natural resources and the increased use of sustainable building materials are currently very popular. High-performance connection systems are essential in timber construction because the cross-sectional dimensions are often determined by the connections. Wood is still used comparatively little as building material in bridge construction. One reason for this is the more difficult climatic conditions compared to building construction (increased wood moisture) and the fatigue stresses caused by high traffic loads. This research project therefore aimed to determine the fatigue strength of connections with bonded-in profiled rods under practical conditions with a focus on bridge construction. The objectives of the project included the development of methods for simple climate control of the test specimens and the performance of fatigue tests with up to 2 Mio. load cycles. The combined influences of wood moisture and dynamic alternating loads on strength and stiffness were investigated. The project focused on two settings of the threaded rods in relation to the grain direction of the wood (parallel and perpendicular). Glulam produced from the most relevant wood species (European ash, *Fraxinus excelsior*, and Norway spruce, *Picea abies*) regarding truss structures in timber was selected.

Material fatigue is a gradual damage process that is caused by altering mechanical loads and can ultimately lead to failure of a structural member or connection. This problem is particularly relevant for structures that are exposed to high cyclic loads such as traffic loads. The service life of components and connections under fatigue loading can be quantified using Wöhler tests by relating the stress differences to the number of load cycles until failure.

Current knowledge of the behavior of members and connections in timber construction subjected to fatigue loading comes primarily from studies in steel construction that have been adapted for timber construction. Eurocode 5 and the SIA 265 standard specify different fatigue verifications, but these were primarily developed for the design of structural components and only cover selected types of fasteners such as nails and dowels. In the case of dowel-type fasteners, fatigue verification is even incompatible with the design of a ductile connection. For bonded-in threaded rods, comprehensive normative regulations for the design, which also include fatigue verifications, have been lacking to date. However, axially loaded fasteners are particularly interesting for structures with fatigue loads, as they allow a very uniform flow of forces when arranged appropriately. The absence of stress peaks is generally regarded as the key to high fatigue strength.

Most of the fatigue strength tests to date have been carried out on connections in dry wood (service class 1). The transferability to applications in bridge construction, where higher moisture contents (service class 2) prevail, is limited. Increased wood moisture levels significantly affect the mechanical properties of wood, which can impair the load-bearing resistance and fatigue strength of connections with bonded-in threaded rods.

When planning and carrying out experiments, particular attention must be paid to the temperature development in the bond lines (anchoring of the threaded rods). At high test frequencies, overheating of the adhesive joints can change the adhesive properties and falsify the results. To achieve practical results, tests should be carried out under the most realistic conditions possible. The rod diameter and

the anchorage lengths should be chosen corresponding to the application in practice or as large as possible based on the available test set up. The load range should correspond to the level of the fatigue-effective service loads and the wood moisture content should cover the range expected for use. To be able to investigate the effects of the combined influences even with a small number of test specimens, low scatter should be aimed for. This can be achieved with glulam lamellas sorted according to uniform density (per wood species), fatigue-resistant steel bars and a high-performance, quality-controlled adhesive system.

In this research project, the load-bearing behavior under fatigue loading and the mechanical properties (connection stiffness and load-bearing resistance under axial tensile force) of threaded rods bonded into European ash and Norway spruce glulam were investigated after passing the fatigue test using a differentiated methodology. The load-bearing behavior and failure modes were compared with tests on connections subjected to purely static loading. Tests were carried out on four groups of test specimens (A-D) according to the following list. The type of load and the wood moisture content were varied, and two settings of the rods in relation to the grain direction of the wood were tested.

- Group A: Tests on threaded rods bonded into ash glulam parallel to the grain
 - Series A1: Fatigue tests in service class 1
 - Series A2: Static load tests in service class 2
 - Series A3: Fatigue tests and determination of residual static strength in service class 2
- Groups B, C and D: Tests on threaded rods bonded into spruce glulam perpendicular to the grain
 - Group B and series C1: Static load tests in service class 1
 - Series C2: Fatigue tests and determination of the residual strength statically in service class 1
 - Series D1: Static load tests in service class 2
 - Series D2: Fatigue tests and determination of residual static strength in service class 2

Central elements of the methodology were the production of glulam for use in service class 2 and the climatization of the test specimens after bonding in the threaded rods to bring the wood moisture specifically to the desired level. A special climate box was developed to achieve wood moisture content corresponding to service class 2. This demonstrated that such tests can also be carried out with simple means, i.e. without expensive chambers for climatizing the specimens. Conditioning to a wood moisture content of around 20 % was essential for simulating real conditions such as those that occur in bridge construction. After conditioning and before the fatigue tests, proof loading was applied for quality control purposes to ensure that the test specimens met the specified requirements.

The fatigue tests were carried out with an R value of 0.1 and frequencies of 4 – 7 Hz, and generally 2 Mio., in one case even 3 Mio. load cycles. The temperature in the adhesive joints, the deformation of the connections (machine stroke) and the force were measured continuously. Monitoring the temperature in the adhesive joints was important to ensure that the fatigue loading would not lead to an impermissible overheating of the adhesive and thus to a negative influence on the load-bearing behavior of the joints. After the fatigue tests, static load tests were carried out to determine the residual load-bearing resistance and the residual stiffness of the joints. After completion of every test, the test specimens were disassembled and analyzed in detail to identify the types of failure such as wood fracture, adhesive joint failure or steel failure.

The results of the extensive tests are presented in Chapter 4 of this report, supported by numerous illustrations (force as a function of joint deformation, temperature in the adhesive joints and room temperature during fatigue loading, type of failure) and tables (connection deformations and connection stiffness, material properties (density and modulus of elasticity), load-bearing resistance, characteristic data of the fatigue tests). For the static load tests and the fatigue tests, the results of each test series are described in detail and summarized in tables at the end of Chapter 4.

The tests carried out in this project showed that threaded rods bonded into glulam can also be used to create load-bearing and rigid connections in components with wood moisture contents of up to 20 %. The step-by-step procedure in several series of tests proved successful. In the end, at least 3 test specimens achieved the targeted 2 Mio. load cycles in all test series with fatigue tests. It was found that the adhesive joints were not the weakest component in any of the test specimens examined. In the first configuration with test specimens made of ash glulam, a high nominal shear stress was generated in the joint in the fatigue tests and the sufficient fatigue strength of rods bonded in parallel to the grain could be demonstrated. The second configuration with test specimens made of spruce glulam also met the expectations. In all test series (wet and dry, static and fatigue loading), the failure of the timber zone between the rows of rods, which is subjected to rolling shear, proved to be critical.

Regarding the planning of similar tests, reference is made to the long period of time required for the production of glulam with a particular wood moisture content and for the climatization of the test specimens. Thanks to careful grading of the timber, high-quality steel rods and a suitable adhesive system, test specimens with homogeneous properties could be produced. This made it possible to observe the effects that had been aimed for with the selected parameters that had been specifically modified during the test series.

The results of this project make an important contribution to the further development of timber construction by providing a sound basis for the application of a modern connection technology that had originally been examined and tested for building construction to bridge construction as well. The research lays the basis for further innovations in an increasingly sought-after area of application of timber as a building material in bridge construction.

The project makes important contributions to the further development of existing standards such as Eurocode 5. The results support the development of design approaches that take into account the specific requirements of bridge construction. This includes the consideration of service class 2 conditions, the ductility of the connections and the long-term load-bearing capacity under fatigue loading.

The significance of the project extends to both research and practice. It closes existing knowledge gaps, particularly regarding the fatigue strength of timber joints under realistic conditions. In practice, the project provides a basis for the safe use of timber in bridge construction, especially for structures subjected to high loads. The research results can help to establish timber as a building material in bridge construction and thus promote the sustainability of modern infrastructures.

1. Einleitung

1.1 Einsatz von eingeklebten Gewindestangen im Holzbau

Seit mehr als 40 Jahren werden Verbindungen mit eingeklebten Stäben erforscht und in der Praxis des Ingenieurholzbaus, vorwiegend bei Brettschichtholz (BSH), erfolgreich eingesetzt [1]. Einsatzbereiche sind Stützenverankerungen in Fundamenten, biegesteife Verbindungen von Holzbauteilen (Trägerstösse, Rahmenecken) und Anschlüsse an Träger rechtwinklig oder schräg zur Faserrichtung. Weitere gängige Anwendungen sind die Verstärkung von Trägern (Schub, Querkraft) in hoch beanspruchten Bereichen wie Aufsattelungen, Durchbrüchen und Ausklinkungen sowie die lokale, auf kleine Kontaktflächen begrenzte Einleitung grosser Kräfte rechtwinklig zur Faserrichtung (Querkraft) [2]. Ein Vorteil dieser Verbindungsart ist die unsichtbare Einbettung des Stahlstabs im Holz, die neben optischen Vorzügen auch Vorteile beim Brand- und Korrosionsschutz bietet.

Mit parallel oder rechtwinklig zur Faserrichtung in Brettschichtholz eingeklebten profilierten Stahlstäben (Ankern) können auf kleiner Fläche grosse Kräfte in Holzbauteile eingeleitet werden. Meist werden Bewehrungsstäbe oder Gewindestangen mit metrischem Gewinde verwendet. Gewindestangen ermöglichen effiziente Verstärkungen von hoch beanspruchten Bereichen in Holzbauteilen und einfache, praxiserprobte Anschlüsse, auch an Beton- und Stahlteile. Eingeklebte Stahlstäbe werden sowohl beim Neubau als auch bei der Instandsetzung von Holztragwerken eingesetzt. Die Stäbe können dabei axial, senkrecht zur Schafrichtung oder in beide Richtungen gleichzeitig beansprucht werden. Insbesondere unter axialer Beanspruchung weisen derartige Verbindungen hohe Festigkeiten und Steifigkeiten auf. Der Fokus der Forschung lag grösstenteils auf parallel zur Faserrichtung eingeklebten Stahlstäben.

1.2 Leistungsfähigkeit von Gewindestangen-Verbindungen

Verbindungen mit eingeklebten profilierten Stahlstäben gehören zu den leistungsfähigsten Verbindungsarten im modernen Holzbau [3-5]. Bei der Bemessung, der Wahl der Komponenten und der Herstellung sollte der Systemgedanke im Vordergrund stehen: Die Verbindung, bestehend aus Stahlstab, Brettschichtholz, Klebstoff, geometrischen Parametern (u. a. Rand- und Zwischenabstände), Ausführung, Montage und Qualitätskontrolle, muss ganzheitlich betrachtet werden. Optimale Leistungen erbringen Gewindestangen-Verbindungen, wenn eine Reihe von Voraussetzungen erfüllt sind bzw. Regeln eingehalten werden. So müssen bei Anschlüssen parallel zur Faserrichtung die Querschnittsflächen von Stahlstangen und Holzstab entsprechend den Zugsteifigkeiten im Holz und im Stahl abgestimmt sein. Auch das Bruchdehnungsvermögen des Holzes parallel zur Faserrichtung ist zu berücksichtigen. Dabei muss die Dehnung des Stahlstabs, der Holzart angepasst, begrenzt werden.

Die Klebstoffindustrie hat speziell für das Einkleben von Gewindestangen in Holz optimierte Klebstoffe entwickelt (2 K-Epoxidharze und 2 K-PUR-Klebstoffe), die auf einfache Weise appliziert werden können, hohe mechanische Kennwerte aufweisen und dauerhaft sind. Obwohl zwischen dem Klebstoff und dem Stahlstab eine gewisse Haftung besteht, ist eine sichere Kraftübertragung nur durch eine mechanische Verzahnung zwischen Klebstoff und Stahlstab möglich. Die eingesetzten Stahlstäbe müssen daher eine Profilierung aufweisen, wie beispielsweise Rippen (Bewehrungsstäbe) oder aufgerollte bzw. eingeschnittene Gewinde (Gewindestangen).

Die Verbindung muss so ausgelegt werden, dass im Bruchzustand die Stahlstangen (duktil) versagen und das spröde Versagen des Holzes (Schubbruch und Aufspalten) oder des Klebstoffs (Kohäsions- und Adhäsionsbruch) ausgeschlossen bleiben. Bei Zugverbindungen mit mehreren gleichzeitig wirkenden Stäben kann die notwendige gleichmässige Kraftverteilung auf die einzelnen Stäbe nur bei ausreichender Duktilität des Einzelstabanschlusses erreicht werden [6].

Bei zu geringen Rand- und Zwischenabständen erfolgt ein Aufspalten des Holzes infolge Überschreitung der Querkrafttragfähigkeit. Die Abstände sollten aber auch nicht zu gross gewählt werden, sonst sinkt die Anschlussleistung (die übertragbare Kraft bezogen auf den Holzquerschnitt) der Verbindung. Wird die effektive Verankerung des Stabes ins Holzzinnere verlegt, zum Beispiel durch Abkleben oder Abfräsen des Gewindes, kann das Aufspalten durch das grössere «Vorholz» minimiert werden.

An beiden Enden der Verankerungszone ergeben sich Schubspannungsspitzen, die das Gesamttragverhalten der Verbindung ungünstig beeinflussen bzw. die Leistung reduzieren. Es gibt verschiedene Ansätze, um die Spannungsspitze beim Beginn der Verankerungslänge zu reduzieren oder die Spannungsverteilung in der Verankerung günstig zu beeinflussen. Dazu gehört etwa das Ansenken des Bohrlochs bzw. eine abgesetzte Bohrung mit grösserem Durchmesser an der Holzoberfläche. Auch mit einer Aufweitung des Bohrlochgrunds und der dadurch ermöglichten Bildung eines zwiebel förmigen Klebstoffklumpens am Stangenende wurde erfolgreich experimentiert.

1.3 Massnahmen zur Gewährleistung des Tragwiderstands

Im verbauten Zustand sind die Verbindungsmittel fast nicht mehr sichtbar, ihre nachträgliche visuelle Kontrolle ist praktisch nicht möglich. Eine zuverlässige Qualitätskontrolle ist daher zwingend. Dabei müssen neben dem Klebstoff (Mischverhältnis/Aushärtungsprozess) auch die Gewindestangen und das Holz umfassend geprüft werden. Die Qualität der Verbindungen hängt zudem in hohem Mass von der Ausführungsqualität der Bearbeitungen ab. So hat die Bohrlochqualität einen entscheidenden Einfluss auf die Festigkeit einer Verbindung. Anschlüsse mit hoher Leistung sollten durch Spezialfirmen ausgeführt werden, die über genügend Fachkenntnisse und entsprechende Erfahrung verfügen.

1.4 Verfügbare Bemessungsansätze für statische Beanspruchung

Für die Bemessung der Verbindungen gibt es teilweise widersprüchliche Ansätze, die zudem auf unterschiedlichen Annahmen und experimentellen Grundlagen beruhen. Die Konsensfindung in der Normierung ist entsprechend schwierig, was Innovationen behindert. Mit der Erarbeitung von Produktnormen oder dem Inverkehrbringen eines Produkts auf Basis einer technischen Zulassung können Hersteller und Lieferanten das Dilemma unterschiedlicher Normen umgehen. Auf dem Markt sind Klebstoffe und Ankertechnologien erhältlich, für welche allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen zum Einkleben von Stahlstäben in tragende Holzbauteile vorliegen.

1.5 Erweiterung des Anwendungsbereichs des Holzbaus

1.5.1 Hochbau

Mit Blick auf die hohe Leistungsfähigkeit von Verbindungen mit eingeklebten Gewindestangen ist es naheliegend, dass dank dieser Verbindungsart die Holzbauweise vermehrt auch dort eingesetzt wird, wo hohe Kräfte auf kleinem Raum zu übertragen sind oder wo dynamisch wirkende Lasten auftreten. Beispiele von solchen Anwendungen sind Knotenverbindungen in Fachwerkträgern (Abb. 1.1) und Tragkonstruktionen für Kranbahnen (Abb. 1.2).



Abb. 1.1: Versuch im Labor der neuen Holzbau AG an einem Fachwerkknoten mit eingeklebten Gewindestangen. Der Prüfkörper zeigt das typische Versagen der zwischen den Ankerreihen liegenden, auf Rollschub beanspruchten Holzschicht. (Bilder: neue Holzbau AG).



Abb. 1.2: Kranbahnträger aus Stahl aufliegend auf BSH-Konsolen, welche mittels eingeklebten Gewindestangen mit den BSH-Stützen verbunden sind. (Bild: neue Holzbau AG).

Bei Kranbahn-Tragkonstruktionen treten auf Grund der Bewegungen der Kranbrücke, der Krankatze und beim Heben und Senken der Lasten dynamisch wirkende Wechsellasten auf. Wenn man in diesen Tragkonstruktionen eingeklebte Gewindestangen einsetzen möchte, so muss man Kenntnisse über deren Verhalten unter Wechsellast bzw. über deren Ermüdungsfestigkeit haben. Die neue Holzbau AG hat deshalb in Zusammenarbeit mit der Empa Ermüdungsversuche durchgeführt, welche die Leistungsfähigkeit der Verbindung auch für diesen Einsatzbereich bestätigen [7, 8].

1.5.2 Brückenbau

Aufgrund der erhöhten Nachfrage nach nachhaltigen Baustoffen, aber auch dank erfolgreicher Entwicklungs- und Forschungsarbeiten hat der Holzbau in den letzten Jahren stark an Bedeutung im Hochbau gewonnen. Demgegenüber wird Holz als Baustoff im Brückenbau im Vergleich zu den Konkurrenz-Baustoffen Stahl und Stahlbeton immer noch äusserst wenig eingesetzt. Es ist allerdings anzunehmen, dass mit stärker werdender Forderung nach nachhaltigen Baustoffen und als Folge von politischen Vorstössen im Parlament, Holz künftig als Baustoff im Brückenbau vermehrt zum Einsatz kommen wird. Im Vergleich zum Hochbau ergeben sich im Brückenbau u. a. zwei markante Unterschiede:

- Die klimatische Exposition der Bauteile im Brückenbau entspricht der Feuchteklasse 2 [9], welche zu höheren Ausgleichsfeuchten im Holz führt und damit zu reduzierten Steifigkeiten und Festigkeiten im Vergleich zur Feuchteklasse 1 (Abb. 1.3). Gemäss der durch die WHFF-CH unterstützten Untersuchung [10], sind in Fichtenholz bei einem der Feuchteklasse 2 entsprechenden Umgebungsklima (20°C / 85% rel. Luftfeuchte) Holzfeuchten von 17 – 20% zu erwarten und in Eschenholz solche von 15 – 17%.
- Die auf Brücken einwirkenden Verkehrslasten sind keine über die Zeit konstanten Einwirkungen, sondern sind Schwankungen unterworfen. Das heisst, es handelt sich um Wechsellasten, welche in den Bauteilen und Verbindungen zu einer Ermüdungsbeanspruchung führen.

Neben den bereits zuvor erwähnten Kranbahn-Tragkonstruktionen sind Brücken aufgrund der sich aus den hohen Verkehrslasten ergebenden grossen Beanspruchungen ein weiteres mögliches Anwendungsgebiet für Verbindungen mit eingeklebten Gewindestangen, z. B. in:

- Knotenverbindungen von Fachwerkstäben (Abb. 1.4) mit parallel zur Faserrichtung in den Füllstäben und rechtwinklig zur Faserrichtung in den Gurtungen eingeklebten Gewindestangen;
- Anschlüssen von Fachwerkstäben an Stahlteile im Bereich von Auflagern (Abb. 1.5);
- Oberen Anschlüssen der Hänger bei Bogenbrücken (Abb. 1.6 und Abb. 1.7).

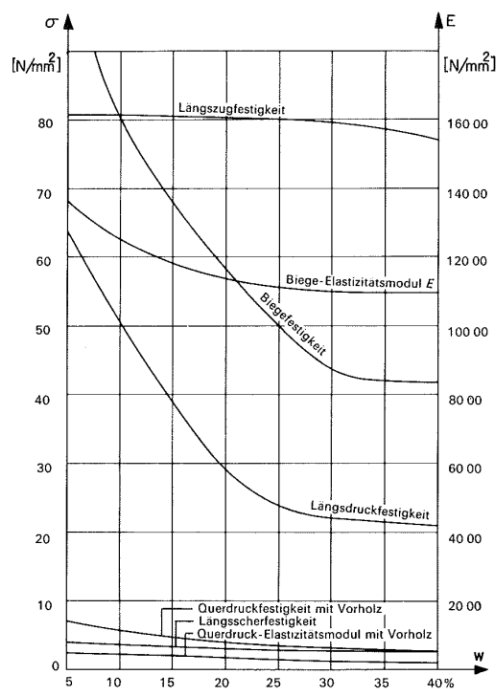


Abb. 1.3: Einfluss der Holzfeuchte auf die mechanischen Eigenschaften von Fichtenholz [11, 12].

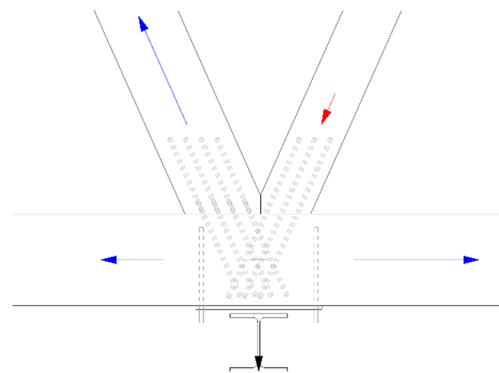


Abb. 1.4: Brücken-Hauptträger ausgebildet als BSH-Streben-Fachwerk (links), mit eingeklebten Gewindestangen in den Knoten (rechts). (Bilder: neue Holzbau AG)

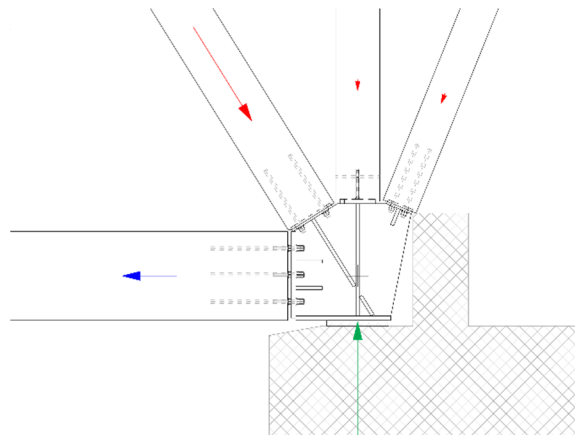


Abb. 1.5: Anschlüsse von Fachwerkstäben an ein Stahlteil im Bereich des Brücken-Auflagers. (Bilder: neue Holzbau AG)



Abb. 1.6: Bogenbrücke Pont de la Pâla in Bulle (FR) mit Stahlhängern, welche mittels Stahlblechen und Bolzen am Bogen angeschlossen sind. (Fotos: Bruno Zumbrunn-Maurer).

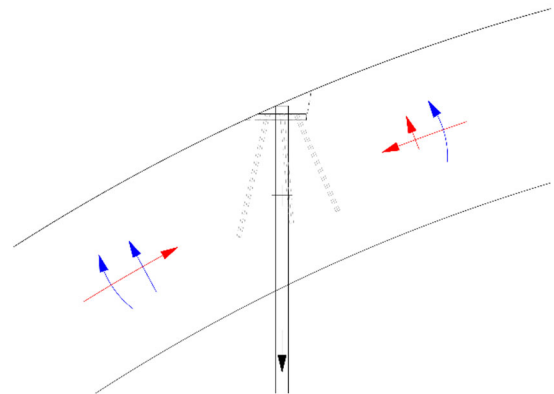


Abb. 1.7: Bogenbrücke in San Niclò (GR), bei welcher die Anschlüsse der Hänger an die Bögen mit eingeklebten Gewindestangen realisiert wurden. (Foto: Bruno Zumbrunn-Maurer, Planskizze: neue Holzbau AG).

Brettschichtholz aus Laubholz bietet oft eine elegante Möglichkeit, um hochbeanspruchte Bereiche eines Tragwerks auszubilden. Diese hybride Bauweise ging bei der Neumattbrücke in Burgdorf (Abb. 1.8) als sinnvollste Lösung aus der Machbarkeitsstudie [13] hervor. Die Konstruktion mit GSA-Verbindungen überzeugt mit filigranen Gurtquerschnitten und einem verbesserten konstruktiven Holzschutz [14]. Hier wurde anstelle von Buchenholz Eschenholz bevorzugt, weil es nach der Trocknung eine bessere Dimensionsstabilität unter klimatischer Wechselbeanspruchung zeigt [15].

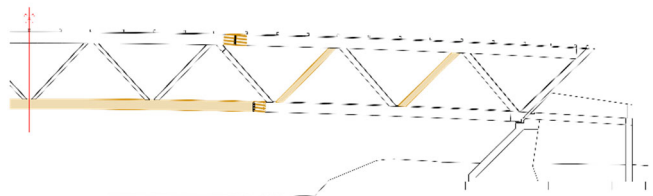


Abb. 1.8: Neumattbrücke in Burgdorf (BE). Fachwerkbrücke für den Langsam-Verkehr mit hochbeanspruchten Bauteilen aus Eschen-BSH, in der Skizze braun dargestellt. (Bilder: neue Holzbau AG).

Während dieses Projekt noch für den Langsam-Verkehr ausgelegt wurde, sollen zukünftig mehr Brücken mit grossen Nutzlasten und hohem Verkehrsaufkommen in Holz realisiert werden. Auch bei diesen Aufgabenstellungen wird der Einsatz von Bauteilen aus Laubholz eine Schlüsselrolle betreffend Machbarkeit spielen. Für eine sichere Anwendung der Holzbauweise für stark frequentierte Brücken fehlen allerdings z.T. noch die Grundlagen, insbesondere was die Ermüdungsfestigkeit in der Feuchteklasse 2 betrifft. Die in diesem Forschungsbericht beschriebenen Projektergebnisse leisten einen Beitrag zur Füllung dieser Wissenslücke.

1.6 Ziele des Forschungsprojekts

Die Weiterentwicklung der Verbindungs-Technologie mit eingeklebten Gewindestangen ist für den Holzbau bedeutsam. Die neue Holzbau AG hat Erfahrung bei Langzeit-Klimaversuchen mit GSA-Stäben in Laubholz. Zudem wurden bereits einzelne Ermüdungsversuche mit eingeklebten Ankern durchgeführt. Im Holzbrückenbau treten diese beiden Beanspruchungen kombiniert auf. Nach heutigem Wissenstand bestehen noch keine Untersuchungen an Holzverbindungen, die sowohl die Feuchte als auch die Ermüdung berücksichtigen. Mit dem durchgeführten Forschungsprojekt sollte diese Lücke für eingeklebte Anker geschlossen werden. Das Projekt hatte zum Ziel, den Anwendungsbereich von Holzbrücken auszuweiten und den Einsatz von Verbindungen mit eingeklebten Gewindestangen abzusichern, indem:

- Hinweise für die Bemessung auf Ermüdung erarbeitet werden betreffend:
 - o den Einfluss der Holzfeuchte (Feuchteklasse 2 im Vergleich zur Feuchteklasse 1);
 - o den Einfluss des Winkels zwischen der axial beanspruchten Gewindestange und der Faserrichtung des Holzes (parallel und rechtwinklig zur Faserrichtung);
 - o den Einfluss der Holzart (Esche, Fichte).
- überprüft wird, ob parallel zur Faserrichtung in Eschen-BSH eingeklebte Gewindestangen in der Feuchteklasse 2 eine Ermüdungsbeanspruchung mit 2 Mio. Lastwechseln ohne Schaden widerstehen.
- für rechtwinklig zur Faserrichtung in Fichten-BSH in der Feuchteklasse 2 eingeklebten Stangengruppen:
 - o ein für Ermüdungsversuche geeigneter Prüfkörper entwickelt wird;
 - o versucht wird, 2 Mio. Lastwechsel zu erreichen, ohne dass die Verbindung versagt;
 - o die Festigkeit, die Steifigkeit, und die Art des allfälligen Versagens ermittelt wird.
- auf die Prüfkörper angepasste Behältnisse und Verfahren zur Klimatisierung (Auffeuchtung) der Prüfkörper auf eine der Feuchteklasse 2 entsprechende Ausgleichsfeuchte entwickelt und gebaut werden.
- die Holzfeuchte-Zunahme in Abhängigkeit der Zeit anhand von Proben aus Eschen- und Fichten-BSH in praxisrelevanten Abmessungen beobachtet wird.

1.7 Bedeutung des Projekts für Forschung und Praxis

Aus Sicht der Praxis leistet das Projekt wichtige Entwicklungsarbeit für einen vermehrten Einsatz der Holzbauweise im Brückenbau. Eine als sehr leistungsfähig bekannte Verbindung wird, eingesetzt in Esche parallel zur Faserrichtung und in Fichte rechtwinklig zur Faserrichtung auf deren Ermüdungsverhalten in einem der Feuchteklasse 2 entsprechenden Zustand der Ausgleichsfeuchte überprüft.

Aus Sicht der Forschung sind die geplanten Versuche als aussergewöhnlich zu bezeichnen, da es bisher nur sehr wenig experimentelle Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten von Holzverbindungen gibt. Gemäss Kenntnisstand der Autoren wurden bisher keine Holzverbindungen mit praxisnahen Abmessungen in der Feuchteklasse 2 auf Ermüdung untersucht. Dies obwohl beispielsweise Malo et al. [16] darauf hinweisen, dass "es allgemein bekannt ist, dass höhere Feuchtigkeitsgehalte und Feuchtigkeitsschwankungen die Festigkeit erheblich verringern können" und dass "der Eurocode 5 diesen Effekt nicht zu berücksichtigen scheint, was in Zukunft sicherlich nachgeholt werden sollte."

1.8 Projekt-Team

Die Versuche wurde an der Abteilung Ingenieur-Strukturen der Empa durch Robert Widmann, Kilian Strasser, Slavko Tudor und René Steiger durchgeführt. Bei der Auswertung der Ermüdungsversuche und der Erstellung der Graphiken hat Lukas Kramer mitgearbeitet. Die neue Holzbau AG (Bruno Zumbrunn-Maurer, Flavio Kienberger und Thomas Strahm) wirkte als Industriepartner im Projekt mit und war verantwortlich für die Herstellung und Klimatisierung der Prüfkörper, die Durchführung der statischen Vorbelastungsversuche und die Zerlegung der Prüfkörper nach den Versuchen, um die Versagensart bestimmen zu können.

1.9 Literatur zum Kapitel 1

1. 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.
2. 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 (Spec. Issue). 90-105.
3. Gehri E. (2007): Leistungsfähige Anschlüsse parallel zur Faser Anforderungen und technische Lösungen. 6. Grazer Holzbau-Fachtagung, 28.09.2007, Graz.
4. Steiger R. (2012): In Brettschichtholz eingeklebte Gewindestangen – Stand des Wissens zu einer leistungsfähigen Verbindungstechnik. 18. Internationales Holzbauforum, Garmisch, Deutschland.
5. Strahm T. (2009): Verbindungen mit grosser Leistung. SAH Fortbildungskurs, Weinfelden.
6. Gehri E. (2001): Ductile behaviour and group effect of glued-in steel rods. In: International RILEM Symposium on Joints in Timber Structures, RILEM Publications s.a.r.l., Stuttgart, Germany.
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, 9- 12 May 2022, Biel/Bienne, Switzerland.
8. Steiger R., Motavalli M. (2021): Empa-Prüfbericht Nr. 5214027186: Ermüdungsversuche zur Ermittlung des Tragverhaltens bei axialer Wechsellast. Dübendorf, Switzerland.
9. SIA (2021): Norm SIA 265 Holzbau. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich, Schweiz.
10. Ehrhart T., Steiger R., Frangi A., Strahm T., Bernasconi A. (2021): Bericht zum Projekt WHFF-CH 2020-11: Laubholzstützen - Druckfestigkeit und E-Modul parallel zur Faserrichtung und Einfluss der Holzfeuchte.
11. Dubas P., Gehri E., Steurer A. (1981): Einführung in die Norm SIA 164(1981) Autographie zum Fortbildungskurs für Bauingenieure; Zürich, 7.-9.Oktober 1981. Zürich.
12. Empa (1955): Über den Einfluss von Wassergehalt, Raumgewicht, Faserstellung und Jahrringstellung auf die Festigkeit und Verformbarkeit schweizerischen Fichten-, Tannen-, Lärchen-, Rotbuchen- und Eichenholzes. EMPA, Zürich.
13. Renggli P. (2012): Schlussbericht zur Machbarkeitsstudie: Verwendung von Laubholz für die Neumattbrücke. Aktionsplan Holz, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern.
14. Renggli P. (2013): Neumattbrücke - Chancen und Grenzen in der Verwendung von Laubholz. 19. Internationales Holzbauforum, Garmisch, Deutschland.
15. Bernasconi A., Ehrhart T., Eschmann M., Franke S., Jockwer R., Klippel M., Lehmann M., Maurer B., Pauli B., Ratsch G., Schmid H., Selzer W., Strahm T. (2021): Verklebte Laubholzprodukte für den statischen Einsatz. Lignum - Holzwirtschaft Schweiz, Zürich.
16. 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.

2. Ermüdungsverhalten von Bauteilen und Verbindungen im Holzbau

2.1 Materialermüdung

Unter Materialermüdung versteht man einen langsam voranschreitenden Schädigungsprozess in einem Bau- oder Werkstoff unter wechselnder mechanischer Belastung, und möglicherweise gleichzeitig wirkender Umgebungseinflüsse, wie wechselnder Temperatur, UV-Strahlung, Einwirkung eines korrosiven Mediums, etc. [1]. Materialermüdung bedeutet, dass auch eine statisch unkritische Belastung (noch im elastischen Bereich, also noch unterhalb der Streckgrenze des Werkstoffs) zu einer Funktionsuntüchtigkeit (Ermüdungsrisssbildung) oder auch zum Totalausfall (Ermüdungsbruch) eines Bauteils führen kann, wenn sie oft genug auf das Bauteil einwirkt. Zyklisch belastete Teile haben daher prinzipiell eine begrenzte Lebensdauer. Deshalb muss man an kritischen Bauteilen vor dem Einsatz eine Lebensdauerbewertung, -berechnung oder Versuche durchführen, die eine Abschätzung der Ermüdungsfestigkeit des Bauteils zulassen. Bauteile, die theoretisch unbegrenzt viele Zyklen ertragen (weil sie aus bestimmten, dafür geeigneten Werkstoffen bestehen), bezeichnet man als dauerfest.

Materialermüdung kann durch schwingende, dynamische Belastung (bei Brücken z.B. in Folge der Verkehrslasten) auftreten. Die Spannung, bei der ein dynamisch belastetes Bauteil bricht, liegt deutlich unterhalb der Zugfestigkeit des verwendeten Werkstoffs. Die Schwingfestigkeit von Werkstoffen oder Bauteilen wird im Wöhlerversuch ermittelt. Hierfür werden die Versuchskörper zyklisch, meist unter einer sinusförmigen Beanspruchungs-Zeit-Funktion, belastet. Der Versuch läuft, bis ein definiertes Versagen (Bruch, Anriss) eintritt oder eine festgelegte Grenzwahrscheinlichkeit erreicht wird. Versuchskörper, welche die Grenzwahrscheinlichkeit ohne erkennbares Versagen erreichen, werden als Durchläufer bezeichnet. Die Ergebnisse des Versuchs trägt man in ein einfach- oder doppellogarithmisches Diagramm ein. Üblicherweise wird in solchen "Wöhlerdiagrammen" die Nennspannungsdifferenz S_a über der ertragbaren Schwingzahl aufgetragen. Den sich ergebenden Kurvenzug nennt man die Wöhlerkurve oder auch Wöhlerlinie. Wöhlerkurven kann man in drei Bereiche K , Z und D einteilen: K ist der Bereich der Kurzzeitfestigkeit bzw. Kurzzeitschwingfestigkeit unterhalb von ca. 10^4 bis 10^5 Schwingspielen. Z ist der Bereich der Zeitfestigkeit bzw. Zeitschwingfestigkeit zwischen 10^4 und materialabhängig etwa 2 Mio. Schwingspielen, in welchem die Wöhlerkurve (von Metallen) bei doppellogarithmischer Darstellung nahezu gerade verläuft. D ist der anschliessende Bereich der sogenannten Dauerfestigkeit. Die Abb. 2.1 zeigt als Beispiel die Wöhlerkurven für verschiedene Kerbgruppen im Stahlbau gemäss Norm SIA 263:2013 [2].

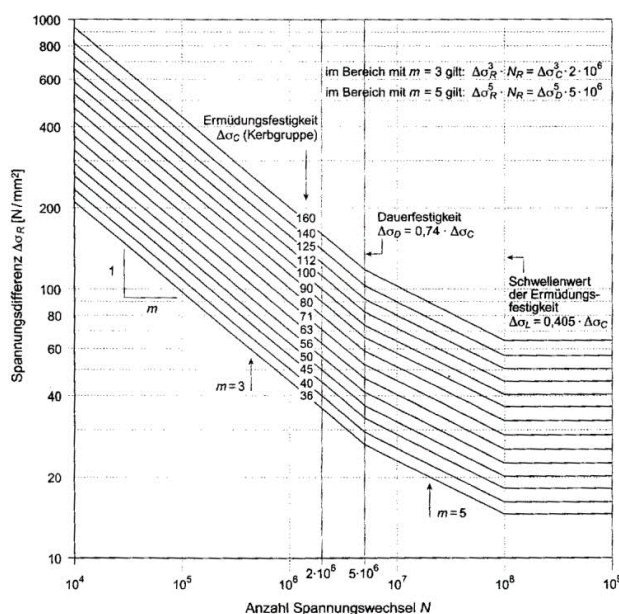


Abb. 2.1: Ermüdungsfestigkeit für verschiedene Kerbgruppen im Stahlbau [2].

Unterhalb der Dauerfestigkeit kann ein Bauteil theoretisch beliebig viele Schwingspiele (auch als Last- bzw. Spannungswechsel bezeichnet) ertragen. Belastungen oberhalb der Dauerfestigkeit bewirken ein Versagen des Bauteils nach einer bestimmten Zahl an Schwingspielen. Die Zahl der ertragenen Schwingspiele eines Bauteils unter Betriebsbelastung (variable Lastamplituden) bis zum Ausfall kann im Rahmen statistischer Genauigkeit mit Hilfe der Wöhlerlinie vorausgesagt werden. Dazu verwendet man die Methoden der linearen Schadensakkumulation nach Palmgren, Langer und Miner [3-5].

Die Auslegung nach Gesichtspunkten der Betriebsfestigkeit begann bei schwingbeanspruchten Bauteilen aus Metall, insbesondere aus Stahl. Folglich gelten heute die Konzepte des Stahlbaus als akzeptierte Grundlage für die Bemessung auf Ermüdung. Neben der Anzahl Lastwechsel N und der Form des Bauteils, ist die Spannungsdifferenz $\Delta\sigma$ (Differenz zwischen maximaler und minimaler Spannung) ein Parameter, welcher die Ermüdungsfestigkeit von Bauteilen und Verbindungen wesentlich beeinflusst. Demgegenüber ist das absolute Spannungsniveau im Stahlbau von untergeordneter Bedeutung. Ausgedrückt wird die Spannungsdifferenz $\Delta\sigma$ üblicherweise als R -Wert, welcher als Verhältnis zwischen der minimalen und der maximalen Spannung berechnet wird. Entsprechend ihrer Form werden Bauteile im Stahlbau in Kerbgruppen eingeteilt, zu denen Angaben zur Zeitfestigkeit bei 2 Mio. Lastwechseln gemacht werden.

2.2 Stand der Forschung auf dem Gebiet

Der folgende Review konzentriert sich auf zwei Themenbereiche, nämlich (i) Bemessungsansätze für Ermüdungsbeanspruchungen im Holzbau; und (ii) Ermüdungsverhalten von in Holz eingeklebten Stahl-Gewindestangen. Aus der gesichteten Literatur konnten Schlussfolgerungen für die Versuchsplanung in der durchgeführten Forschungsarbeit gezogen werden.

2.2.1 Bemessungsansätze für Ermüdungsbeanspruchungen im Holzbau

Für Bauwerke oder Bauteile, die häufig zyklischen Belastungen mit grossen Amplituden ausgesetzt sind, sind Ermüdungsnachweise erforderlich. Es ist nachzuweisen, dass kein Versagen oder grössere Schäden aufgrund von Ermüdung, d.h. Schwächung der Verbindung oder eines Bauteils durch zyklische Belastung, auftreten. Ehlbeck 1982 [6] gibt einen ersten Überblick über die geleisteten Arbeiten zur Ermüdungsfestigkeit von Holz, Holzwerkstoffen und Holzverbindungen. Das Holz zeigt offenbar bei Zug-, Druck- und Biegebeanspruchung in Faserrichtung kein ausgesprochen beängstigendes Verhalten. Gefährlich sind Scherbeanspruchungen, besonders bei Wechsel der Beanspruchungsrichtung. Querkzugbeanspruchungen dürften ähnlich gefährlich sein, obwohl darüber im Hinblick auf die Dauer-schwingfestigkeiten keine Daten bekannt sind. Mechanische Verbindungsmittel als wesentlicher Bestandteil einer jeden Holzkonstruktion sind unterschiedlich gefährdet. Durchgehende zylindrische Verbindungsmittel sind vorzuziehen. Sie sollten nicht zu schlank sein oder aber mit reduzierten zulässigen Belastungen eingesetzt werden. Wechselbeanspruchungen sind wegen rascher Lockerung der Verbindung besonders gefährlich und führen frühzeitig zu Dauerbrüchen in den metallischen Verbindungsmitteln.

In der Literatur sind verschiedene Nachweisverfahren beschrieben, von denen einige Eingang in die Normung gefunden haben, zum Beispiel in die Schweizer Norm SIA 265 [7] und in den Eurocode 5 (EN 1995-2 [8] und spätere Versionen). Die Methoden unterscheiden sich erheblich, insbesondere im Hinblick auf das Einbeziehen verschiedener Parameter in die Bemessung. So basiert die Nachweismethode in der Norm SIA 265 auf dem herrschenden Spannungs-Schwankungsbereich, während diejenige in der EN 1995-2 Spannungsverhältnisse und Maximalspannungen verwendet. Obwohl nur in einem informativen Anhang zur Norm enthalten (!), gilt letzteres Verfahren heute als geeigneter und zuverlässiger für die Bemessung von Holzbauten [9]. Ein Überblick über diese Nachweismethode wurde 2017 in [10] publiziert. Auch in der DIN 50100 [11] und in [12] werden interessante Hinweise gegeben. Bei Holzkonstruktionen treten, bedingt durch Nagellöcher und Bohrungen (= Kerben), ähnliche Spannungsverhältnisse wie in früheren (genieteten) Stahlkonstruktionen auf, bei denen keine hohen lokalen Eigenspannungen infolge Schweissung auftraten [13]. Dies gilt auch für Stabdübel-Verbindungen, solange ein elastisches Verhalten des Werkstoffes vorliegt, was bei gedrunenen Stabdübeln der Fall ist. Gemäss EN 1995-2 [8] gilt folgender Ansatz für die Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit:

$$k_{\text{fat}} = 1 - \frac{1 - R}{a(b - R)} \cdot \log_{10} N$$

Für Stabdübel (SD)-Verbindungen (mit $d \leq 12$ mm) ergibt sich mit $a = 6$ und $b = 2$ für 1 Mio. (10^6) Lastwechsel:

$$k_{\text{fat,SD}} = 1 - \frac{1 - R}{6(2 - R)} \cdot 6 = 1 - \frac{1 - R}{2 - R}$$

Malo et al. publizierten 2006 [9] einen Vergleich der eigenen Daten aus Ermüdungsversuchen an Stabdübel-Verbindungen mit dem Ansatz im Eurocode 5. Die Schlankheit der Stabdübel war dabei gering, was zwar die Berechenbarkeit eines solchen Anschlusses vereinfacht, jedoch die Duktilität einer Verbindung stark reduziert. Die Autoren fanden bei ihrem Vergleich eine ausgezeichnete Übereinstimmung, wie aus der Abb. 2.2 ersichtlich ist.

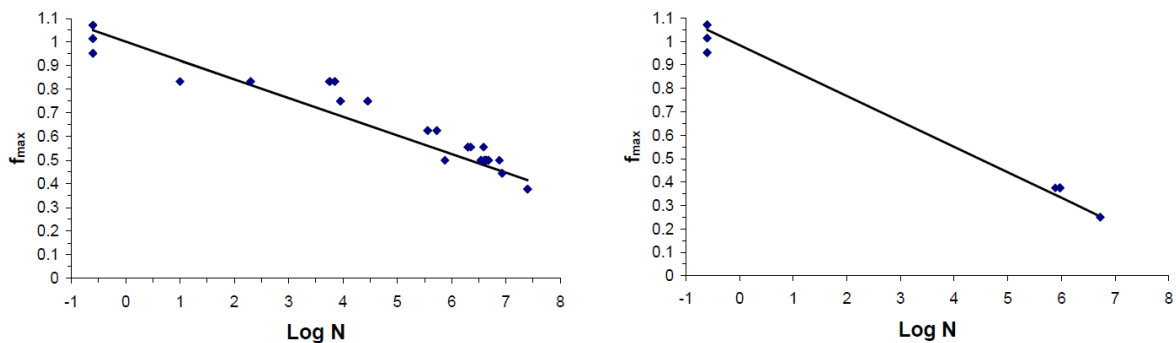


Abb. 2.2: Maximale Spannung f_{max} in Funktion der Anzahl Lastwechsel N bis zum Versagen für R -Werte von 0.1 (links) und -1 (rechts). EN 1995-2 Bemessungsansatz [8] im Vergleich mit Daten aus Versuchen von Malo et al. an spröden Stabdübelverbindungen [9].

In der aktuell gültigen Version des Eurocode 5 [8] sind die Ermüdungsbeiwerte (a und b) nur für Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln (Nägel, Stabdübel) unter lateraler Beanspruchung angegeben. Aus veröffentlichten Arbeiten im Rahmen des Projekts "TACITUS" kann gefolgert werden, dass eine Erweiterung des Nachweisverfahrens für Ermüdung auf eingeklebte Stäbe unter axialer Beanspruchung möglich ist [14-16]. Bei Verwendung von Betonrippenstäben Innoxripp 4486 eingeklebt in Laubholz, schlagen die Autoren Ermüdungsbeiwerte von $a = 6.0$ und $b = 2.8$ vor. Für übliche Rippen- und Betonstähle werden tiefere b -Werte ($b = 2.1$) angesetzt, weil sich dort Stahlbrüche einstellen. Im Schluss-Entwurf der überarbeiteten Version des Eurocode 5 [17] sind nun auch Ermüdungsbeiwerte (a bzw. $\alpha_{\text{fat}} = 6.7$ und b bzw. $\beta_{\text{fat}} = 1.3$) für axial belastete eingeklebte Stangen angegeben. In der Abb. 2.3 ist der Vergleich der k_{fat} -Werte für mit 2 Mio. Lastwechseln belastete Stabdübel und eingeklebte Anker in Funktion des Spannungsverhältnisses R dargestellt. Die Werte für eingeklebte Anker liegen generell höher. Für den Bereich um $R = 0$ ergeben sich rund 30% höhere Werte; d. h., dass Anschlüsse mit eingeklebten Ankern wesentlich unempfindlicher auf Ermüdung reagieren bzw. weniger häufig ein Ermüdungsnachweis erforderlich wird. Generell ist laut [13] kein wesentlicher Einfluss der Holzart auf die k_{fat} -Werte zu erwarten, wohl aber auf die Ermüdungsfestigkeit f_{fat} , da $f_{\text{fat}} = k_{\text{fat}} \cdot f_d$.

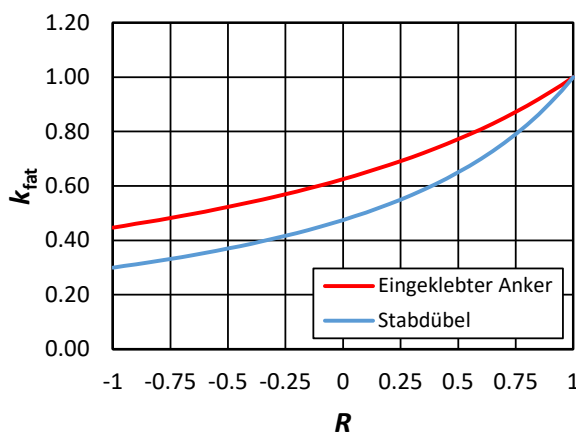


Abb. 2.3: Vergleich des Ermüdungsbeiwerts k_{fat} für mit 2 Mio. Lastwechseln lateral belastete Stabdübel und für eingeklebte Anker mit axialer Beanspruchung in Funktion des Spannungsverhältnisses R [13].

An axial beanspruchten selbstbohrenden Schrauben sind einige wenige Untersuchungen durchgeführt worden. Niebuhr und Sieder [18] untersuchten das hochzyklische Ermüdungsverhalten einer selbstschneidenden Holzschraube für axiale Zugbelastung mit $R = 0.1$. Basierend auf 71 Ermüdungsversuchen im End- und Langzeitbereich wurden Wöhlerkurven für die Versagensarten Gewindeflächenbruch und Kopfabriss abgeleitet. Vergleiche mit bereits vorliegenden Ergebnissen ähnlicher Versuche zeigten ein gleiches Verhalten im Langzeitbereich und leichte Unterschiede im Endlebensbereich, die nicht überzeugend ausschliesslich auf unterschiedliche Prüfbedingungen oder Unterschiede in der untersuchten Population zurückgeführt werden können. Der Ermüdungsnachweis nach EN 1993-1-9, Detailkategorie 50, erwies sich als sehr konservativ, während die Detailkategorie 100 das beobachtete Ermüdungsverhalten im Bereich der endlichen Lebensdauer nachweislich überschätzte. Ergänzend zu den bisherigen Beobachtungen zum Ermüdungsverhalten von selbstschneidenden Schrauben konnten die Autoren eine erste Einschätzung der Entscheidungskraft von geometrischen und verfahrenstechnischen Unterschieden bei den Schrauben vornehmen.

Für das 2K-EP-Klebstoff WEVO-Spezialharz EP 32 S mit WEVO-Härter B 22 TS zum Einkleben von Stahlstäben in Holzbaustoffe besteht laut der Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Z-9.1-705 [19] eine Genehmigung für die Anwendung von in Nadelholz-BSH eingeklebten Betonrippenstäbe mit Durchmesser $6 \text{ mm} \leq d \leq 30 \text{ mm}$ und Kraft- zur Faserwinkeln $0^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ auch bei Ermüdungsbeanspruchung. Der Beiwert k_{fat} für die Berücksichtigung der Festigkeitsminderung infolge der Anzahl der Belastungszyklen kann laut der Zulassung wie folgt bestimmt werden:

$$k_{\text{fat,SD}} = R^2 \cdot 0.2064 \cdot \lg(N) + R \cdot 0.05425 \cdot \lg(N) - 0.08029 \cdot \lg(N) + 1$$

mit:

N	Schwingenspielzahl $N = \beta \cdot N_{\text{obs}} \cdot t_L$ für $N \leq 10^7$
B	Beiwert zur Berücksichtigung der Auswirkungen eines Schadens des betrachteten Tragwerkselements
N_{obs}	Anzahl der jährlichen Spannungsspiele mit konstanter Amplitude
t_L	Bemessungsbeiwert zur Berücksichtigung der Lebensdauer des Tragwerks in Jahren
R	Spannungsverhältnis nach DIN EN 1995-2, Gleichung (A.6)

Bei einem Einsatz in der Nutzungsklasse (Feuchteklasse) 2 ist der Beiwert k_{fat} um 20% abzumindern.

Brandner [20] untersuchte das Ermüdungsverhalten von im niedrigzyklischen Bereich axial auf Zug belasteten, selbstbohrenden Holzschrauben in Fichten-Brettsperrholz mit Versagensmodus Ausziehen. Die Untersuchungen beschränkten sich auf einen Schraubentyp und Durchmesser, eine effektive Einbaulänge, eine Prüfgeschwindigkeit und ein Spannungsverhältnis ($R = 0.1$). Die untersuchten Parameter waren unterschiedliche Kraft-Faser-Winkel, die erwartete Ermüdungslebensdauer, die Form der Belastung. Die Holzfeuchte betrug 11% bei den monotonen Versuchen und 12% bei den zyklischen. Insgesamt wurden neun zyklische Versuchsreihen mit insgesamt 132 Versuchen und drei monotone Versuchsreihen mit insgesamt 60 Versuchen durchgeführt. Bei den zyklischen Versuchen versagten 98 Probekörper durch Ausziehen, und 34 Probekörper durch Schraubenbruch. In den Versuchen bestätigte es sich, dass Holzschrauben, die auf Ausziehen versagen, weniger anfällig für Ermüdungsversagen sind als Holz, das auf Schub belastet wird. Ausgewertet mit dem Bemessungsansatz im Eurocode 5 (EN 1995-2 [8]), ergeben sich auf der Grundlage der beobachteten Fälle von Ausziehversagen $a = 2.26$ und $b = 6.25$ als die auf Niveau Mittelwert am besten passenden Parameter. Mit dem konservativeren Modell von Kreuzinger und Mohr [21] ergeben sich die Parameter zu $a = 1.84$ und $b = 5.52$. Das beobachtete Stahlzugversagen liegt unterhalb der von Ringhofer et al. [22] vorgeschlagenen Detailkategorie 100 gemäss Eurocode 3. Die Gründe für die unerwartet kurzen Ermüdungslebensdauern und das deutlich unterschiedliche Versagen (Schraubenbruch versus Ausziehen), konnten die Autoren noch nicht vollständig klären.

2.2.2 Ermüdungsverhalten von eingeklebten Gewindestangen

Im Rahmen des GIROD-Projektes [23] wurden Ermüdungsversuche mit einer Prüffrequenz von ca. 1 Hz und einem R -Wert von 0.1 an in Fichten-Vollholz der Festigkeitsklasse C 35 parallel zur Faserrichtung eingeklebten Gewindestangen mit Durchmesser 16 mm und 8 mm durchgeführt. Die Holzfeuchte der Prüfkörper betrug $12 \pm 1\%$. Es wurden 3 Klebstofftypen (EPX, PUR und gefüllter PRF) untersucht. Aus den Versuchen wurde die Schlussfolgerung gezogen, dass Ermüdungsbeanspruchung nicht zu unter-

schiedlichen Versagensarten als bei statischer Belastung führt. Allerdings wurde eine Häufung von Gewindestangen-Versagen festgestellt. Neben der Art des Klebstoffs sind die geometrischen Abmessungen der Prüfkörper ein entscheidender Faktor. Es wurden Bemessungsregeln entwickelt, welche jedoch aufgrund des beschränkten Prüfumfags nur sehr allgemein gehalten sind.

Erchinger und Steurer [24] untersuchten parallel zur Faserrichtung in Fichten-BSH eingeklebte Einzel-Gewindestangen M20 mit Stahlqualität 4.6. Sie führten 7 dynamische Versuche durch mit einer Beanspruchungsamplitude vom 9 kN, entsprechend einer Spannung in der Gewindestange von 37 N/mm². Bei zwei Versuchen wurde eine Wechselbeanspruchung (Zug / Druck 0 kN ± 4.5 kN) angesetzt, bei den übrigen Versuchen wurden die Prüfkörper vorgängig auf Druck vorgespannt und anschliessend zyklisch beansprucht (Druck -30.5 kN ± 4.5 kN). Die bei der Prüffrequenz 8 Hz gemessenen Relativverformungen zeigten auch beim Erreichen der Ziel-Lastwechselzahl von 2.8 Mio. keine erkennbaren Veränderungen, d.h. sie blieben elastisch bei gleicher Grösse. Die in anschliessenden Auszugsversuchen ermittelte Resttragfähigkeit ergab keine nennenswerten Differenzen zum vergleichbaren statischen Versuch. Offenbar führten die dynamischen Beanspruchungen im vorliegenden Fall nicht zu Schäden. Die Erhöhung der Lastwechselzahl auf 4 bzw. 10 Millionen und die Erhöhung der Schwingungsamplitude auf 13 kN ($\Delta\sigma = 53 \text{ N/mm}^2$) führte zum gleichen Ergebnis. Angaben zum relevanteren Parameter $\Delta\tau$ (Schubspannung in der Verankerung) werden in der Publikation keine gemacht.

Die Ergebnisse der durch Molina et al. [25] mit einer Prüffrequenz von 3 Hz durchgeführten Ermüdungsversuchen an in *Eucalyptus citriodora*-BSH eingeklebten Stahl-Bewehrungsstäben zeigten eine höhere Verankerungsfestigkeit als die in *Pinus taeda*-BSH eingeklebten Stäbe. Die Versuche zeigten auch, dass eine Erhöhung des Belastungsgrades die Anzahl der Lastwechsel bis zum Versagen der Verbindungen erheblich reduzierte. Die Auszugsfestigkeit der Verbindung nach insgesamt 1 Mio. Lastwechsel (mit $R = 0.1$) war um 50% geringer als die Auszugsfestigkeit bei einem einzigen Belastungszyklus. Mit Ausnahme des Versagens im Stahlstab, glichen die meisten in den Versuchen beobachteten Ermüdungsversagensarten denjenigen, welche in den entsprechenden statischen Versuchen beobachtet wurden. Speziell an dieser Untersuchung ist, dass drei verschiedene Holzfeuchten (12, 17 und 22 % je ± 1) geprüft wurden. Obwohl nicht explizit erwähnt, wird vermutet, dass die Stangen in vorgängig klimatisierte Holzteile eingeklebt worden waren. Ein allenfalls negativer Effekt des Aufquellens dürfte somit unberücksichtigt geblieben sein. Zudem wiesen die Proben mit einem Stangendurchmesser von 6.3 mm einen für baupraktische Anwendungen sehr kleinen Durchmesser auf. Das Ermüdungsverhalten wurde durch den Feuchtigkeitsgehalt und die Art des verwendeten Klebstoffs (EPX bzw. PUR) beeinflusst. Je höher die Holzfeuchte war, desto geringer war die Verankerungsfestigkeit des Stahlstabs. Ermüdungsversagen kann in jeder Verbindungskomponente auftreten, d. h. in der Stahlstange, dem Klebstoff oder dem Holz. Unter Ermüdungsbeanspruchung besteht jedoch eine erhöhte Gefahr, dass die Stahlstangen Schäden erleiden oder versagen.

Laut Myslicki et al. [16] gab es normative Regelungen für auf Ermüdung beanspruchte Verbindungen mit eingeklebten Gewindestangen noch in ungenügendem Umfang, was gemäss Einschätzung der Autoren zum grössten Teil auf unvollständige oder gänzlich fehlende experimentelle Daten zurückzuführen war. In ihrem Beitrag stellen die Autoren Ermüdungsuntersuchungen an in Laubholz-Werkstoffen eingeklebten Stangen vor, bei denen verschiedene Stabtypen (Gewindestangen, Bewehrungsstäbe und Inox-Bewehrungsstäbe), Holzarten (Buchen-BSH, Eichen-BSH, BauBuche) und Klebstoffe (2K-PUR und -EPX) eingesetzt wurden. Ausserdem wurden die Verankerungslänge (6 d und 10 d) und das Belastungsverhältnis ($R = 0.1$ und 0.5) variiert. Die Holzfeuchte ist in den Publikationen zu den Versuchen nicht explizit angegeben. Bei Lagerung und Prüfung habe ein Klima von 23°C / 50% rel. LF geherrscht. Die mehr als 70 zyklischen Versuche geben aufschlussreiche Hinweise auf das Ermüdungsverhalten von eingeklebten Gewindestangen und zeigen u.a., dass zwei unterschiedliche Schädigungsmechanismen auftreten können. Im Bereich der Kurzzeitschwingfestigkeit (Low-Cycle-Fatigue LCF), dominieren Holz- und Adhäsionsbruch, während das Versagen der Stäbe der begrenzende Faktor im Bereich der hohen Lastwechselzahlen bzw. des Dauerschwingverhaltens (High-Cycle-Fatigue HCF) ist. Auf der Grundlage der dokumentierten experimentellen Ergebnisse werden die existierenden normativen Regelungen für zyklische Belastung von Verbindungen in Nadelholz diskutiert. In einem Folgebeitrag [26] stellen die Autoren eine basierend auf den Versuchen entwickelte Bemessungsmethodik vor, welche auf der ermüdungsbedingten Schadensakkumulation im Holz basiert und welche mit Ermüdungsmodellen aus dem Stahlbau verglichen wird.

Maurer et al. [27] untersuchten den Einfluss der Prüffrequenz (5 – 12 Hz) und der damit verbundenen Temperaturerhöhung im Probekörper an in Eschen-BSH parallel zur Faserrichtung eingeklebten Paaren von Gewindestangen mit metrischem M16-Gewinde, wobei die Holzfeuchte nach den Versuchen zwischen 7.7 und 8.2% lag. Die Versuche wurden mit einem Spannungsverhältnis von $R = 0.1$ durchgeführt. Es konnten geeignete Gewindestangen und Stahlschlussteile gefunden werden, welche bei mehr als 2 Mio. Lastwechseln nicht versagten. Bei Belastungsfrequenzen von mehr als 5 Hz stiegen die Temperaturen in den EPX-Klebfugen auf über 45°C an. Festgestellte irreversible Deformationen in den Klebfugen lassen vermuten, dass es aufgrund der erhöhten Temperaturen zu Veränderungen im Klebstoff kam. Dennoch blieb die Steifigkeit der Verbindungen während der gesamten Versuche sehr hoch. Die an die Ermüdungsversuche anschliessende Belastung bis zum Versagen in einem statischen Versuch zeigte einen immer noch sehr hohen Tragwiderstand. Im Beitrag wurde auch anschaulich aufgezeigt, dass beim Ermüdungsnachweis von kombinierten Holz-Stahl-Konfigurationen Schwierigkeiten auftreten. Je nach Versagensart – Holzversagen oder Stahlversagen – gelten unterschiedliche Nachweisarten (Abb. 2.4). Im gezeigten Beispiel wechselt der Versagensmodus von Holz- zu Stahlversagen im Bereich von 10^4 bis 10^5 Lastwechseln.

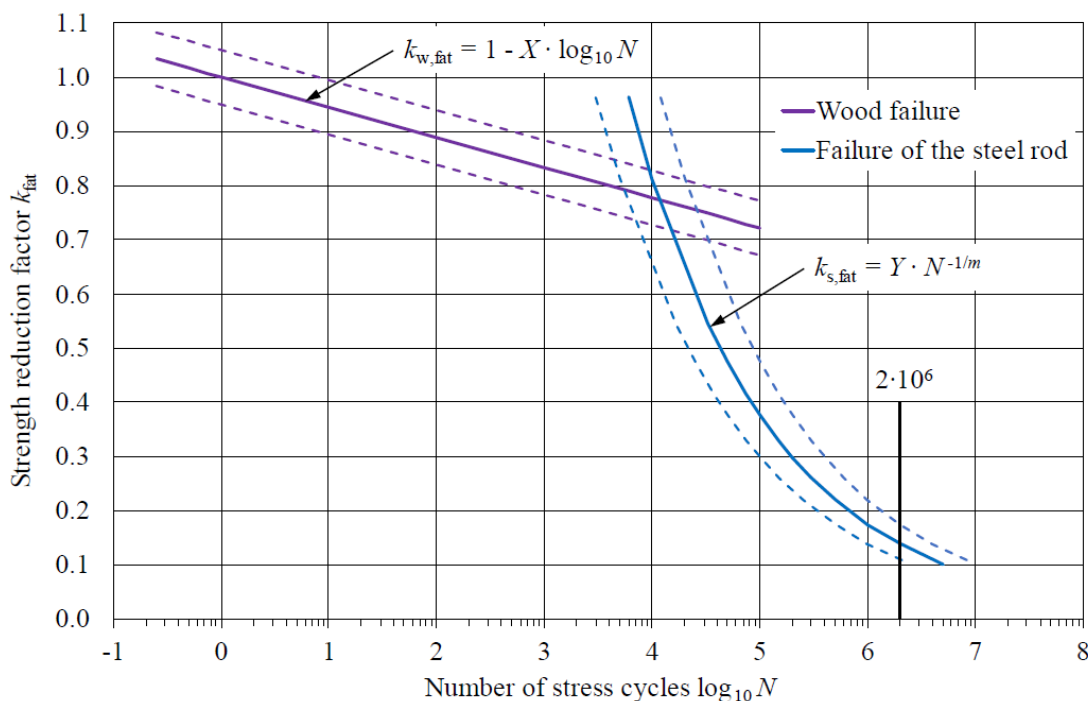


Abb. 2.4: Festigkeitsreduktionsfaktor k_{fat} für Ermüdungsbeanspruchung unter Berücksichtigung von zwei verschiedenen Versagensarten (Holzversagen / Stahlversagen)[27].

Bei geringerer Schwingspielzahl kommt es zum Ausziehversagen des eingeklebten Stabes, bei EPX-Verklebung also zum Scherversagen im Holz. Nach dem Bemessungsansatz in der EN 1995-2:2004 [8], kann die Abnahme der Tragfähigkeit als lineare Funktion des Logarithmus der Lastwechselzahl beschrieben werden (Abb. 2.4). Der Parameter X ist eine Funktion des Spannungsverhältnisses R , der Konfiguration des Bauteils oder der Verbindung und der Holzart. Seine Definition ist identisch mit dem Neigungsparameter A nach [10].

Bei einer grösseren Anzahl von Lastwechseln kommt es zu einem Ermüdungsbruch in der Gewindestange; die Abnahme der Tragfähigkeit kann hier als Funktion der Kraft- bzw. Spannungsdifferenz $\Delta\sigma_{fat}$ beschrieben werden, welche auch als Zeitfestigkeitsbereich bezeichnet wird. Der übliche Ansatz für die Ermüdungsbemessung von Stahlbauteilen kann übernommen werden und der Parameter Y ist dann eine Funktion der Form des Gewindes, d. h. der Schärfe der Vertiefung (die bei geschnittenen Gewinden, kalt- oder warmgewalzten Gewinden unterschiedlich ist), der Konfiguration des Bauteils oder der Verbindungen, sowie der mechanischen Eigenschaften des Stahls (Güte). In der Stahlbemessung (z. B. [28]) wird für den Parameter m in Bereichen unter 5 Mio. Spannungswechseln üblicherweise ein

Wert von 3 angenommen. Durch Optimierung der Verbindungs- und Prüfparameter kann der Bereich, wo das Holzversagen in Stahlversagen übergeht, verschoben werden, z. B. auf bis zu etwa 10 Mio. Spannungswechsel. Damit ist eine getrennte Bewertung der beiden Versagensarten möglich.

2.3 Folgerungen für die Versuchsplanung und -durchführung

Aus der gesichteten Literatur konnten die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Insgesamt wurden bisher im Holzbau generell und an Verbindungen nur wenige Ermüdungsversuche durchgeführt. Bei eingeklebten Gewindestangen ist die verfügbare Versuchsanzahl ebenfalls äusserst gering. Entsprechend ist das Wissen ungenügend und die Angaben zur Ermüdungsbemessung in Holzbaunormen sind dürftig. Sie beschränken sich bei den Verbindungen auf einzelne Verbindungsmitteltypen und niedrige Holzfeuchten. Zudem widersprechen die eingesetzten Prüfkfigurationen teilweise den gängigen Bemessungsgrundsätzen der Praxis.
- In den in der Literatur beschriebenen Versuchen wurden Prüffrequenzen zwischen 1 und 12 Hz eingesetzt, wobei Frequenzen > ca. 5 Hz zu unzulässigen Erwärmungen in den Klebfugen führen können. Entsprechend ist die Temperatur in den Klebfugen ein wichtiger Parameter, welcher während den Ermüdungsversuchen gemessen werden muss.
- Um die Leistungsgrenze von eingeklebten Gewindestangen (d. h. insb. des Klebstoffes und des Holzes) ausloten zu können, muss vorzeitiges Versagen der Stahlteile (d. h. der Gewindestangen und der Adapterteile zum Anschluss der Prüfkörper an die Prüfmaschine ausgeschlossen sein. Eine seriöse Detailplanung der Stahlteile vor den Versuchen und entsprechende Vorversuche sind daher angezeigt, bevor man mit den Versuchen an eingeklebten Gewindestangen beginnt. Um das vorzeitige Versagen der profilierten Stahlstäbe zu vermeiden, sind ermüdungsfeste rostfreie Stähle einzusetzen.
- Sämtliche bisher bekannten Ermüdungsversuche an eingeklebten Stäben mit praxisrelevanten Durchmessern wurden an trockenem Holz (Feuchteklasse 1) durchgeführt. Das für den Brückenbau wichtige Ermüdungsverhalten von eingeklebten Stäben bei höheren Holzfeuchten (Feuchteklasse 2 und obere Feuchtwerte in der Feuchteklasse 1) ist noch weitgehend unerforscht.
- Die Versuche wurden häufig mit einem *R*-Wert (siehe Abb. 2.3) von 0.1 gefahren. Diese grosse Spannungsdifferenz im Zugschwellbereich deckt einen baupraktisch realistischen, in vielen Fällen konservativen Bereich des Spannungswechsels ab. Im Holzbau kommen einfach gelagerte Brücken häufig vor. Hier kommt es aufgrund der Nutzlasten in der Regel nicht zu einem Vorzeichenwechsel bei den Strebenkräften. Erst bei Tragwerken, bei denen die Belastungsrichtung variiert (z. B. bei Durchlaufträgern), könnte die Durchführung von Versuchen mit negativen *R*-Werten angezeigt sein. Solche Versuche stellen jedoch eine Herausforderung für die Regelung der Prüfmaschine dar. Deshalb müssten die Prüffrequenzen tief angesetzt werden, weshalb mit einer bis zu zehn Mal längeren Versuchsdauer zu rechnen wäre.
- Da sowohl die Prüfkörper als auch die Ermüdungsversuche sehr teuer sind, ist es von grosser Bedeutung, dass mittels Verwendungen eines optimierten, qualitätskontrolliert hergestellten Gewindestangen-Systems die Berechenbarkeit und eine geringe Streuung der Versuche sichergestellt wird. Durch die Verwendung des erprobten und optimierten GSA-Systems der neuen Holzbau AG kann dieses Ziel erreicht werden. Das Forschungsprojekt kann jedoch auch wertvolle Erkenntnisse für andere Varianten von eingeklebten Gewindestangen bringen, weil in erster Linie die Versagensmodi des Holzes untersucht werden.

2.4 Literatur zum Kapitel 2

1. wikipedia.org (2022): Materialermüdung. de.wikipedia.org/wiki/Materialermüdung.
2. SIA (2013): Norm SIA 263 Stahlbau. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, Schweiz.
3. Langer B. F. (1937): Fatigue failure from stress cycles of varying amplitude. *Journal of Applied Mechanics* 59 160-162.
4. Miner M. A. (1945): Cumulative damage in fatigue. *Journal of Applied Mechanics* 12 159-164.
5. Palmgren A. (1924): Die Lebensdauer von Kugellagern. *VDI-Zeitschrift* 69 339-341.

6. Ehlbeck J. (1982): Dauerschwingfestigkeit von Holz und Holzverbindungen. In: Ingenieurholzbau in Forschung und Praxis, Bruderverlag, Karlsruhe.
7. SIA (2021): Norm SIA 265 Holzbau. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich, Schweiz.
8. CEN (2004): EN 1995-2 Design of timber structures, Part 2: Bridges. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
9. 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.
10. Stamatopoulos H., Malo K. A. (2017): Fatigue strength of axially threaded rods embedded in glulam at 45° to the grain. 3rd International Conference on Timber Bridges ICTB, Skelleftea, Sweden.
11. DIN (2021): DIN 50100 Schwingfestigkeitsversuch - Durchführung und Auswertung von zyklischen Versuchen mit konstanter Lastamplitude für metallische Werkstoffproben und Bauteile. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Germany.
12. Aicher S., Zachary C. (2015): Ermüdungsverhalten von Holz und geklebten Holzbauteilen. 21. Internationales Holzbauforum, Garmisch, Deutschland.
13. Gehri E. (2020): Ermüdungsbeanspruchte Holzkonstruktionen. Rüschlikon, Schweiz.
14. Bletz-Mühdorfer O., Diehl F., Bathon L., Myslicki S., Scholz R., Walther F., Grundwald C., Vallée T. (2018): Traglastverhalten von eingeklebten Stäben in Laubhölzern. adhäsion KLEBEN & DICHTEN 62 (10). 50-53.
15. Bletz-Mühdorfer O., Diehl F., Bathon L., Myslicki S., Walther F., Grundwald C., Vallée T. (2018): Ermüdungsverhalten von eingeklebten Stäben. Bauen mit Holz (5). 30 - 35.
16. Myslicki S., Bletz-Mühdorfer O., Diehl F., Lavarec C., Vallée T., Scholz R., Walther F. (2019): Fatigue of glued-in rods in engineered hardwood products part I: experimental results. Journal of Adhesion 95 (5-7). 675-701.
17. CEN (2025): FprEN 1995-1-1. Design of timber structures, Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings; Final Draft; Document CEN/TC 250/SC 5/N 2200. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
18. Niebuhr P., Sieder M. (2020): High-Cycle Fatigue Behavior of a Self-tapping Timber Screw Under Axial Tensile Loading. Journal of Failure Analysis and Prevention 20 (2). 580-589.
19. DIBt (2021): 2K-EP-Klebstoff WEVO-Spezialharz EP 32 S mit WEVO-Härter B 22 TS zum Einkleben von Stahlstäben in Holzbaustoffen. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, Deutschland.
20. Brandner R. (2024): INTER/57-7-8: Fatigue behaviour of in tension axially loaded self-tapping screws. INTER Meeting Fifty-Seven, August 2024, Online.
21. Kreuzinger H., Mohr B. (1994): Holz und Holzverbindungen unter nicht vorwiegend ruhenden Einwirkungen. Munich.
22. Ringhofer A., Augustin M., Schickhofer G. (2019): Basic steel properties of self-tapping timber screws exposed to cyclic axial loading. Construction and Building Materials 211 207-216.
23. Bengtsson C., Johansson C.-J. (2002): GIROD - Glued-in rods for timber structures.
24. Erchinger C., Steurer A. (2005): In Holz eingeleimte Gewindestangen - Ermüdungsverhalten. Bulletin Holzforschung Schweiz 13 (1). 12-13.
25. Molina J. C., Calil C., Carreira M. R. (2009): Pullout strength of axially loaded steel rods bonded in glulam at a 45 degrees angle to the grain. Materials Research-Ibero-American Journal of Materials 12 (4). 427-432.
26. Myslicki S., Walther F., Bletz-Mühdorfer O., Diehl F., Lavarec C., Beber V. C., Vallée T. (2019): Fatigue of glued-in rods in engineered hardwood products Part II: Numerical modelling. Journal of Adhesion 95 (5-7). 702-722.
27. 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, 9 - 12 May 2022, Biel/Bienne, Switzerland.
28. CEN (2005): EN 1993-1-9 Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-9: Ermüdung. Europäisches Komitee für Normung,

3. Versuchsmethodik

3.1 Grundsätzliches Vorgehen

In den in der Literatur (siehe Kapitel 2) beschriebenen, bereits durchgeführten Ermüdungsversuchen an in BSH eingeklebten Gewindestangen hatte sich gezeigt, dass die Prüffrequenz nicht grösser als 5 Hz sein darf, damit die Temperatur in den Klebfugen nicht unzulässig ansteigt. Dies bedeutet, dass eine Zeit von 111 h (bzw. 4.6 Tage) nötig ist, um einen Prüfkörper mit 2 Mio. Lastwechseln zu belasten. Im vorliegenden Projekt wurden die Versuche mit einem *R*-Wert von 0.1 durchgeführt. Die methodische Vorgehensweise war grundsätzlich die folgende:

Die Prüfkörper wurden durch die neue Holzbau AG hergestellt und in speziell konzipierten und hergestellten Klimakisten auf die gewünschte Zielholzfeuchte konditioniert. Mittels einer statischen Probelastung mit einem Lastniveau, welches in etwa dem Bemessungswert (in Feuchtekategorie 1) entsprach, wurde eine Qualitätskontrolle an sämtlichen Prüfkörpern durchgeführt. Gemessen wurden im Lauf der Probelastung die Verformung an den Gewindestangenanschlüssen und die Dehnungen im Holz. Durch die Probelastung wurde sichergestellt, dass keine Prüfkörper in die aufwendigen Ermüdungsversuche einbezogen wurden, welche nicht den Qualitätsansprüchen entsprachen.

Die Prüfkörper wurden sodann in den Klimakisten an die Empa transportiert. Sie wurden erst kurz vor den Versuchen aus den Kisten entnommen, gewogen und mit Temperatursensoren im Bereich der Klebfugen bestückt. Vor den jeweiligen Ermüdungsversuch wurde eine statische Belastung in 5 identischen Zyklen vorgenommen. Dabei wurden die Anschlussverformungen und die Holzdehnungen gemessen. Das Haupt-Experiment waren die direkt an die 5 statischen Zyklen anschliessenden Ermüdungsversuche mit einem *R*-Wert von 0.1 bis zum Erreichen von maximal 2 Mio. Lastwechseln. Während der Ermüdungsversuche wurde das Umgebungsklima und die Temperatur in den Klebfugen gemessen und aufgezeichnet.

Nach dem Ermüdungsversuch wurde ein statischer Zugversuch bis zum Versagen des Prüfkörpers durchgeführt. Bestimmt wurden dabei die Verformungen an den Anschlüssen, die Dehnung im Holz und die Versagensart. Letztere wurde nach Rücktransport der Prüfkörper wiederum in den Klimakisten nach Lungern durch die neue Holzbau AG durch Zerlegen der Prüfkörper noch genauer untersucht und dokumentiert.

In den nachfolgenden Abschnitten des Berichts werden die einzelnen Schritte und Versuche, sowie die eingesetzten Mess- und Prüfmittel genauer beschrieben.

3.2 Durchgeführte Versuche

Die Versuchskampagne wurde in 4 Gruppen (A – D) geplant und durchgeführt:

- Gruppe A: Versuche an parallel zur Faserrichtung in Eschen-BSH eingeklebten Stangen
 - o Reihe A1: Ermüdungsversuche in der Feuchtekategorie 1
 - o Reihe A2: Statische Belastungsversuche in der Feuchtekategorie 2
 - o Reihe A3: Ermüdungsversuche und Bestimmung der Restfestigkeit statisch in der Feuchtekategorie 2
- Gruppe B: Versuche zur Entwicklung und Optimierung des Test-Setups (Prüfkörper-Geometrie und Krafteinleitung) an rechtwinklig zur Faserrichtung in Fichten-BSH eingeklebten Stangen
- Gruppe C: Versuche an rechtwinklig zur Faserrichtung in Fichten-BSH eingeklebten Stangen
 - o Reihe C1: Statische Belastungsversuche in der Feuchtekategorie 1
 - o Reihe C2: Ermüdungsversuche und Bestimmung der Restfestigkeit statisch in der Feuchtekategorie 1

- Gruppe D: Versuche an rechtwinklig zur Faserrichtung in Fichten-BSH eingeklebten Stangen
 - o Reihe D1: Statische Belastungsversuche in der Feuchtklasse 2
 - o Reihe D2: Ermüdungsversuche und Bestimmung der Restfestigkeit statisch in der Feuchtklasse 2

Die Feuchtklasse 1 entspricht dabei gemäss Norm SIA 265:2021 [1] einem Umgebungsklima, bei welchem sich mittlere Holzfeuchten $\leq 12\%$ einstellen (Tabelle 3.1). Dies ist der Fall für Bauteile, welche vor der Witterung geschützt sind. In die Feuchtklasse 2 werden Bauteile eingeteilt, welche teilweise vor der Witterung geschützt oder direkt bewittert sind. In diesem Fall stellt sich im Mittel eine Holzfeuchte im Bereich von > 12 bis 20% ein.

Tabelle 3.1: Zuordnung von Bauteilen zu Feuchtklassen gemäss Norm SIA 265:2021 [1].

Feuchtklasse	Mittlere Holzfeuchte ¹⁾	Zuordnung der Bauteile
1	$\leq 12\%$	vor der Witterung geschützt
2	> 12 bis 20%	teilweise vor der Witterung geschützt oder direkt bewittert
3	$> 20\%$	feucht oder unter Wasser

¹⁾ Die Werte dürfen während einiger Wochen im Jahr überschritten werden.

3.3 Prüfplan

3.3.1 Prüfkörper

Während aus früheren Versuchen [2] bekannt war, dass das Test-Setup für die Ermüdungsversuche an parallel zur Faserrichtung eingeklebten Gewindestangen funktioniert, musste für die Versuche an den rechtwinklig zur Faserrichtungen eingeklebten Gewindestangen ein geeignetes Setup erst entwickelt werden. Die Abb. 3.1 und die Abb. 3.2 zeigen Prinzip-Skizzen der experimentell untersuchten Prüfkörper für die Versuchsreihen von parallel bzw. rechtwinklig zur Faserrichtung eingeklebten Gewindestangen. Die Detailpläne sämtlicher Prüfkörper sind im Anhang A zusammengestellt.

Damit kein Ermüdungsversagen in den Stahl-Anschlussstellen auftrat, mussten diese betreffend die Stahlqualität und die geometrische Form (Abmessungen, Ausrundungen) vor den Versuchen an den Holz-Prüfkörpern entwickelt und optimiert werden. Die Pläne der entsprechend resultierenden Stahlteile sind im Anhang B ersichtlich.

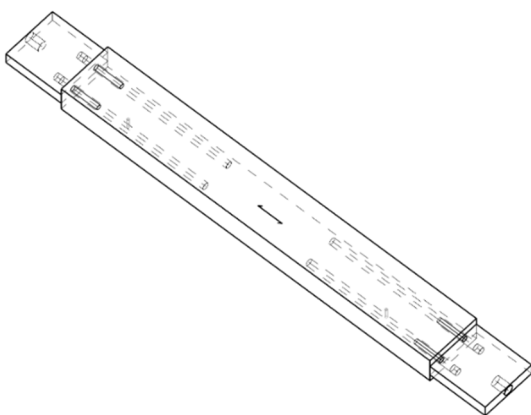


Abb. 3.1: Prinzip-Skizze eines Prüfkörpers mit je 2 Gewindestangen-Paaren M16 beidseitig für Ermüdungsversuche parallel zur Faserrichtung in Eschen-BSH.

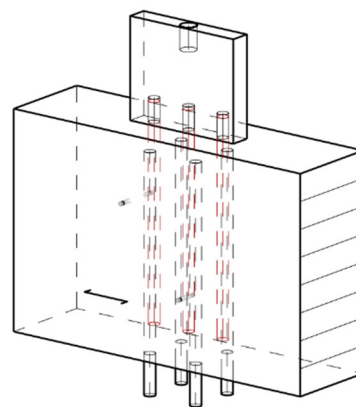


Abb. 3.2: Prinzip-Skizze eines Prüfkörpers mit 3 Gewindestangen M16 für Ermüdungsversuche rechtwinklig zur Faserrichtung in Fichten-BSH.

3.3.2 Auslegung der Versuche

Der Gewindestangendurchmesser M16 wurde gewählt, weil dieser teilweise in der Praxis angewendet wird. Von noch grösseren Durchmessern wurde abgesehen, um die Beanspruchungen der Prüfeinrichtung im bekannten Rahmen zu halten [2]. Zur Auslegung der Prüfkörper mit Gewindestangen parallel zur Faserrichtung eingeklebt (Gruppe A) wurde der charakteristische Tragwiderstand ($R_k = 100$ kN pro Stange) aus der GSA-Bemessungstabelle für Laubholz verwendet (siehe Anhang D). Das Laubholz wurde gewählt, weil sich hier bei identischer Konfiguration deutlich höhere Kräfte anschliessen lassen als im Nadelholz und damit die Klebfuge stärker belastet ist.

Die Prüfkörper mit Gewindestangen rechtwinklig zur Faserrichtung eingeklebt wurden so ausgelegt, dass ein Versagen auf Rollschub zu erwarten war (siehe Abb. 1.1). Der charakteristische Tragwiderstand ($R_k = 187.1$ kN für die Stangengruppe) wurde anhand eines unveröffentlichten Bemessungsmodells ermittelt. Dieses Modell ist in der GSA-Software zur Bemessung von Fachwerkknoten eingebaut. Einen Ausdruck dieses Nachweises ist im Anhang D zu finden. Unter Anwendung der in der Schweiz massgebenden Sicherheitsfaktoren ergeben sich für die geprüften Gruppen die in der Tabelle 3.2 zusammengestellten Tragwiderstände.

Tabelle 3.2: Rechnerische Tragwiderstände für die geprüften Konfigurationen.

		Gruppe A	Gruppen B & C	Gruppe D
Charakteristischer Tragwiderstand	R_k	200 kN	187 kN	187 kN
Verhältniswert nach Norm SIA 265, Tab. 1 für duktile Verbindungen	γ_M/η_M	1.5	1.5	1.5
Holzfeuchtebeiwert (Norm SIA 265, Tab. 4)	η_w	1.0	1.0	0.8
Bemessungswert des Tragwiderstands	R_d	133 kN	125 kN	99.8 kN
Umrechnungsfaktor gemäss den Gleichungen 1 und 2 (siehe unten)	$\gamma_Q + R \cdot \gamma_G$	1.635	1.635	1.635
Annahme der veränderlichen Nutzlast	Q_k	81.5 kN	73.6 kN	61.0 kN
Gewählte Ermüdungsbelastung	ΔF	90.0 kN	81.0 kN	64.8 kN

Die veränderliche Nutzlast Q_k in der Tabelle 3.2 errechnet sich unter folgender Annahme, welche mit dem gewählten Verhältnis $R = 0.1$ zusammenhängt: Die Schnittkraft eines Stabs im Lastfall «Ermüdung» (entspricht in der Regel dem Gebrauchsniveau) entsteht zu 90 % aus einer ermüdungswirksamen Betriebslast. Ausgehend von einer maximalen Ausnutzung im Grenzzustand der Tragsicherheit ergibt sich folgende Gleichung (1):

$$R_d = E_d = 1.35 \cdot G_k + 1.50 \cdot Q_k \quad (1)$$

Für den gewählten Fall von $G_k / Q_k = R = 0.1$ lässt sich die Gleichung 1 vereinfachen zu:

$$Q_k = R_d / 1.635 \quad (2)$$

Wäre beispielsweise ein Prüfkörper der Gruppe A eine Fachwerkstrebe mit $N_{Ed} = 133$ kN, dann würden darauf eine ständige Last G_k von 8.15 kN und eine Nutzlast Q_k von 81.5 kN einwirken. Für die Ermüdungsversuche wurde die Oberlast F_O in den Gruppen A und C als ganze Zahl gewählt und es wurde darauf geachtet, dass die sich ergebende Ermüdungsbelastung ΔF stets grösser war als die angenommene veränderliche Nutzlast Q_k . Aufgrund der hohen Bruchlasten, welche in der Reihe A2 erzielt worden waren, wurde für die Reihe A3 keine Feuchtereduktion angesetzt ($\eta_w = 1.0$). Dasselbe wurde beim ersten Prüfkörper auch in der Reihe D2 probiert. Wegen dessen frühem Versagen wurde jedoch entschieden, den Holzfeuchtebeiwert $\eta_w = 0.8$ für die Feuchtekategorie 2 zu berücksichtigen. Details zu den Belastungsparametern für die Ermüdungsversuche sind in der Tabelle 3.4 aufgeführt.

Als Verhältniszahl R wurde ein Wert von 0.1 gewählt, weil dies für ein leichtes Tragwerk mit grosser veränderlicher Nutzlast als praxisrelevant erachtet wird. Zudem ist hier ein Vergleich mit Ergebnissen aus der Literatur möglich (Abschnitt 2.3). Als Zielwert wurden $2 \cdot 10^6$ Lastwechsel definiert, weil auch die Stahlbaunormen ihre Kerbgruppen in der Regel auf diese Anzahl beziehen (Abschnitt 2.1).

3.4 Prüfeinrichtungen und Prüfprocedere bei der neuen Holzbau AG

3.4.1 Herstellung der Prüfkörper

Als **Versuchsreihe A1** wurden in das Forschungsvorhaben Prüfkörper einbezogen, an welchen im Jahr 2021 Ermüdungsversuche in der Feuchtekategorie 1 durchgeführt worden waren. Damals wurden 4 identische Prüfkörper geplant und hergestellt. Sie bestanden aus Eschen-Brettschichtholz (*Fraxinus excelsior*) der Festigkeitsklasse GL40h. Die Eschenlamellen wurden mit dem Timber Grader MTG (Brookhuis) so sortiert, dass die Elastizitätsmoduln und Rohdichten der Prüfkörper eine einheitliche Verteilung aufwiesen [2]. Der zulässige Holzfeuchtebereich für die Bretter wurde zwischen 9 und 11 % vorgegeben.

Im Rahmen des WHFF-CH-Projekts 2022-10 wurden als erstes die Prüfkörper der **Gruppe B** aus Fichten-Brettschichtholz (*Picea abies*) der Festigkeitsklasse GL28h produziert. An diese Prüfkörper wurden in der Produktion noch keine besonderen Anforderungen gestellt. Der zulässige Holzfeuchte-Bereich für die Bretter wurde zwischen 8 % und 12 % vorgegeben.

Für die Herstellung der **Gruppe C** wurden die Anforderungen an die Holzfeuchte ebenfalls zu 10 ± 2 % festgelegt. Aufgrund eines passenden Auftrags ergab sich die Möglichkeit, die Prüfkörper als Teil eines grösseren Trägers (160 mm x 800 mm, GL32c) zu produzieren. Dies wurde als ideale Gelegenheit erachtet, um auch das Versagensbild in diesen Festigkeitsklassen beobachten zu können. Somit bestanden die Prüfkörper dieser Gruppe je zur Hälfte aus Lamellen der Festigkeitsklasse T14 von den Sägereien Wyss (Büron LU) und Olwo (Erlenbach BE) sowie aus Lamellen der Festigkeitsklasse T26 von der Sägerei Wyss. Die unsortierten Fichtenbretter hatten eine Breite von 175 mm und wurden in der Sägerei auf eine Dicke von 44 mm vorgehobelt. Die Bretter wurden mittels Timber Grader MTG (Brookhuis) in die T-Klassen sortiert. Wie die Abb. 3.3 zeigt, wurde beim Abbund darauf geachtet, dass die hochfesten Lamellen jeweils auf der Seite des einreihigen GSA-Anschlusses (bei den Versuchen oben) angeordnet wurden.

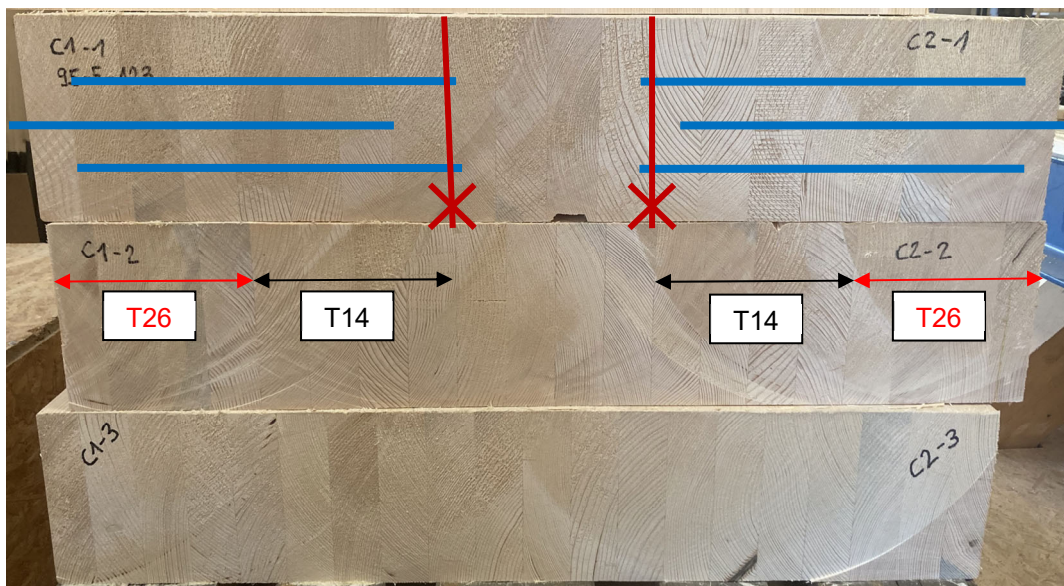


Abb. 3.3: Prüfkörperzuschnitt für die Versuchsgruppe C aus Trägern der Festigkeitsklasse GL32c.

Für die Prüfkörper der **Gruppe A (Reihen A2 und A3)** wurden als erster Schritt 5 Meter lange Bretter aussortiert. Als Ausgangsmaterial diente ein Paket von 43 Eschenbrettern (*Fraxinus excelsior*) des Querschnitts 175 mm x 44 mm (vorgehobelt). Bei jedem Brett wurde die Rohdichte bestimmt und mittels Timber Grader MTG (Brookhuis) ein dynamischer E-Modul gemessen. Anhand dieser Messwerte und anhand von zusätzlichen visuellen Kriterien wie Schnittart, Äste (Grösse und Lage), Rindeneinwuchs, Schrägfasrigkeit, Risse und Jahrringbreite wurden 11 Bretter ausgewählt, welche sich der Festigkeitsklasse T33 zuordnen liessen. Mit einem elektrischen Widerstandsmessgerät (Hydromette HAT 65, Gann) wurden Holzfeuchten zwischen 7.0 % und 10.0 % gemessen. Der Mittelwert von 8.9 % entsprach

den Erwartungen, jedoch nicht dem Ziel von $12 \pm 1 \%$. Die deshalb vorgenommene Klimatisierung der Bretter ist im Abschnitt 3.4.2 dieses Berichts beschrieben. Von den zwei BSH-Stäben mit Querschnitt 160 mm x 200 mm der Festigkeitsklasse GL40h wurde der erste mittig aufgesägt und beide Stücke auf 70 mm x 140 mm ausgehobelt. So entstanden für die Reihen A2 und A3 je vier Prüfkörper aus demselben Holz. Der zweite Stab wurde ebenfalls aufgesägt und es wurden Kontrollstäbe in den Querschnitten 70 mm x 65 mm und 120 mm x 120 mm ausgehobelt.

Für die Prüfkörper der **Gruppe D** wurden 5.05 Meter lange Bretter aussortiert. Als Ausgangsmaterial diente ein Paket von 54 Fichtenbrettern (*Picea abies*), welche bereits vorgängig der Festigkeitsklasse T18 zugeordnet worden waren. Die Bretter des Querschnitts 175 mm x 44 mm (vorgehobelt) wurden nummeriert und ein zweites Mal mit dem Timber Grader MTG (Brookhuis) gemessen. Die 21 ausgewählten Bretter wiesen eine durchschnittliche Rohdichte von 432 kg/m^3 auf (min. 410 kg/m^3 , max. 452 kg/m^3). Der dynamische E-Modul dieser Bretter lag zwischen $11'400 \text{ N/mm}^2$ und $13'150 \text{ N/mm}^2$ bei einem Mittelwert von $12'150 \text{ N/mm}^2$. Es wurden Holzfeuchten zwischen 8.9 % und 9.9 % gemessen. Der Mittelwert von 9.5 % lag auch hier unter dem Zielbereich von $14 \pm 2 \%$. Aus den gemäss den Angaben im Abschnitt 3.4.2 klimatisierten Fichtenbrettern wurden BSH-Stäbe der Festigkeitsklasse GL28h hergestellt. Aus einem ersten Stab mit Querschnitt 160 mm x 320 mm wurden die neun Prüfkörper geschnitten. Die Bretter wurden ohne Keilzinken aufeinander geklebt, damit alle Prüfkörper aus demselben Holz bestanden. Zusätzlich wurde ein Querschnitt von 160 mm x 400 mm produziert. Anschliessend wurde dieser aufgesägt und Kontrollstäbe mit Querschnitten 70 mm x 70 mm, 120 mm x 120 mm und 160 mm x 160 mm ausgehobelt. Sämtliche Kontrollstäbe (aus Esche und Fichte) wurden auf eine Länge von 500 mm zugeschnitten und die Masse wurde bestimmt.

3.4.2 Klimatisierung der Lamellen

Für die benötigten Kleinmengen an Lamellen, wäre es unverhältnismässig gewesen, diese bei einer Sägerei mit Sonderanforderungen bezüglich Holzfeuchte zu bestellen. Wie im Abschnitt 3.4.1 beschrieben, waren folglich die Bretter trockener als für die Reihen A2 und A3 sowie D1 und D2 vorgesehen. Deshalb wurde entschieden, die 32 Bretter vor der Verklebung zu klimatisieren. Nach der Sortierung wurden die Bretter während 29 Tagen in einer Plastikverpackung im Aussenbereich gelagert. Zur planmässigen Klimatisierung wurden die Bretter schliesslich in einer Kiste, hergestellt aus Dreischichtplatten (Abb. 3.4 und Anhang C) gelagert. Deren Innenseiten (Boden und Teile der Wände) wurden mit einer wasserdichten Kunststoff-Membrane ausgekleidet. Darauf wurden 45 Liter gesättigte Salzlösung (Natriumchlorid (NaCl) in Leitungswasser) gegossen und Lagerhölzer mit Querbohrungen gelegt. Die Lamellen wurden in 3 Lagen auf ihren Schmalseiten stehend in der Kiste gestapelt (Abb. 3.5).



Abb. 3.4: Klimakiste für 5 m lange Lamellen.



Abb. 3.5: Lamellen während der Klimatisierung.

Zwei Ventilatoren sorgten von beiden Stirnseiten her für Luftzirkulation (Abb. 3.5 und Abb. 3.6). Mit geschlossenem Deckel wurde die Kiste in der Werkhalle der n'H gelagert. Nach 16 Tagen wurde entschieden, die Salzlösung auszutauschen, weil die Feuchtezunahme unbefriedigend erschien. Um den Prozess zu beschleunigen, wurde eine gesättigte Lösung mit Kaliumchlorid (KCl, Abb. 3.7) und destilliertem Wasser eingesetzt. Anhand der Gewichtszunahme der Bretter wurde die Entwicklung der Holzfeuchte beobachtet.

Das Klima in der Kiste (Temperatur und relative Luftfeuchte) wurde mit drei USB-Loggern (EasyLog | EL-USB-2, Lascar Electronics) aufgezeichnet. Anhand dieser Messungen lässt sich die rechnerische Ausgleichsfeuchte (Equilibrium Moisture Content, EMC) nach dem Sorptionsmodell von Reichel [3] aus der Temperatur T [°K] und der relativen Luftfeuchtigkeit RH [-] wie folgt errechnen:

$$EMC = 0.01 \left[\frac{-T \cdot \ln(1 - RH)}{0.13 \left(1 - \frac{T}{647.1}\right)^{-6.46}} \right]^{\frac{1}{110 T^{-0.75}}}$$



Abb. 3.6: Ventilator.

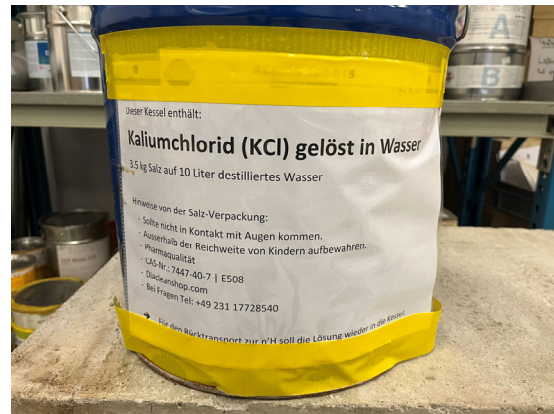


Abb. 3.7: Salzlösung für die Klimatisierung.

Als sich der Mittelwert der Holzfeuchte für beide Holzarten den Zielwerten von 12 % und 14 % annäherte, wurde die BSH-Produktion geplant. Nach 59 Tagen wurden die Bretter aus der Klimakiste entnommen und umgehend zu Brettschichtholz verklebt. Die Entwicklung der Holzfeuchte in den Brettern ist in der Abb. 3.9 (Versuchsreihen A2 und A3) und in der Abb. 3.9 (Reihen D1 und D2) dargestellt. Die dargestellten Kurven wurden anhand von Darrproben justiert, die während dem Prüfkörperzuschnitt (nach der BSH-Produktion) entnommen wurden. Der Mittelwert der Holzfeuchte lag zu diesem Zeitpunkt für die Esche bei 12.8 % und für die Fichte bei 14.1 %.

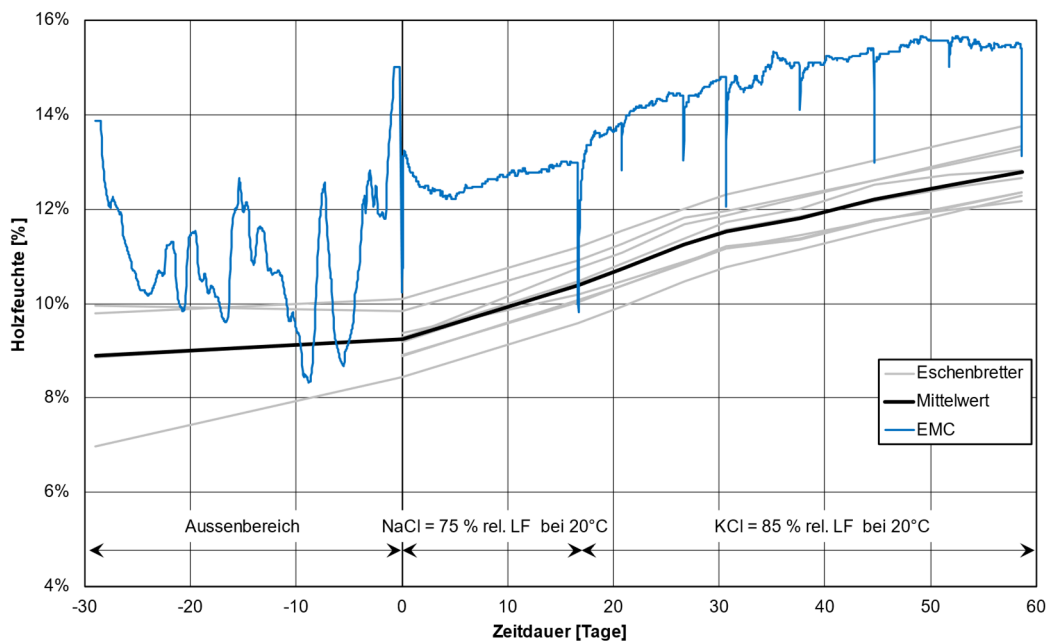


Abb. 3.8: Holzfeuchte und rechnerische Ausgleichsfeuchte (EMC) der Bretter zur Herstellung der Prüfkörper der Versuchsreihen A2 und A3 während der Klimatisierung der BSH-Lamellen, anfangs im Aussenbereich, schliesslich in einer Kiste mit gesättigter Salzlösung.

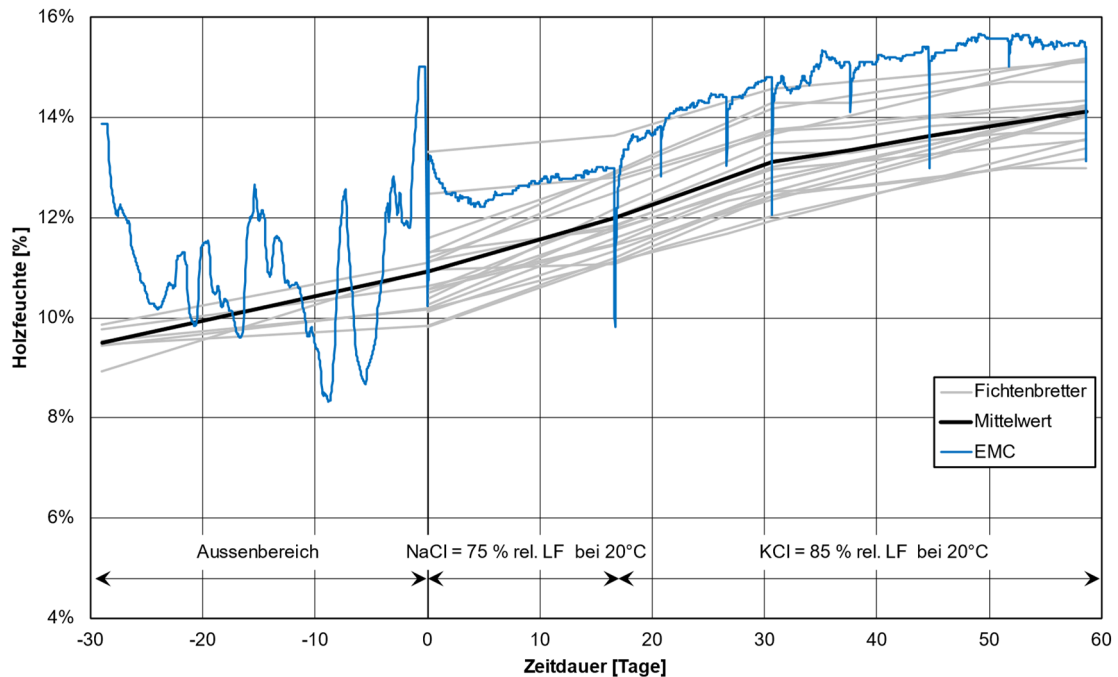


Abb. 3.9: Holzfeuchte und rechnerische Ausgleichsfeuchte (EMC) der Bretter zur Herstellung der Prüfkörper der Versuchsreihen D1 und D2 während der Klimatisierung der BSH-Lamellen, anfangs im Aussenbereich, schliesslich in einer Kiste mit gesättigter Salzlösung.

3.4.3 Abbund des BSH, Einkleben der Gewindestangen, Stahladapterteile

Bei den Prüfkörpern der Gruppe A wurden in die aus jeweils vier verklebten Lamellen zusammengesetzten Brettschichtholzteile an beiden Stirnseiten je zwei Gewindestangen M16 nach dem Standard von GSA parallel zur Faserrichtung des Holzes eingeklebt. Der eingesetzte Klebstoff war ein 2-Komponenten-Epoxidharz und als Bohrl Lochdurchmesser d_{drill} wurden 18 mm gewählt. Die wirksame Verankerungslänge (Einklebelänge) betrug 290 mm (d.h. $16 \cdot d_{\text{drill}}$) mit einer Versenkung (nicht verklebte Länge) von 70 mm. Auf dieser Länge wurde das Gewinde der Stahlstangen entfernt (abgedreht). In den Werkplänen der n'H (siehe Anhang A) wird dies als «Einschnürung» bezeichnet. Bei den Prüfkörpern der Reihe A2 wurden Gewindestangen der Festigkeit 8.8 eingesetzt. Diese ragten 80 mm aus dem Holz hervor, damit sich das zur Verbindung mit dem Zugprüfrahmen eingesetzte Stahlteil mehrmals verwenden liess. Bei den Prüfkörpern der Reihe A3 wurden Gewindestangen aus rostfreiem Duplexstahl eingesetzt. Zur Einleitung der Kraft von der Prüfmaschine in die Prüfkörper dienten 30 mm dicke Stahlplatten der Festigkeitsklasse S355 J2. Das Verbindungsdetail zu den beiden Gewindestangen entsprach der im Jahr 2021 erfolgreich geprüften Ausführung [2].

Das Grundmaterial für die Prüfkörper der Gruppen B, C und D bildeten aus jeweils acht verklebten Lamellen zusammengesetzte Brettschichtholzteile. Von der obersten Lamelle her wurden mittig drei Bohrungen erstellt, welche parallel zur Faserrichtung des Holzes mit je 60 mm Abstand in einer Reihe angeordnet waren. Von der gegenüberliegenden Seite (unten) her wurde eine Vierergruppe ebenfalls mittig angeordnet. Die je zwei Bohrungen wiesen einen Abstand parallel zur Faserrichtung von 80 mm auf. Rechtwinklig zur Faserrichtung betrug der Abstand 90 mm. Für alle diese Bohrungen wurde ein Durchmesser d_{drill} von 18 mm gewählt. In die Bohrlöcher wurden Gewindestangen M16 nach dem Standard von GSA rechtwinklig zur Faserrichtung des Holzes eingeklebt. Die Verankerungslänge (Einklebelänge) betrug nominell 290 mm (d.h. $16 \cdot d_{\text{drill}}$). Zur Abdichtung des Bohrlochs wurde an der Holzoberfläche jeweils ein 13 mm langer Dichtungsring platziert, dessen Einfluss auf den Tragwiderstand vernachlässigbar ist. Bei den Prüfkörpern der Reihen B, C1 und D1 wurden Gewindestangen der Festigkeit 8.8 eingesetzt. Bei den Reihen C2 und D2 wurden Gewindestangen aus rostfreiem Duplexstahl gewählt. Zur Einleitung der Kraft in die drei GSA-Stangen dienten 30 mm dicke Stahlplatten der Festigkeitsklasse S355 J2 mit 25 mm langen Innengewinden. Die vier GSA-Stangen auf der Unterseite ragten 85 mm aus dem Holz hervor, damit sich das zur Verbindung mit der Prüfeinrichtung eingesetzte Stahlteil mehrmals verwenden liess.

Alle den Ermüdungsversuchen unterzogenen Prüfkörper wiesen je zwei Bohrungen auf, welche den späteren Einbau von Temperatursensoren in zwei Klebfugen erlaubten. Die Pläne der Prüfkörper sind im Anhang A zusammengestellt. Um bei den Reihen A2, A3, D1 und D2 möglichst wenig Holzfeuchte zu verlieren musste die Produktion der Prüfkörper gut vorbereitet werden. So war es möglich, am Montag die Lamellen aus der Kiste zu nehmen und am Freitag die fertigen Prüfkörper wieder in eine Klimakiste zu legen. Bei diesen vier Prüfkörper-Reihen und bei sämtlichen Kontrollstäben wurden die Stirnflächen versiegelt. Es wurden jeweils zwei Anstriche Hirnholzschutz von Koch & Schulte mit einem Pinsel aufgetragen.

Bei allen im Rahmen dieses Projekts produzierten Prüfkörpern wurden Abmessungen und Gewicht beim Abbund aufgenommen und daraus die Dichte des gesamten Prüfkörpers errechnet.

3.4.4 Klimatisierung der Prüfkörper

Die Prüfkörper der Reihen A1, B, C1 und C2 wurden nach der Produktion im Labor-Raum der n'H ohne besondere Klimatisierung gelagert. Die Abb. 3.10 zeigt den Verlauf der rechnerischen Ausgleichsfeuchte (EMC) für den Zeitraum vor den statischen Zugversuchen an der Reihe C1 und der Probelastung der Reihe C2. Die EMC-Kurve wurde nach dem Sorptionsmodell von Reichel [3] aus der gemessenen Temperatur und der relativen Luftfeuchte berechnet (siehe 3.4.2).

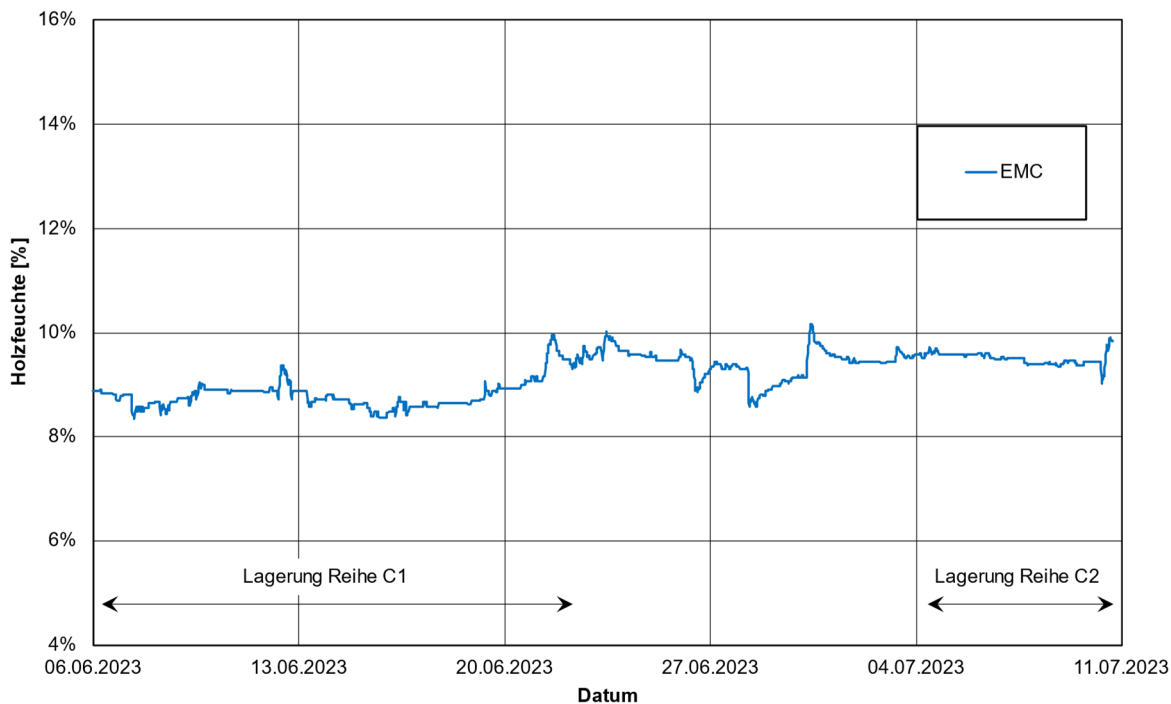


Abb. 3.10: Rechnerische Ausgleichsfeuchte (EMC) im Prüfraum der n'H zur Zeit der statischen Zugversuche (Probelastungen) an den Prüfkörpern der Versuchsreihen C1 und C2.

Die Prüfkörper der Reihen A2, A3, D1 und D2 wurden nach der Produktion in speziell dafür konzipierten Kisten klimatisiert (Abb. 3.4). Ziel war es, eine der Feuchtekategorie 2 entsprechende Ausgleichsfeuchte zu erreichen. Für die Lagerung dieser Prüfkörper wurden drei Kisten aus 27 mm dicken Dreischichtplatten gebaut. Deren Innenseiten (Boden und Wände) wurden mit einer wasserdichten Membrane ausgekleidet. Darauf wurden je Kiste 25 Liter gesättigte Kaliumchlorid-Lösung (KCL) gegossen, was eine Füllhöhe von 2 cm ergab. Um die Löslichkeit von 34,4 % mit Sicherheit zu übertreffen, wurden 9 kg KCl-Salz in jede Kiste gegeben. Die in der Flüssigkeit liegenden Lagerhölzer wurden auf der Oberseite mit einem Streifen Bauplastik abgedeckt, um die Prüfkörper vor aufsteigender Feuchtigkeit zu schützen (siehe Abb. 3.11). Von einer Stirnseite her sorgte ein Ventilator für Luftzirkulation. Die geometrischen Abmessungen der Klimakisten sind im Anhang C dargestellt.



Abb. 3.11: Prüfkörper (Reihe A3) in der Klimakiste.



Abb. 3.12: Prüfkörper (Reihen D1 und D2) und Kontrollstäbe in der Klimakiste.

Die Kontrollstäbe wurden zu Beginn der Klimatisierung so aufgeteilt, dass von jedem Typ (Holzart und Querschnitt) in jeder der drei Kisten mindestens ein Stück gelagert werden konnte. Für die Lieferung der drei Versuchsreihen an die Empa, wurden die Kontrollstäbe jeweils umplatziert, damit sie zum Prüfkörperquerschnitt passten. Während der ganzen Klimatisierung wurde anhand einer Messung der Gewichtszunahme der Kontrollstäbe die Entwicklung der Holzfeuchte beobachtet. Das Klima in den Kisten (Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit) wurde mit je einem USB-Logger (EasyLog | EL-USB-2, Lascar Electronics) aufgezeichnet. Anhand dieser Messungen wurde für die nachfolgenden Abbildungen (Abb. 3.13 bis Abb. 3.18) die EMC-Kurve nach dem Sorptionsmodell von Reichel [3] berechnet (siehe 3.4.2).

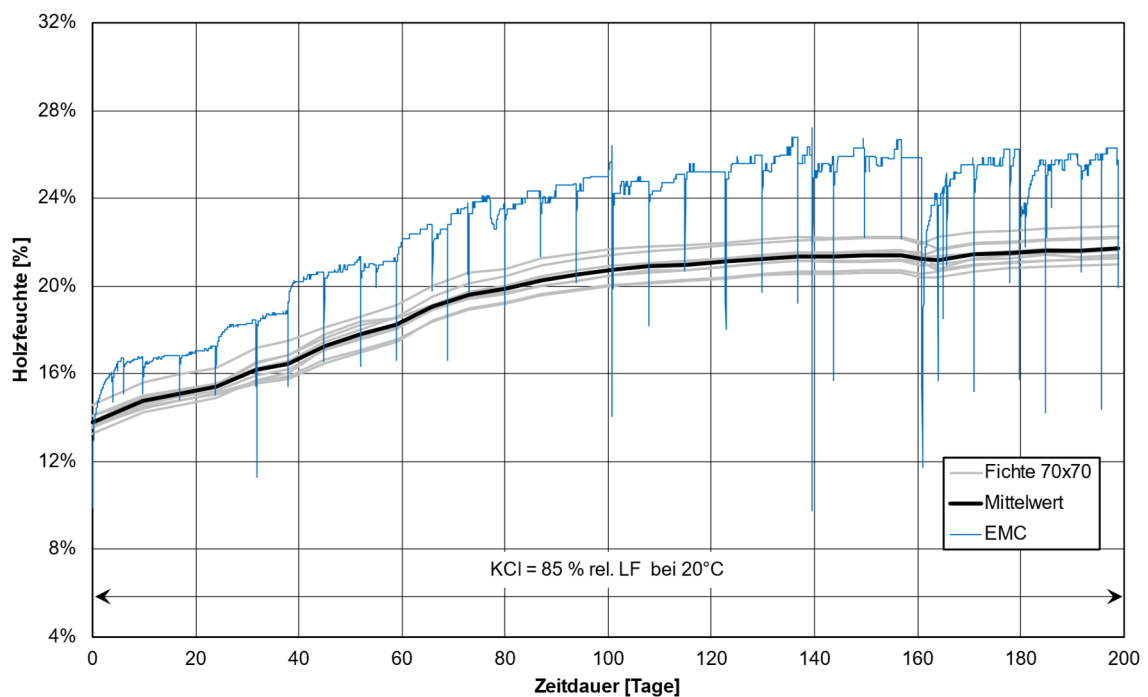


Abb. 3.13: Entwicklung der Holzfeuchte der 70 mm-Fichten-Stäbe und rechnerische Ausgleichsfeuchte (EMC) anhand des gemessenen Klimas in den Kisten.

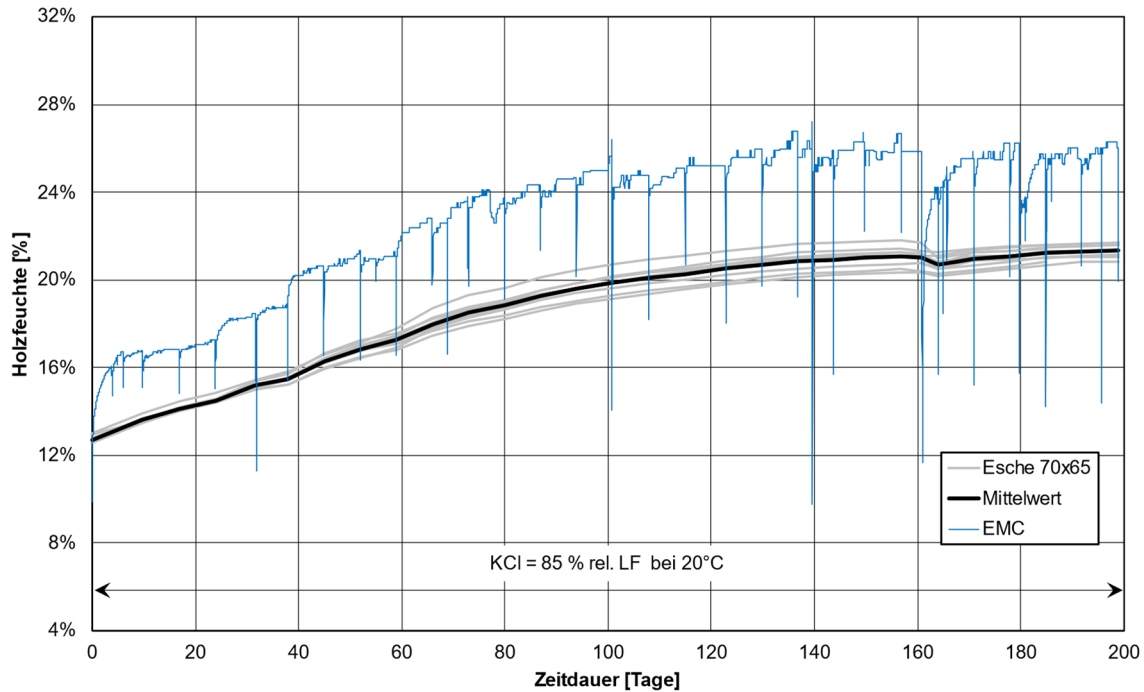


Abb. 3.14: Entwicklung der Holzfeuchte der 70 mm-Eschen-Stäbe und rechnerische Ausgleichsfeuchte (EMC) anhand des gemessenen Klimas in den Kisten.

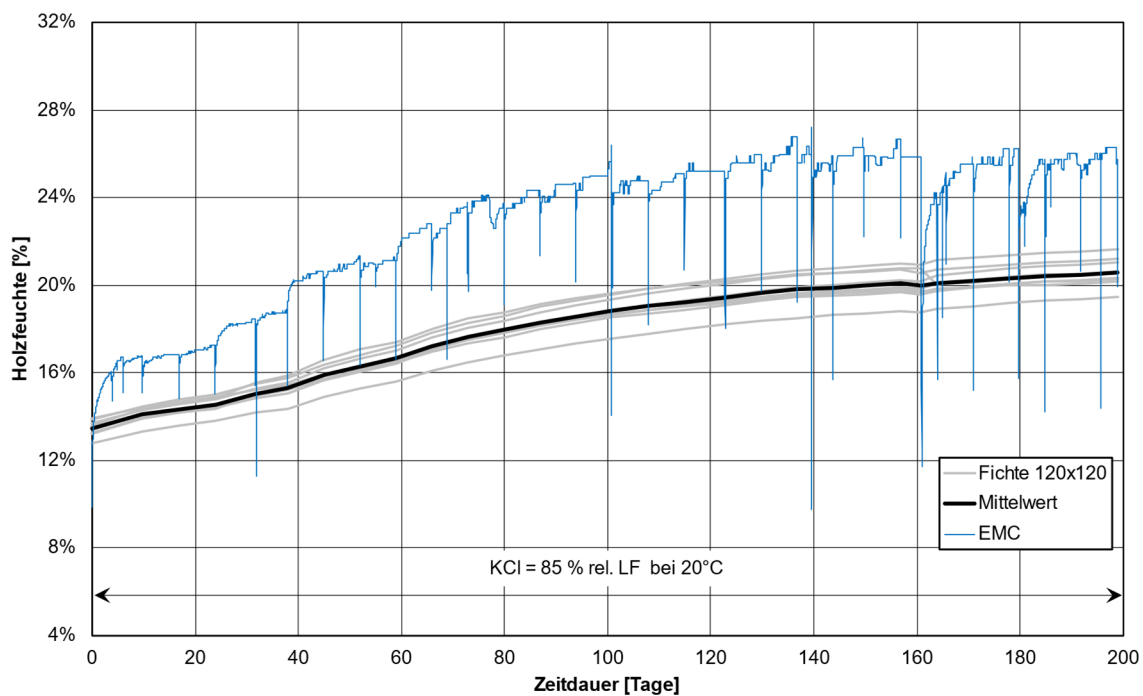


Abb. 3.15: Entwicklung der Holzfeuchte der 120 mm-Fichten-Stäbe und rechnerische Ausgleichsfeuchte (EMC) anhand des gemessenen Klimas in den Kisten.

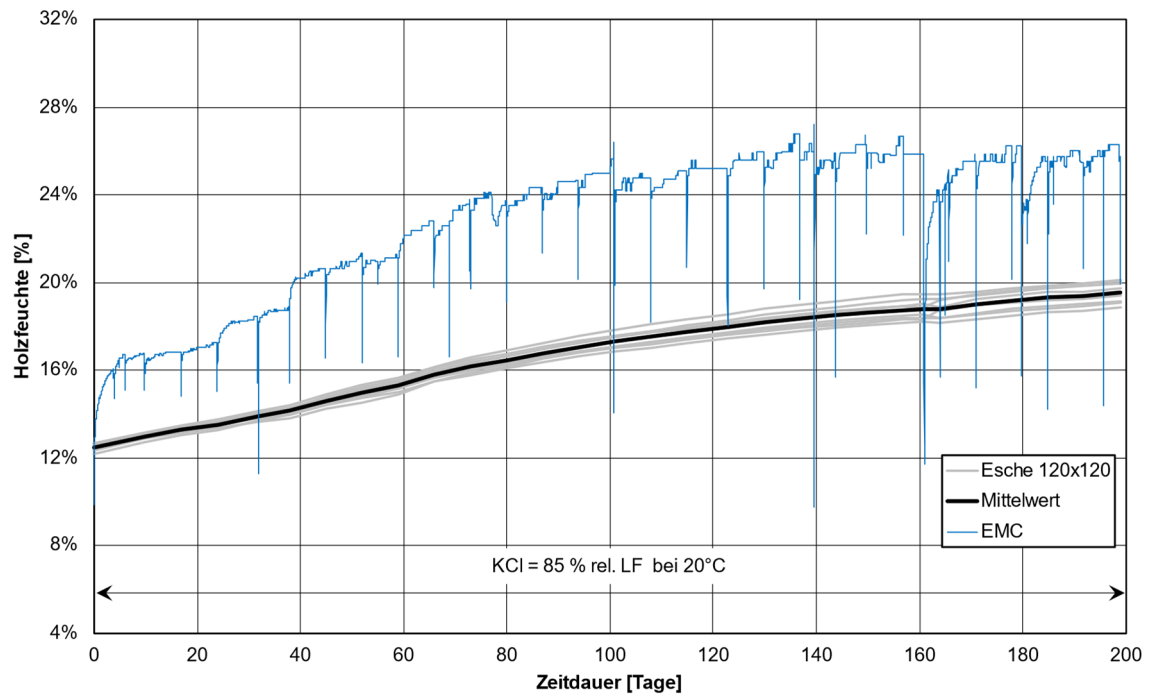


Abb. 3.16: Entwicklung der Holzfeuchte für die 120 mm-Eschen-Stäbe und rechnerische Ausgleichsfeuchte (EMC) anhand des gemessenen Klimas in den Kisten.

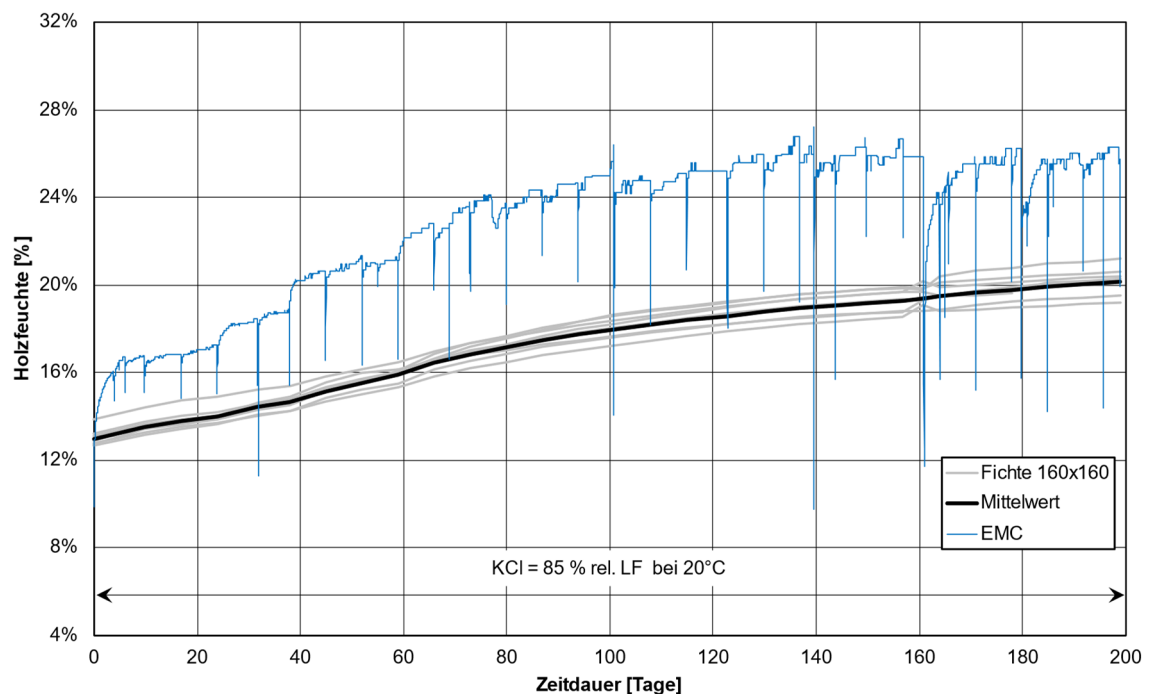


Abb. 3.17: Entwicklung der Holzfeuchte für die 160 mm-Fichten-Stäbe und rechnerische Ausgleichsfeuchte (EMC) anhand des gemessenen Klimas in den Kisten.

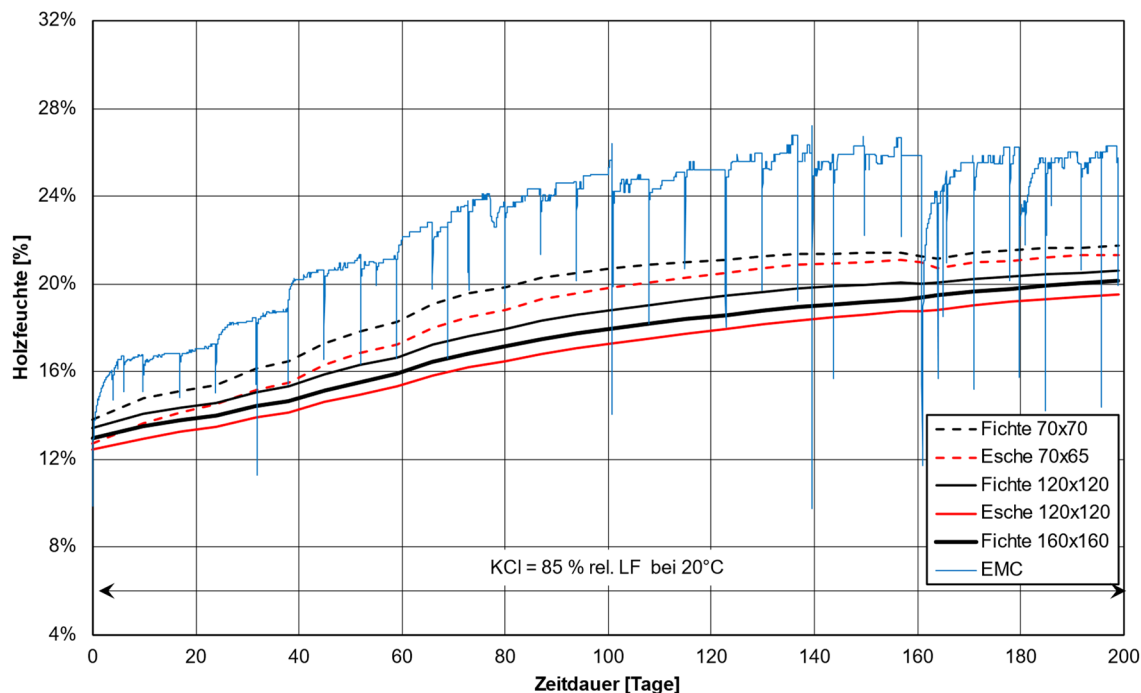


Abb. 3.18: Zusammenfassende Darstellung der Entwicklung der Holzfeuchte der Kontrollstäbe (rechnerische Ausgleichsfeuchte (EMC) anhand des gemessenen Klimas in den Kisten).

Nach 161 Tagen wurden von jedem Typ drei Kontrollstäbe in der Mitte aufgetrennt. Anschliessend wurde jeweils eine Darrprobe entnommen, um die Holzfeuchte zu bestimmen. Diese Messungen bestätigten, dass die Prüfkörper der Reihe A3 bereit waren für die Prüfungen. Am 179. Tag der Klimatisierung wurden die Prüfkörper der Reihe A3 für den Transport an die Empa vorbereitet. Die Flüssigkeit wurde in zwei Kessel gefüllt und die Holzteile wurden in die Kiste gestapelt.

Nach 200 Tagen wurde auch für die Gruppe D entschieden, die Klimatisierung zu beenden. Die Kontrollstäbe aus Fichte mit Querschnitt 160 mm x 160 mm hatten zu diesem Zeitpunkt im Mittel eine Holzfeuchte von 20 % erreicht.

3.4.5 Statische Zugversuche (Probebelastungen nach der Produktion)

An sämtlichen Prüfkörpern wurden durch die n'H statische Zugversuche durchgeführt. Bei den Reihen A1, B, C1 und C2 erfolgte dies jeweils in Anschluss an die Herstellung. Dabei vergingen zwischen 3 Tage (Reihe B) und 16 Tage (Reihe C2). Die Prüfkörper der Reihen A2 und A3 wurden rund 166 Tage nach dem Einkleben der Stangen belastet. Bei den Reihen D1 und D2 vergingen etwa 201 Tage.

Die Last auf die Zug-Zug-Konfiguration (siehe Abb. 3.19 und Abb. 3.20) wurde über einen, respektive zwei bei der Reihe A2, Hohlkolbenzylinder (RCH-302 oder RCH-306, Enerpac) aufgebracht. Bei dieser Prüfeinrichtung erzeugt eine Handpumpe (SCH302H, Enerpac) den benötigten Öldruck. Diesen misst ein Manometer an der Pumpe, woraus sich die Kraft im System berechnen lässt. Die Belastung wird schrittweise erhöht, wobei in jeden Lastschritt die Zylinderkraft und die gemessenen Verschiebungen notiert werden. In die Auswertung übernommen wurde stets die Zylinderkraft, welche nach dem Ablesen aller Messuhren noch wirkte. Dies liegt auf der sicheren Seite, weil der Öldruck in dieser Zeit immer etwas abnimmt. Die Messung der Verschiebungen an den Prüfkörpern erfolgte mit digitalen Messuhren (DIGICO, TESA und MILLI, Futuro). Zudem wurde jeweils der Pressenweg mit einer digitalen Messuhr (CENTI, Futuro) erfasst.

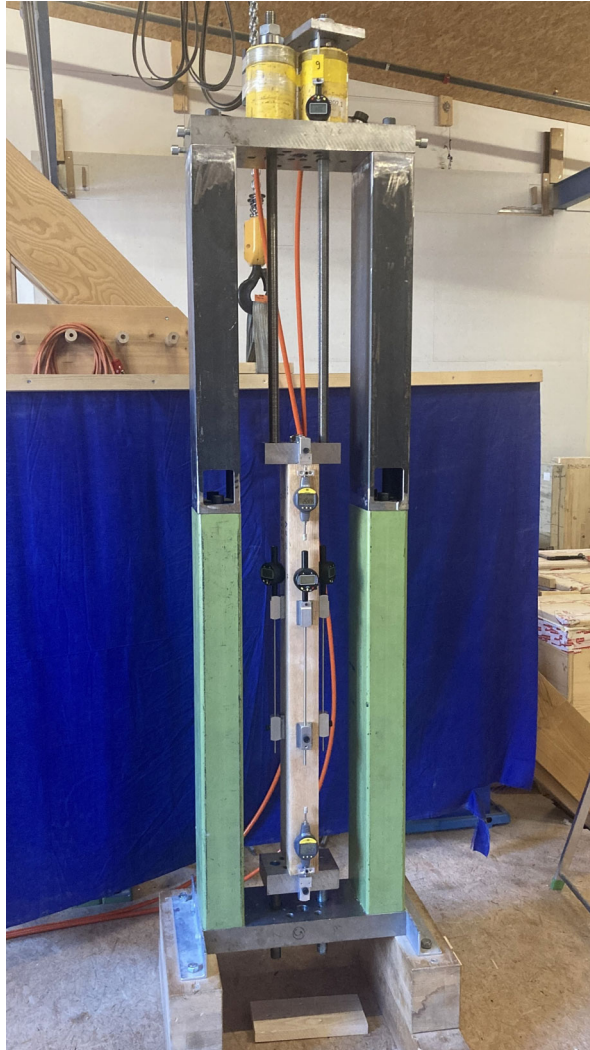


Abb. 3.19: Prüfeinrichtung für die statische Zugbelastung an parallel eingeklebten Stangen am Beispiel der Reihe A2.

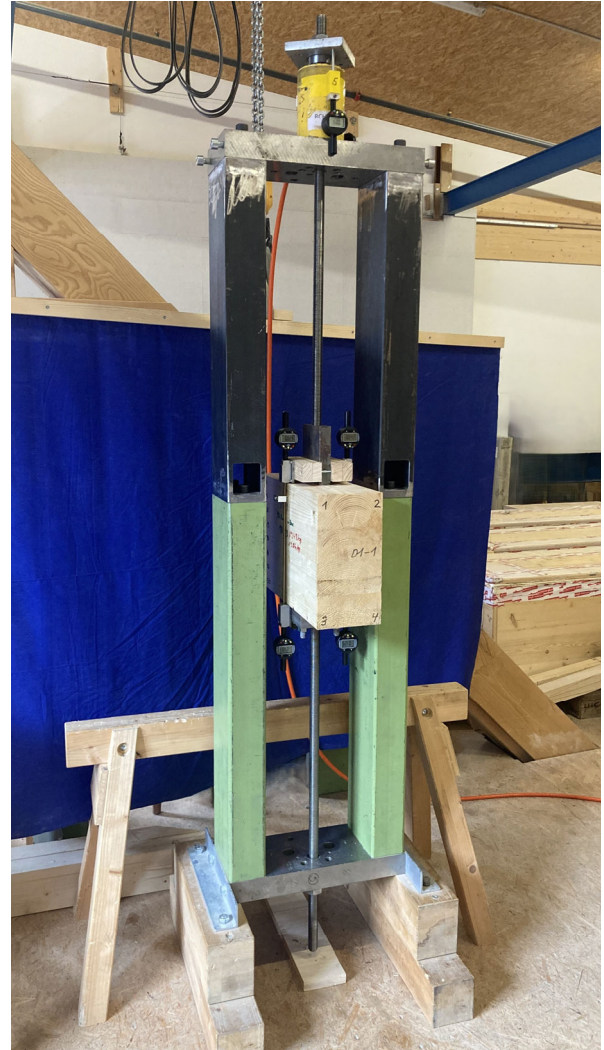


Abb. 3.20: Prüfeinrichtung für die statische Zugbelastung an rechtwinklig eingeklebten Stangen am Beispiel der Reihe D1.

Die Versuche wurden in Anlehnung an die Norm EN 26891 [4] durchgeführt. So wurde jeweils ein erster Belastungszyklus auf 40 % der geschätzten Bruchlast aufgebracht und danach nochmals vollständig entlastet. Mit diesem ersten Zyklus lässt sich die Funktion und einwandfreie Befestigung aller Messuhren überprüfen. Für die Auswertung wurden die Messungen im darauffolgenden, zweiten Zyklus berücksichtigt. Dieser zweite Zyklus dauerte 8 bis 15 Minuten, abhängig davon, welche (Versagens-)Last erreicht wurde. Die Reihen A2, B, C1 und D1 wurden jeweils bis zum Versagen belastet. In der Reihe A2 trat ein duktils Versagen (Fließen der Gewindestangen) ein. Hier wurde die Belastung nach ca. 5 mm plastischer Deformation (Pressenweg) beendet, um die Prüfeinrichtung zu schonen und um die Prüfkörper noch weiterverwenden zu können.

Die Prüfkörper der Reihe A3 wurden bis auf eine Kraft von 150 kN belastet. Diese Probelastung entspricht in etwa 80 % von 185 kN, der Probelastung der Reihe A1 [2]. Bei den Prüfkörpern der Reihen C2 und D2 wurde im zweiten Zyklus eine Kraft von 125 kN aufgebracht. Diese Probelastung entspricht dem angestrebten Bemessungswert in der Feuchteklasse 1 für die geprüfte Konfiguration (siehe Tabelle 3.4).

An allen Prüfkörpern der Gruppe A wurde an beiden Anschlüssen die Verschiebung auf jeweils zwei Bauteilseiten gemessen. Der Befestigungspunkt am Holz lag jeweils 20 mm von Ende entfernt (siehe Abb. 3.22). Im Mittelbereich wurde über eine Strecke von 300 mm die Holzdehnung gemessen. In der Reihe A1 waren zwei Messuhren auf der jeweils schmalen Seitenfläche befestigt. Bei den Reihen A2 und A3 wurden die Holzdehnungen auf allen vier Bauteilseiten gemessen (siehe Abb. 3.21).



Abb. 3.21: Verschiebungsmessungen an einem Prüfkörper der Reihe A2.



Abb. 3.22: Verschiebungsmessungen an einem Anschluss bei einem Prüfkörper der Reihe A3.

Die 50 mm dicken Stahl-Anschlussplatten der Reihe A2 wurden mit 16 mm langen Muttern (1 $\frac{1}{2}$) und Unterlagscheiben 17/30/3 an die Stirnholzflächen befestigt. Das dabei aufgebrachte Drehmoment von 80 Nm sollte eine gleichmässige Lastverteilung gewährleisten, erzeugte jedoch auch eine leichte Vorspannung.

Bei den Versuchsreihen mit rechtwinklig zur Faserrichtung eingeklebten Gewindestangen wurden an den Prüfkörpern jeweils zwei Verschiebungen gemessen. Dazu wurde jeweils beidseitig an den Seitenflächen des Prüfkörpers eine Stange befestigt. Als Anschlusssteifigkeit erfassten je zwei Messuhren die Verschiebungen zwischen den Stahlteilen und dieser Stange. Der Befestigungspunkt am Holz lag beim Prüfkörper B-01 in der Mitte der Bauteilhöhe. Weil bei den Messungen festgestellt worden war, dass dieser Referenzpunkt nicht optimal ist, wurden bei allen weiteren Prüfkörpern die Stangen jeweils 40 mm oberhalb der Oberkante des Holzbauteils angeschraubt. Dadurch konnte die Differenz in den Messergebnissen an den beiden Anschlüssen verkleinert werden.

Die 45 mm dicke Stahlplatte am unteren Anschluss wurde mit 16 mm langen Flanschmutter (1 $\frac{1}{2}$) und Unterlagscheiben 17/40/6 an die 2 x 2 GSA befestigt (siehe Abb. 3.23). Zur Gewährleistung einer möglichst gleichmässigen Lastverteilung wurde ein Drehmoment von 30 Nm aufgebracht. Dies führte zu festem Kontakt zwischen Querholzfläche und Stahlplatte, ohne jedoch Eindrückungen zu erzeugen. Wie die Abb. 3.24 zeigt, wurden am oberen Anschluss zwei Holzklötze an die Stahlplatte geschraubt, um daran die Messuhren befestigen zu können.

Um die Messmittel vor Beschädigung zu schützen, wurden bei sämtlichen statischen Zugversuchen die Messuhren frühzeitig von den Prüfkörpern entfernt. Das Belastungsniveau, wann dies geschah, wurde nicht in allen Reihen einheitlich gehandhabt. Es wurde jedoch immer mindestens der Bemessungswert erreicht.



Abb. 3.23: Stahlteil und Verschiebungsmessungen am unteren Anschluss beim Prüfkörper B-1



Abb. 3.24: Stahlteil und Verschiebungsmessungen am oberen Anschluss am Beispiel des Prüfkörpers C1-1

3.5 Prüfeinrichtungen und Prüfprocedere an der Empa

3.5.1 Klimatisierung der Prüfkörper

Die Prüfkörper der Reihen A3 und D2 wurden in den Klimakisten von Lungern nach Dübendorf transportiert und dort bis kurz vor der Durchführung der Ermüdungsversuche gelagert. Zur Kontrolle der sich in den Klimakisten über die Zeit einstellende bzw. wechselnde Holzfeuchte wurden die Kontrollstäbe in den Klimakisten regelmässig gewogen. Die Klimakisten lagerten im Klimaraum der Empa-Abteilung Ingenieur-Strukturen (Raum BA 126, Abb. 3.25) bei einer Temperatur von 20° C und einer rel. Luftfeuchtigkeit von 50 %.



Abb. 3.25: Klimakiste bei der Ankunft an der Empa.

Jeweils zeitgleich mit der Entnahme eines Prüfkörpers aus der Klimakiste wurden auch 2 Kontrollstäbe entnommen. Der Prüfkörper und die Kontrollstäbe wurden vor Beginn und am Ende des Ermüdungsversuchs gewogen, um den sich während der Dauer des Ermüdungsversuchs einstellenden Masseverlust in Folge Trocknens zu bestimmen. Nach Beendigung der Versuche wurden sowohl die Prüfkörper als auch die Kontrollstäbe wieder zurück in die Klimakiste gelegt.

3.5.2 Umgebungsklima während den Belastungsversuchen

Das Umgebungsklima direkt im Bereich der Ermüdungsprüfmaschine (Empa-Bauhalle, Bereich BA 173) wurde mit einem Klimalogger in einem 5-Minuten-Intervall registriert. Zusätzlich wurde die Raumtemperatur im Bereich des Prüfkörpers mit einem Thermoelement Typ K gemessen.

3.5.3 Temperatur in den Klebfugen

Zur Messung und Kontrolle der Temperatur in den Klebfugen wurden je 2 Temperatursensoren Typ K in vorgebohrte Löcher appliziert Abb. 3.26. Die Löcher reichten bis in die Klebfuge. Vor Einbringen der Thermoelemente wurde thermisch leitende Paste (Fischer Elektronik WLPF 50) dosiert in das Bohrloch eingebracht. Die Kabel der Thermoelemente wurden sodann mittels HBM DMS-Abdeckmittel SG 250 abgedichtet.

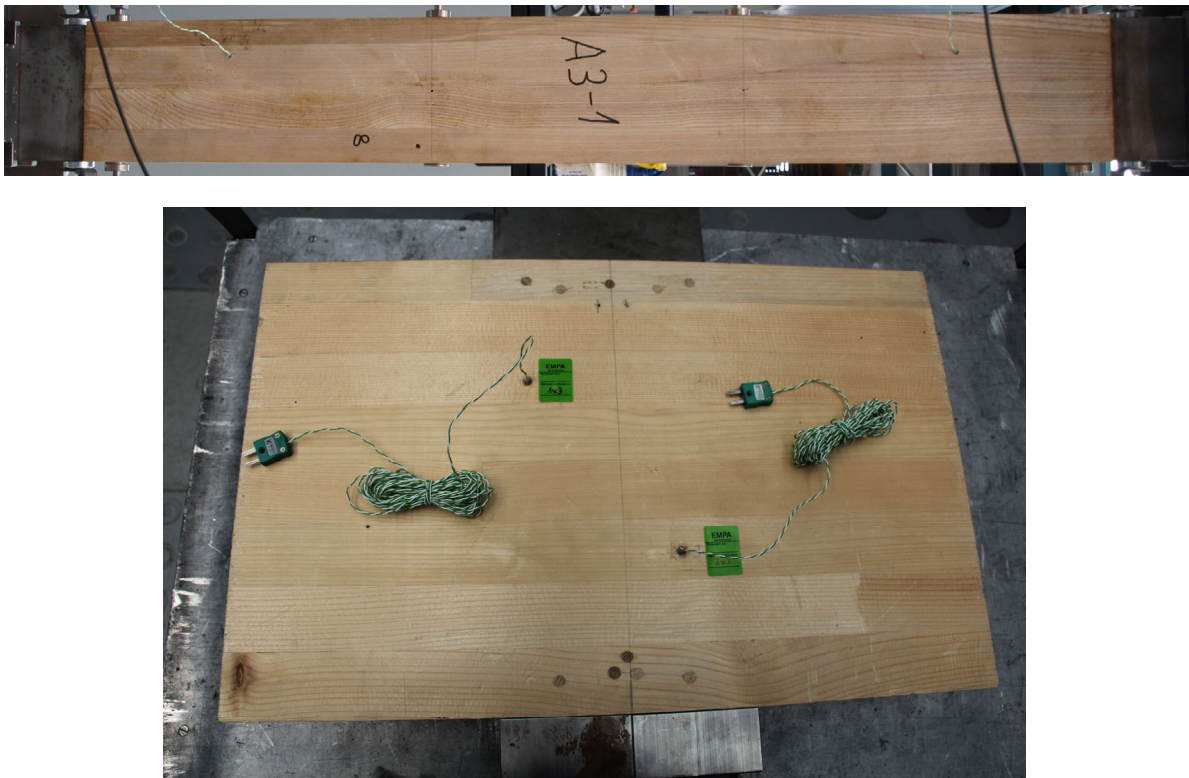


Abb. 3.26: Prüfkörper der Reihe A3 (oben) und Prüfkörper der Reihe C2 (unten) bestückt mit 2 Temperatursensoren Typ K.

3.5.4 Montage der Stahladapterteile

Die im Anhang B dargestellten Stahladapterteile zur Einspannung der Prüfkörper in die Prüfmaschine wurden an den Gewindestangen montiert. An der Empa wurde bei den Prüfkörpern der Reihen C2 und D2 mit rechtwinklig zur Faserrichtung eingeklebten Gewindestangen das untere Stahlteil jeweils wiederverwendet. Um eine gleichmässige Krafteinleitung sicherzustellen, wurden die Muttern und die Kontermuttern mit einem Anzugsdrehmoment von je 30 Nm vorgespannt. Die übrigen Stahladapterteile mit Innengewinden waren bereits durch die n'H montiert worden (siehe Abschnitt 3.4.3).

3.5.5 Statische Belastungsversuche und Ermüdungsversuche

Die statischen Belastungsversuche und die Ermüdungsversuche wurden auf der 500 kN Ermüdungsprüfmaschine Walter & Bai LFV-500 (LOG-Nr. 60.560) in der Bauhalle der Empa-Abteilung Ingenieurstrukturen in Dübendorf (Abb. 3.27 und Abb. 3.28) durchgeführt. Die Prüfmaschine ist in die Genauigkeitsklasse 0.5 eingeordnet. Die auf die Prüfkörper aufgebrachtten Kräfte wurden mit der in der Prüfmaschine eingebauten Kraftmessdose mit einer Genauigkeit von $\pm 0.5\%$ (erweiterte Messunsicherheit U_{95}) gemessen. Der Maschinenweg wurde mit der in der Prüfmaschine eingebauten Traversen-Messeinrichtung mit einer Genauigkeit von $\pm 0.5\%$ (erweiterte Messunsicherheit U_{95}) gemessen.



Abb. 3.27: 500 kN Ermüdungsprüfmaschine Walter & Bai LFV-500 der Empa in Dübendorf mit eingebauten Eschen-BSH-Prüfkörper (eingeklebte Gewindestangen parallel zur Faserrichtung).



Abb. 3.28: 500 kN Ermüdungsprüfmaschine Walter & Bai LFV-500 der Empa in Dübendorf mit eingebauten Fichten-BSH-Prüfkörper (eingeklebte Gewindestangen rechtwinklig zur Faserrichtung).

3.5.5.1 Messung der Anschlussverformungen und Ermittlung der Anschlusssteifigkeiten

Die Anschlussverformungen bei der statischen Vorbelastung (3.5.5.2) und bei der Belastung bis zum Versagen (3.5.5.4) wurden mittels gefederter induktiver Sensoren mit einem Messbereich von 10 mm (Abb. 3.29 und Abb. 3.30) jeweils auf zwei gegenüberliegenden Prüfkörperseiten gemessen.

Bei der Versuchsreihe A3 waren die Sensoren (B in der Abb. 3.29) auf dem Holz 20 mm vom Stirnholzrand entfernt befestigt. Die Metallwinkel als Referenzpunkt (A in der Abb. 3.29) waren auf einer Stahlplatte befestigt. Die Verformungen im Holz wurden mit induktiven Sensoren (C in der Abb. 3.29) ebenfalls beidseitig gemessen. Die Verformungsmessung erfolgte bezogen auf einen Referenzpunkt (D in der Abb. 3.29), der in derselben Distanz vom anderen Prüfkörperrand entfernt montiert war. Die Sensoren C waren mittels Stahldraht mit dem Referenzpunkt D verbunden. Die Messlänge betrug 300 mm.

Bei den Versuchsreihen C2 und D2 waren die induktiven Sensoren (X in der Abb. 3.30) zur Messung der Anschlussverformung auf dem Holz 40 mm vom Prüfkörperrand entfernt befestigt. Die Metallwinkel als Referenzpunkt (W in der Abb. 3.30) waren auf der Anschlussplatte aus Stahl befestigt. Die Verformungen im Holz wurden mittels induktiver Sensoren (Y in der Abb. 3.30) und einem Referenzpunkt (Z

in der Abb. 3.30), welche dieselbe Distanz zum Prüfkörperend hatten wie der Sensor X, gemessen. Sowohl der Sensor als auch der Referenzpunkt wurden mit einem Abstand von 40 mm von der vertikalen Symmetrieachse angebracht. Die Sensoren Y waren mittels Stahldraht mit dem Referenzpunkt Z verbunden. Detaillierte Angaben zur Positionierung der Sensoren und der Referenzpunkte für die Messung der Anschlussverformungen und der Verformungen im Holz sind im Anhang E aufgeführt.

Die Anschlusssteifigkeiten wurden in Anlehnung an die Norm EN 26891 [4] im Lastbereich zwischen 10 % und 40 % der geschätzten Bruchlast bestimmt. Für die Auswertung wurden bei den statischen Vorbelastungsversuchen die Messungen im zweiten Belastungszyklus berücksichtigt (siehe Abb. 3.31). Damit entsprach das Vorgehen demjenigen der n'H bei den Probebelastungen (siehe 3.4.5).

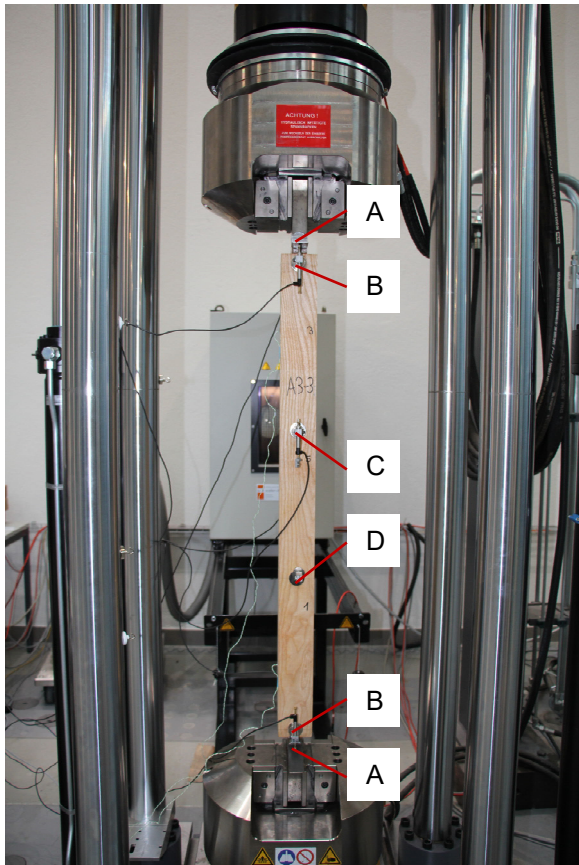


Abb. 3.29: Messung der Anschlussverformungen und der Verformungen im Holz bei den Prüfkörpern der Versuchsreihe A3.

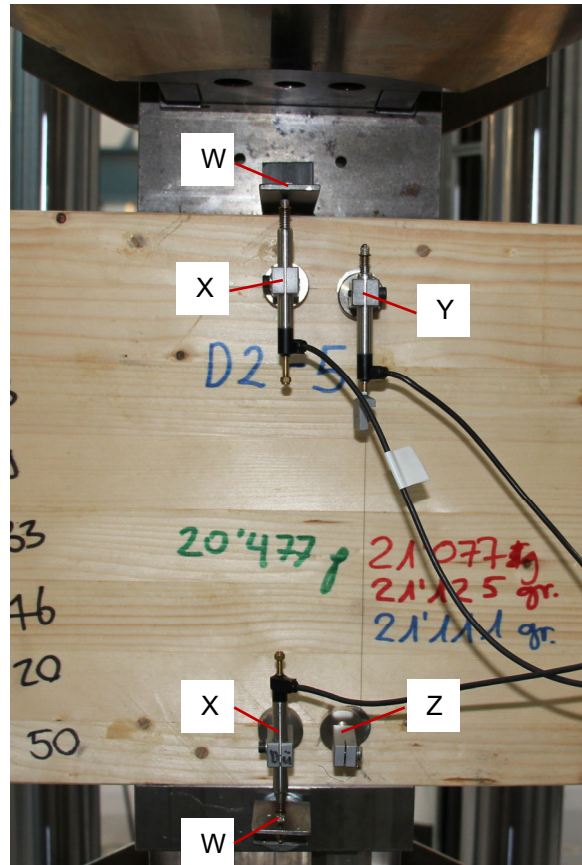


Abb. 3.30: Messung der Anschlussverformungen und der Verformungen im Holz bei den Prüfkörpern der Versuchsreihe C2 und D2.

3.5.5.2 Statische Vorbelastung

Vor den Ermüdungsversuchen wurden alle Prüfkörper kraftgesteuert statisch in 5 Zyklen belastet. Die jeweiligen Belastungsparameter (Oberlast, Unterlast, Last halten, Be- und Entlastungsgeschwindigkeit, etc.) sind in der Tabelle 3.3 zusammengestellt. Die Abb. 3.31 zeigt ein typisches Belastungsprogramm.

Tabelle 3.3: Belastungsparameter bei der statischen Vorbelastung.

Reihe	Oberlast [kN]	Unterlast [kN]	Last Haltedauer [s]	Belastungsgeschwindigkeit [kN/s]
A1	100	10	0	2
A3	100	0	60	2 ¹⁾ bzw. 0.85 ²⁾
C2	90	0	60	3 ³⁾ bzw. 0.66 ⁴⁾
D2	72 ⁵⁾	0	60	0.66

¹⁾ Versuch A3-01 ²⁾ Versuche A3-01 bis A3-04 ³⁾ Versuch C2-01 ⁴⁾ Versuche C2-02 bis C2-04 ⁵⁾ Versuch D2-01: 90 kN

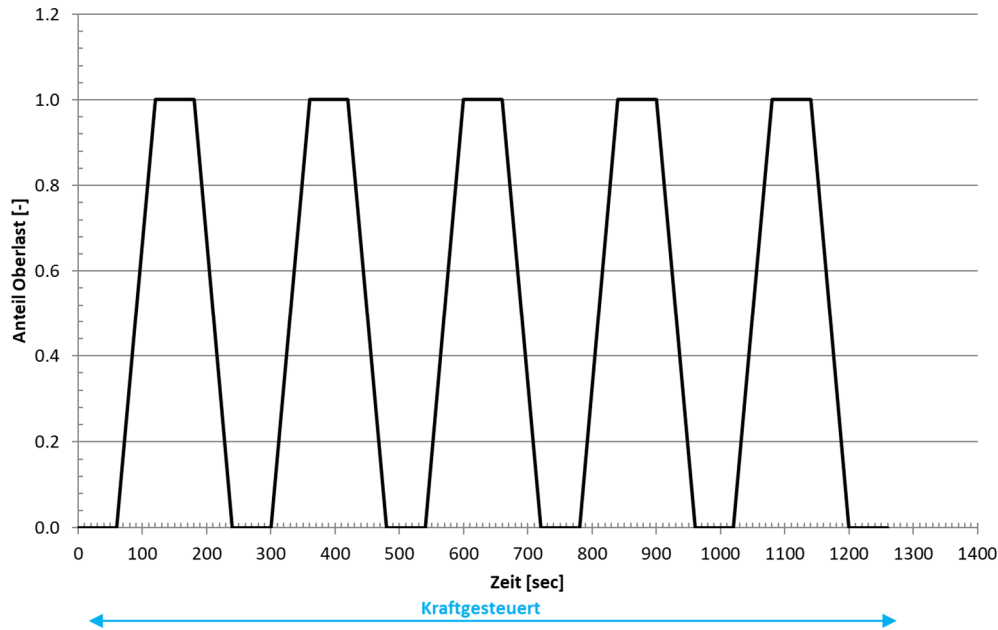


Abb. 3.31: Belastungsprotokoll für die statischen Vorbelastung: 5 Zyklen mit Haltezeiten von je 60 s.

3.5.5.3 Ermüdungsversuche

In den Ermüdungsversuchen wurden sämtliche Prüfkörper kraftgesteuert möglichst bis zum Erreichen von 2 Mio. Lastwechseln belastet. Die jeweiligen Belastungsparameter (Unterlast, Oberlast, Mittellast, Amplitude, R -Wert, Frequenz, Belastungs- und Entlastungsgeschwindigkeit, Schwingungsform, etc.) sind in der Tabelle 3.4 zusammengestellt. Die Abb. 3.32 zeigt ein typisches Belastungsprogramm.

Tabelle 3.4: Belastungsparameter für die Ermüdungsversuche.

	Versuchsreihe			
	A1	A3	C2	D2
Unterlast [kN]	10	10 ⁵⁾	9	7.2 ¹⁾
Mittellast [kN]	55	55 ⁶⁾	49.5	39.6 ²⁾
Oberlast [kN]	100	100 ⁷⁾	90	72 ³⁾
Amplitude [kN]	± 45	± 45	± 40.5	± 32.4 ⁴⁾
R -Wert [-]	0.1	0.1	0.1	0.1
Frequenz [Hz]	5 – 12	4 – 6	5.5 – 7	4 – 6.25
Schwingungsform	Sinus			
Regelung	Kraft			

¹⁾ Versuch D2-01: 9

²⁾ Versuch D2-01: 49.5

³⁾ Versuch D2-01: 90

⁴⁾ Versuch D2-01: ± 40.5

⁵⁾ Versuch A3-04: 14

⁶⁾ Versuch A3-04: 77

⁷⁾ Versuch A3-04: 140

Nachdem beim Ermüdungsversuch am Prüfkörper D2-01 bereits nach 135'000 Lastwechseln Risse auftraten (Abb. 3.33), und nicht ausgeschlossen werden konnte, dass diese durch die Trocknung des Prüfkörpers initiiert wurden, wurde beschlossen, bei den restlichen Ermüdungsversuchen an Prüfkörpern der Gruppe D, die Stirnflächen der Prüfkörper mit Kunststoff-Klebeband abzudecken (Abb. 3.34), um ein zu starkes bzw. zu rasches Austrocknen zu verhindern.

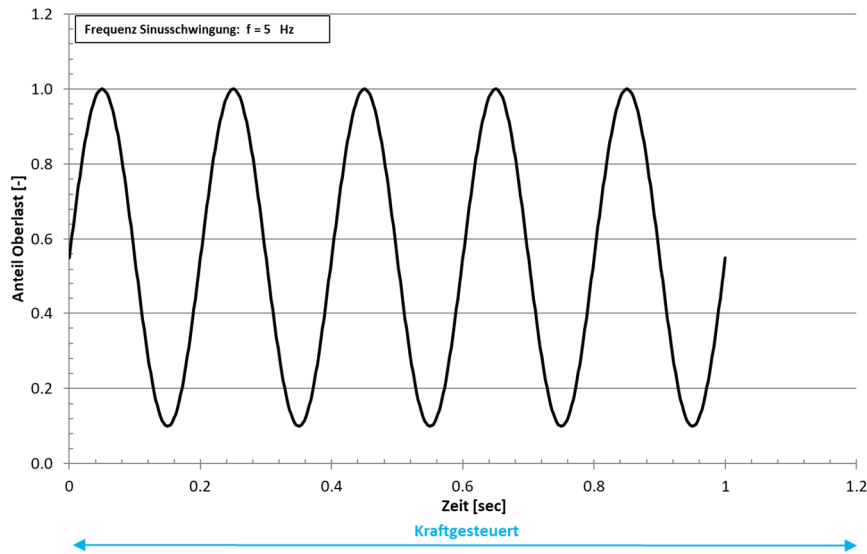


Abb. 3.32: Belastungsprotokoll für die Ermüdungsversuche: Kraftgesteuerte Sinusbelastung mit Frequenzen zwischen 4 und 12 Hz.



Abb. 3.33: Rissbildung beim Prüfkörper D2-01 nach 135'000 Lastwechseln im Ermüdungsversuch.



Abb. 3.34: Mit Kunststoff-Klebeband abgedeckte Stirnflächen der Fichten-BSH-Prüfkörper der Versuchsgruppe D – Beispiel: Prüfkörper D2-02.

3.5.5.4 Belastung der Prüfkörper bis zum Versagen

Nach den Ermüdungsversuchen wurden sämtliche Prüfkörper statisch (Kraftregelung / Verformungsregelung) bis zum Bruch belastet. Die Abb. 3.35 zeigt ein typisches Belastungsprogramm.

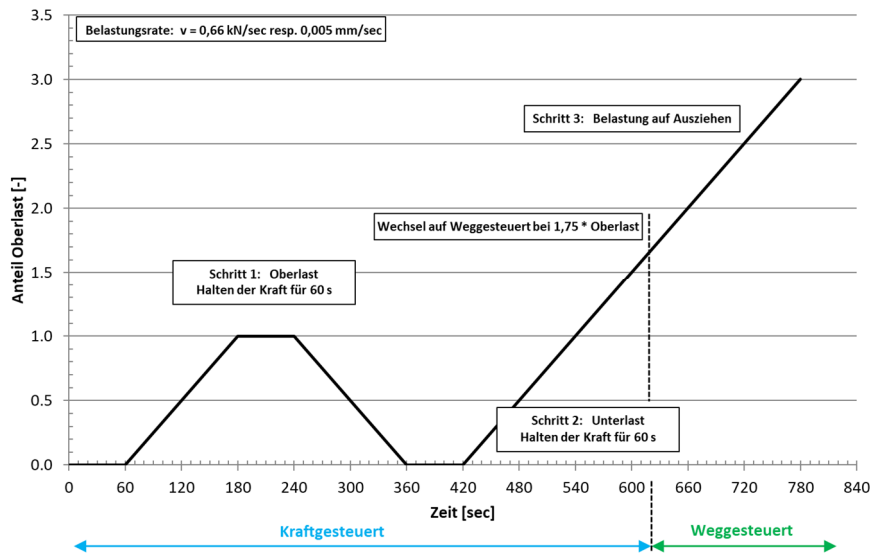


Abb. 3.35 Bei den Ausziehversuchen angewendetes Belastungsprotokoll.

Die Belastung erfolgte im Gebrauchslastbereich kraftgesteuert und im Bruchversuch ab einem Kraftniveau entsprechend dem 1.75-fachen der Oberlast verformungsgeregelt. Die jeweiligen Belastungsparameter (Unterlast, Oberlast, Last halten, Belastungs- und Entlastungsgeschwindigkeit, etc.) sind in der Tabelle 3.5 zusammengestellt.

Tabelle 3.5: Belastungsparameter bei den Ausziehversuchen.

Reihe	Unterlast [kN]	Oberlast [kN]	Last Haltedauer [s]	Belastungsgeschwindigkeit
A1	0	92	ca. 30	schrittweise ¹⁾
A3	0	100	60	0.85 kN/s bzw. 0.012 mm/s
C2	0	90	60	0.66 kN/s bzw. 0.005 mm/s
D2	0	72	60	0.66 kN/s bzw. 0.005 mm/s

¹⁾ Prüfung durch die n'H analog zum Procedere gemäss Abschnitt 3.4.5

3.5.5.5 Datenerfassung

Während der Versuche wurden die Messgrößen Zeit, Maschinenkraft, Maschinenweg, Anzahl Lastwechsel, Temperatur in den Klebfugen und im Raum aufgezeichnet. Die Temperaturen in den Klebfugen und im Raum wurden mittels der Temperaturerfassungseinheit Quantum X MX1609KB (LOG 70.157) von HBM mit einer Frequenz von 2 Hz registriert. Zur Aufzeichnung der Maschinenkraft und des Maschinenwegs wurde das Datenerfassungsgerät Somat MX840B R (LOG 70.132) von HBM eingesetzt. In den statischen Versuchen betrug die Messfrequenz 2 Hz in den dynamischen Versuchen 2.5 kHz. Die Raumtemperaturen wurden mit einem Thermoelement Typ K in der Nähe der Temperaturerfassungseinheit gemessen und in Intervallen von 5 Minuten gespeichert.

3.6 Zerlegen der Prüfkörper nach Abschluss des Versuchsprogramms

Um die Klebfugen nach den Prüfungen analysieren zu können, wurden die Prüfkörper jeweils nach Abschluss des kompletten Versuchsprogramms zerlegt. Bei den Prüfkörpern der Gruppe A wurde zuerst das Mittelstück herausgesägt. Die Abb. 3.36 zeigt dies am Beispiel des Prüfkörpers A1-02. Daraus wurden 40 mm lange Querschnittsscheiben geschnitten und als Darrproben zur Ermittlung der Holzfeuchte verwendet. Anhand eines 150 mm langen Stücks wurde die Dichte in diesem Mittelteil errechnet. Die lokale Dichte wurde gemessen, um diese Eigenschaft mit den Prüfkörpern der Reihe A1 vergleichen zu können. Die Anschlussbereiche der Prüfkörper der Gruppe A wurden aufgetrennt, indem zuerst von zwei Seiten eine parallel zur GSA-Stange verlaufende Sägenut geschnitten wurde. Danach liess sich das Holz aufspalten und die Stange und die Klebfuge konnten freigelegt werden.

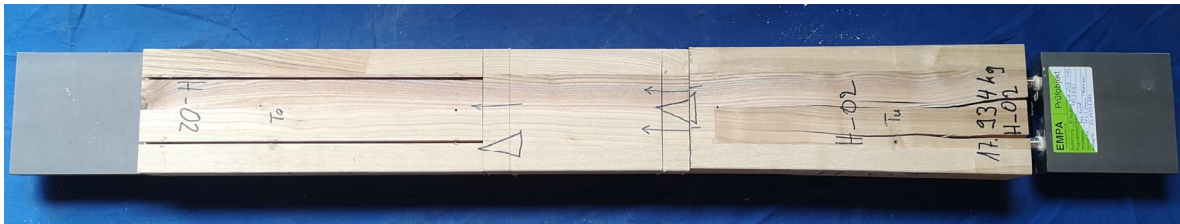


Abb. 3.36: Prüfkörper A1-02 beim Zerlegen nach dem statischen Zugversuch.

Die Prüfkörper der Gruppen B, C und D liessen sich in der Regel zerlegen, indem man sie entlang der Risse aufspaltete, welche während der Ausziehprüfungen entstanden waren (siehe Abb. 3.37). In einzelnen Fällen, wenn die Risse nur wenig ausgeprägt waren, wurde von der Stirnseite her jeweils eine etwa 7 cm tiefe Sägenut geschnitten, um das Aufspalten zu erleichtern. Wie die Abb. 3.38 zeigt, folgte die auf diese Weise freigelegte Fläche jeweils gut den Risslinien aus den Versuchen. Die Sägenut ermöglichte nur das Ansetzen des Spaltwerkzeugs. So ergaben sich jeweils zwei Seitenteile mit je zwei GSA-Stangen des unteren Anschlusses und ein Innenteil mit den 3 GSA-Stangen des oberen Anschlusses.

Jede freigelegte Bruchfläche wurde fotografiert und es wurde visuell analysiert, ob eine der drei Komponenten (Holz, Stahl oder Klebstoff) besondere Merkmale aufwies. Zudem wurden Unterschiede in der Charakteristik der Bruchflächen gesucht.



Abb. 3.37: Prüfkörper D1-02 mit ausgeprägten Rissen, die sich weiter aufspalten liessen.



Abb. 3.38: Prüfkörper D2-02 nach allen Versuchen und Schnittflächen der Kreissäge in den aufgespaltenen Bruchflächen.

3.7 Literatur zum Kapitel 3

1. SIA (2021): Norm SIA 265 Holzbau. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich, Schweiz,
2. 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, 9- 12 May 2022, Biel/Bienne, Switzerland.
3. Reichel S. (2015): Modellierung und Simulation hygro-mechanisch beanspruchter Strukturen aus Holz im Kurz- und Langzeitbereich. Technischen Universität Dresden, Dresden, Germany.
4. CEN (1991): EN 26891: Timber structures - Joints made with mechanical fasteners: General principles for the determination of strength and deformation characteristics. CEN, Brussels,

4. Versuchsergebnisse

4.1 Einleitung

Im Rahmen des Projekts wurden die in der Tabelle 4.1 aufgelisteten Versuche durchgeführt.

Tabelle 4.1: Übersicht über die durchgeführten Versuche.

Gruppe	Reihe	Thema	BSH	PK
A	A1	Stangen $\parallel$ zur Faserrichtung, FKL 1, Ermüdung ¹⁾	Esche	3+2
	A2	Stangen $\parallel$ zur Faserrichtung, FKL 2, Festigkeit statisch		4
	A3	Stangen $\parallel$ zur Faserrichtung, FKL 2, Ermüdung & Restfestigkeit statisch		3+1
B		Entwicklung / Optimierung des Test-Setups Stangen $\perp$ zur Faserrichtung, FKL 1, Festigkeit statisch	Fichte	3
C	C1	Stangen $\perp$ zur Faserrichtung, FKL 1, Festigkeit statisch	Fichte	3+1
	C2	Stangen $\perp$ zur Faserrichtung, FKL 1, Ermüdung & Restfestigkeit statisch		4
D	D1	Stangen $\perp$ zur Faserrichtung, FKL 2, Festigkeit statisch	Fichte	3
	D2	Stangen $\perp$ zur Faserrichtung, FKL 2, Ermüdung & Restfestigkeit statisch		4+2

¹⁾ Vorleistung durch die neue Holzbau AG

FKL = Feuchteklasse

4.2 Versuchsgruppe A

4.2.1. Versuchsreihe A1

In der Versuchsreihe A1 wurden parallel zur Faserrichtung in Eschen-BSH eingeklebte Gewindestangen Ermüdungsversuchen unterzogen. Die Holzfeuchte der Prüfkörper entsprach den Bedingungen der Feuchteklasse 1 gemäss Norm SIA 265 [1]. Diese Versuche wurden als Vorleistung der neuen Holzbau AG in das Projekt eingebracht.

4.2.1.1 Statische Probelastungsversuche bei der n'H

Vor den Ermüdungsversuchen erfolgte, im Sinne einer Qualitätskontrolle und zur Ermittlung der Steifigkeiten, eine statische Probelastung bei der neuen Holzbau AG mit einer Zugkraft von 185 kN. Insgesamt wurden 5 Prüfkörper hergestellt und deren Steifigkeit während der statischen Probelastung gemessen. Die entsprechenden Versuchsparameter sind in Abschnitt 3.4.5 beschrieben. Es wurden die in der Abb. 4.1 bzw. Abb. 4.2 dargestellten und in der Tabelle 4.2 aufgelisteten Ergebnisse erzielt.

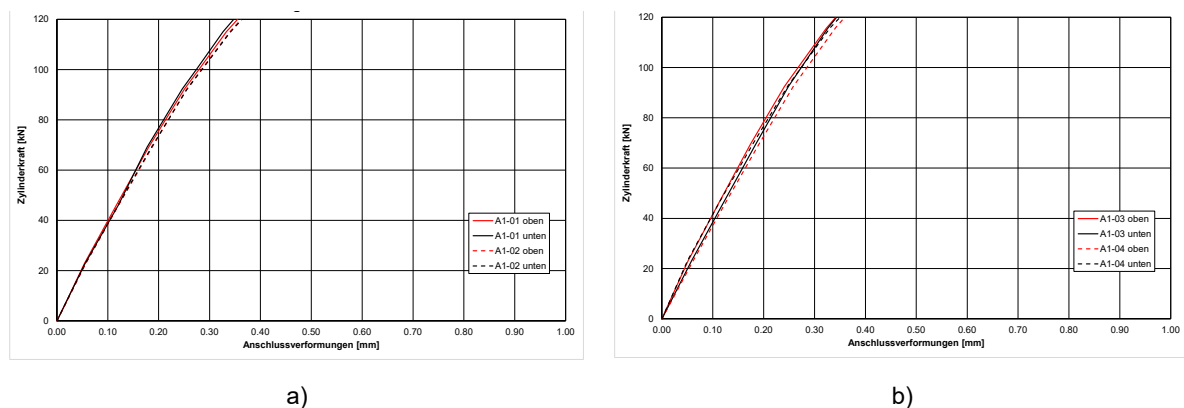


Abb. 4.1: Anschlussverformungen in den statischen Probelastungsversuchen an den Prüfkörpern A1-01, A1-02 (Abb. a), sowie A1-03 und A1-04 (Abb. b).

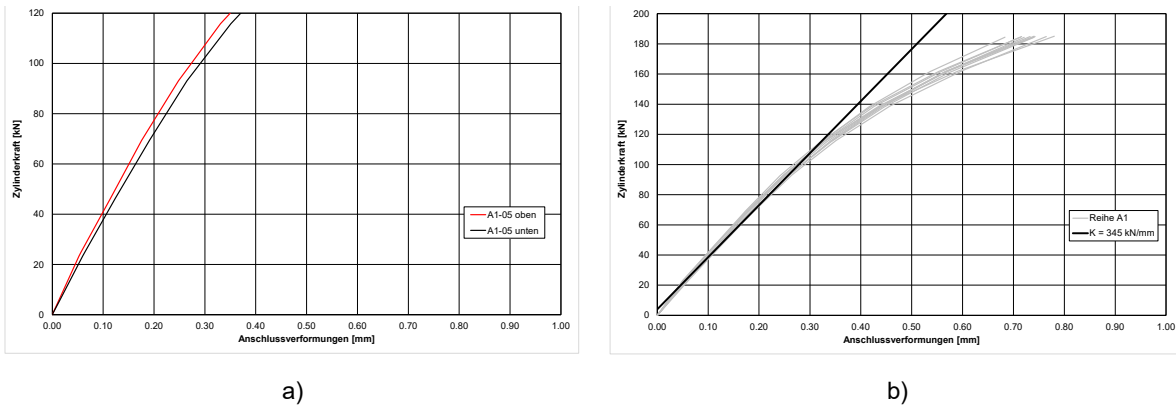


Abb. 4.2: Anschlussverformungen in den statischen Probelastungsversuchen am Prüfkörper A1-05 (Abb. a) und vergleichende Darstellung für alle 5 Prüfkörper (Abb. b).

Tabelle 4.2: Ergebnisse der statischen Probelastungsversuche in der Versuchsreihe A1.

Prüfkörper	Verformung [mm] bei 25 kN		Verformung [mm] bei 100 kN		Steifigkeit [kN/mm]	
	Anschluss unten	Anschluss oben	Anschluss unten	Anschluss oben	Anschluss unten	Anschluss oben
A1-01	0.061	0.060	0.274	0.279	353	343
A1-02	0.062	0.063	0.285	0.284	336	339
A1-03	0.063	0.056	0.274	0.268	356	355
A1-04	0.055	0.067	0.274	0.285	343	344
A1-05	0.064	0.057	0.291	0.273	331	347
Mittelwert					345	
Prüfkörper	Holzdehnungen im Mittelbereich				E-Modul [N/mm ²]	
	b = 70 mm	h = 140 mm	b = 70 mm	h = 140 mm		
A1-01	0.049	–	0.209	-	14'300	
A1-02	0.060	–	0.234	-	13'100	
A1-03	0.046	–	0.180	-	17'100	
A1-04	0.050	–	0.198	-	15'600	
A1-05	0.043	–	0.176	-	17'200	
Mittelwert					15'500	

4.2.1.2 Statische Vorbelastungsversuche an der Empa

Aus Kostengründen wurden an der Empa nur noch 3 Prüfkörper geprüft. An diesen 3 identischen Prüfkörpern wurden die folgenden Versuche durchgeführt:

- **Statischer Zugversuch:**
 - o Kraftgeregelte Steigerung der Last mit einer Geschwindigkeit von 2 kN/s auf eine Last von 100 kN (Zug).
 - o Kraftgeregelte Entlastung mit einer Geschwindigkeit von 2 kN/s auf 10 kN (Zug)
- **Ermüdungsversuch:**
 - o Lastaufbringung: kraftgeregelt
 - o Wellenform: Sinus
 - o Frequenz: so hoch wie möglich, ohne dass sich eine übermäßige Erhöhung der Temperatur in den Klebfugen ergibt
 - o Mittellast: 55 kN (Zug) und Amplitude: ± 45 kN, d. h. (Unterlast: 10 kN (Zug)) und (Oberlast: 100 kN (Zug))

Die Holzfeuchte beim Einkleben der Gewindestangen lag bei 10 ± 1 %. Nach den Ermüdungsversuchen wurden Holzfeuchten zwischen 7.7 % und 8.2 % gemessen.

Bei den statischen Vorbelastungsversuchen bis auf eine Zugkraft von 100 kN ergaben sich keine Auffälligkeiten. Da lediglich der Maschinenweg gemessen worden war, können keine Angaben zu den Steifigkeiten der Anschlüsse gemacht werden. Die Ergebnisse der Versuche sind im Detail im Empa-Prüfbericht 5214027186, vom 26. 08. 2021 beschrieben und in der Publikation [2] zusammengefasst.

4.2.1.3 Ermüdungsversuch am Prüfkörper A1-01

Im ersten Ermüdungsversuch war ein wichtiges Ziel, die optimale Prüffrequenz zu ermitteln. Die Prüffrequenz sollte möglichst hoch sein, sollte jedoch nicht zu unzulässigen Erwärmungen in den Klebfugen auf Temperaturen von mehr als 45°C bis 50°C führen. In einem ersten Schritt wurde die Prüffrequenz zu 12 Hz festgelegt. Es stellte sich jedoch innert äusserst kurzer Zeit eine unzulässig starke Erwärmung in den Klebfugen ($T > 45^\circ\text{C}$ nach 20'000 Lastwechseln) ein, so dass die Frequenz vorerst halbiert wurde (6 Hz). Bei dieser Frequenz war die Wärmezunahme in den Klebfugen in Funktion der Prüfzeit deutlich geringer. Nach ca. 430'000 Lastwechseln wurde daher die Prüffrequenz auf 9 Hz erhöht und wegen erneuter übermässiger Zunahme der Temperatur in den Klebfugen bei 8 Hz eingependelt. Zwischenzeitlich wurde während des Versuchs mit der Frequenz 9 Hz ein Ventilator neben der Prüfmaschine auf den Boden gestellt, um den Prüfkörper zu kühlen. Da sich jedoch nicht die gewünschte Wirkung einstellte und die Temperaturen in den Klebfugen trotz Ventilation weiter anstiegen, wurde der Ventilator wieder entfernt und die Prüffrequenz wurde reduziert.

Der Ermüdungsversuch konnte letztlich mit einer Gesamtzahl von 2'054'712 Lastwechseln abgeschlossen werden, ohne dass der Prüfkörper versagte. Die Tabelle 4.3 gibt eine Übersicht über die wichtigsten Ergebnisse des Ermüdungsversuchs am Prüfkörper A1-01.

Tabelle 4.3: Ermüdungsversuch am Prüfkörper A1-01.

Lastwechsel	Frequenz	Max. Temperatur [$^\circ\text{C}$]			Max. Traversenweg [mm] bei	
		Raum	unten ¹⁾	oben ¹⁾	10 kN (Unterlast)	100 kN (Oberlast)
1 – 21'147	12 Hz	26.2	47.7	46.7	0.386	1.590
21'148 – 455'097	6 Hz	26.4	48.3	47.5	0.445	1.608
455'098 – 505'097	9 Hz	26.0	56.8	54.5	0.478	1.670
505'098 – 2'054'712	8 Hz	26.6	57.2	55.7	0.504	1.697

¹⁾ Temperatur in den Klebfugen der eingeklebten Gewindestangen

4.2.1.4 Ermüdungsversuche an den Prüfkörpern A1-02 und A1-03

Beim Versuch am Prüfkörper A1-02 betrug die Prüffrequenz 8 Hz, beim Versuch am Prüfkörper A1-03 betrug sie 5 Hz. Beide Prüfkörper überstanden 2'010'000 Lastwechsel, ohne dass sie versagten. Die Versuchsergebnisse sind in der Tabelle 4.4 zusammengestellt.

Tabelle 4.4: Ermüdungsversuche an den Prüfkörpern A1-02 und A1-03.

Prüfkörper	Lastwechsel	Frequenz	Max. Temperatur [$^\circ\text{C}$]			Max. Traversenweg [mm] bei	
			Raum	unten ¹⁾	oben ¹⁾	10 kN (Unterlast)	100 kN (Oberlast)
A1-02	2'010'000	8 Hz	25.6	54.2	47.8	0.607	1.838
A1-03	2'010'000	5 Hz	27.7	48.0	46.0	0.456	1.569

¹⁾ Temperatur in den Klebfugen der eingeklebten Gewindestangen

4.2.1.5 Klebfugentemperaturen in den Ermüdungsversuchen der Reihe A1

Die folgenden Abbildungen (Abb. 4.3 - Abb. 4.6) zeigen, welche Temperaturen sind in den Ermüdungsversuchen mit verschiedenen Frequenzen in den Klebfugen der eingeklebten Gewindestangen einstellten. Aus der Versuchsreihe A1 konnte geschlossen werden, dass mit Blick auf die Temperatur in den Klebfugen, die optimale Prüffrequenz ca. 5 Hz beträgt.

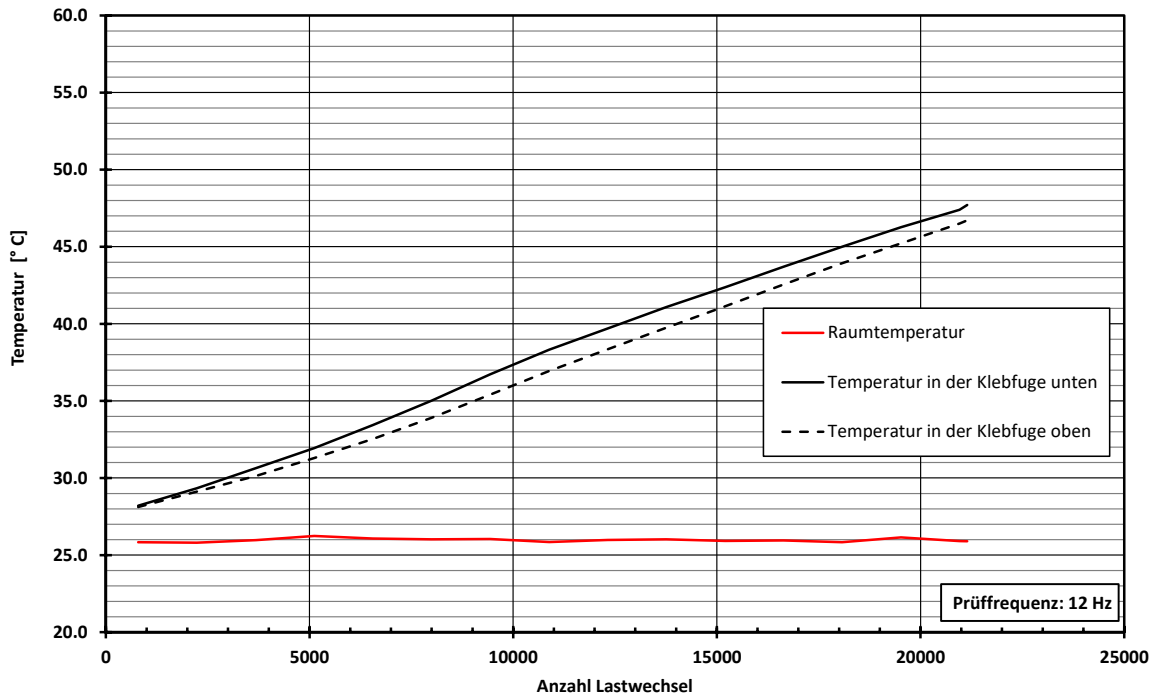


Abb. 4.3: Temperaturen im Ermüdungsversuch am Prüfkörper A1-01: Zyklen 1 – 21'147 bei 12 Hz.

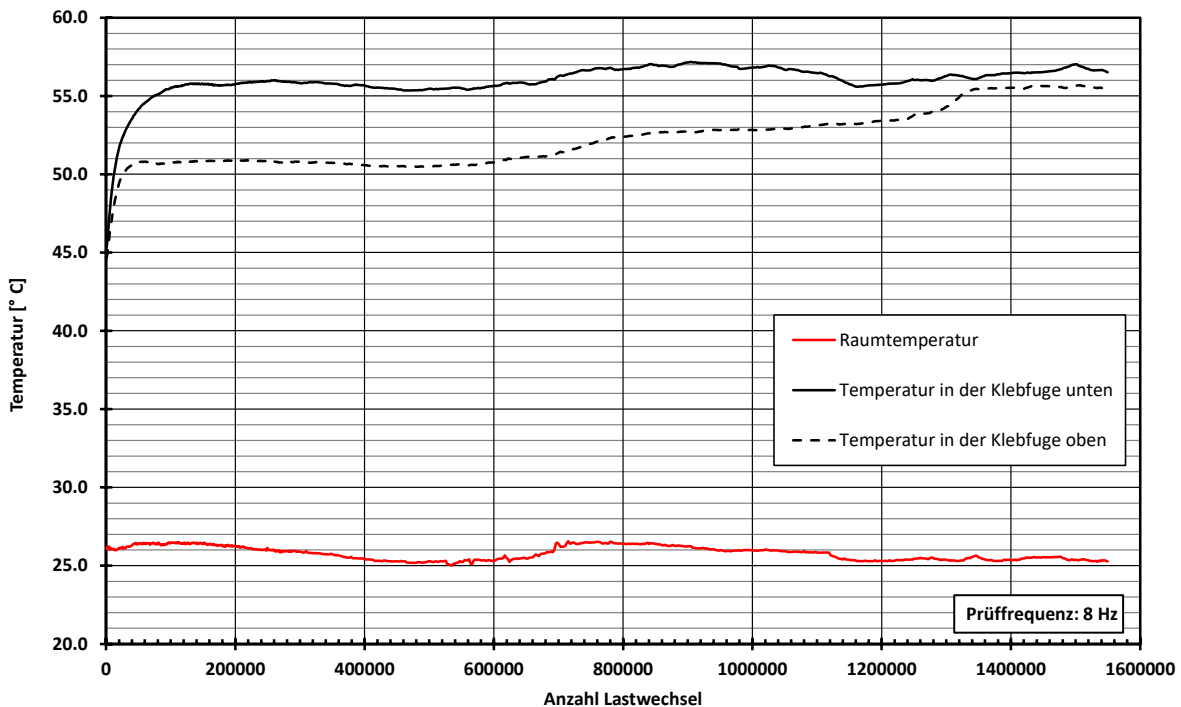


Abb. 4.4: Temperaturen im Ermüdungsversuch am Prüfkörper A1-01: Zyklen 505'098 – 2'054'712 bei 8 Hz.

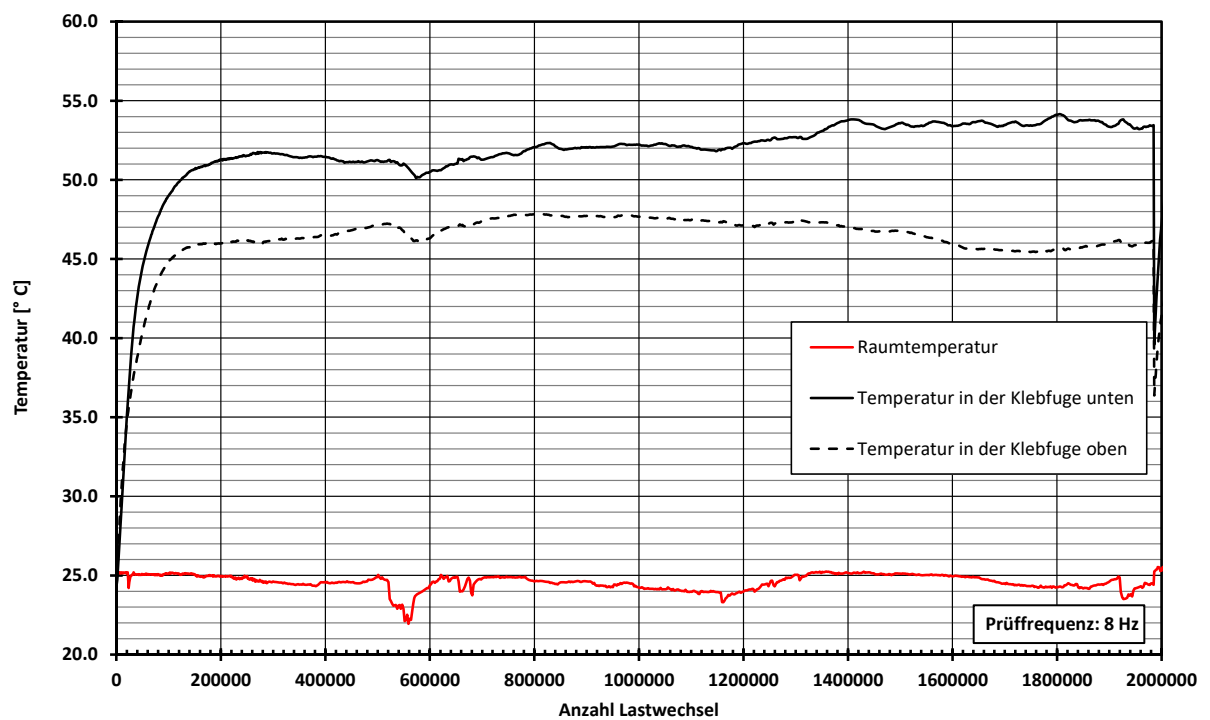


Abb. 4.5: Temperaturen im Ermüdungsversuch am Prüfkörper A1-02: Zyklen 1 – 2'000'000 bei 8 Hz.

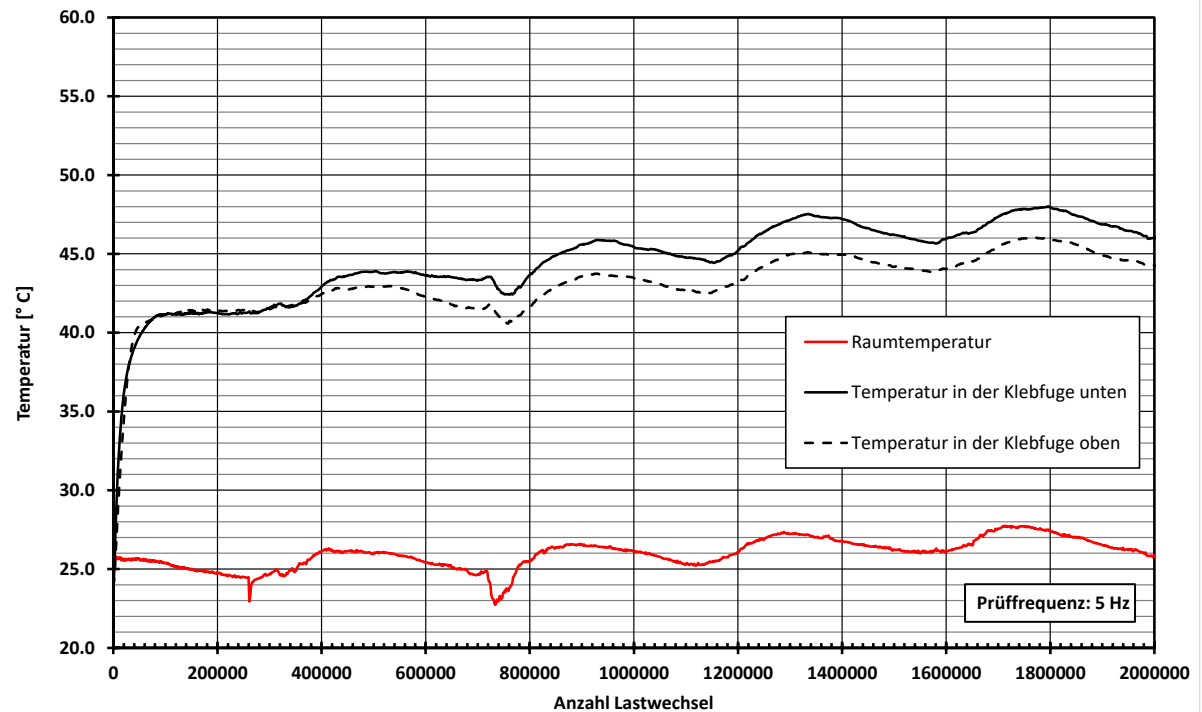


Abb. 4.6: Temperaturen im Ermüdungsversuch am Prüfkörper A1-03: Zyklen 1 – 2'000'000 bei 5 Hz.

4.2.1.6 Ausziehversuche nach den Ermüdungsversuchen

Den Abschluss der Versuche bildete ein statischer Zugversuch zur Ermittlung der Restfestigkeit mit Verformungsmessungen an den Anschlüssen und im Mittelbereich zur Ermittlung der Reststeifigkeit. Die entsprechenden Versuchsparameter sind in Abschnitt 3.4.5 beschrieben. Es wurde lediglich der Prüfkörper A1-02 geprüft. Bei den übrigen zwei Prüfkörpern bestand das Interesse, die Klebfugen nach dem Ermüdungsversuch visuell zu beurteilen. In der Abb. 4.7 ist der Vergleich der Anschlusssteifigkeit mit den Kurven aus der Probebelastung dargestellt. Dabei fällt auf, dass die Verformung bei 185 kN in beiden Versuchen fast übereinstimmt. Die Abnahme der Steifigkeit ist folglich nicht auf die 2 Mio. Lastwechsel zurückzuführen, sondern auf die «Vorschädigung» während der Probebelastung. Die Tabelle 4.5 gibt eine Übersicht über die wichtigsten Ergebnisse der Versuchsreihe A1.

Tabelle 4.5: Vergleich der Steifigkeit vor und nach dem Ermüdungsversuch an den Prüfkörpern der Versuchsreihe A1.

Prüfkörper	Steifigkeit [kN/mm] vor Ermüdungsversuch im Anschluss		Lastwechsel im Er- müdungsversuch	Steifigkeit [kN/mm] nach Ermüdungsversuch im Anschluss		Ausziehwi- derstand [kN]
	unten	oben		unten	oben	
A1-01 ¹⁾	353	343	2'054'712	–	–	–
A1-02	336	339	2'010'000	241	222	246
A1-03 ¹⁾	356	355	2'010'000	–	–	–
A1-04 ²⁾	343	344	–	–	–	–
A1-05 ²⁾	331	347	–	–	–	–
Mittelwert	345			231		

¹⁾ Kein Ausziehversuch nach dem Ermüdungsversuch, um die visuelle Beurteilung der Klebfuge zu ermöglichen.

²⁾ Kein Ermüdungsversuch entsprechend dem Prüfplan. Diese Prüfkörper wurden aufbewahrt und zur Vorbereitung der Reihe A2 eingesetzt.

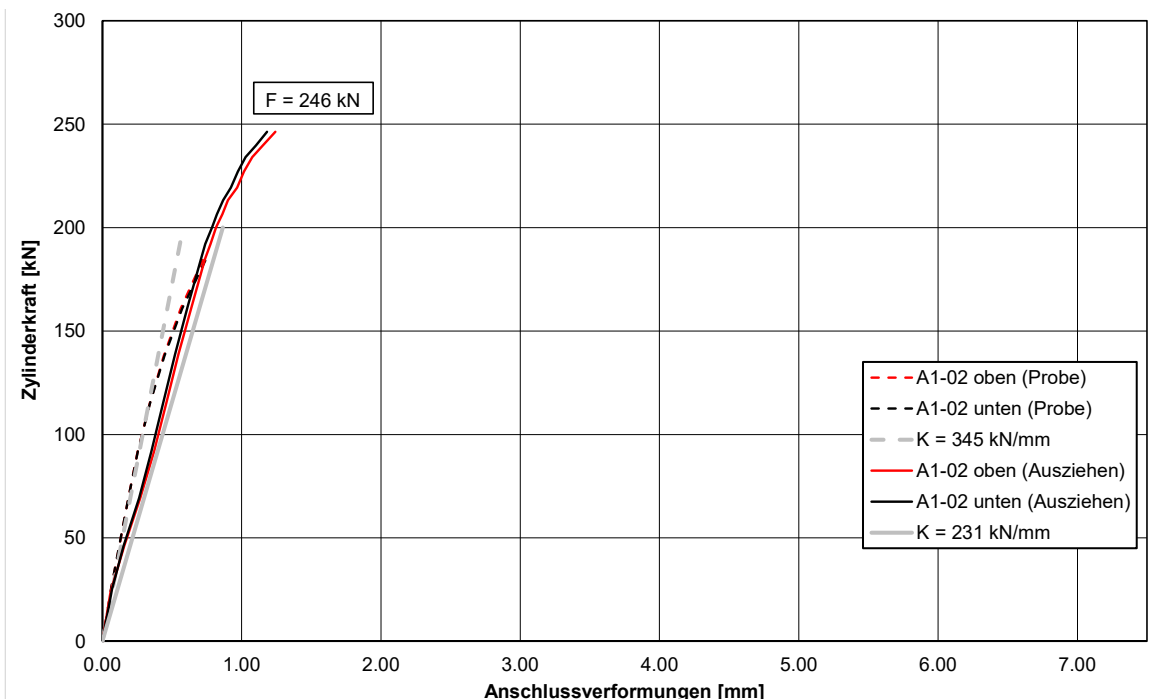


Abb. 4.7: Anschlussverformungen im Ausziehversuch nach 2 Mio. Lastwechseln am Prüfkörper A1-02.

Die Tabelle 4.6 fasst die in der Versuchsreihe A1 bestimmten Holzeigenschaften zusammen. Dabei beziehen sich die Angaben zur Dichte stets auf eine Holzfeuchte von 12 %. Bei den Reihen A2 und A3 wurde die Dichte sowohl im Mittelbereich (siehe Abschnitt 3.6) als auch für den gesamten Prüfkörper ermittelt.

Tabelle 4.6: Holzeigenschaften der Prüfkörper der Versuchsreihe A1.

Prüfkörper	Dichte bei $\omega = 12\%$ [kg/m ³]		Holzfeuchte [%]	E-Modul [N/mm ²]	
	Mittelbereich	Prüfkörper		Probelastung	Ausziehversuch
A1-01	728	–	8.0	14'300	–
A1-02	705	–	7.7	13'100	13'100
A1-03	721	–	8.2	17'100	–
Mittelwert	718		8.0	14'800	

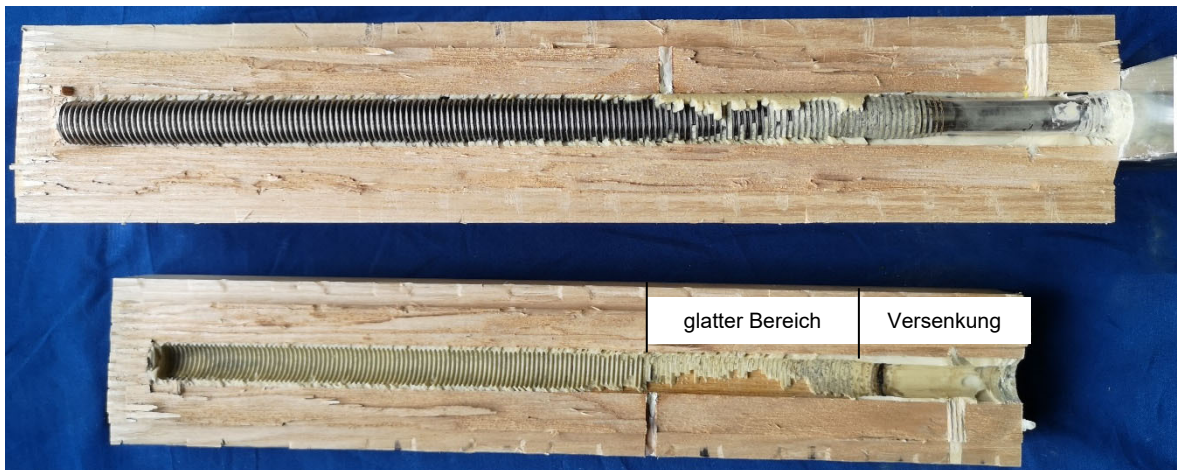
4.2.1.7 Versagensbilder

Der Prüfkörper A1-02 versagte spröde bei einer Kraft von 246 kN und somit 23 % über dem charakteristischen Wert für statische Kurzzeitprüfungen von GSA-Stangen eingeklebt in Laubholz. Die Abb. 4.8 a) und b) zeigen den unteren Anschluss, welcher im statischen Zugversuch versagte.

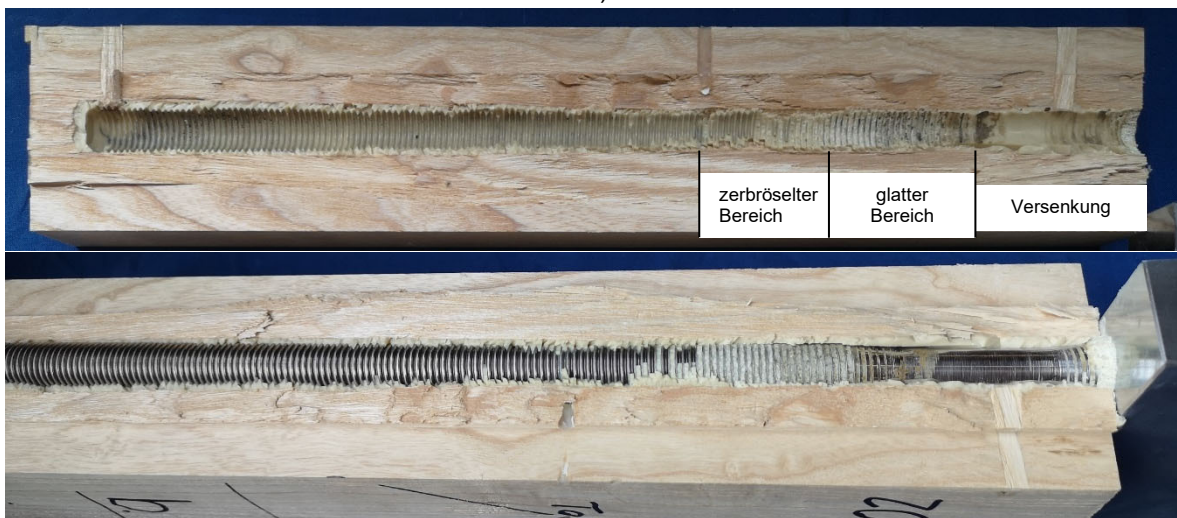


Abb. 4.8: Versagensbilder in der Versuchsreihe A1: a) Prüfkörper A1-02 nach dem Ausziehversuch, b) Unterer Anschluss des Prüfkörpers A1-02 zerlegt.

Der Zustand der Klebfugen lässt sich besser anhand von Anschlüssen vergleichen, die nicht versagt haben. Bei der Analyse der zerlegten Anschlüsse zeigten sich in den Verankerungslängen der Klebfugen zwei unterschiedlich geschädigte Bereiche. So zeigt die Abb. 4.9 a) eine Stange des Prüfkörpers A1-01, welcher nach 2 Mio. Lastwechseln mit Frequenzen bis zu 12 Hz zerlegt wurde. Auf die Versenkung der wirksamen Verankerungslänge ins Innere des Holzes folgt ein erster, relativ glatter Bereich mit braunen Verfärbungen. Die Gewindegänge sind hier nur noch als feine Rillen erkennbar. Die Länge dieses glatten Bereichs betrug bei allen Stangen und allen 3 Prüfkörpern ca. 70 mm. Die Abb. 4.9 b) zeigt eine Stange aus dem oberen Anschluss des Prüfkörpers A1-02. Hier besteht links des glatten Bereichs ein zweiter geschädigter Bereich, in welchem praktisch alle Gewindegänge im Klebstoff abgebrochen sind. Da dieser zerbröselte Bereich nur bei diesem Prüfkörper zu beobachten war, wird diese Schädigung auf den Ausziehversuch zurückgeführt. Solche Bilder sind bekannt aus eigenen Kurzzeitprüfungen der n'H. Die Klebfugen des Prüfkörpers A1-03 wiesen wiederum nur den glatten Bereich auf.



a)



b)



c)

Abb. 4.9: Zustand der Klebfugen bei den Prüfkörpern der Versuchsreihe A1: a) Klebfuge des PK A1-01 nach dem Ermüdungsversuch, b) PK A1-02: Klebfuge im oberen Anschluss nach Ermüdungsversuch und Ausziehversuch, c) PK A1-03: Klebfuge nach dem Ermüdungsversuch.

4.2.2. Versuchsreihe A2

Bei der Versuchsreihe A2 wurden durch die n'H statische Zugversuche an parallel zur Faserrichtung in Eschen-BSH eingeklebten Gewindestangen durchgeführt. Die Holzfeuchte der Prüfkörper entsprach den Bedingungen der Feuchteklasse 2 gemäss Norm SIA 265 [1]. Nach dem Einkleben der Stangen bei etwa 12.5 % Holzfeuchte, wurden die Prüfkörper während etwa 166 Tagen klimatisiert. Gemäss den Kontrollstäben aus Esche mit Querschnitt 70 mm x 65 mm, war die Holzfeuchte in dieser Zeit auf 21.0 % gestiegen. Die Gewichtszunahme der Prüfkörper liess auf eine durchschnittliche Holzfeuchte von 19.7 % vor den Versuchen schliessen. Nach den ersten Versuchen war die Holzfeuchte bei allen 4 Prüfkörpern um jeweils 0.8 % geringer.

4.2.2.1 Ausziehversuche feucht

In Ausziehversuchen an feuchten Prüfkörpern wurden im Hinblick auf die Ermüdungsversuche mechanische Kenngrössen im feuchten Zustand ermittelt. Gemessen wurden die Anschlussverformungen und die Holzdehnungen im Mittelbereich sowie der Zylinderweg und die Kraft gemäss Beschrieb in Abschnitt 3.4.5. Es wurden die in der Abb. 4.10 dargestellten und in der Tabelle 4.7 aufgelisteten Ergebnisse erzielt. Die gemessenen Anschlussverformungen liessen bis zu einer Kraft von etwa 45 kN auf eine erhöhte Steifigkeit schliessen. Der Grund dafür lag bei dem auf die Muttern aufgebrachten Drehmoment (80 Nm). Deshalb wurde für die Auswertung der Anschlusssteifigkeit der untere Referenzpunkt bei 50 kN gewählt. Alle 4 Prüfkörper versagten infolge von Fliessen der Stahlstangen. Die Versuche wurden beendet, als der gemessene Zylinderweg 12 mm überschritten hatte. In beiden Anschlüssen zusammen war eine plastische Verformung von über 5 mm entstanden. Anstatt die Belastung bis zum Bruch der Stahlstangen zu erhöhen, wurde entschieden, 3 der 4 Prüfkörper weiterzuverwenden. Dies wird im nachfolgenden Abschnitt 4.2.2.2 beschrieben. Der Prüfkörper A2-01 wurde jedoch gleich im Anschluss an den Ausziehversuch zerlegt.

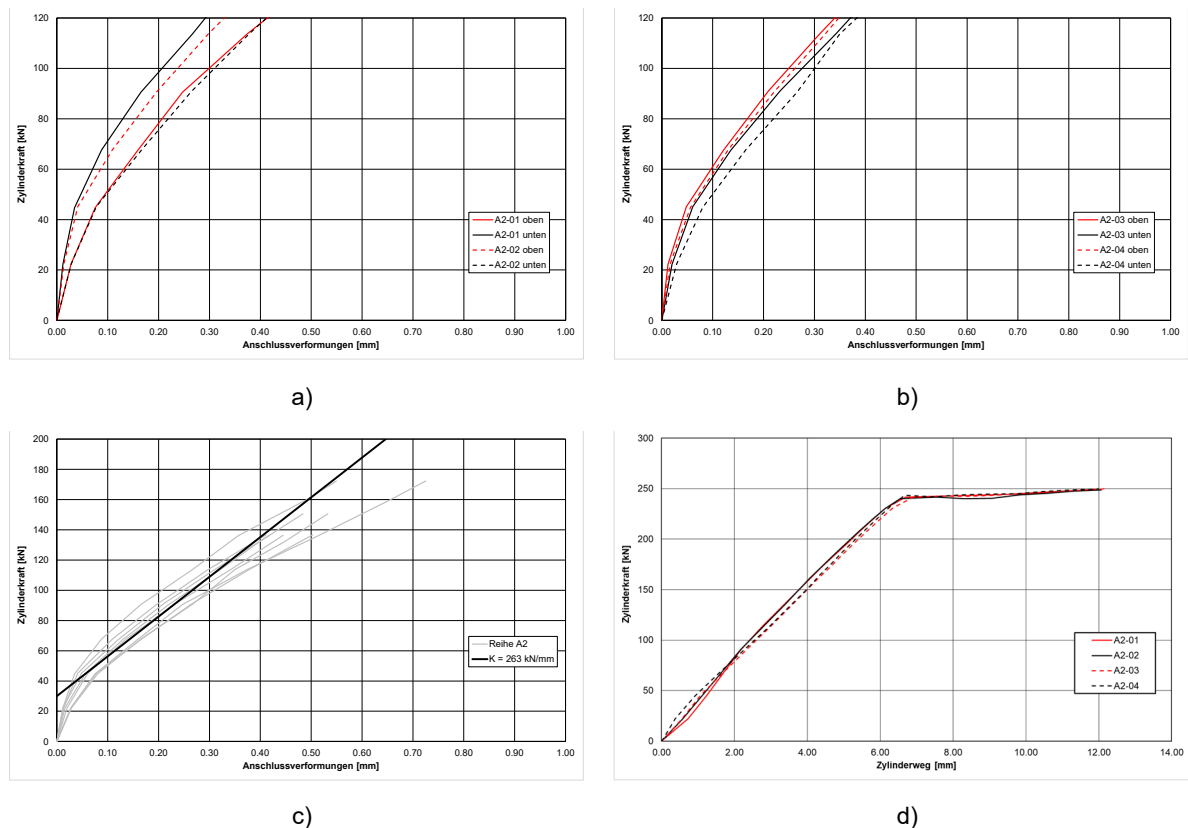


Abb. 4.10: Ergebnisse der statischen Zugversuche an den Prüfkörpern der Reihe A2 im feuchten Zustand: a) und b) Anschlussverformungen der einzelnen Prüfkörper, b) Darstellung des Mittelwerts der Anschlusssteifigkeit, d) Diagramm der Kraft in Funktion des Zylinderwegs.

Tabelle 4.7: Ergebnisse der statischen Zugversuche in der Versuchsreihe A2 an Prüfkörpern mit ca. 20 % Holzfeuchte.

Prüfkörper	Verformung [mm] bei 50 kN		Verformung [mm] bei 100 kN		Steifigkeit [kN/mm]	
	Anschluss unten	Anschluss oben	Anschluss unten	Anschluss oben	Anschluss unten	Anschluss oben
A2-01	0.047	0.095	0.207	0.299	313	245
A2-02	0.097	0.056	0.310	0.237	235	276
A2-03	0.077	0.064	0.276	0.250	252	270
A2-04	0.100	0.073	0.300	0.262	249	265
Mittelwert					263	
Prüfkörper	Holzdehnungen im Mittelbereich					
	Verformung [mm] bei 25 kN		Verformung [mm] bei 100 kN		E-Modul [N/mm ²]	
¹⁾	b = 70 mm	h = 140 mm	b = 70 mm	h = 140 mm	b = 70 mm	h = 140 mm
A2-01	0.071	0.065	0.292	0.275	10'400	11'000
A2-02	0.058	0.060	0.237	0.245	12'800	12'400
A2-03	0.067	0.064	0.277	0.263	10'900	11'500
A2-04	0.054	0.056	0.229	0.232	13'100	13'000
Mittelwert					11'800	12'000

¹⁾ Verformungsmessungen auf der Schmalseite (b) bzw. Breitseite (h) der Prüfkörper.

4.2.2.2 Ausziehversuche trocken

Die 3 verbleibenden Prüfkörper wurden nach den ersten Ausziehversuchen im Labor-Raum der n'H ohne besondere Klimatisierung gelagert. Nach 44 Tagen war die durchschnittliche Holzfeuchte auf 12.0 % gesunken. Weil an den Holzstäben jedoch keinerlei Risse entstanden waren, wurde technisch nachgeholfen. Um die Entstehung eines Schwindrisses zu simulieren, wurde neben sämtlichen Gewindestangen eine etwa 22 mm tiefe Nut gesägt. Wie die Abb. 4.11 zeigt, verlief diese über die gesamte Stangenlänge auf jeweils einer Seite des Prüfkörpers.



a)



b)

Abb. 4.11: Prüfkörper der Reihe A2 mit einer gesägten Nut entlang jeder eingeklebten Gewindestange.

In diesem wieder-getrockneten Zustand wurde eine zweite statische Zugprüfung durchgeführt. Wie beim ersten Ausziehversuch, wurden die Anschlussverformungen und die Holzdehnung im Mittelbereich sowie der Zylinderweg und die Kraft gemessen. Es wurden die in der Abb. 4.12 dargestellten und in der Tabelle 4.8 aufgelisteten Ergebnisse erzielt. Bei der Bruchverformung gilt es zu beachten, dass die Stangen bereits im ersten Ausziehversuch um mehrere Millimeter plastisch verformt (gedehnt) worden waren.

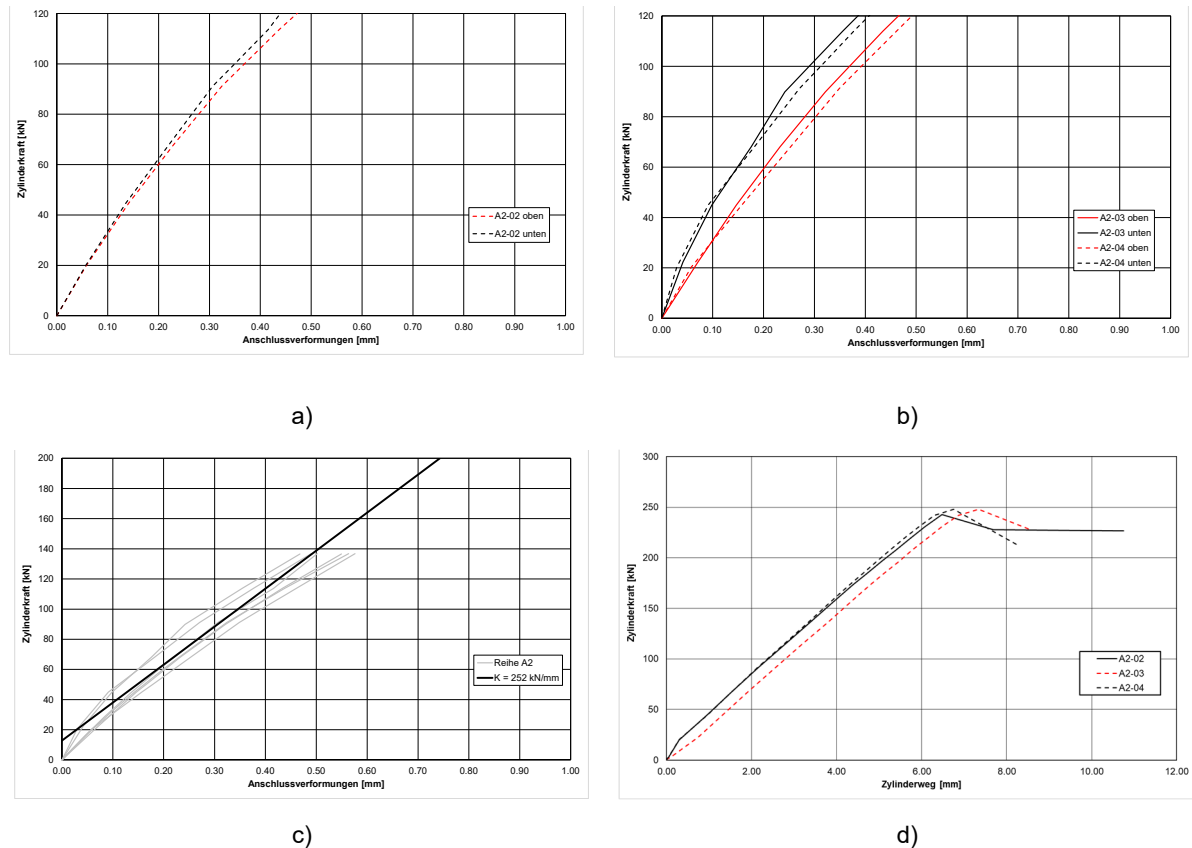


Abb. 4.12: Ergebnisse der statischen Zugversuche an den Prüfkörpern der Reihe A2 im trockenen Zustand: a) und b) Anschlussverformungen der einzelnen Prüfkörper, b) Darstellung des Mittelwerts der Anschlusssteifigkeit, d) Diagramm der Kraft in Funktion des Zylinderwegs.

Tabelle 4.8: Ergebnisse der statischen Zugversuche in der Versuchsreihe A2 an Prüfkörpern mit ca. 12 % Holzfeuchte und gesägtem Schwindriss.

Prüfkörper	Verformung [mm] bei 50 kN		Verformung [mm] bei 100 kN		Steifigkeit [kN/mm]	
	Anschluss unten	Anschluss oben	Anschluss unten	Anschluss oben	Anschluss unten	Anschluss oben
A2-02	0.155	0.161	0.349	0.369	257	241
A2-03	0.115	0.165	0.290	0.369	287	245
A2-04	0.111	0.178	0.312	0.392	249	233
Mittelwert					252	
Prüfkörper	Holzdehnungen im Mittelbereich					
	Verformung [mm] bei 25 kN		Verformung [mm] bei 100 kN		E-Modul [N/mm ²]	
¹⁾	b = 70 mm	h = 140 mm	b = 70 mm	h = 140 mm	b = 70 mm	h = 140 mm
A2-02	0.054	0.056	0.228	0.236	13'200	12'800
A2-03	0.061	0.060	0.253	0.246	12'000	12'300
A2-04	0.052	0.056	0.220	0.232	13'700	13'000
Mittelwert					13'000	12'700

¹⁾ Verformungsmessungen auf der Schmalseite (b) bzw. Breitseite (h) der Prüfkörper.

Die Tabelle 4.6 fasst die in der Versuchsreihe A2 gemessenen Holzeigenschaften und Tragwiderstände zusammen. Die Angaben zur Dichte beziehen sich auf eine Holzfeuchte von 12 %.

Tabelle 4.9: Holzeigenschaften und Auszieh Widerstände der Prüfkörper der Versuchsreihe A2.

Prüfkörper	Dichte bei $\omega = 12\%$ [kg/m ³]		Holzfeuchte [%]	E-Modul [N/mm ²]		Auszieh Widerstand [kN]	
	Mittelbereich	Prüfkörper	nach allen Versuchen	bei $\omega \approx 20\%$	bei $\omega \approx 12\%$	bei $\omega \approx 20\%$ ¹⁾	bei $\omega \approx 12\%$
A2-01 ²⁾	647	657	18.6	10'700	–	248	–
A2-02	648	655	11.9	12'600	13'000	249	243
A2-03	634	648	11.7	11'200	12'150	250	248
A2-04	645	659	11.9	13'050	13'350	250	248
Mittelwert	643	655		11'900	12'800	249	246

¹⁾ Höchstlast nach Stahlfließen

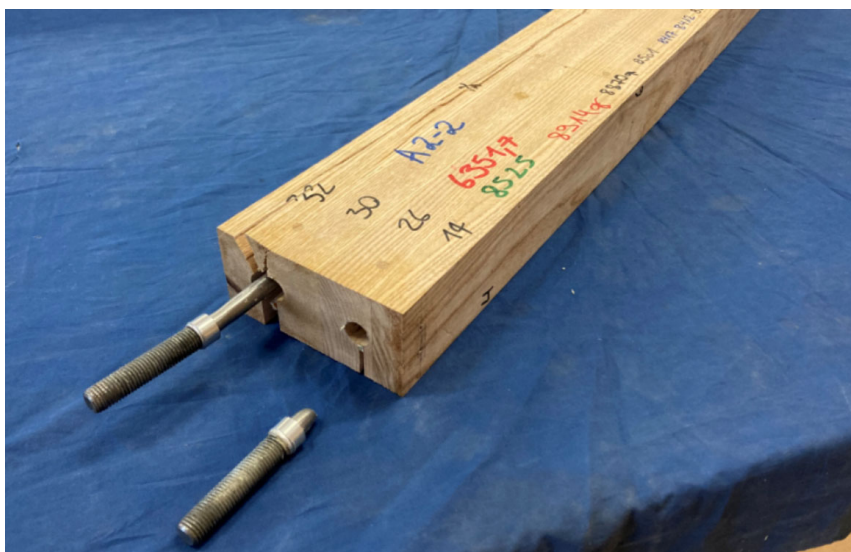
²⁾ Prüfkörper nach dem Ausziehversuch im feuchten Zustand zerlegt.

4.2.2.3 Versagensbilder

Der Prüfkörper A1-01 wurde zerlegt, nachdem Stahlfließen im feuchten Zustand aufgetreten war (siehe Abb. 4.13 a). Im Gegensatz zur Versuchsreihe A1, wies die Klebfuge keinen zerbröselten Bereich auf, obwohl die Kraft dasselbe Niveau erreicht hatte. Die 3 wieder-getrockneten Prüfkörper mit "Schwindriss" erreichten auch im zweiten Ausziehversuch Stahlfließen. Wie die Abb. 4.13 b) zeigt, trat nach dem Zugbruch einer Stange bei der zweiten Stange Aufspalten des Holzes auf. Auch in der Klebfuge dieser zweiten Stange waren die Gewindegänge im Klebstoff kaum geschädigt. Die in der Abb. 4.14 dargestellte Gewindestange weist einen sichtbaren Knick auf, weil sich der Prüfkörper aufgrund der entstehenden Exzentrizität seitlich verschoben hatte.



a)



b)

Abb. 4.13: Versagensbilder in der Versuchsreihe A2: a) Klebfuge des Prüfkörpers A2-01 nach dem Ausziehversuch feucht, b) Stahlbruch und anschliessendes Aufspalten beim Prüfkörper A2-02.

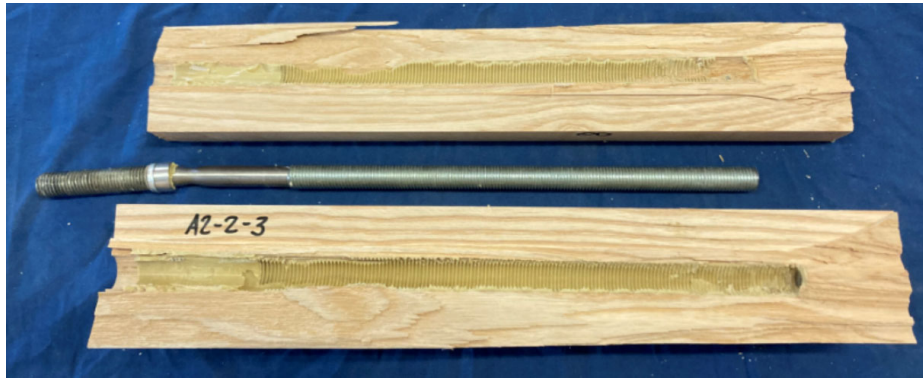


Abb. 4.14: Versagensbilder in der Versuchsreihe A2: Klebfuge und Gewindestange des Prüfkörpers A2-02 nach dem Ausziehversuch trocken.

4.2.3. Versuchsreihe A3

Die Prüfkörper für die Versuchsreihe A3 wurden zusammen mit denjenigen der Reihe A2 produziert und wie in Abschnitt 3.4.4 beschrieben klimatisiert. Die Holzfeuchte der Prüfkörper entsprach den Bedingungen der Feuchtekategorie 2 gemäss Norm SIA 265 [1]. Nach dem Einkleben der Stangen bei ca. 12.5 % Holzfeuchte, wurden die Prüfkörper während etwa 166 Tagen klimatisiert. Gemäss den Eschen-Kontrollstäben mit Querschnitt 70 mm x 65 mm, war die Holzfeuchte in dieser Zeit auf 21.0 % gestiegen. Die Gewichtszunahme der Prüfkörper liess auf eine durchschnittliche Holzfeuchte von 20.2 % vor den nachfolgend beschriebenen Versuchen schliessen.

4.2.3.1 Statische Probelastungsversuche bei der n'H

Im Sinne einer Qualitätskontrolle und zur Ermittlung der Steifigkeiten erfolgte eine statische Probelastung bei der neuen Holzbau AG mit einer Zugkraft von 150 kN. Insgesamt wurden 4 Prüfkörper hergestellt und deren Steifigkeit während der statischen Probelastung im feuchten Zustand gemessen. Die entsprechenden Versuchsparameter sind in Abschnitt 3.4.5 beschrieben. Diese Versuche fanden anschliessend an die Versuchsreihe A2 statt (siehe Abschnitt 4.2.2.1). Nach diesen Versuchen war die Holzfeuchte der 4 Prüfkörper zwischen 0.3 % und 0.5 % geringer. Es wurden die in der Abb. 4.15 und Abb. 4.16 dargestellten und in der Tabelle 4.10 aufgelisteten Ergebnisse erzielt.

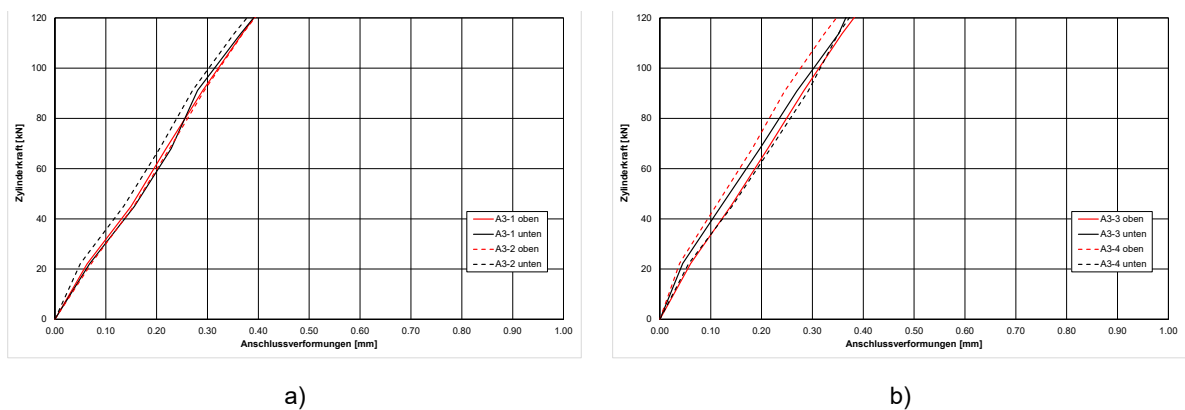


Abb. 4.15: Anschlussverformungen in den statischen Probelastungsversuchen an den Prüfkörpern A3-01, A3-02 (Abb. a), bzw. A3-03 und A3-04 (Abb. b).

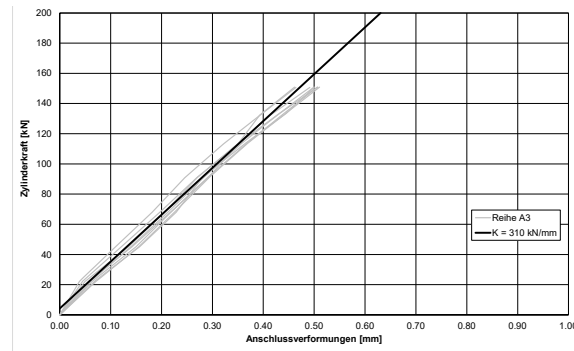


Abb. 4.16: Darstellung des Mittelwerts der Anschlusssteifigkeit in den statischen Probelastungsversuchen an den 4 Prüfkörpern der Reihe A3.

Tabelle 4.10: Ergebnisse der statischen Probelastungsversuche in der Versuchsreihe A3.

Prüfkörper	Verformung [mm] bei 25 kN		Verformung [mm] bei 100 kN		Steifigkeit [kN/mm]	
	Anschluss unten	Anschluss oben	Anschluss unten	Anschluss oben	Anschluss unten	Anschluss oben
A3-01	0.079	0.074	0.314	0.321	320	304
A3-02	0.060	0.082	0.303	0.324	310	310
A3-03	0.054	0.070	0.302	0.313	302	309
A3-04	0.067	0.047	0.315	0.277	302	327
Mittelwert					310	
Prüfkörper	Holzdehnungen im Mittelbereich					
	Verformung [mm] bei 25 kN		Verformung [mm] bei 100 kN		E-Modul [N/mm ²]	
¹⁾	b = 70 mm	h = 140 mm	b = 70 mm	h = 140 mm	b = 70 mm	h = 140 mm
A3-01	0.070	0.067	0.288	0.273	10'600	11'200
A3-02	0.061	0.061	0.250	0.255	12'100	11'800
A3-03	0.069	0.063	0.283	0.261	10'800	11'600
A3-04	0.067	0.065	0.280	0.270	10'800	11'200
Mittelwert					11'100	11'500

¹⁾ Verformungsmessungen auf der Schmalseite (b) bzw. Breitseite (h) der Prüfkörper.

4.2.3.2 Statische Vorbelastungsversuche an der Empa

Vor den Ermüdungsversuchen wurden an der Empa jeweils 5 Zyklen kraftgeregelte statische Zugbelastung (0 kN → 100 kN → 0 kN) mit Verformungsmessungen an den Anschlüssen durchgeführt. Die entsprechenden Versuchsparameter sind in der Tabelle 3.3 zusammengestellt. Es wurden die in der Abb. 4.17 dargestellten und in der Tabelle 4.11 aufgelisteten Ergebnisse erzielt.

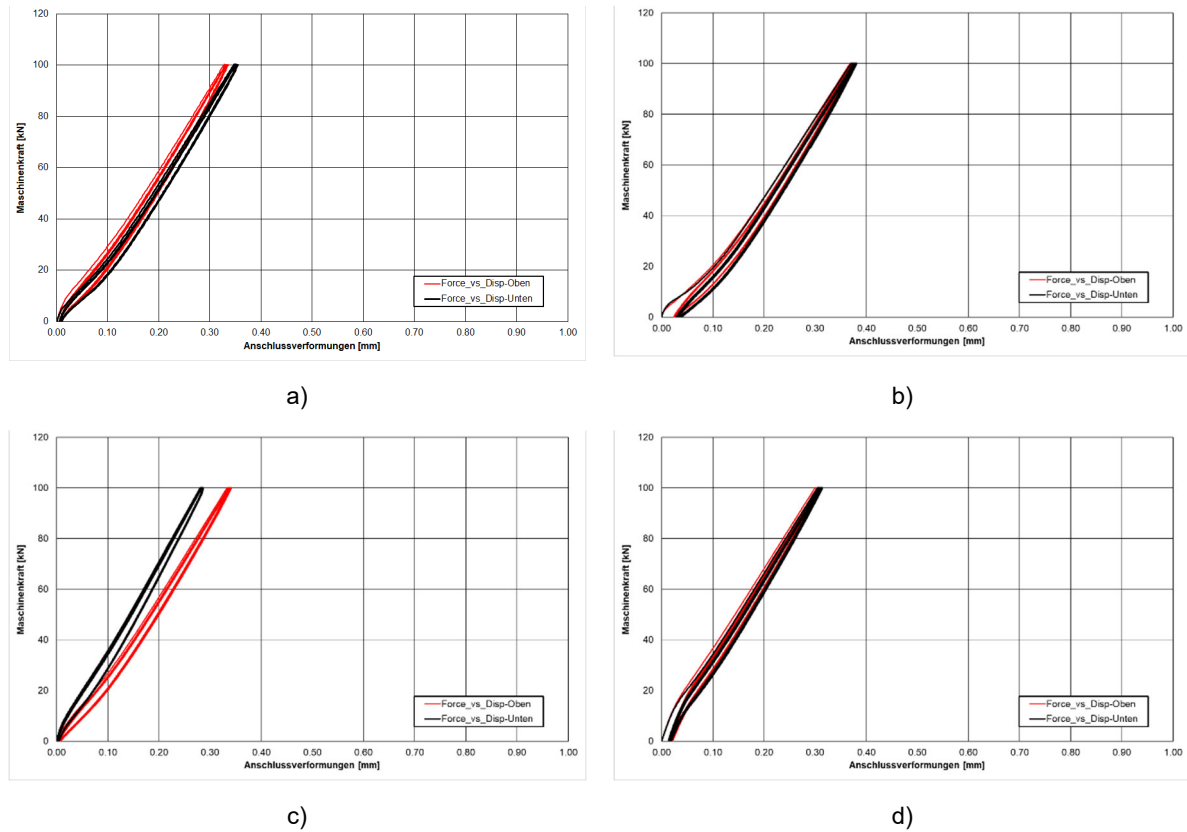


Abb. 4.17: Anschlussverformungen in den statischen Vorbelastungsversuchen an den Prüfkörpern A3-01 (a), A3-02 (b), A3-03 (c) und A3-04 (d).

Tabelle 4.11: Ergebnisse der statischen Vorbelastungsversuche in der Versuchsreihe A3.

Prüfkörper	Verformung [mm] bei 25 kN		Verformung [mm] bei 100 kN		Steifigkeit [kN/mm]	
	Anschluss unten	Anschluss oben	Anschluss unten	Anschluss oben	Anschluss unten	Anschluss oben
A3-01	0.108	0.092	0.349	0.331	310	314
A3-02	0.137	0.129	0.375	0.371	315	309
A3-03	0.069	0.098	0.282	0.336	352	315
A3-04	0.076	0.070	0.308	0.304	324	321
Mittelwert					320	

4.2.3.3 Ermüdungsversuche

Anschliessend wurden Ermüdungsversuche durchgeführt, mit dem Ziel mehr als 2 Mio. Lastwechsel zu erreichen, ohne dass die Prüfkörper versagen. Die wichtigsten Ergebnisse der Ermüdungsversuche an den Prüfkörpern der Reihe A3 sind in der Tabelle 4.12 zusammengestellt. Wenn in der zweiten Spalte eine Lastwechselzahl von weniger als 2 Mio. angegeben ist, bedeutet dies, dass der Prüfkörper während des Ermüdungsversuchs versagt hat.

Tabelle 4.12: Ermüdungsversuche an den Prüfkörpern der Versuchsreihe A3.

Prüfkörper	Lastwechsel	Frequenz	Max. Temperatur [°C]			Max. Traversenweg [mm] bei	
			Raum	unten ¹⁾	oben ¹⁾	Unterlast ²⁾	Oberlast ³⁾
A3-01	2'000'486	5 Hz	21.7	25.1	26.2	0.344	1.533
A3-02	2'000'483	6 Hz	21.8	25.4	24.3	0.414	1.558
A3-03	2'000'486	5 Hz	22.2	25.9	26.6	0.310	1.465
A3-04	56'175	5 Hz	22.3	34.1	36.5	0.534	2.285 ⁴⁾

¹⁾ Temperatur in den Klebfugen der eingeklebten Gewindestangen

²⁾ Prüfkörper A3-01 – A3-03: Unterlast 10 kN /// Prüfkörper A3-04: Unterlast 14 kN

³⁾ Prüfkörper A3-01 – A3-03: Oberlast 100 kN /// Prüfkörper A3-04: Oberlast 140 kN

⁴⁾ Maximaler Traversenweg bis 54'000 Lastwechsel im Versuch

In der Abb. 4.18 ist dargestellt, wie sich die Temperaturen während des Ermüdungsversuchs entwickelt haben. Die Abb. 4.19 zeigt die Ganglinien der Traversenwege für die untere Last (10 kN) und die obere Last (100 kN).

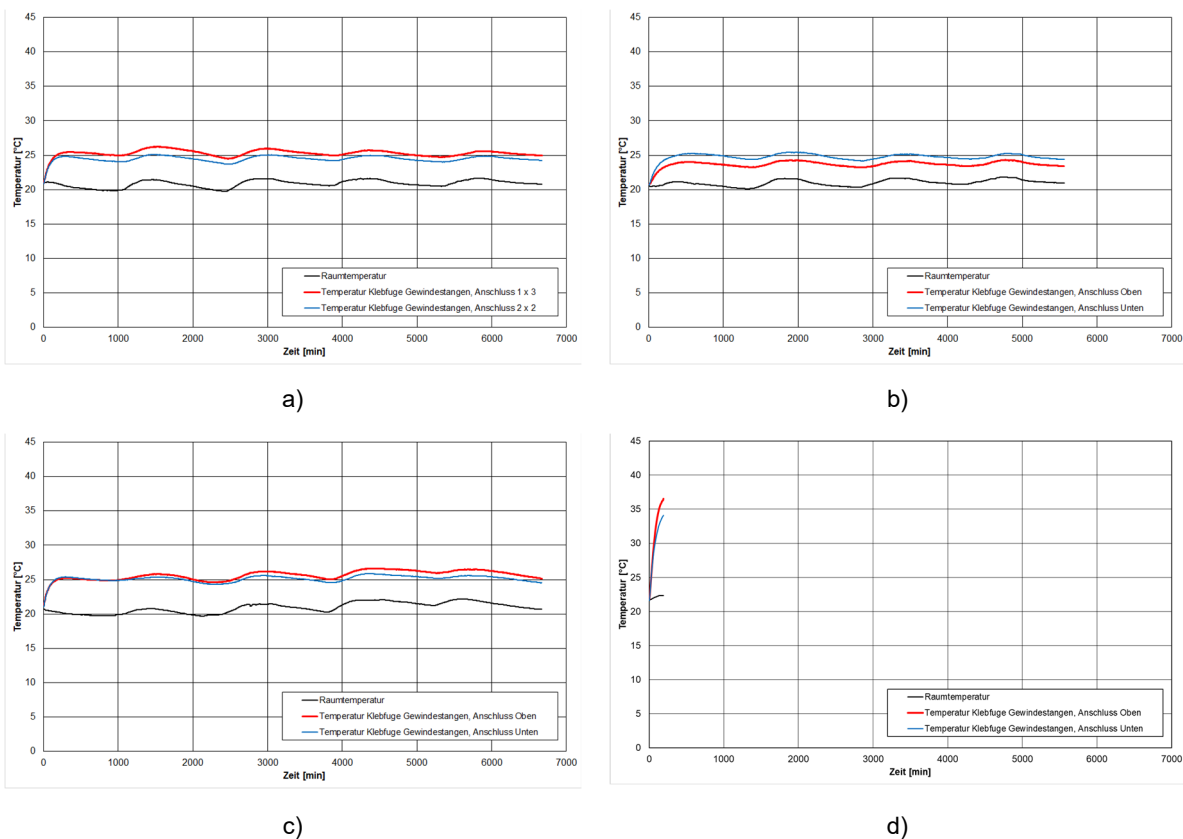


Abb. 4.18: Temperaturen während den Ermüdungsversuchen an den Prüfkörpern A3-01 (a), A3-02 (b), A3-03 (c) und A3-04 (d).

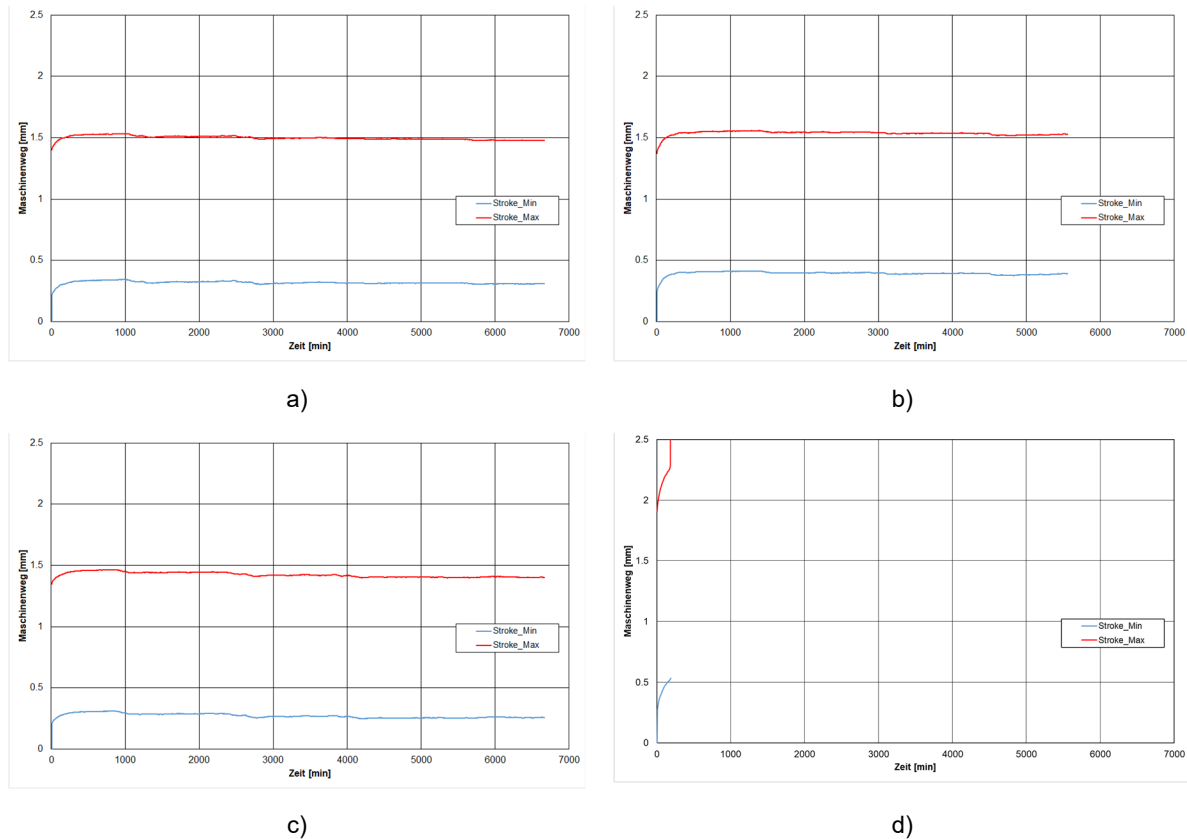


Abb. 4.19: Traversenwege bei der Unterlast (10 kN) und bei der Oberlast (100 kN) in den Ermüdungsversuchen an den Prüfkörpern A3-01 (a), A3-02 (b), A3-03 (c) und A3-04 (d).

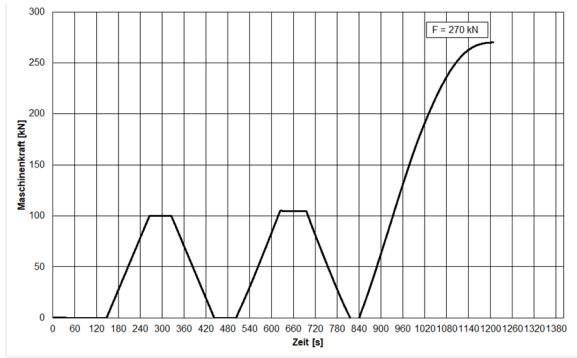
4.2.3.4 Ausziehversuche nach den Ermüdungsversuchen

Den Abschluss der Versuche bildete jeweils ein statischer Zugversuch zur Ermittlung der Restfestigkeit mit Wegmessungen an den Anschlüssen zur Ermittlung der Reststeifigkeit. Vor dem Ausziehversuch wurden nicht bei jedem Prüfkörper dieselben Vorbelastungszyklen gefahren. Die Belastungsprogramme für die einzelnen Versuche sind der Abb. 4.20 dargestellt. Die Abb. 4.21 zeigt Kraft versus die Anschlussverformung. Die Tabelle 4.13 gibt eine Übersicht der wichtigsten Ergebnisse der Versuchsreihe A3. Die in den statischen Versuchen vor und nach den Ermüdungsversuchen ermittelten Steifigkeiten sind vergleichend in der Tabelle 4.14 (Anschlusssteifigkeiten) und in der Tabelle 4.15 (Holzsteifigkeit) zusammengestellt.

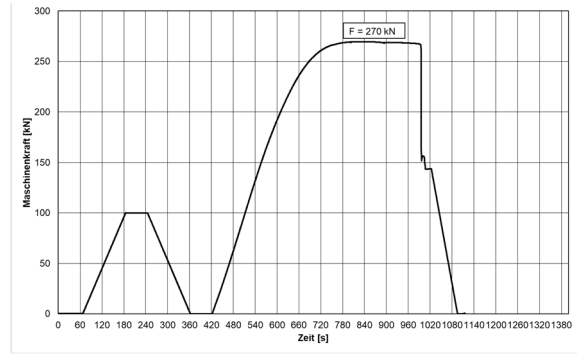
Tabelle 4.13: Ergebnisse der Ausziehversuche an den Prüfkörpern der Versuchsreihe A3.

Prüfkörper	Verformung [mm] bei 25 kN		Verformung [mm] bei 100 kN		Steifigkeit [kN/mm]	
	Anschluss unten	Anschluss oben	Anschluss unten	Anschluss oben	Anschluss unten	Anschluss oben
A3-01	0.105	0.096	0.337	0.316	323	342
A3-02	0.090	0.086	0.296	0.281	364	384
A3-03	0.067	0.082	0.270	0.308	370	333
A3-04 ¹⁾	–	–	–	–	–	–
Mittelwert					353	

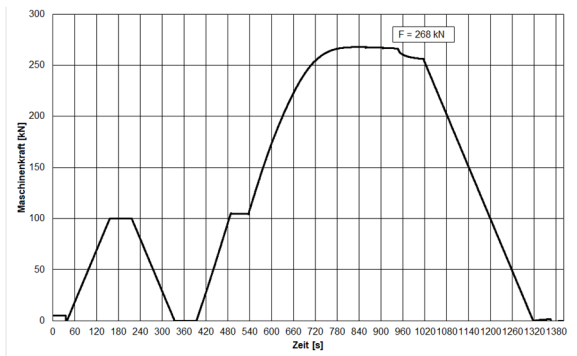
¹⁾ Vorzeitiges Versagen im Ermüdungsversuch



a)



b)

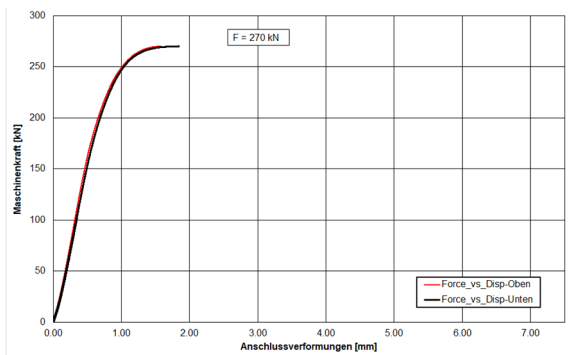


c)

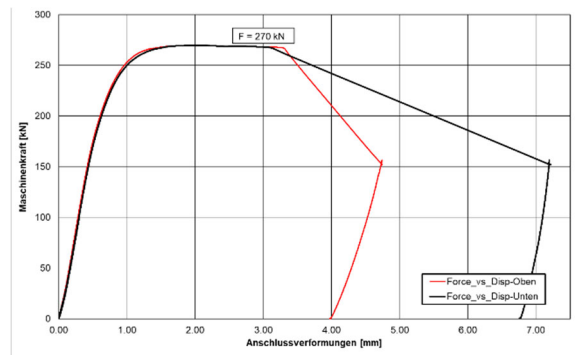
Am Prüfkörper A3-04 konnte kein Ausziehversuch durchgeführt werden, weil der Prüfkörper im Ermüdungsversuch versagt hatte.

d)

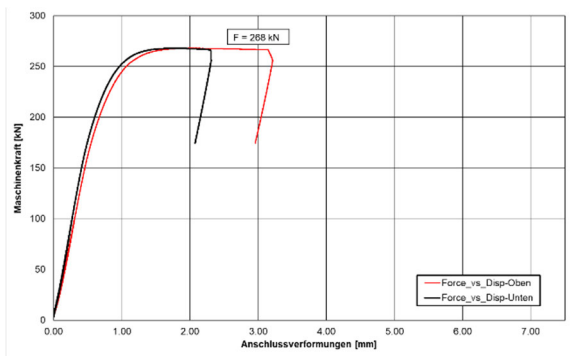
Abb. 4.20: Belastungsprogramme in den nach den Ermüdungsversuchen durchgeführten Ausziehversuchen an den Prüfkörpern A3-01 (a), A3-02 (b), A3-03 (c) und A3-04 (d).



a)



b)



c)

Am Prüfkörper A3-04 konnte kein Ausziehversuch durchgeführt werden, weil der Prüfkörper im Ermüdungsversuch versagt hatte.

d)

Abb. 4.21: Kraft versus Anschlussverformung in den nach den Ermüdungsversuchen durchgeführten Ausziehversuchen an den Prüfkörpern A3-01 (a), A3-02 (b), A3-03 (c) und A3-04 (d).

Tabelle 4.14: Vergleich der Steifigkeit vor und nach dem Ermüdungsversuch an den Prüfkörpern der Versuchsreihe A3.

Prüfkörper	Steifigkeit [kN/mm] vor Ermüdungsversuch im Anschluss		Lastwechsel im Ermüdungsversuch	Steifigkeit [kN/mm] nach Ermüdungsversuch im Anschluss		Ausziehwi- derstand [kN]
	unten	oben		unten	oben	
A3-01	310	314	2'000'486	323	342	270
A3-02	315	309	2'000'483	364	384	270
A3-03	352	315	2'000'486	370	333	268
A3-04 ¹⁾	324	321	56'175	–	–	–
Mittelwert	320		–	353		269

¹⁾ Vorzeitiges Versagen im Ermüdungsversuch

Tabelle 4.15: Zusammenfassung der Holzeigenschaften der Prüfkörper der Versuchsreihe A3.

Prüfkörper	E-Modul [N/mm ²]		Dichte bei $\omega = 12\%$ [kg/m ³]	
	vor dem Ermüdungsversuch bei $\omega \approx 20\%$	nach dem Ermüdungsversuch ²⁾	Mittelbereich	Prüfkörper
A3-01	10'478	10'997	644	665
A3-02	13'503	13'134	645	660
A3-03	11'041	11'442	641	656
A3-04 ¹⁾	10'879	–	628	652
Mittelwert	11'500	11'900	640	658

¹⁾ Vorzeitiges Versagen während dem Ermüdungsversuch

²⁾ Abnahme der individuellen Holzfeuchte während dem Versuch siehe Abschnitt 4.6

4.2.3.5 Versagensbilder

Dominierende Versagensart bei den Ausziehversuchen an den Prüfkörpern der Versuchsreihe A3 war Versagen in der Gewindestange. Bei den Prüfkörpern A3-01, A3-02 und A3-03 begannen die Gewindestangen im Ausziehversuch zu fließen wie in der Abb. 4.22 a) sowie b) illustriert. Der Prüfkörper A3-04 hat während dem Ermüdungsversuch in den Gewindestangen versagt. Es ist ein typischer Ermüdungsbruch feststellbar (Abb. 4.23 b)



a)

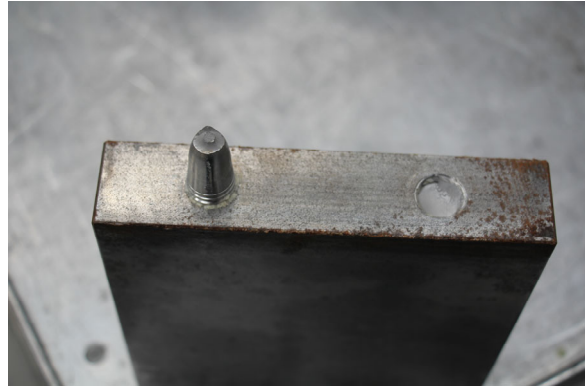


b)

Abb. 4.22: Versagensbilder der Versuchsreihe A3: a) A3-01 nach dem Ausziehversuch, b) A3-02 nach dem Ausziehversuch.



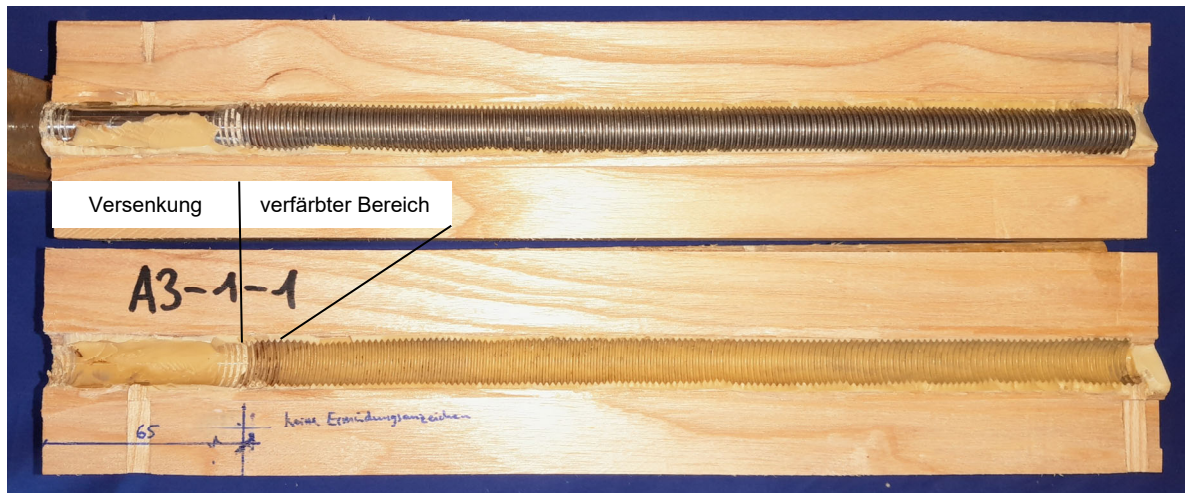
a)



b)

Abb. 4.23: Versagensbilder des Prüfkörpers A3-04 mit dem typischen Ermüdungsbruch der Gewindestange rechts: a) Eschenteil nach dem Ermüdungsversuch, b) Stahlanschlussplatte nach dem Ermüdungsversuch.

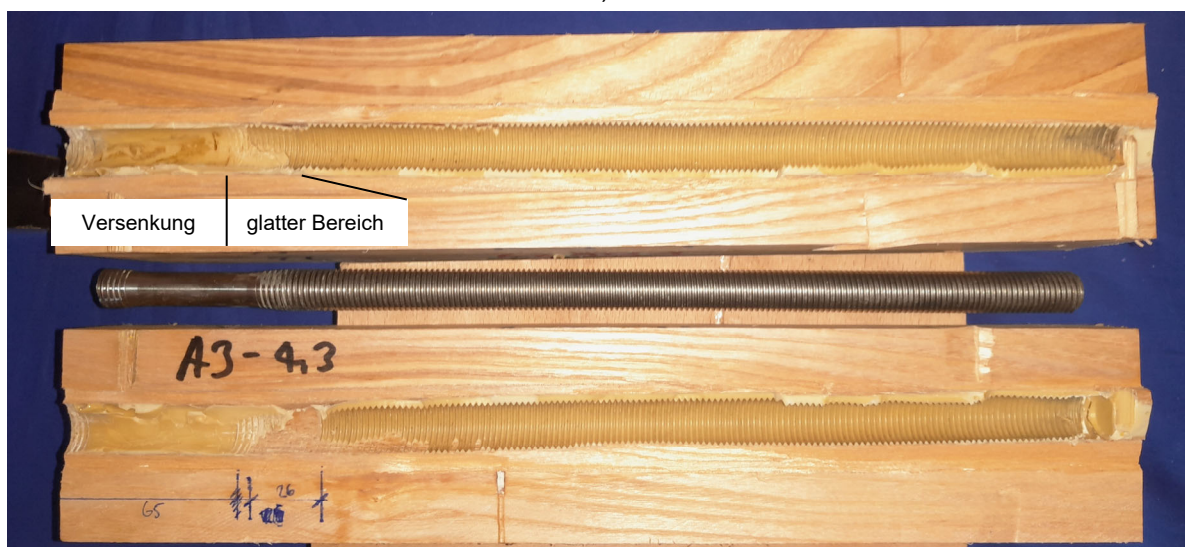
Den Zustand der Klebfugen nach allen Versuchen zeigt die Abb. 4.24. Dabei war im Bereich der Versenkung stets eine glasige, teilweise leicht gewellte Struktur oder Risse im Klebstoff zu erkennen, was bei Epoxidharz auf die Einwirkung hoher Temperaturen hindeutet. Abb. 4.24 a) ist ein Beispiel für die Prüfkörper A3-01 bis 03. Obwohl diese im Ausziehversuch rund 270 kN getragen hatten, gab es Klebefugen, die völlig intakt erschienen. Sichtbar war in diesem Fall oft ein relativ kurzer, braun verfärbter Bereich zu Beginn der Verankerungslänge. Die Abb. 4.24 b) zeigt das zweite typische Bild für diese 3 ersten Prüfkörper. Hier entstand anschliessend an die Versenkung ein zerbröselter Bereich, wie bereits in Abschnitt 4.2.1.7 beschrieben. Dessen Länge war mit 2 bis 3 cm kürzer als dies bei trockenen Prüfkörpern üblicherweise zu beobachten ist. Schliesslich zeigt Abb. 4.24 c) die Klebfuge des Prüfkörpers A3-04, dessen Stange auf Ermüdung versagt hatte. Der glatte Bereich, wie er bereits für die Reihe A1 beschrieben wurde, war hier nur etwa 2 bis 3 cm lang.



a)



b)



c)

Abb. 4.24: Zustand der Klebfugen bei den Prüfkörpern der Versuchsreihe A3: a) lediglich verfärbte Klebfuge des PK A3-01 nach Ermüdungsversuch und Ausziehversuch, b) PK A3-03: geschädigte Klebfuge nach Ermüdungsversuch und Ausziehversuch, c) PK A3-04: Klebfuge nach dem Ermüdungsversagen der Stange.

4.3 Versuchsgruppe B

In der Versuchsgruppe B wurden durch die n'H statische Zugversuche an rechtwinklig zur Faserrichtung in Fichten-BSH eingeklebten Gewindestangen durchgeführt. In der gewählten Konfiguration übergreifen zwei GSA-Gruppen im Holzstab, welcher in der Praxis ein Fachwerkurt sein könnte. Anstelle von je einer Zug- und einer Druckstrebe, die üblicherweise von einer Seite anschliessen würden, ziehen die Kräfte nach unten und oben. Von oben kommend, verlaufen 3 Stangen in einer Reihe parallel zur Faserrichtung (1 x 3) zwischen den zwei Reihen einer 4er-Gruppe (2 x 2), die den unteren Anschluss bildet. Die in Abschnitt 3.3 erläuterte Konfiguration wurde im Rahmen dieser Untersuchungen erstmals eingesetzt, weshalb die Versuche in der Gruppe B ganz zu Beginn durchgeführt wurden.

4.3.1. Ausziehversuche

Anhand von statischen Zugversuchen an trockenen Prüfkörpern (Holzfeuchte rund 9 %) wurden erste mechanische Kenngrößen für die gewählte Konfiguration ermittelt. Gemessen wurden die Anschlussverformungen, der Zylinderweg und die Kraft gemäss Beschrieb in Abschnitt 3.4.5. Es wurden die in der Abb. 4.25 dargestellten und in der Tabelle 4.16 aufgelisteten Ergebnisse erzielt. Das im 2 x 2-Anschluss auf die Muttern aufgebrauchte Drehmoment von 30 Nm scheint die Anschlussverformungen kaum beeinflusst zu haben. Alle 3 Prüfkörper versagten auf Ausziehen der 3er-Gruppe. Angekündigt hat sich dies jeweils mit einem Riss auf der Oberseite des Prüfkörpers.

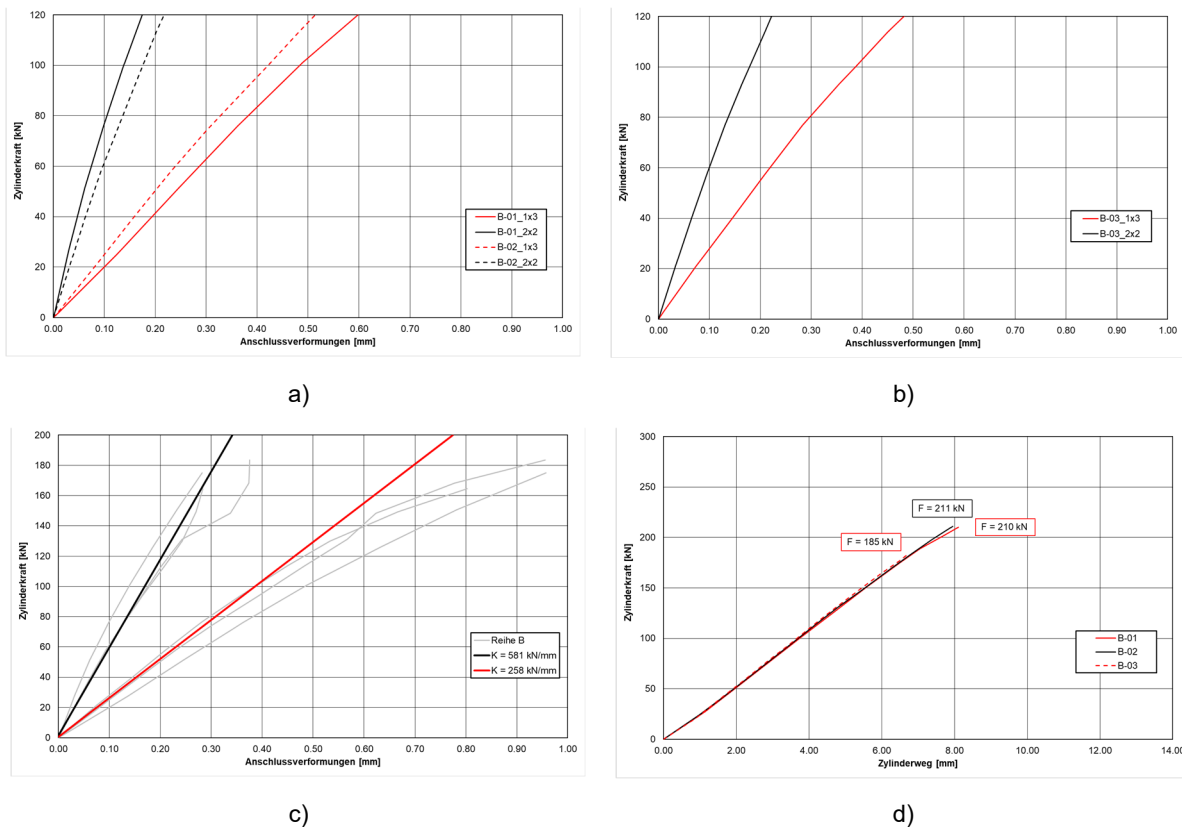


Abb. 4.25: Ergebnisse der statischen Zugversuche an den Prüfkörpern der Gruppe B: a) und b) Anschlussverformungen der einzelnen Prüfkörper, b) Darstellung der Mittelwerte der Anschlusssteifigkeiten, d) Diagramm der Kraft in Funktion des Zylinderwegs.

Tabelle 4.16: Ergebnisse der statischen Zugversuche in der Versuchsgruppe B an Prüfkörpern mit ca. 9 % Holzfeuchte.

Prüfkörper	Verformung [mm] bei 18 kN		Verformung [mm] bei 72 kN		Steifigkeit [kN/mm]	
	Anschluss unten	Anschluss oben	Anschluss unten	Anschluss oben	Anschluss unten	Anschluss oben
B-01	0.020	0.089	0.093	0.343	747 ¹⁾	213 ¹⁾
B-02	0.028	0.072	0.121	0.292	583	246
B-03	0.028	0.063	0.122	0.264	580	269
Mittelwert					581	258

¹⁾ Referenzpunkt mittig am Prüfkörper, deshalb nicht im Mittelwert berücksichtigt (siehe Abschnitt 3.4.5).

Die Tabelle 4.17 fasst die in der Versuchsgruppe B bestimmten Rohdichten, Holzfeuchten und Tragwiderstände zusammen. Dabei beziehen sich die Angaben zur Dichte auf eine Holzfeuchte von 12 %.

Tabelle 4.17: Holzigenschaften und Auszieh Widerstände der Prüfkörper der Versuchsgruppe B.

Prüfkörper	Dichte bei $\omega = 12\%$ [kg/m ³]		Holzfeuchte ω [%]	Auszieh Widerstand [kN]
	Mittelbereich	Prüfkörper	nach dem Versuch	bei $\omega \approx 9\%$
B-01	434	407	8.9	210
B-02	441	447	9.0	211
B-03	435	441	9.0	185
Mittelwert	437	431	9.0	202

4.3.2. Versagensbilder

Bei allen 3 Prüfkörpern versagte das auf Rollschub beanspruchte Holz in den beiden Ebenen zwischen den Stangenreihen. Wie die Abb. 4.26 b) und d) zeigen, wurden entlang dieser Bruchflächen die Holzbereiche zwischen den 3 Stangen jeweils zu grossen Teilen herausgezogen. Von aussen sichtbar, entstand jeweils ein Spalt in der Mitte des Prüfkörpers, welcher von der 3er-Gruppe ausging. Beim Prüfkörper B-03 war zudem auffällig, dass dieser Spalt genau durch die Löcher zweier Holzschrauben verlief. Die Schrauben waren bei der Prüfkörperherstellung temporär eingesetzt worden, um das Stahlteil zu fixieren. Aufgrund dieser Beobachtung wurde in den nachfolgenden Versuchsgruppen C und D darauf geachtet, im Mittelbereich keine Schrauben mehr einzudrehen. In der Abb. 4.26 e) sind weitere Auffälligkeiten markiert. Die Gewindgänge im Klebstoff blieben im oberen Bereich überwiegend intakt. Der zerbröselte Bereich lag in der unteren Hälfte der Verankerungslänge und reichte bis zum unbelasteten Ende der Stange. In der Nähe des Stahlteils waren Lufteinschlüsse mit 1 bis 2 cm Grösse keine Seltenheit.



a)



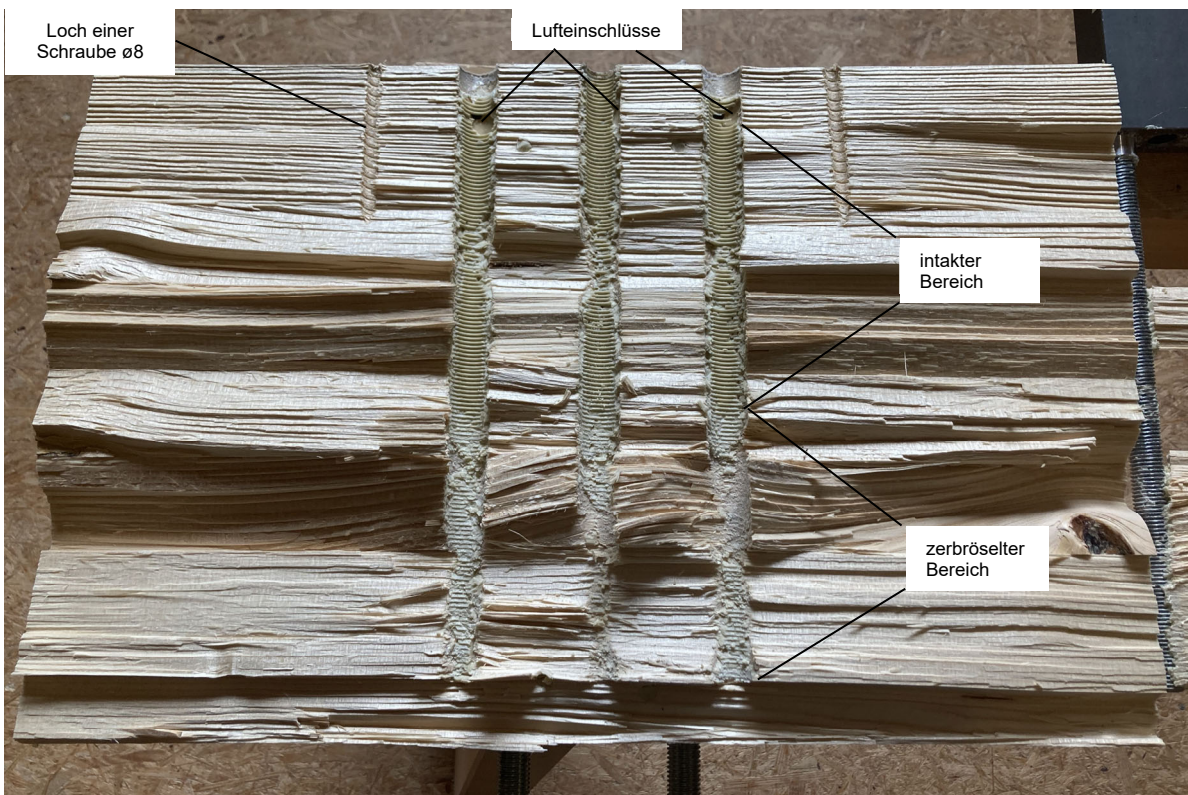
b)



c)



d)



e)

Abb. 4.26: Versagensbilder bei den Prüfkörpern der Versuchsgruppe B: a) Prüfkörper B-01 nach dem Ausziehversuch, b) B-01 zerlegt, c) Prüfkörper B-03 nach dem Ausziehversuch, d) B-03 zerlegt, e) Details am zerlegten Prüfkörper B-03.

4.4 Versuchsgruppe C

4.4.1. Versuchsreihe C1

In der Versuchsreihe C1 wurden durch die n'H statische Zugversuche an rechtwinklig zur Faserrichtung in Fichten-BSH eingeklebten Gewindestangen durchgeführt. Wie in der Versuchsgruppe B entsprach die Holzfeuchte der Prüfkörper den Bedingungen der Feuchteklasse 1 gemäss Norm SIA 265 [1]. Wie in Abschnitt 3.4.1 beschrieben, wurden die Prüfkörper dieser Gruppe ohne besondere Anforderungen an die Holzfeuchte produziert.

4.4.1.1 Ausziehversuche

In Ausziehversuchen wurden im Hinblick auf die Ermüdungsversuche im trockenen Zustand mechanische Kenngrössen ermittelt. Die Holzfeuchte lag bei rund 9 %. Gemessen wurden die Anschlussverformungen, der Zylinderweg und die Kraft gemäss Beschrieb in Abschnitt 3.4.5. Es wurden die in der Abb. 4.27 dargestellten und in der Tabelle 4.18 aufgelisteten Ergebnisse erzielt. Das im 2 x 2-Anschluss auf die Muttern aufgebrachte Drehmoment von 30 Nm scheint die Anschlussverformungen kaum beeinflusst zu haben. Alle 3 Prüfkörper versagten auf Ausziehen der 3er-Gruppe. Angekündigt hat sich dies jeweils mit einem Riss auf der Oberseite des Prüfkörpers.

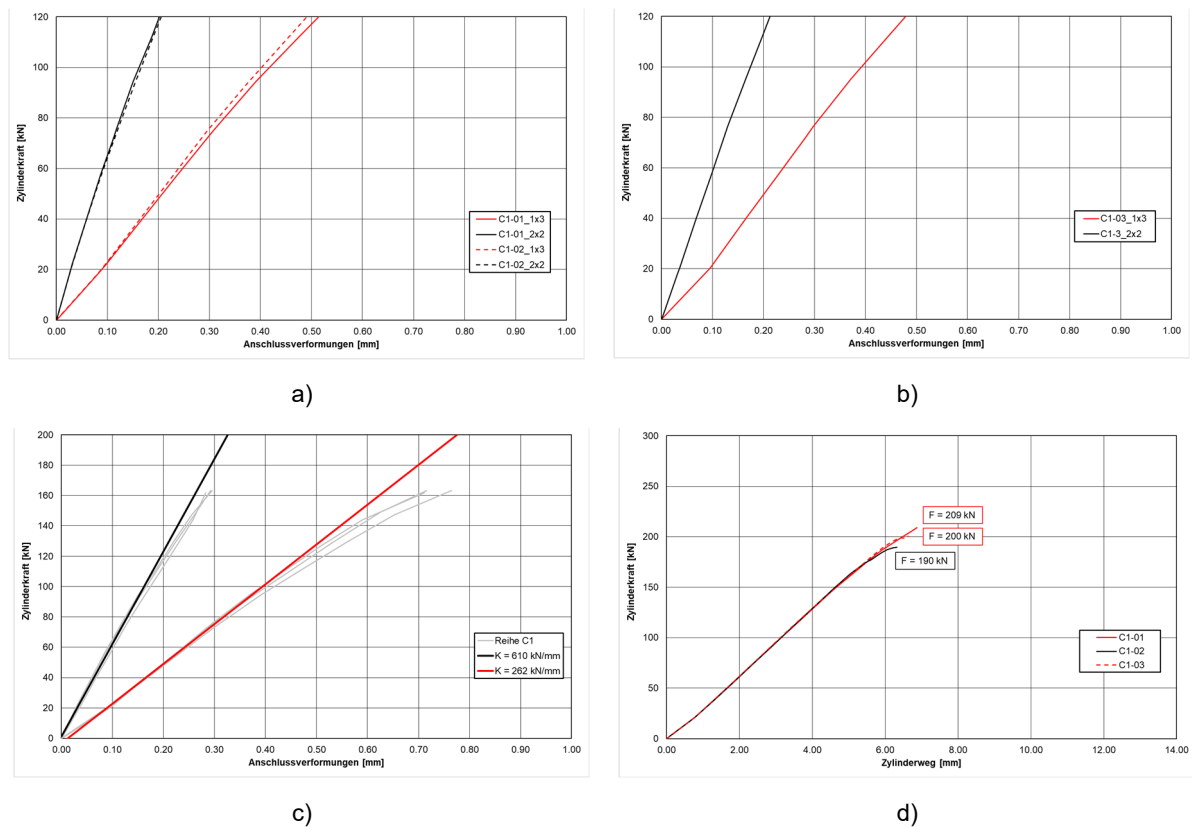


Abb. 4.27: Ergebnisse der statischen Zugversuche an den Prüfkörpern der Reihe C1: a) und b) Anschlussverformungen der einzelnen Prüfkörper, c) Darstellung der Mittelwerte der Anschlusssteifigkeiten, d) Diagramm der Kraft in Funktion des Zylinderwegs.

Die Tabelle 4.19 fasst die in der Versuchsreihe C1 bestimmten Rohdichten, Holzfeuchten und Tragwi-derstände zusammen. Dabei beziehen sich die Angaben zur Dichte auf eine Holzfeuchte von 12 %.

Tabelle 4.18: Ergebnisse der statischen Zugversuche in der Versuchsreihe C1 an Prüfkörpern mit ca. 9 % Holzfeuchte.

Prüfkörper	Verformung [mm] bei 18 kN		Verformung [mm] bei 72 kN		Steifigkeit [kN/mm]	
	Anschluss unten	Anschluss oben	Anschluss unten	Anschluss oben	Anschluss unten	Anschluss oben
C1-01	0.025	0.080	0.111	0.295	626	250
C1-02	0.025	0.079	0.114	0.285	610	263
C1-03	0.031	0.085	0.122	0.282	593	274
Mittelwert					610	262

Tabelle 4.19: Holzeigenschaften und Auszieh Widerstände der Prüfkörper der Versuchsreihe C1.

Prüfkörper	Dichte des Prüfkörpers bei $\omega = 12\%$ [kg/m ³]	Holzfeuchte ω [%] nach dem Versuch	Auszieh Widerstand [kN] bei $\omega \approx 9\%$
C1-01	415	8.7	209
C1-02	443	8.8	190
C1-03	418	8.8	200
Mittelwert	431	8.8	200

4.4.1.2 Versagensbilder

Bei allen 3 Prüfkörpern ergab sich das von den Versuchen in der Versuchsgruppe B bekannte Versagensbild. Wie die Abb. 4.28 a) und c) zeigen, verlief der von aussen sichtbare Spalt im oberen Teil des Prüfkörpers manchmal zur Seite hin. Diese Bilder zeigen, dass in der gewählten Konfiguration auch Querkzugspannungen entstehen. Beim Prüfkörper C1-01 setzten sich beide Rollschub-Bruchflächen bis zur vorderen Stirnfläche fort, sodass gemäss Abb. 4.28 b) auch noch Holzbereiche neben der 3er-Gruppe mit dieser ausgezogen wurden. Beim schwächsten Prüfkörper dieser Reihe (C1-02) versagte die rechte Zwischenschicht in zwei Ebenen. Dazwischen verlief der Spalt teilweise entlang einer Jahrringgrenze. Auch bei diesem Prüfkörper entstand ein kleiner Riss in der Mitte der obersten Lamelle. Beim Versagen wurde er jedoch nicht Teil der Bruchfläche.

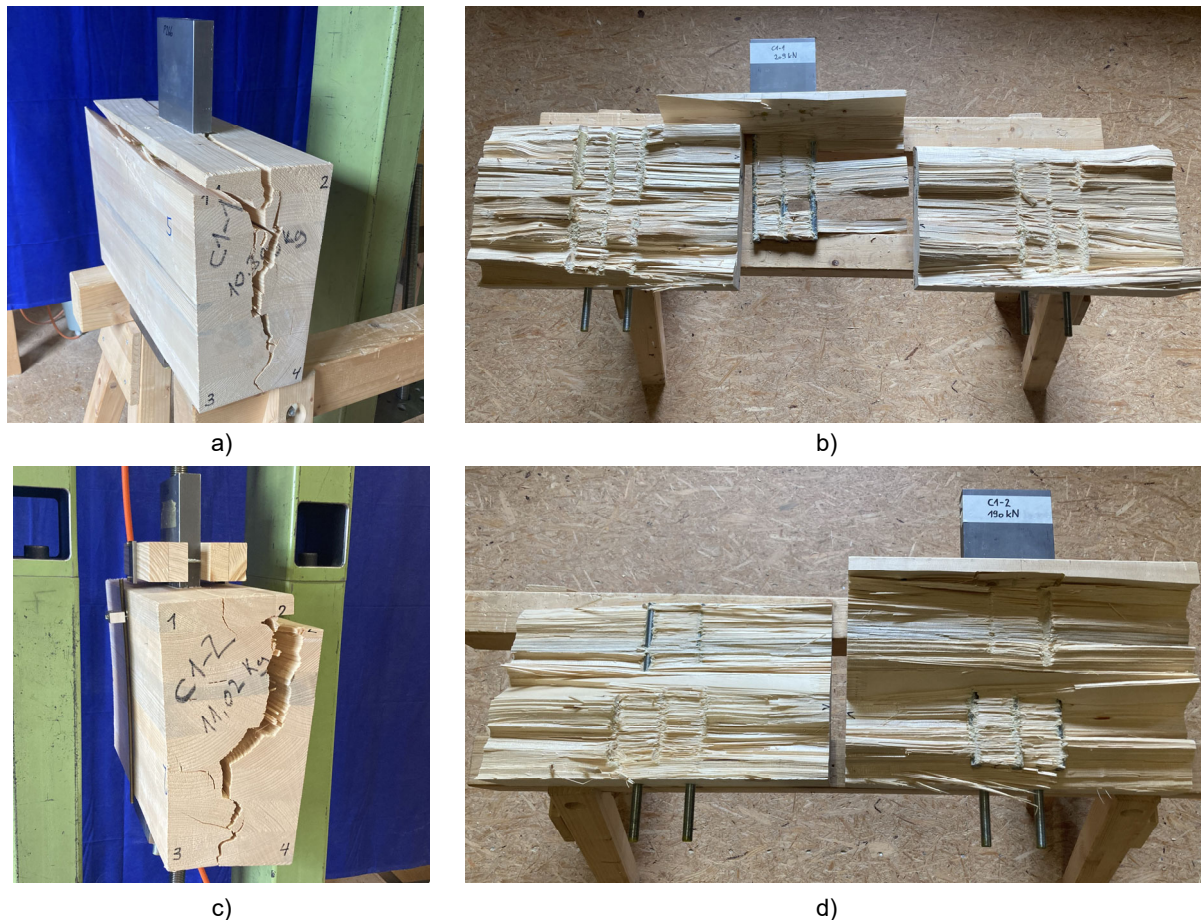


Abb. 4.28: Versagensbilder bei den Prüfkörpern der Versuchsreihe C1: a) Prüfkörper C1-01 nach dem Ausziehversuch, b) C1-01 zerlegt, c) Prüfkörper C1-02 nach dem Ausziehversuch, d) C1-02 zerlegt.

4.4.2. Versuchsreihe C2

In der Versuchsreihe C2 wurden rechtwinklig zur Faserrichtung in Fichten-BSH eingeklebte Gewindestangen Ermüdungsversuchen unterzogen. Die Prüfkörper wurden zusammen mit denjenigen der Versuchsreihe C1 produziert (siehe Abschnitt 3.4.1). Somit entsprach die Holzfeuchte von etwa 9 % auch hier den Bedingungen der Feuchteklasse 1 gemäss Norm SIA 265 [1].

4.4.2.1 Statische Probelastungsversuche bei der n'H

Im Sinne einer Qualitätskontrolle und zur Ermittlung der Steifigkeiten erfolgte eine statische Probelastung bei der neuen Holzbau AG mit einer Zugkraft von 125 kN. Insgesamt wurden 4 Prüfkörper hergestellt und deren Anschlussverformungen während der statischen Probelastung gemessen. Die entsprechenden Versuchsparameter sind in Abschnitt 3.4.5 beschrieben. Es wurden die in der Abb. 4.29 dargestellten und in der Tabelle 4.20 aufgelisteten Ergebnisse erzielt.

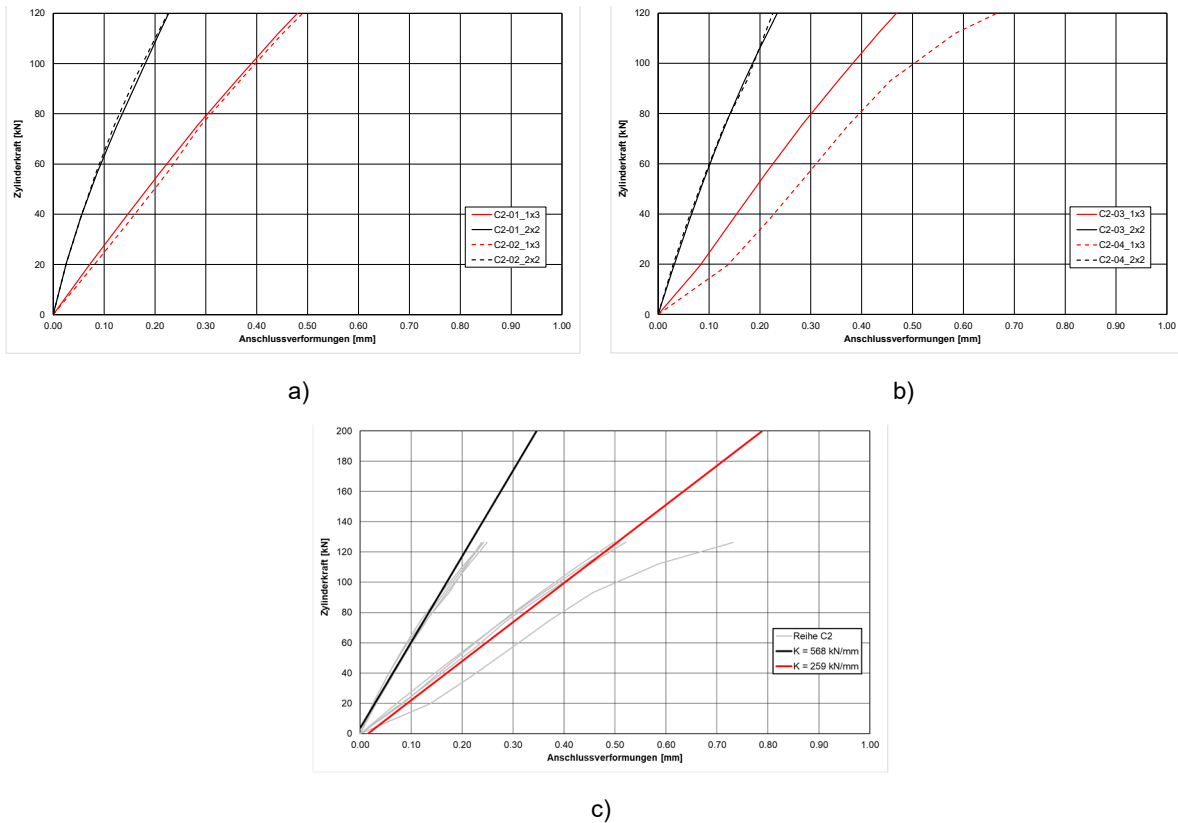


Abb. 4.29: Anschlussverformungen in den statischen Probelastungsversuchen an den 4 Prüfkörpern der Reihe C2.

Tabelle 4.20: Ergebnisse der statischen Probelastungsversuche in der Versuchsreihe C2.

Prüfkörper	Verformung [mm] bei 18 kN		Verformung [mm] bei 72 kN		Steifigkeit [kN/mm]	
	Anschluss unten	Anschluss oben	Anschluss unten	Anschluss oben	Anschluss unten	Anschluss oben
C2-01	0.022	0.064	0.118	0.270	564	262
C2-02	0.023	0.073	0.113	0.278	594	264
C2-03	0.028	0.076	0.125	0.270	558	279
C2-04	0.026	0.125	0.124	0.360	555	230
Mittelwert					568	259

4.4.2.2 Messung der Holzfeuchte an der Empa

Bei der Versuchsreihe C2 wurden keine Kontrollstäbe eingesetzt. Die Holzfeuchte wurde bei den Prüfkörpern der Versuchsreihe C2 mittels elektrischer Widerstandsmessung bestimmt. Die Holzfeuchten wurden vor Beginn und nach Beendigung des Ermüdungsversuchs gemessen. Die Messergebnisse sind in der Tabelle 4.33 zusammengestellt.

4.4.2.3 Statische Vorbelastungsversuche an der Empa

Vor den Ermüdungsversuchen wurden an der Empa jeweils 5 Zyklen kraftgeregelte statische Zugbelastung (0 kN → 90 kN → 0 kN) mit Verformungsmessungen an den Anschlüssen durchgeführt. Die entsprechenden Versuchsparameter sind in der Tabelle 3.3 zusammengestellt. Es wurden die in der Abb. 4.30 dargestellten und in der Tabelle 4.21 aufgelisteten Ergebnisse erzielt.

Der Versuch am Prüfkörper C2-01 wurde als Probe-Versuch durchgeführt. Die Anschlussverformungen wurden nicht gemessen.

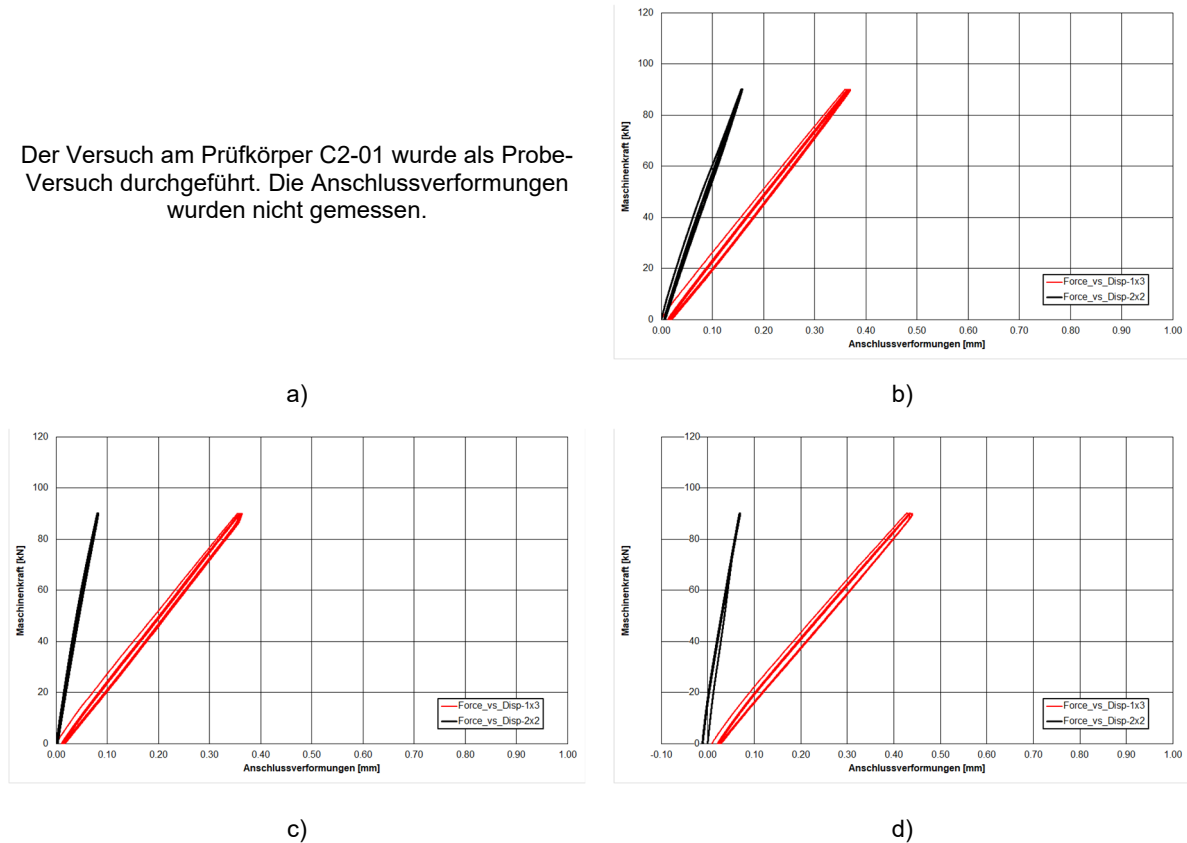


Abb. 4.30: Anschlussverformungen in den statischen Vorbelastungsversuchen an den Prüfkörpern C2-01 (a), C2-02 (b), C2-03 (c) und C2-04 (d).

Tabelle 4.21: Ergebnisse der statischen Vorbelastungsversuche in der Versuchsreihe C2.

Prüfkörper	Verformung [mm] bei 18 kN		Verformung [mm] bei 72 kN		Steifigkeit [kN/mm]	
	Anschluss unten	Anschluss oben	Anschluss unten	Anschluss oben	Anschluss unten	Anschluss oben
C2-01	—	—	—	—	—	—
C2-02 ¹⁾	0.032	0.079	0.126	0.291	578	254
C2-03	0.015	0.075	0.062	0.285	1139	256
C2-04 ¹⁾	0.011	0.081	0.052	0.337	1312	210
Mittelwert					1010	240

¹⁾ Die Steifigkeit wurde aus dem ersten Belastungszyklus (ansteigende Kraft) ermittelt.

4.4.2.4 Ermüdungsversuche

Anschließend wurden Ermüdungsversuche durchgeführt, mit dem Ziel mehr als 2 Mio. Lastwechsel zu erreichen, ohne dass die Prüfkörper versagen. Die wichtigsten Ergebnisse der Ermüdungsversuche an den Prüfkörpern der Reihe C2 sind in der Tabelle 4.22 zusammengestellt. Bei 3 Prüfkörpern wurden 2 Mio. Lastwechsel, bei einem Versuch sogar 3 Mio. Lastwechsel erreicht, ohne dass der Prüfkörper versagte. Im letzteren Fall war dies sogar bei einer Prüffrequenz von 7 Hz möglich, ohne dass die Temperatur in den Klebfugen übermässig anstieg.

Tabelle 4.22: Ermüdungsversuche an den Prüfkörpern der Versuchsreihe C2.

Prüfkörper	Lastwechsel	Frequenz	Max. Temperatur [°C]			Max. Traversenweg [mm] bei	
			Raum	unten ¹⁾	oben ¹⁾	10 kN (Unterlast)	90 kN (Oberlast)
C2-01	2'034'359	5.5 Hz	26.3	29.6	32.9	0.307	0.937
C2-02	1'999'998	5.9 Hz	25.0	28.6	30.6	0.211	0.811
C2-03	1'998'521	6.5 Hz	25.4	28.5	31.3	0.150	0.731
C2-04	2'999'801	7 Hz	23.4	29.2	32.1	0.269	0.934

¹⁾ Temperatur in den Klebfugen der eingeklebten Gewindestangen

In der Abb. 4.31 ist dargestellt, wie sich die Temperaturen während des Ermüdungsversuchs entwickelt haben. Die Abb. 4.32 zeigt die Ganglinien der Traversenwege für die Unterlast (10 kN) und die Oberlast (90 kN).

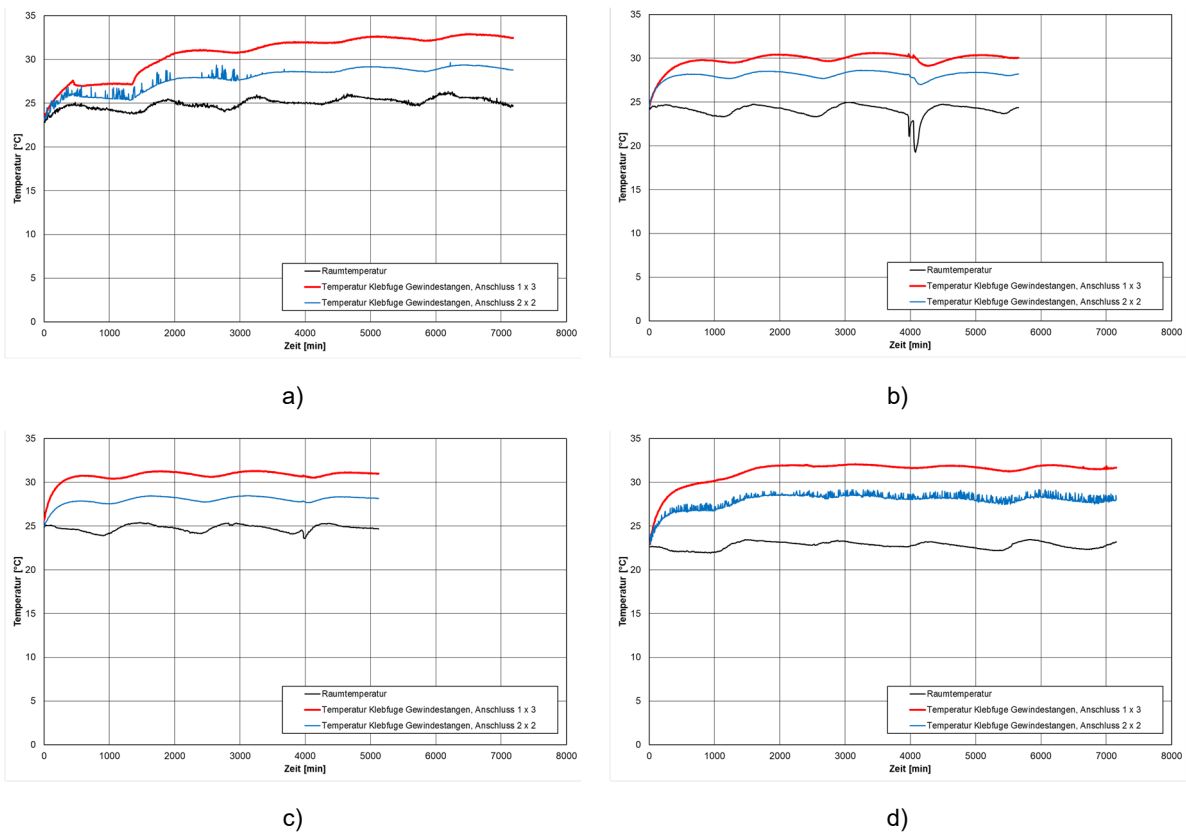


Abb. 4.31: Temperaturen während den Ermüdungsversuchen an den Prüfkörpern C2-01 (a), C2-02 (b), C2-03 (c) und C2-04 (d).

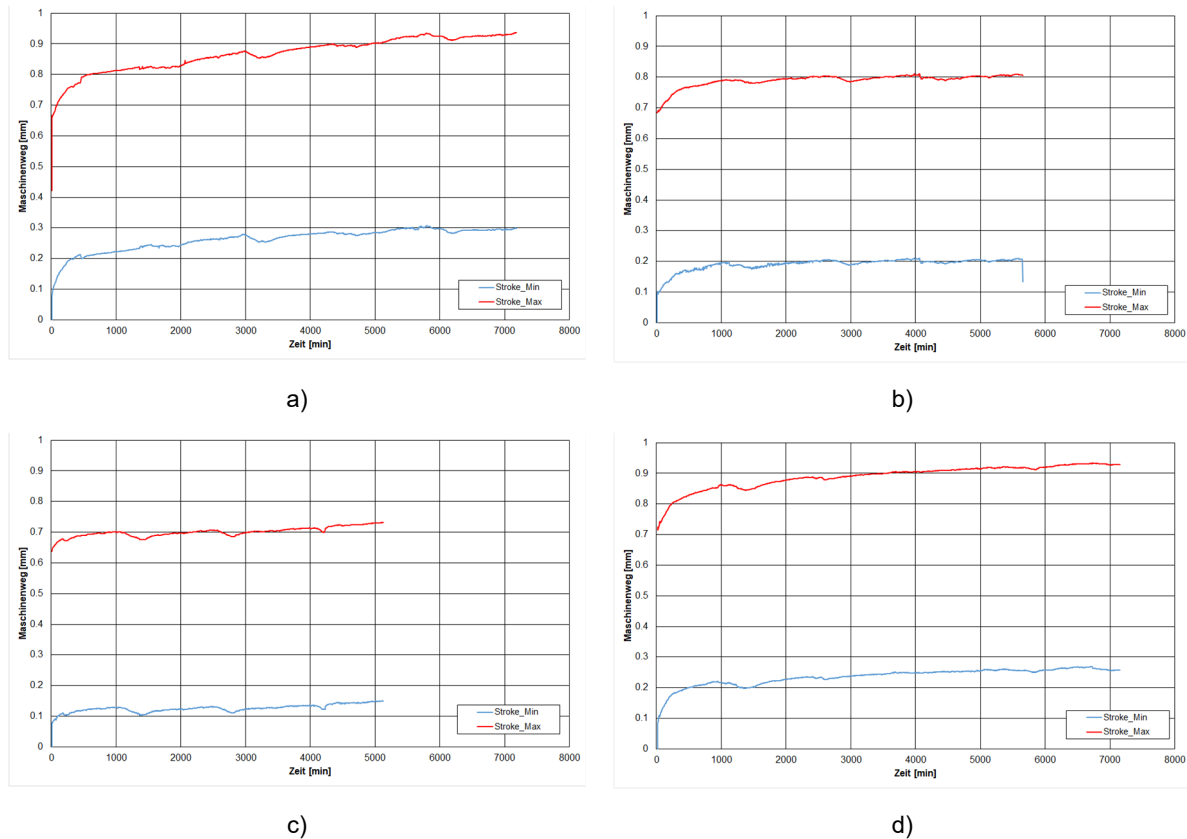
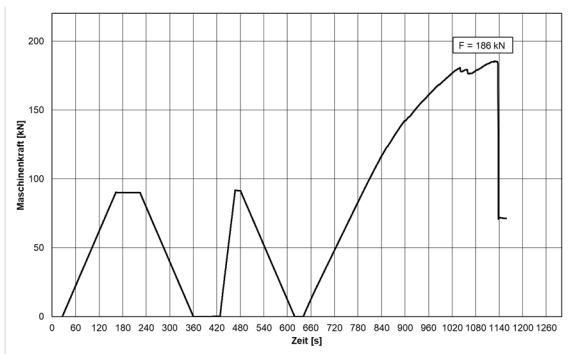


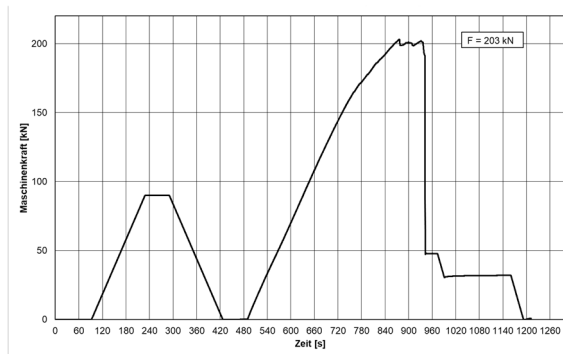
Abb. 4.32: Traversenwege bei der Unterlast (10 kN) und bei der Oberlast (90 kN) in den Ermüdungsversuchen an den Prüfkörpern C2-01 (a), C2-02 (b), C2-03 (c) und C2-04 (d).

4.4.2.5 Ausziehversuche nach den Ermüdungsversuchen

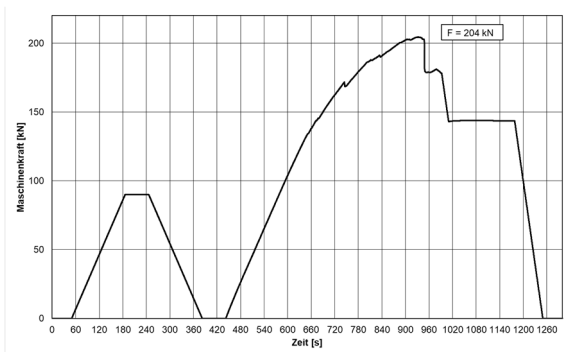
Den Abschluss der Versuche bildete jeweils ein statischer Zugversuch zur Ermittlung der Restfestigkeit mit Wegmessungen an den Anschlüssen zur Ermittlung der Reststeifigkeit. Vor dem Ausziehversuch wurden nicht bei jedem Prüfkörper dieselben Vorbelastungszyklen gefahren. Die Belastungsprogramme für die einzelnen Versuche sind der Abb. 4.33 dargestellt. Die Abb. 4.34 zeigt die Kraft versus die Anschlussverformung. Die darin ersichtlichen nicht-linearen Verformungen waren nicht wesentlich grösser als in den vorangehenden Versuchsreihen. In den Ergebnissen der Versuche der n'H sind diese anhand des gemessenen Zylinderwegs jedoch kaum erkennbar. Die Tabelle 4.23 zeigt einen Vergleich der Steifigkeiten der Anschlüsse vor und nach den Ermüdungsversuchen.



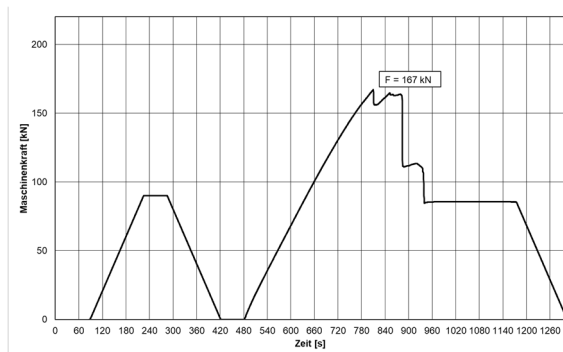
a)



b)



c)



d)

Abb. 4.33: Belastungsprogramme in den nach den Ermüdungsversuchen durchgeführten Ausziehversuchen an den Prüfkörpern C2-01 (a), C2-02 (b), C2-03 (c) und C2-04 (d).

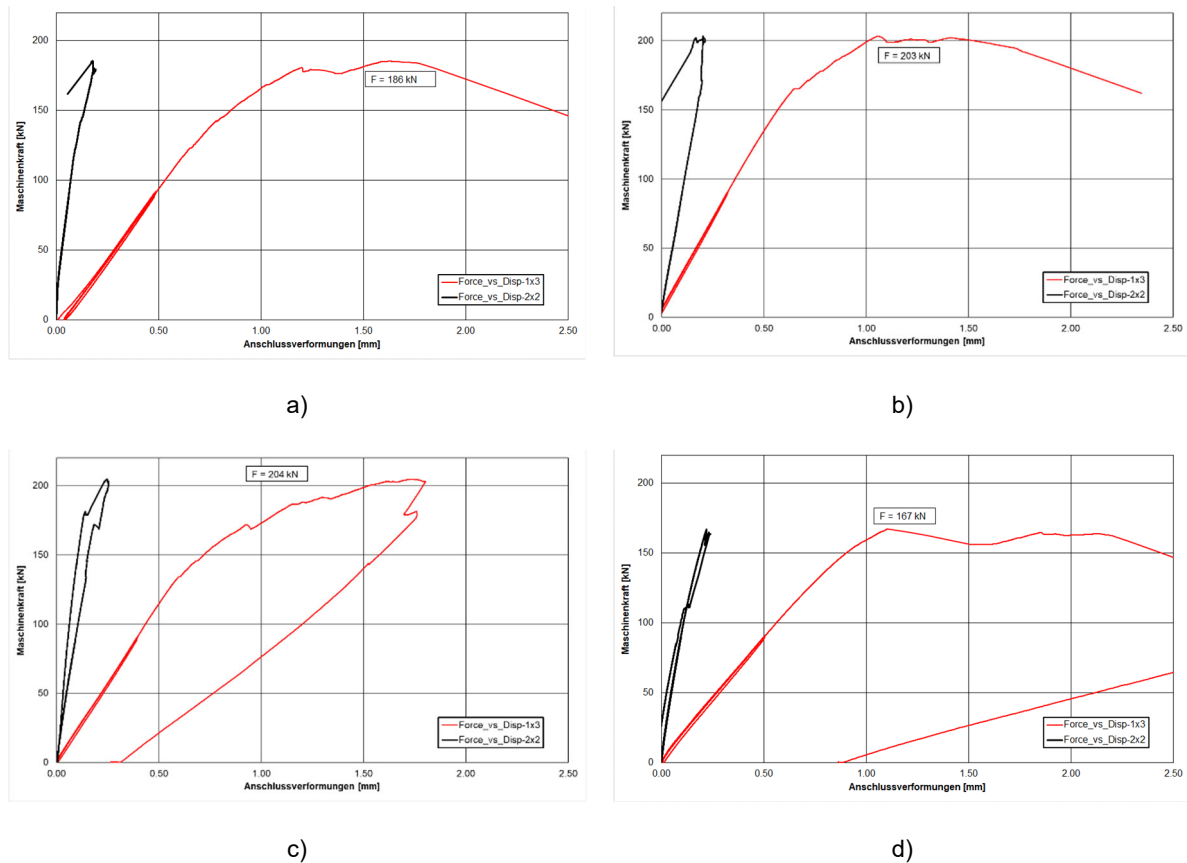


Abb. 4.34: Kraft versus Anschlussverformung in den nach den Ermüdungsversuchen durchgeführten Ausziehversuchen an den Prüfkörpern C2-01 (a), C2-02 (b), C2-03 (c) und C2-04 (d).

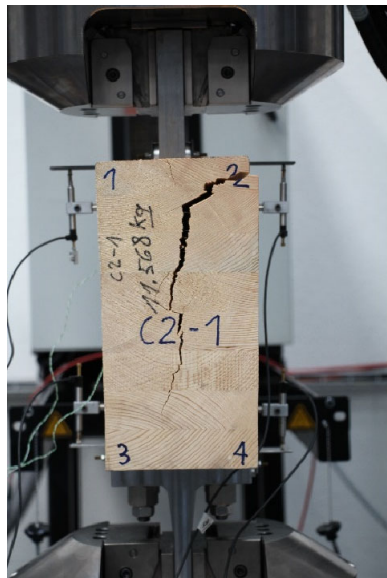
Tabelle 4.23: Vergleich der Steifigkeit vor und nach dem Ermüdungsversuch an den Prüfkörpern der Versuchsreihe C2.

Prüfkörper	Steifigkeit [kN/mm] vor Ermüdungsversuch im Anschluss		Lastwechsel im Ermüdungsversuch	Steifigkeit [kN/mm] nach Ermüdungsversuch im Anschluss		Ausziehwi- derstand [kN]	Dichte bei $\omega = 12\%$ [kg/m ³]
	unten	oben		unten	oben		
C2-01	—	—	2'034'359	1270	201	186	465
C2-02	578	254	1'999'998	824	263	203	419
C2-03	1139	256	1'998'521	969	224	204	465
C2-04	1312	210	2'999'801	911 ¹⁾	173 ¹⁾	167 ¹⁾	432
Mittelwert	1010	240	—	1021	229	198	445

¹⁾ Wert bei der Berechnung des Mittelwerts nicht berücksichtigt, weil der Prüfkörper nach 3 Mio. Lastwechseln geprüft wurde

4.4.2.6 Versagensbilder

Sämtliche Prüfkörper der Versuchsreihe C2 versagten im Holz. Die Prüfkörper C2-01 und C2-03 haben unter einem Winkel von 30 – 45° zu den Gewindestangen versagt wie in der Abb. 4.35 a) sowie c) illustriert. Die Prüfkörper C2-02 und C2-04 haben entlang der Gewindestangen von der oberen Anschlussplatte her versagt wie in der Abb. 4.35 b) sowie d) dargestellt.



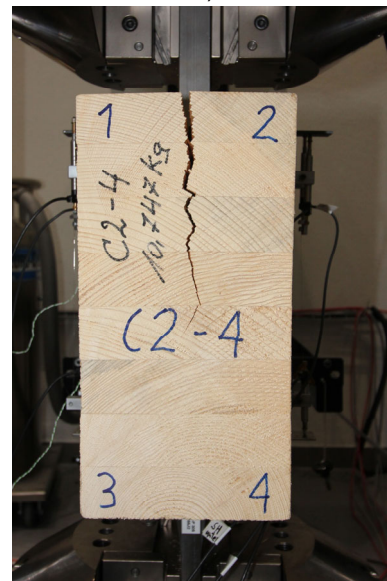
a)



b)



c)



d)

Abb. 4.35: Versagensbilder der Versuchsreihe C2: a) C2-01 nach dem Ausziehversuch, b) C2-02 nach dem Ausziehversuch, c) C2-03 nach dem Ausziehversuch, d) C2-04 nach dem Ausziehversuch

Nach allen Versuchen zerlegte Prüfkörper zeigt die Abb. 4.36. In a) und b) sind einmal weniger und einmal mehr Holzbereiche ersichtlich, die mit der 3er-Gruppe verbunden blieben. Die nicht dargestellten Prüfkörper C2-01 und C2-02 entsprachen dem Prüfkörper C2-04. Die Abb. 4.36 c) zeigt typische intakte Klebfugen im Anfangsbereich der Verankerungslänge, wie sie bereits in den statisch geprüften Reihen beobachtet wurden (siehe auch Abb. 4.26 e). Nach den Ermüdungsversuchen war auf den Gewindestangen teilweise ein schwarzer Belag zu beobachten. Braune Verfärbungen des Klebstoffs waren hingegen selten und dabei stets kleinräumig. Die Abb. 4.36 d) ist die Detailaufnahme eines ca. 3 cm langen Lufteinschlusses. Das Bild entstand als man das Innenteil noch nicht aus dem Seitenteil herausgebrochen hatte.

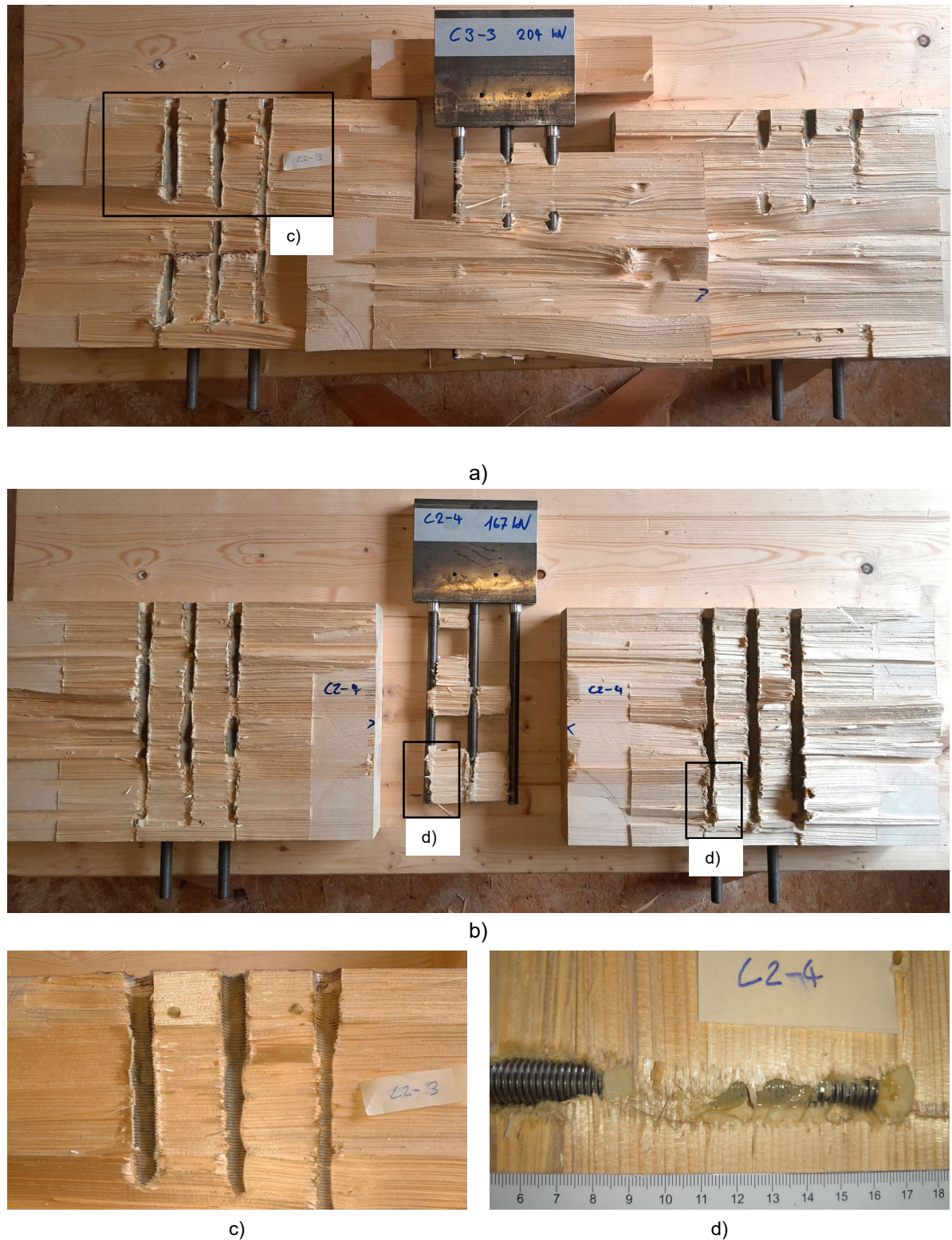


Abb. 4.36: Mittels Sägenut und aufspalten zerlegte Prüfkörper der Versuchsreihe C2: a) C2-03 mit besonders grossem Innenteil, b) C2-04 mit typischen Holzbereichen zwischen den Stangen der 3er-Gruppe, c) intakte Klebfugen mit schwarzem Belag, d) Luft einschluss am Ende der Verankerungslänge.

4.5 Versuchsgruppe D

4.5.1. Versuchsreihe D1

Bei der Versuchsreihe D1 wurden durch die n'H statische Zugversuche an rechtwinklig zur Faserrichtung in Fichten-BSH eingeklebten Gewindestangen durchgeführt. Die Holzfeuchte der Prüfkörper entsprach Bedingungen, welche gemäss Norm SIA 265 [1] der oberen Grenze der Feuchteklasse 2 entsprechen. Nach dem Einkleben der Stangen bei rund 14 % Holzfeuchte, wurden die Prüfkörper während etwa 201 Tagen klimatisiert. Gemäss den Kontrollstäben aus Fichte mit Querschnitt 160 mm x 160 mm, war die Holzfeuchte in dieser Zeit auf 20 % gestiegen. Die Gewichtszunahme der Prüfkörper liess auf eine durchschnittliche Holzfeuchte von 21.4 % vor den Versuchen schliessen. Nach den Versuchen war die Holzfeuchte der 4 Prüfkörper zwischen 0.2 % und 0.5 % geringer.

4.5.1.1 Ausziehversuche

In Ausziehversuchen an feuchten Prüfkörpern wurden im Hinblick auf die Ermüdungsversuche mechanische Kenngrössen im feuchten Zustand ermittelt. Gemessen wurden die Anschlussverformungen sowie der Zylinderweg und die Kraft gemäss Beschrieb in Abschnitt 3.4.5. Es wurden die in der Abb. 4.37 dargestellten und in der Tabelle 4.24 aufgelisteten Ergebnisse erzielt.

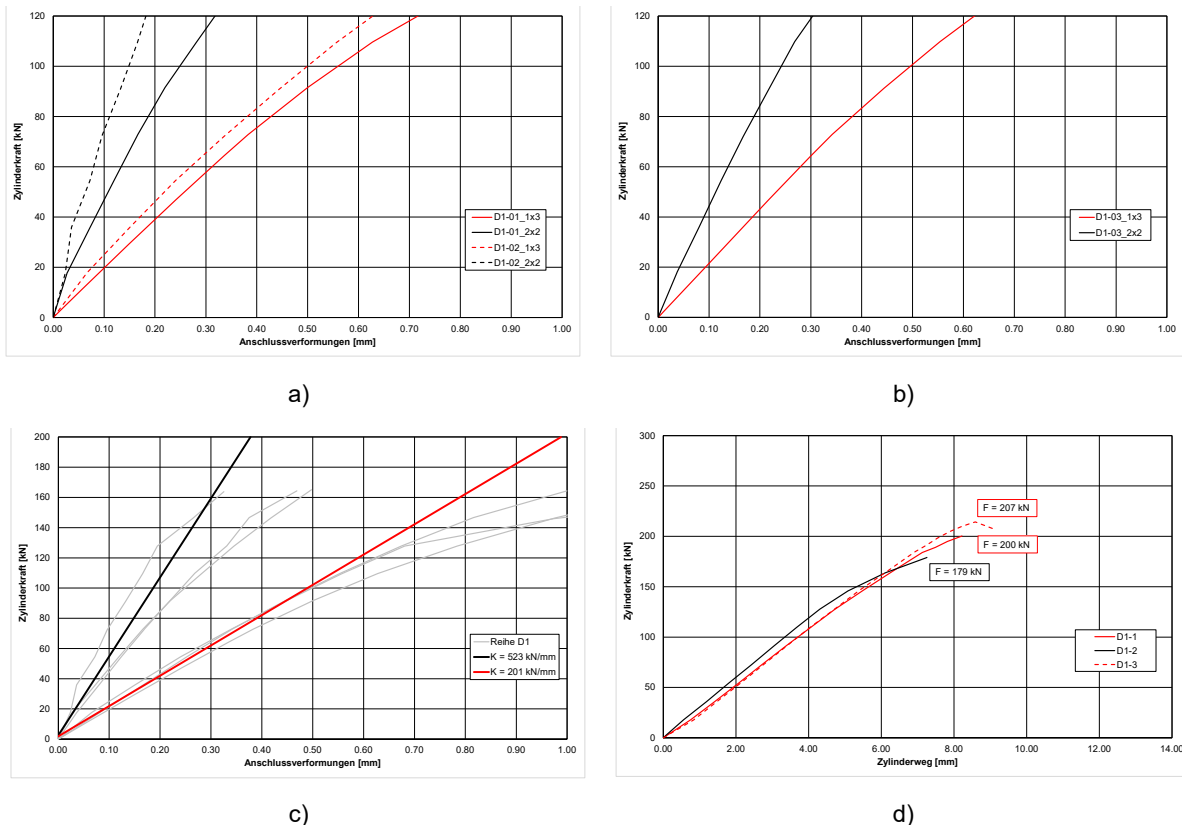


Abb. 4.37: Ergebnisse der statischen Zugversuche an den Prüfkörpern der Reihe D1: a) und b) Anschlussverformungen der einzelnen Prüfkörper, b) Darstellung der Mittelwerte der Anschlusssteifigkeiten, d) Diagramm der Kraft in Funktion des Zylinderwegs.

Tabelle 4.24: Ergebnisse der statischen Zugversuche in der Versuchsreihe D1 an Prüfkörpern mit ca. 20 % Holzfeuchte.

Prüfkörper	Verformung [mm] bei 18 kN		Verformung [mm] bei 72 kN		Steifigkeit [kN/mm]	
	Anschluss unten	Anschluss oben	Anschluss unten	Anschluss oben	Anschluss unten	Anschluss oben
D1-01	0.028	0.091	0.164	0.378	397	188
D1-02	0.024	0.067	0.095	0.335	757	201
D1-03	0.037	0.083	0.167	0.338	416	212
Mittelwert					523	200

Die Tabelle 4.25 fasst die in der Versuchsreihe D1 bestimmten Rohdichten, Holzfeuchten und Tragwiderstände zusammen. Dabei beziehen sich die Angaben zur Dichte auf eine Holzfeuchte von 12 %. Die Holzfeuchte (HF) wurde anhand von Darrproben aus der Prüfkörper-Mitte bestimmt (siehe Abb. 4.39 d). Dabei fällt auf, dass alle diese Messungen deutlich unter der geschätzten Holzfeuchte anhand des Prüfkörper-Gesamtgewichts liegen. Der Unterschied des Mittelwerts beträgt hier 1.8 % HF. Offenbar führten die grossen Stirnholzflächen der Prüfkörper, trotz Versiegelungsanstrich, zu einem ausgeprägten Feuchtegefälle über die Länge des Prüfkörpers. Ausserdem waren die Prüfkörper während dem Zerlegen und Fotografieren dem beheizten Raumklima ausgesetzt. Von der Wägung des Prüfkörpers bis zur Wägung der Darrproben vergingen jeweils etwa 40 Minuten.

Tabelle 4.25: Holzeigenschaften und Auszieh Widerstände der Prüfkörper der Versuchsreihe D1.

Prüfkörper	Dichte bei $\omega = 12\%$ [kg/m ³]	Holzfeuchte [%] nach dem Versuch		Auszieh Widerstand [kN]
	Prüfkörper	Ganzer Prüfkörper	Darrprobe	bei $\omega \approx 20\%$
D1-01	421	20.7	19.3	200
D1-02	421	21.2	19.3	179
D1-03	427	21.4	19.4	207
Mittelwert	423	21.1	19.3	196

4.5.1.2 Versagensbilder

Der Versagensmodus bei dieser Reihe von feuchten Prüfkörpern unterschied sich nicht von den Versuchsreihen mit trockenem Holz. Wie die Abb. 4.38 b) und Abb. 4.39 b) zeigen, wurde auch hier die obere Stangengruppe entlang von zwei Bruchflächen ausgezogen. Die Detailaufnahme Abb. 4.39 c) verdeutlicht, dass sich die auf Rollschub abgesicherten Bereiche in Faserrichtung auch über den Umfang der Stangengruppe hinaus erstrecken. In der Abb. 4.39 d) ist die Lage der Bruchflächen im Querschnitt ersichtlich. Zudem erkennt man einen zweiten Riss, welcher sich entlang der Stange des unteren Anschlusses bildete.

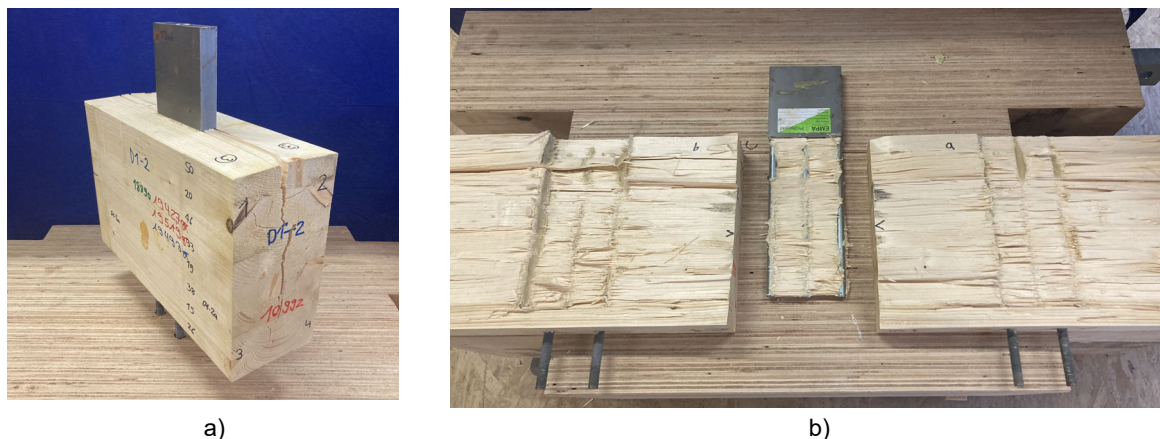
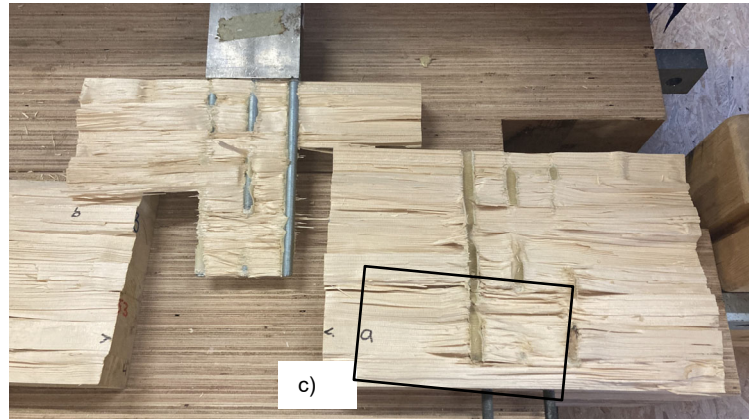


Abb. 4.38: Versagensbilder bei den Prüfkörpern der Versuchsreihe D1: a) Prüfkörper D1-02 nach dem Ausziehversuch, b) D1-02 zerlegt.



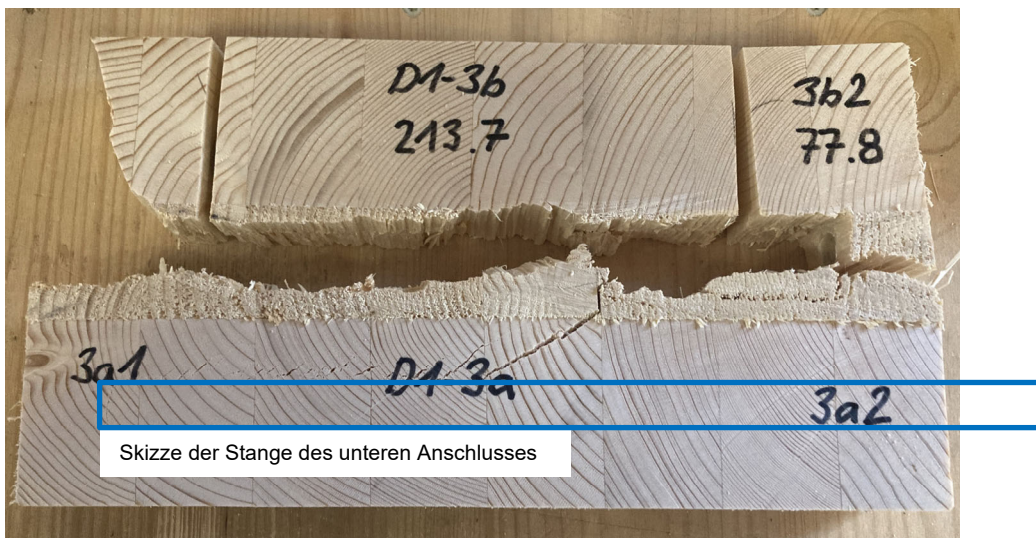
a)



b)



c)



d)

Abb. 4.39: Versagensbilder bei den Prüfkörpern der Versuchsreihe D1: a) Prüfkörper D1-03 nach dem Ausziehversuch, b) D1-03 zerlegt, c) typisches Rollschubversagen, d) Querschnittsscheibe aus der Mitte der beiden Seitenteile.

4.5.2. Versuchsreihe D2

In der Versuchsreihe D2 wurden rechtwinklig zur Faserrichtung in Fichten-BSH eingeklebte Gewindestangen Ermüdungsversuchen unterzogen. Die Prüfkörper wurden zusammen mit denjenigen der Versuchsreihe D1 produziert (siehe Abschnitt 3.4.1) und klimatisiert (Abschnitt 3.4.4). Somit entsprach die Holzfeuchte von etwa 20 % auch hier Bedingungen an der oberen Grenze der Feuchteklasse 2 gemäss Norm SIA 265 [1].

4.5.2.1 Statische Probelastung bei der n'H

Im Sinne einer Qualitätskontrolle und zur Ermittlung der Steifigkeiten erfolgte eine statische Probelastung bei der neuen Holzbau AG mit einer Zugkraft von 125 kN. Insgesamt wurden 6 Prüfkörper hergestellt und deren Anschlussverformungen während der statischen Probelastung gemessen. Die entsprechenden Versuchsparameter sind in Abschnitt 3.4.5 beschrieben. Es wurden die in der Abb. 4.40 dargestellten und in der Tabelle 4.26 aufgelisteten Ergebnisse erzielt.

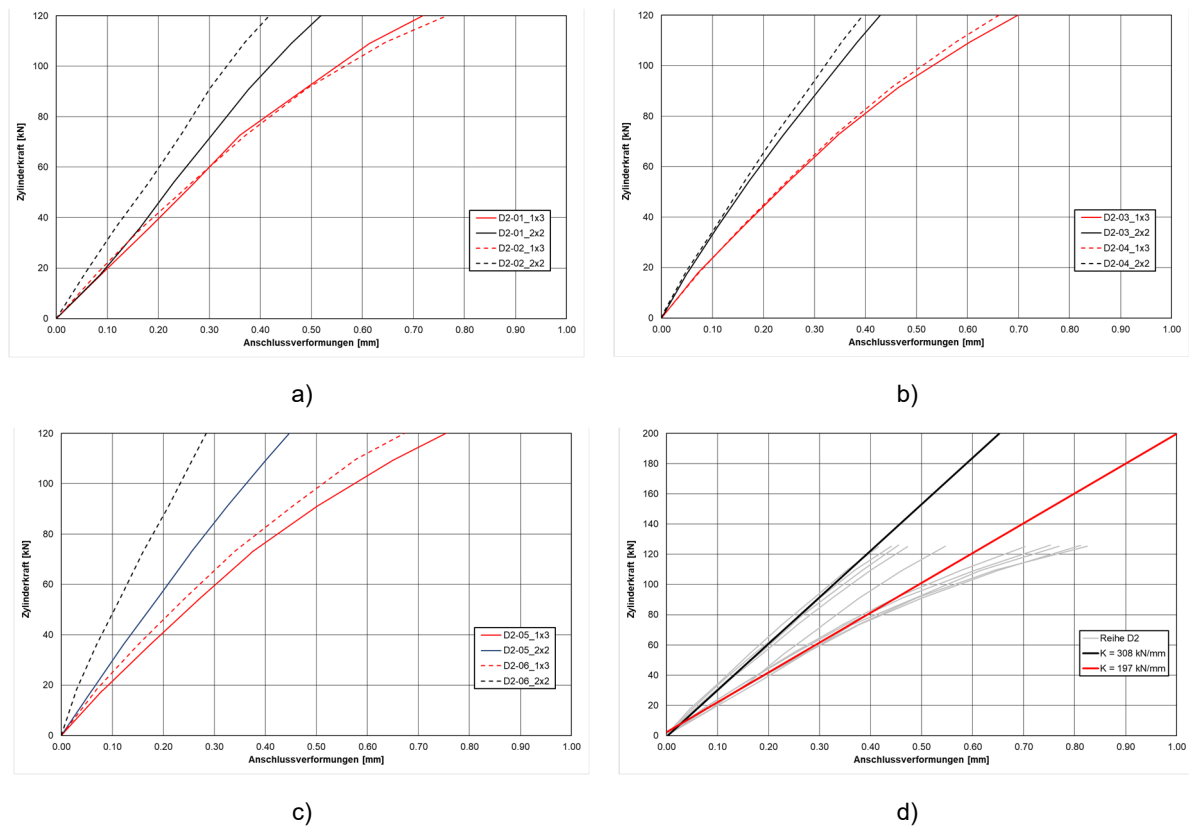


Abb. 4.40: Anschlussverformungen in den statischen Probelastungsversuchen an den 6 Prüfkörpern der Reihe D2.

Tabelle 4.26: Ergebnisse der statischen Probelastungsversuche in der Versuchsreihe D2.

Prüfkörper	Verformung [mm] bei 18 kN		Verformung [mm] bei 72 kN		Steifigkeit [kN/mm]	
	Anschluss unten	Anschluss oben	Anschluss unten	Anschluss oben	Anschluss unten	Anschluss oben
D2-01	0.088	0.090	0.302	0.357	253	202
D2-02	0.056	0.080	0.241	0.367	292	188
D2-03	0.051	0.072	0.237	0.343	290	199
D2-04	0.047	0.073	0.221	0.338	309	204
D2-05	0.060	0.081	0.252	0.369	282	187
D2-06	0.029	0.068	0.157	0.334	421	203
Mittelwert					308	197

4.5.2.2 Statische Vorbelastungsversuche an der Empa

Vor den Ermüdungsversuchen wurden an der Empa jeweils 5 Zyklen kraftgeregelte statische Zugbelastung (0 kN → Oberlast → 0 kN) mit Verformungsmessungen an den Anschlüssen durchgeführt. Beim Versuch am Prüfkörper D2-01 betrug die Oberlast (wie bei den Versuchen an den Prüfkörpern der Reihe C2) 90 kN. In den weiteren 3 Versuchen wurde die Oberlast auf das 0.8-Fache (72 kN) reduziert. Die entsprechenden Versuchsparameter sind in der Tabelle 3.3 zusammengestellt. Es wurden die in der Abb. 4.41 dargestellten und in der Tabelle 4.27 aufgelisteten Ergebnisse erzielt.

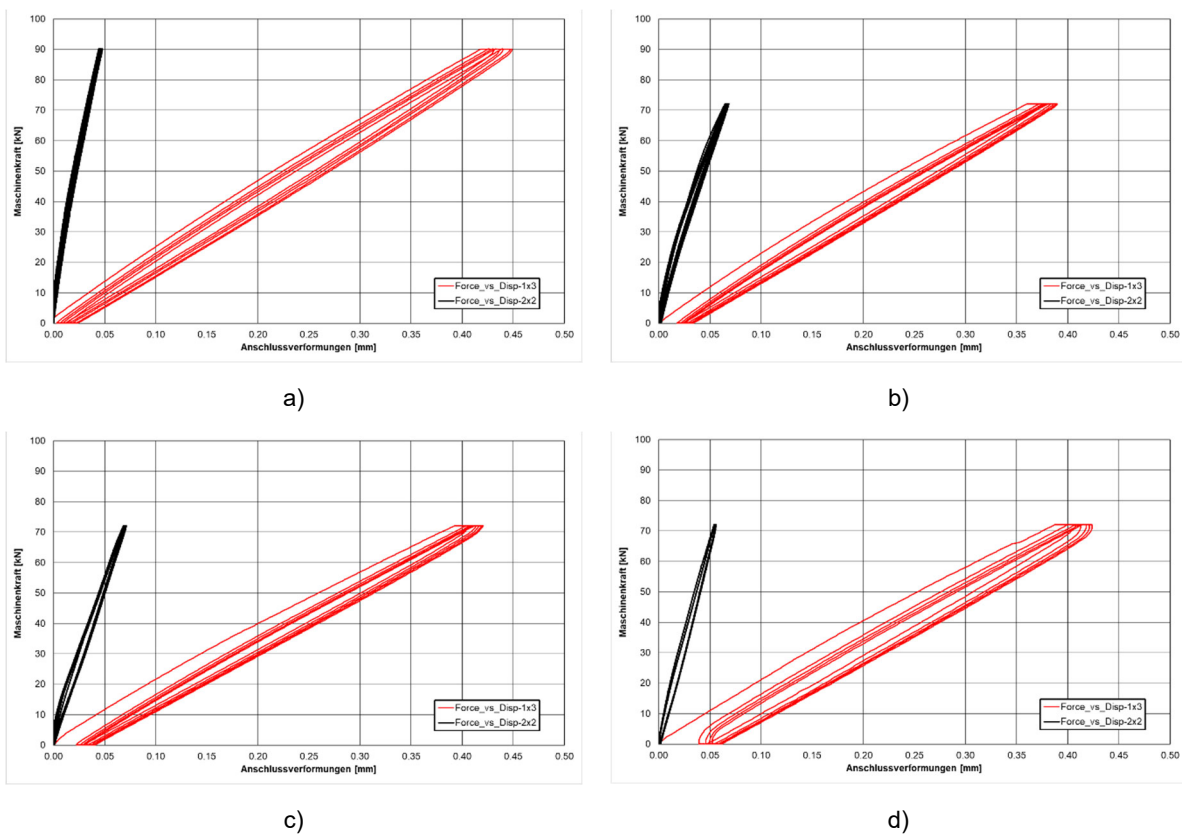


Abb. 4.41: Anschlussverformungen in den statischen Vorbelastungsversuchen an den Prüfkörpern D2-01 (a), D2-02 (b), D2-03 (c) und D2-04 (d).

Tabelle 4.27: Ergebnisse der statischen Vorbelastungsversuche in der Versuchsreihe D2.

Prüfkörper	Verformung [mm] bei 18 kN		Verformung [mm] bei 72 kN		Steifigkeit [kN/mm]	
	Anschluss unten	Anschluss oben	Anschluss unten	Anschluss oben	Anschluss unten	Anschluss oben
D2-01	0.005	0.078	0.034	0.334	1863	212
D2-02	0.008	0.095	0.065	0.372	947	195
D2-03	0.009	0.108	0.068	0.404	913	182
D2-04	0.011	0.109	0.055	0.400	1235	185
Mittelwert					1240	194

4.5.2.3 Ermüdungsversuche

Anschliessend wurden Ermüdungsversuche durchgeführt, mit dem Ziel mehr als 2 Mio. Lastwechsel zu erreichen, ohne dass die Prüfkörper versagen. Die wichtigsten Ergebnisse der Ermüdungsversuche an den Prüfkörpern der Reihe D2 sind in der Tabelle 4.28 zusammengestellt. Wenn in der zweiten Spalte eine Lastwechselzahl von weniger als 2 Mio. angegeben ist, bedeutet dies, dass der Prüfkörper während des Ermüdungsversuchs versagt hat.

Tabelle 4.28: Ermüdungsversuche an den Prüfkörpern der Versuchsreihe D2.

Prüfkörper	Lastwechsel	Frequenz	Max. Temperatur [°C]			Max. Traversenweg [mm] bei	
			Raum	unten ¹⁾	oben ¹⁾	Unterlast ²⁾	Oberlast ³⁾
D2-01	422'834	6.25 Hz	25.0	42.2	46.1	0.660 ⁴⁾	1.519 ⁴⁾
D2-02	2'000'500	5 Hz	23.7	30.2	30.5	0.941	1.969
D2-03	2'000'500	5.9 Hz	24.8	30.2	33.8	0.406	1.068
D2-04	2'000'500	4 Hz	27.5	30.5	37.6	0.377	1.029

¹⁾ Temperatur in den Klebfugen der eingeklebten Gewindestangen

²⁾ Prüfkörper D2-01: Unterlast 9 kN /// Prüfkörper D2-02 – D2-04: Unterlast 7.2 kN

³⁾ Prüfkörper D2-01: Oberlast 90 kN /// Prüfkörper D2-02 – D2-04: Oberlast 72 kN

⁴⁾ Maximaler Traversenweg bis 270'000 Lastwechsel im Versuch

In der Abb. 4.42 ist dargestellt, wie sich die Temperaturen während des Ermüdungsversuchs entwickelt haben. Die Abb. 4.43 zeigt die Ganglinien der Traversenwege für die Unterlast und für die Oberlast.

Der in der Abb. 4.43 b erkennbare Anstieg des Traversenwegs deutet darauf hin, dass beim Prüfkörper D2-02 nach 1.37 Mio. Lastwechseln eine Schädigung im Holz eintrat. Der Prüfkörper konnte aber dennoch mit einer Gesamt-Lastwechselzahl von 2'000'500 Lastwechseln belastet werden, ohne dass er versagte. Von aussen betrachtet, war keine Schädigung des Prüfkörpers erkennbar. Allerdings wies der Prüfkörper auch im Ausziehversuch eine geringere Anschlusssteifigkeit beim oberen Anschluss und einen geringeren Tragwiderstand auf als die anderen Prüfkörper der Reihe D2 (siehe Tabelle 4.29).

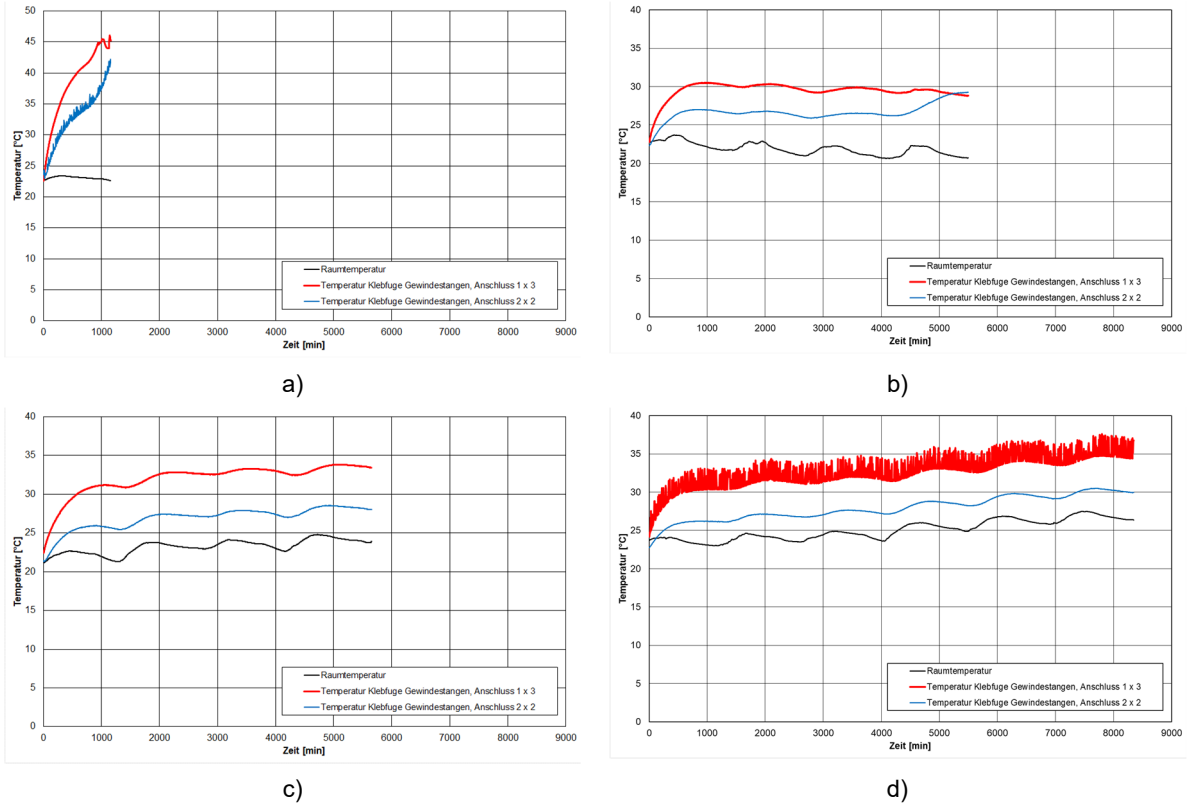


Abb. 4.42: Temperaturen in den Ermüdungsversuchen an den Prüfkörpern D2-01 (a), D2-02 (b), D2-03 (c) und D2-04 (d).

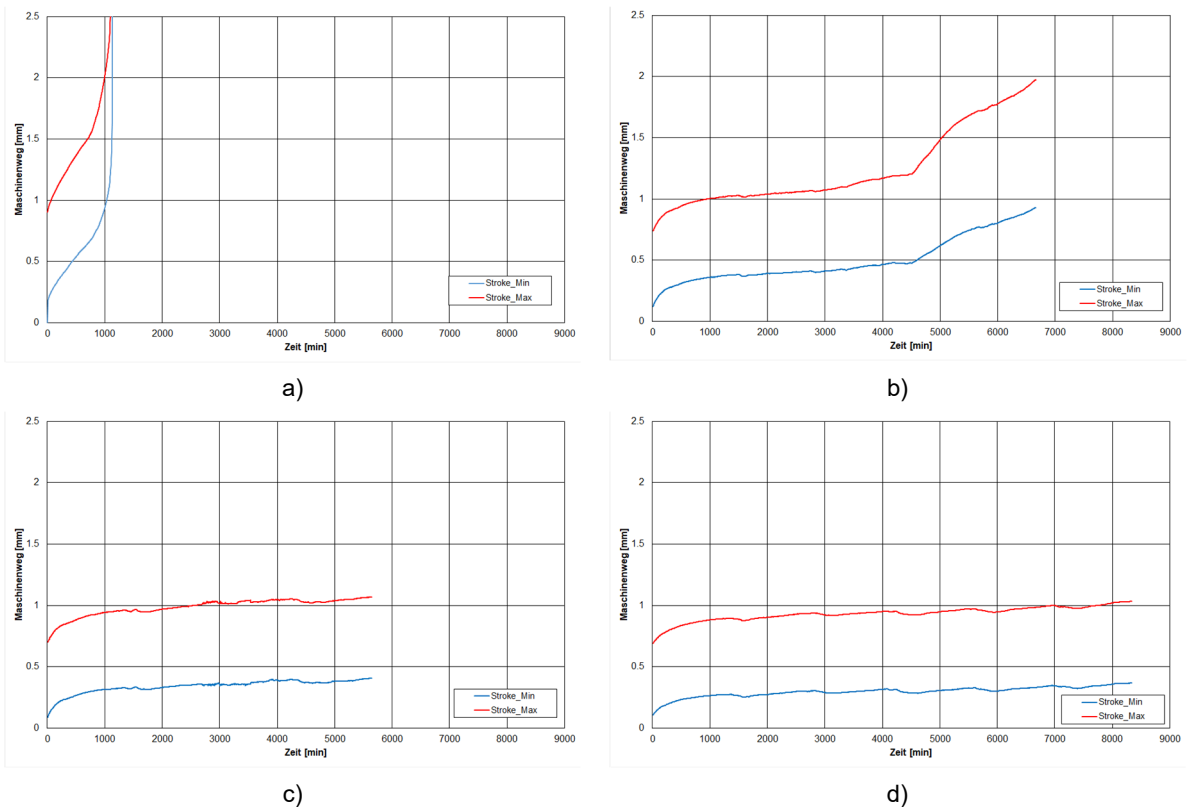
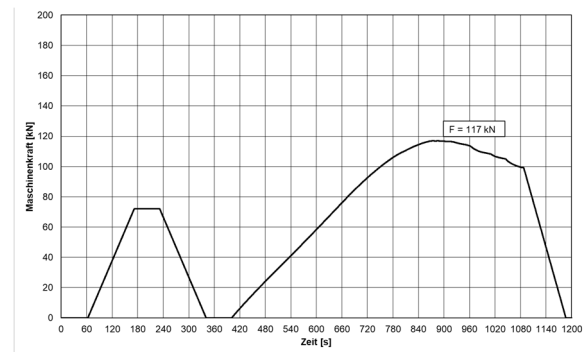


Abb. 4.43: Traversenwege bei der Unterlast und bei der Oberlast in den Ermüdungsversuchen an den Prüfkörpern D2-01 (a), D2-02 (b), D2-03 (c) und D2-04 (d).

4.5.2.4 Ausziehversuche nach den Ermüdungsversuchen

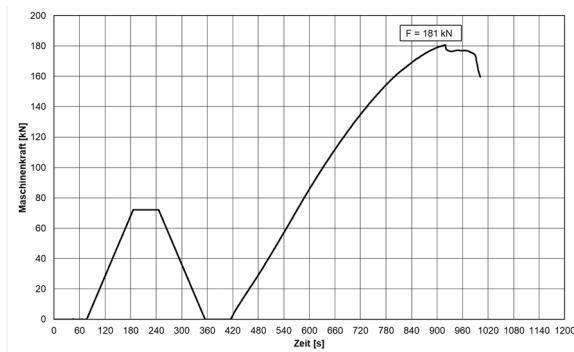
Den Abschluss der Versuche bildete jeweils ein statischer Zugversuch zur Ermittlung der Restfestigkeit mit Wegmessungen an den Anschlüssen zur Ermittlung der Reststeifigkeit. Vor dem Ausziehversuch wurden nicht bei jedem Prüfkörper dieselben Vorbelastungszyklen gefahren. Die Belastungsprogramme für die einzelnen Versuche sind der Abb. 4.44 dargestellt. Die Abb. 4.45 zeigt die Kraft versus der Anschlussverformung. An den Reserve-Prüfkörper D2-05 und D2-06 wurde kein Ermüdungsversuch, an der Empa nur der Ausziehversuch durchgeführt. Folglich sind deren Ergebnisse eher mit der Versuchsreihe D1 vergleichbar. Die an der Empa gemessenen nicht-linearen Verformungen waren nicht wesentlich grösser als bei der Versuchsreihe D1. In den Ergebnissen der Versuche der n'H sind diese anhand des gemessenen Zylinderwegs jedoch kaum erkennbar. Die Tabelle 4.29 zeigt einen Vergleich der Steifigkeiten der Anschlüsse vor und nach den Ermüdungsversuchen.

Am Prüfkörper D2-01 konnte kein Ausziehversuch durchgeführt werden, weil der Prüfkörper im Ermüdungsversuch versagt hatte.

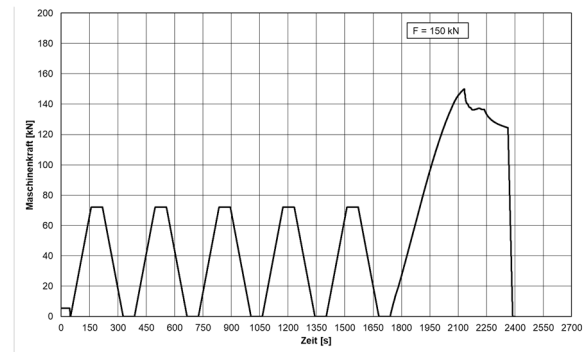


a)

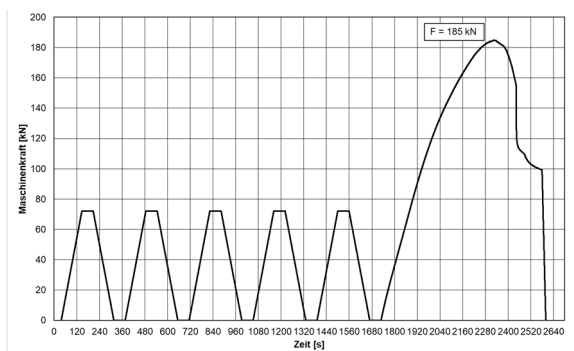
b)



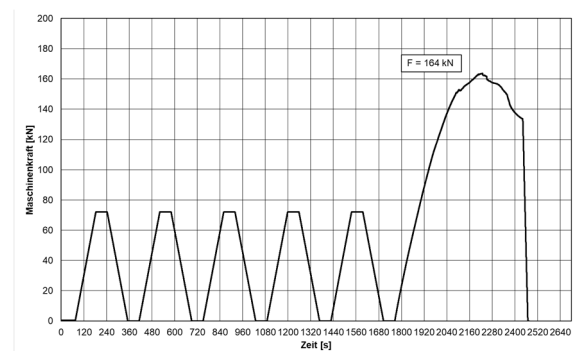
c)



d)



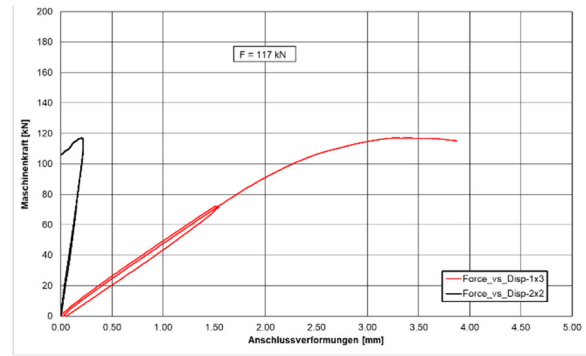
e)



f)

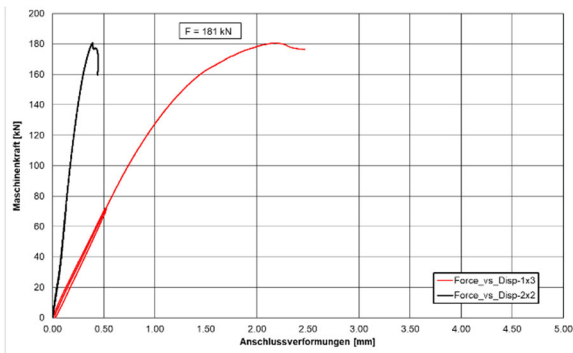
Abb. 4.44: Belastungsprogramme in den Ausziehversuchen an den Prüfkörpern D2-01 (a), D2-02 (b), D2-03 (c), D2-04 (d), D2-05 (e) und D2-06 (f).

Am Prüfkörper D2-01 konnte kein Ausziehversuch durchgeführt werden, weil der Prüfkörper im Ermüdungsversuch versagt hatte.

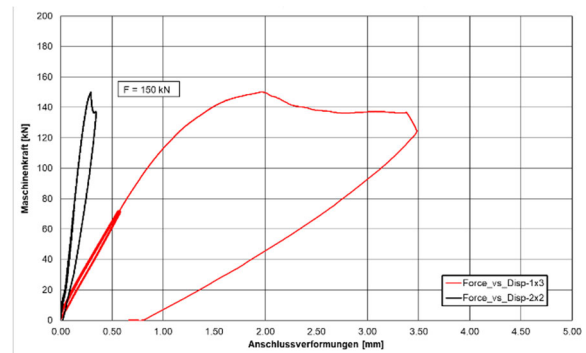


a)

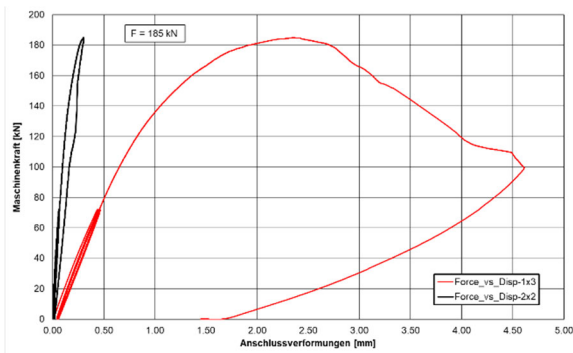
b)



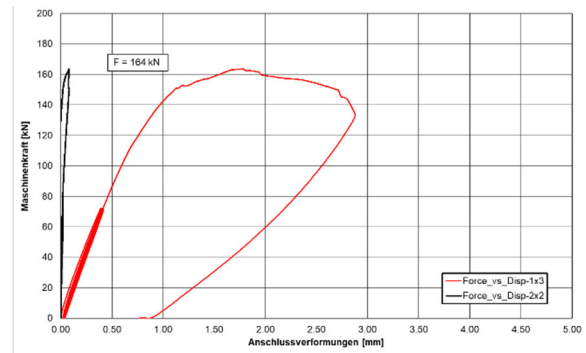
c)



d)



e)



f)

Abb. 4.45: Kraft versus Anschlussverformung in den durchgeführten Ausziehversuchen an den Prüfkörpern D2-01 (a), D2-02 (b), D2-03 (c), D2-04 (d) nach den Ermüdungsversuchen sowie D2-05 (e) und D2-06 (f) in statischen Zugversuchen.

Tabelle 4.29: Vergleich der Steifigkeit vor und nach dem Ermüdungsversuch an den Prüfkörpern der Versuchsreihe D2.

Prüfkörper	Steifigkeit [kN/mm] Vor Ermüdungsversuch im Anschluss		Lastwechsel im Ermüdungsversuch	Steifigkeit [kN/mm] Nach Ermüdungsversuch im Anschluss		Ausziehwi- derstand [kN]	Dichte bei $\omega = 12\%$ [kg/m ³] Prüfkörper
	unten	oben		unten	oben		
D2-01 ¹⁾	1863	212	422'834	–	–	–	422
D2-02	947	195	2'000'500	466	46 ³⁾	117 ³⁾	423
D2-03	913	182	2'000'500	587	138	181	423
D2-04	1235	185	2'000'500	606	117	150	423
D2-05 ²⁾	(1156)	(169)	–	–	–	(185)	425
D2-06 ²⁾	(1899)	(177)	–	–	–	(164)	427
Mittelwert	1240	194	–	553	128	166	424

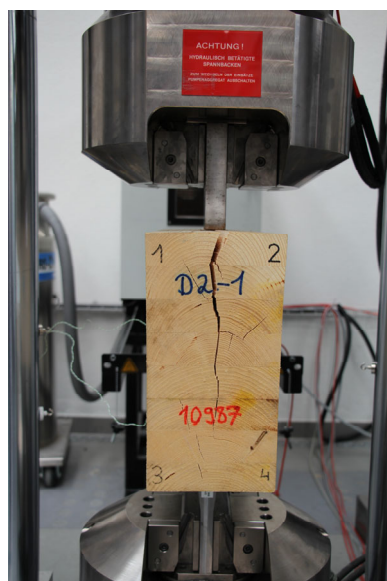
¹⁾ Vorzeitiges Versagen während dem Ermüdungsversuch

²⁾ Kein Ermüdungsversuch entsprechend dem Prüfplan (Wert im Mittelwert nicht berücksichtigt)

³⁾ Wert bei der Berechnung des Mittelwerts nicht berücksichtigt

4.5.2.5 Versagensbilder

Auch bei den Prüfkörpern der Versuchsreihe D2 trat Versagen im Holz auf. Alle Prüfkörper haben entlang der Gewindestangen von der oberen Anschlussplatte her auf versagt, wie in Abb. 4.46 und Abb. 4.47 dargestellt.



a)

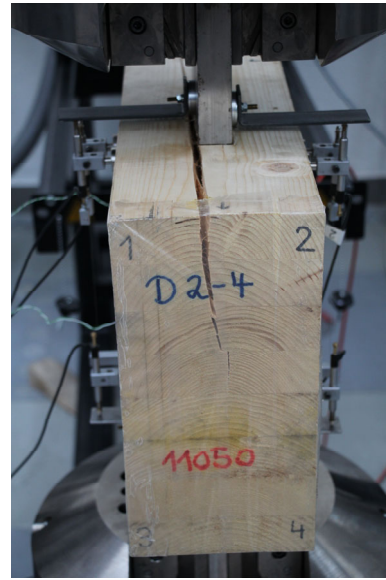


b)

Abb. 4.46: Versagensbilder bei den Prüfkörpern der Versuchsreihe D2: a) D2-01 nach dem Versagen im Ermüdungsversuch, b) D2-02 nach dem Ausziehversuch.



a)



b)

Abb. 4.47: Versagensbilder bei den Prüfkörpern der Versuchsreihe D2: a) D2-03 nach dem Ausziehversuch, b) D2-04 nach dem Ausziehversuch.

Die nach allen Versuchen zerlegten Prüfkörper sind in der Abb. 4.48 und in der Abb. 4.49 dargestellt. In der Abb. 4.48 a) und b) ist das Innenteil (die 3er-Gruppe) von beiden Seiten zu sehen. Diese Bruchflächen sind im Ermüdungsversuch entstanden. Sie weisen jedoch keine besonderen Merkmale auf, die von bloßem Auge sichtbar wären. Die Abb. 4.49 a) zeigt Klebfugen des Prüfkörpers D2-01. Auch diesbezüglich wurde nichts entdeckt, was nicht schon in vorangehenden Reihen beschrieben worden wäre. Schließlich zeigt die Abb. 4.49 b) die 6 Innenteile dieser Serie nebeneinander. Der Prüfkörper D2-01 versagte auf Rollschub während des Ermüdungsversuchs, die anderen 3 Prüfkörper hatten eine Ermüdungsbeanspruchung mit 2 Mio. Lastwechsel und den Ausziehversuch hinter sich, die Prüfkörper D2-05 und D2-06 nur die Probelastung und den Ausziehversuch.



a)



b)

Abb. 4.48: Zerlegte Prüfkörper der Versuchsreihe D2: a) und b) Innenteil des Prüfkörpers D2-01.



a)



b)

Abb. 4.49: Zerlegte Prüfkörper der Versuchsreihe D2: a) Rollschub-Bruchfläche und Klebfugen im Seitenteil des Prüfkörpers D2-01, b) Zusammenstellung aller Innenteile der Prüfreihe D2.

4.6 Holzfeuchteabnahme der Prüfkörper und Kontrollstäbe während der Versuche

Die Holzfeuchteabnahmen der Prüfkörper und Kontrollstäbe der Versuchsreihen A3 und D2 wurde anhand von Wägungen ermittelt. Die entsprechenden Messwerte und die sich ergebende Gewichtsreduktion während der Prüfkörpervorbereitung, der Versuchsdurchführung und dem Versuchsrückbau ist in der Tabelle 4.30 aufgeführt. Bei den in der Tabelle 4.30 angegebenen Gewichten der Prüfkörper handelt es sich um die Gesamtgewichte (Summe des Gewichts des Holzes, der Gewindestangen und der Stahlteile). Um die Holzfeuchteänderungen während der Versuchsdauer ermitteln zu können, müssen die Gewichte der Stahlteile und der Gewindestangen (11.362 kg für die Prüfkörper der Prüfreihe A3 und 9.338 kg für die Prüfkörper der Prüfreihe D2) vom Gesamtgewicht abgezogen. Die entsprechenden Werte findet man in der Tabelle 4.31. In dieser Tabelle, bzw. in einer Fussnote dazu ist angegeben, ob die Prüfkörper bzw. Kontrollstäbe an den Stirnseiten durch Abkleben mittels Kunststoff-Klebeband gegen zu rasches Austrocknen geschützt waren. Aus den Werten in der Tabelle 4.32 ist erkennbar, dass die Kontrollstäbe mit abgedeckten Stirnseiten während der gesamten Versuchsdauer weniger stark austrockneten als die Kontrollstäbe mit ungeschützten Stirnseiten.

Tabelle 4.30: Gewichtsreduktion und Verweildauer ausserhalb der Klimakiste der Prüfkörper und Kontrollstäbe der Versuchsreihen A3 und D2.

Prüfkörper bzw. Kontrollstab	Gewicht vor den Versuchen [kg]	Gewicht nach den Versuchen [kg]	Gewichtsreduktion [kg]	Verweildauer aus- serhalb der Klima- kiste [hh:mm]
A3-01	18.098	17.840	0.258	117:25
A3-02	18.060	17.820	0.240	122:53
E70-4	1.586	1.521	0.065	122:53
E70-10	0.646	0.616	0.03	122:53
A3-03	18.018	17.755	0.263	144:34
E70-5	1.572	1.497	0.075	144:34
E70-11	0.640	0.606	0.034	144:34
A3-04	17.952	17.857	0.095	29:05
E70-8	1.560	1.531	0.029	29:05
E70-12	0.647	0.634	0.013	29:05
D2-01	21.116	20.774	0.342	95:55
F-160-2	6.028	5.832	0.196	95:55
D2-02	21.245	20.981	0.264	120:23
F-160-4	5.808	5.602	0.206	120:23
D2-03	21.214	21.017	0.197	115:13
F-160-5	5.867	5.717	0.15	115:13
F-160-11	2.525	2.398	0.127	115:13
D2-04	21.121	20.969	0.152	142:45
F-160-7	5.856	5.683	0.173	142:45
F-160-12	2.533	2.393	0.14	142:45
D2-05	21.179	21.143	0.036	02:40
D2-06	21.295	21.252	0.043	03:45

Tabelle 4.31: Gewichte (reine Holzmasse feucht) und Gewichtsreduktion der Prüfkörper und Kontrollstäbe der Versuchsreihen A3 und D2.

Prüfkörper bzw. Kontrollstab	Gewicht vor den Versuchen [kg]	Gewicht nach den Versuchen [kg]	Gewichtsreduktion [kg]
A3-01	6.736	6.478	0.258
A3-02	6.698	6.458	0.240
E70-4	1.586	1.521	0.065
E70-10	0.646	0.616	0.030
A3-03	6.656	6.393	0.263
E70-5	1.572	1.497	0.075
E70-11	0.640	0.606	0.034
A3-04	6.590	6.495	0.095
E70-8	1.560	1.531	0.029
E70-12	0.647	0.634	0.013
D2-01	11.778	11.436	0.342
F-160-2	6.028	5.832	0.196
D2-02 ¹⁾	11.907	11.643	0.264
F-160-4	5.808	5.602	0.206
D2-03 ¹⁾	11.876	11.679	0.197
F-160-5 ¹⁾	5.867	5.717	0.150
F-160-11	2.525	2.398	0.127
D2-04 ¹⁾	11.783	11.631	0.152
F-160-7 ¹⁾	5.856	5.683	0.173
F-160-12	2.533	2.393	0.140
D2-05	11.841	11.805	0.036
D2-06	11.957	11.914	0.043

¹⁾ Stirnseiten mit Kunststoff-Klebeband abgedeckt

Basierend auf den Angaben in der Tabelle 4.31 und den experimentell bestimmten Darrmassen (siehe Tabelle 4.32) können die Differenzen der Holzfeuchten in % HF zwischen den Zuständen vor und nach den Versuchen ermittelt werden (siehe Tabelle 4.32).

Bei der Versuchsreihe C2 wurden keine Kontrollstäbe eingesetzt. Die Holzfeuchte wurde bei den Prüfkörpern der Versuchsreihe C2 mittels elektrischer Widerstandsmessung bestimmt. Die Holzfeuchten wurden vor Beginn und nach Beendigung des Ermüdungsversuchs gemessen. Die Messergebnisse sind in der Tabelle 4.33 zusammengestellt.

Tabelle 4.32: Geschätzte Holzfeuchten vor dem Versuch, Darrmassen und Holzfeuchtdifferenz (vor dem Versuch / nach dem Versuch) der Prüfkörper und Kontrollstäbe der Versuchsreihen A3 und D2.

Prüfkörper bzw. Kontrollstab	Geschätzte Holz- feuchte vor den Versuchen [%]	Darrmasse [kg]	Holzfeuchtdifferenz [% HF]
A3-01	20.3	5.598	4.6
A3-02	20.5	5.558	4.3
E70-4	20.8	1.313	5.0
E70-10	21.4	0.532	5.6
A3-03	20.5	5.522	4.8
E70-5	20.8	1.301	5.8
E70-11	21.5	0.527	6.5
A3-04	20.2	5.484	1.7
E70-8	21.3	1.286	2.3
E70-12	21.1	0.535	2.4
Mittelwert der Kontrollstäbe	21.2	–	4.6
Mittelwert der Prüfkörper	20.4	–	3.9

D2-01	21.9	9.636	3.5
F-160-2	20.7	4.993	3.9
D2-02 ¹⁾	22.2	9.667	2.7
F-160-4	19.6	4.855	4.2
D2-03 ¹⁾	22.0	9.669	2.0
F-160-5 ¹⁾	20.9	4.851	3.1
F-160-11	20.1	2.099	6.1
D2-04 ¹⁾	21.8	9.657	1.6
F-160-7 ¹⁾	20.7	4.862	3.6
F-160-12	20.5	2.105	6.6
D2-05	21.3	9.707	0.4
D2-06	21.2	9.753	0.4
Mittelwert der Kontrollstäbe	20.4	–	4.6
Mittelwert der Prüfkörper	21.7	–	2.5

¹⁾ Stirnseiten mit Kunststoff-Klebeband abgedeckt

Tabelle 4.33: Mittels elektrischer Widerstandsmessung bestimmte Holzfeuchten der Prüfkörper der Versuchsreihe C2.

Prüfkörper	Holzfeuchte vor dem Ermü- dungsversuch [%]	Holzfeuchte nach dem Er- müdungsversuch [%]	Holzfeuchtdifferenz [% HF]
C2-01	10.3	10.0	-0.3
C2-02	10.2	9.8	-0.4
C2-03	10.5	10.2	-0.3
C2-04	10.0	9.6	-0.4

4.7 Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse

4.7.1. Parallel zur Faserrichtung in Eschen BSH eingeklebte Gewindestangen

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Versuche an den Prüfkörpern aus Eschen-BSH mit parallel zur Faserrichtung eingeklebten Gewindestangen (Versuchsgruppe A) wie folgt zusammenfassend dargestellt:

- Dichten: Tabelle 4.34
- E-Moduln: Tabelle 4.35
- Kenndaten der Ermüdungsversuche: Tabelle 4.36
- Anschlusssteifigkeiten: Tabelle 4.37
- Auszieh Widerstände und Versagensarten: Tabelle 4.38

Tabelle 4.34: Dichten [kg/m^3] bei $\omega = 12\%$ der Eschen-BSH-Prüfkörper der Versuchsgruppe A.

Prüfkörper	Reihe A1	Reihe A2		Reihe A3	
	Mittelbereich	Mittelbereich	Prüfkörper	Mittelbereich	Prüfkörper
PK-01	728	647	657	644	665
PK-02	705	648	655	645	660
PK-03	721	634	648	641	656
PK-04	–	645	659	628	652
Mittelwerte	718	644	655	640	658
Mittelwert der Gruppe A					662
Variationskoeffizient der Gruppe A					6 %

Tabelle 4.35: E-Moduln [N/mm^2] der Eschen-BSH-Prüfkörper der Versuchsgruppe A.

Prüfkörper	Reihe A1		Reihe A2		Reihe A3		
	Probebelastung bei	Ausziehversuch bei	Ausziehversuch bei	Ausziehversuch bei	Probebelastung bei	Vorbelastung bei	Ausziehversuch bei
	$\omega \approx 9\%$	$\omega \approx 8\%$	$\omega \approx 20\%$	$\omega \approx 12\%$	$\omega \approx 20\%$	$\omega \approx 20\%$	$\omega \approx 17\%$
PK-01	14'300	–	10'700	–	10'900	10'500	11'000
PK-02	13'100	13'100	12'600	13'000	12'000	13'500	13'150
PK-03	17'100	–	11'200	12'150	11'200	11'000	11'450
PK-04	15'600	–	13'050	13'350	11'000	10'900	–
PK-05	17'200	–	–	–	–	–	–
Mittelwerte	15'500	–	11'900	12'800	11'300	11'500	11'900

Tabelle 4.36: Kenndaten der Ermüdungsversuche an den Prüfkörpern mit parallel zur Faserrichtung eingeklebten Stangen der Versuchsgruppe A.

Reihe A1					
Prüfkörper	Lastwechsel im Ermüdungsversuch bei anfänglich $\omega \approx 9\%$				
	Anz. Lastwechsel	$\Delta\sigma_s$ [N/mm ²]	τ_0 [N/mm ²]	Frequenz [Hz]	Max. Temperatur [° C] ¹⁾
PK-01	2'054'712	287	3.4	6 – 12	55.7
PK-02	2'010'000	287	3.4	8	54.2
PK-03	2'010'000	287	3.4	5	48.0
PK-04	–	–	–	–	–
Reihe A3					
Prüfkörper	Lastwechsel im Ermüdungsversuch bei anfänglich $\omega \approx 20\%$				
	Anz. Lastwechsel	$\Delta\sigma_s$ [N/mm ²]	τ_0 [N/mm ²]	Frequenz [Hz]	Max. Temperatur [° C] ¹⁾
PK-01	2'000'486	287	3.4	5	26.2
PK-02	2'000'483	287	3.4	6	25.4
PK-03	2'000'486	287	3.4	5	26.6
PK-04	56'175	401	4.8	5	36.5

¹⁾ Temperatur in den Klebfugen

τ_0 Spannung in der Klebfuge bei Oberlast (bezogen auf den Nenndurchmesser der Gewindestange und die wirksame Verankerungslänge)

$\Delta\sigma_s$ Spannungsdifferenz in den Gewindestangen (2 x M16)

Tabelle 4.37: Anschlusssteifigkeiten [kN/mm] (oben bzw. unten) ermittelt an den Prüfkörpern mit parallel zur Faserrichtung eingeklebten Stangen der Versuchsgruppe A.

Prüfkörper	Reihe A1		Reihe A2		Reihe A3		
	Probebelastung	Ausziehversuch	Ausziehversuch	Ausziehversuch	Probebelastung	Vorbelastung	Ausziehversuch
	$\omega \approx 9\%$	$\omega \approx 8\%$	$\omega \approx 20\%$	$\omega \approx 12\%$ ¹⁾	$\omega \approx 20\%$	$\omega \approx 20\%$	$\omega \approx 17\%$
PK-01 oben	343	–	245	–	304	314	342
PK-01 unten	353	–	313	–	320	310	323
PK-02 oben	339	222	276	241	310	309	384
PK-02 unten	336	241	235	257	310	315	364
PK-03 oben	355	–	270	245	309	315	333
PK-03 unten	356	–	252	287	302	352	370
PK-04 oben	344	–	265	233	327	321	–
PK-04 unten	343	–	249	249	302	324	–
PK-05 oben	347	–	–	–	–	–	–
PK-05 unten	331	–	–	–	–	–	–
Mittelwert	345	232	263	252	311	320	353
Variationskoeffizient	2 %	6 %	9 %	8 %	3 %	4 %	7 %

¹⁾ mit gesägtem Schwindriss

Tabelle 4.38: Auszieh Widerstände [kN] und Versagensarten ermittelt an den Prüfkörpern mit parallel zur Faserrichtung eingeklebten Stangen der Versuchsgruppe A.

Prüfkörper	Reihe A1	Reihe A2		Reihe A3
	$\omega \approx 8 \%$	$\omega \approx 20 \%$	$\omega \approx 12 \%$	$\omega \approx 17 \%$
PK-01	–	248	–	270
PK-02	246	249	243	270
PK-03	–	250	248	268
PK-04	–	250	248	–
Mittelwert	–	249	246	269
Versagensart	spröd, Aufspalten	Stahlfließen	Stahlbruch kurz nach Fließen	Stahlfließen

4.7.2. Rechtwinklig zur Faserrichtung in Fichten-BSH eingeklebte Gewindestangen

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Versuche an den Prüfkörpern aus Fichten-BSH mit rechtwinklig zur Faserrichtung eingeklebten Gewindestangen (Versuchsgruppen B, C und D) wie folgt zusammenfassend dargestellt:

- Dichten: Tabelle 4.39
- Kenndaten der Ermüdungsversuche: Tabelle 4.40
- Anschlusssteifigkeiten: Tabelle 4.41 und Tabelle 4.42
- Auszieh Widerstände und Versagensarten: Tabelle 4.43

Tabelle 4.39: Dichten [kg/m³] bei $\omega = 12\%$ der Fichten-BSH-Prüfkörper der Versuchsgruppen B, C und D.

Prüfkörper	Gruppe B und Reihe C1		Reihe C2	Reihe D1	Reihe D2
	Mittelbereich	Prüfkörper	Prüfkörper	Prüfkörper	Prüfkörper
PK-01	434	407	465	421	422
PK-02	441	447	419	421	423
PK-03	435	441	465	427	423
PK-04	–	415	432	–	423
PK-05	–	443	–	–	425
PK-06	–	418	–	–	427
Mittelwerte	437	429	445	423	424
Mittelwert (Prüfkörper) Gruppen B, C und D					430
Variationskoeffizient (Prüfkörper) Gruppen B, C und D					4 %

Tabelle 4.40: Kenndaten der Ermüdungsversuche an den Prüfkörpern mit rechtwinklig zur Faserrichtung eingeklebten Stangen der Versuchsreihen C2 und D2.

Reihe C2					
Prüfkörper	Lastwechsel im Ermüdungsversuch bei anfänglich $\omega \approx 9\%$				
	Anzahl Lastwechsel	$\Delta\sigma_s$ [N/mm ²]	τ_o [N/mm ²]	Frequenz [Hz]	Max. Temperatur [° C] ¹⁾
PK-01	2'034'359	172	2.1	5.5	32.9
PK-02	1'999'998	172	2.1	5.9	30.6
PK-03	1'998'521	172	2.1	6.5	31.3
PK-04	2'999'801	172	2.1	7	32.1
Reihe D2					
Prüfkörper	Lastwechsel im Ermüdungsversuch bei anfänglich $\omega \approx 20\%$				
	Anzahl Lastwechsel	$\Delta\sigma_s$ [N/mm ²]	τ_o [N/mm ²]	Frequenz [Hz]	Max. Temperatur [° C] ¹⁾
PK-01	422'834	172	2.1	6.25	46.1
PK-02	2'000'500	138	1.6	5	30.5
PK-03	2'000'500	138	1.6	5.9	33.8
PK-04	2'000'500	138	1.6	4	37.6

¹⁾ Temperatur in den Klebfugen

τ_o Spannung in der Klebfuge bei Oberlast (bezogen auf den Nenndurchmesser der Gewindestange und die wirksame Verankerungslänge)

$\Delta\sigma_s$ Spannungsdifferenz in den Gewindestangen des oberen Anschlusses (3 x M16)

Tabelle 4.41: Anschlusssteifigkeiten [kN/mm] ermittelt am Anschluss oben (1 x 3 GSA) bei den Prüfkörpern mit rechtwinklig zur Faserrichtung eingeklebten Stangen der Versuchsgruppen B, C und D.

Prüfkörper	Gruppe B und Reihe C1	Reihe C2			Reihe D1	Reihe D2		
		Probebelastung	Vorbelastung	Ausziehversuch	Ausziehversuch	Probebelastung	Vorbelastung	Ausziehversuch
		$\omega \approx 9\%$	$\omega \approx 9\%$	$\omega \approx 9\%$	$\omega \approx 20\%$	$\omega \approx 20\%$	$\omega \approx 20\%$	$\omega \approx 18\%$
PK-01	213 ¹⁾	262	–	201	188	202	212	–
PK-02	246	264	254	263	201	188	195	46 ³⁾
PK-03	269	279	256	224	212	199	182	138
PK-04	250	230	210	173 ²⁾	–	204	185	117
PK-05	263	–	–	–	–	187	–	–
PK-06	274	–	–	–	–	203	–	–
Mittelwert	260	240	229	198	194	128		
Variationskoeffizient	6 %	11 %	14 %	4 %	7 %	–		

¹⁾ Wert bei der Berechnung des Mittelwerts nicht berücksichtigt, weil für die Messung der Anschlussverformung ein anderer Referenzpunkt gewählt worden war als bei den restlichen Versuchen

²⁾ Wert bei der Berechnung des Mittelwerts nicht berücksichtigt, weil der Prüfkörper nach 3 Mio. Lastwechseln geprüft wurde

³⁾ Prüfkörper hat zwar 2 Mio. Lastwechsel im Ermüdungsversuch erzielt, es scheint jedoch zu einer Schädigung infolge der Ermüdungsbeanspruchung gekommen zu sein. Wert bei der Berechnung des Mittelwerts nicht berücksichtigt.

Tabelle 4.42: Anschlusssteifigkeiten [kN/mm] ermittelt am Anschluss unten (2 x 2 GSA) bei den Prüfkörpern mit rechtwinklig zur Faserrichtung eingeklebten Stangen der Versuchsgruppen B, C und D.

Prüfkörper	Gruppe B und Reihe C1	Reihe C2			Reihe D1	Reihe D2		
	Ausziehversuch	Probebelastung	Vorbelastung	Ausziehversuch	Ausziehversuch	Probebelastung	Vorbelastung	Ausziehversuch
	$\omega \approx 9 \%$	$\omega \approx 9 \%$	$\omega \approx 9 \%$	$\omega \approx 9 \%$	$\omega \approx 20 \%$	$\omega \approx 20 \%$	$\omega \approx 20 \%$	$\omega \approx 18 \%$
PK-01	747 ¹⁾	564		1270	397	253	1863	–
PK-02	583	594	578	824	757	292	947	466
PK-03	580	558	1139	969	416	290	913	587
PK-04	626	555	1312	911 ²⁾	–	309	1235	606
PK-05	610	–	–	–	–	282	–	–
PK-06	593	–	–	–	–	421	–	–
Mittelwert	598		1010	1021	380		1240	553
Variationskoeffizient	4 %		38 %	20 %	41 %		36 %	14 %

¹⁾ Wert bei der Berechnung des Mittelwerts nicht berücksichtigt, weil für die Messung der Anschlussverformung ein anderer Referenzpunkt gewählt worden war als bei den restlichen Versuchen

²⁾ Wert bei der Berechnung des Mittelwerts nicht berücksichtigt, weil der Prüfkörper nach 3 Mio. Lastwechseln geprüft wurde

Tabelle 4.43: Auszieh Widerstände [kN] und Versagensarten ermittelt an den Prüfkörpern mit rechtwinklig zur Faserrichtung eingeklebten Stangen der Versuchsgruppen B, C und D.

Prüfkörper	Gruppe B und Reihe C1	Reihe C2	Reihen D1 und D2	Reihe D2
	$\omega \approx 9 \%$	$\omega \approx 9 \%$	$\omega \approx 20 \%$	$\omega \approx 18 \%$
PK-01	210	186	200	–
PK-02	211	203	179	117 ¹⁾
PK-03	185	204	207	181
PK-04	209	167 ²⁾	–	150
PK-05	190	–	185	–
PK-06	200	–	164	–
Mittelwert	201	198	187	166
Versagensart	Rollschubversagen nach Rissbildung			

¹⁾ Prüfkörper hat zwar 2 Mio. Lastwechsel im Ermüdungsversuch erzielt, es scheint jedoch zu einer Schädigung infolge der Ermüdungsbeanspruchung gekommen zu sein. Wert bei der Berechnung des Mittelwerts nicht berücksichtigt.

²⁾ Wert bei der Berechnung des Mittelwerts nicht berücksichtigt, weil der Prüfkörper nach 3 Mio. Lastwechseln geprüft wurde

4.8 Literatur zum Kapitel 4

1. SIA (2021): Norm SIA 265 Holzbau. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich, Schweiz,
2. 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, 9- 12 May 2022, Biel/Bienne, Switzerland.
3. Ehrhart T., Steiger R., Frangi A., Strahm T., Bernasconi A. (2021): Bericht zum Projekt WHFF-CH 2020-11: Laubholzstützen - Druckfestigkeit und E-Modul parallel zur Faserrichtung und Einfluss der Holzfeuchte.

5. Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse im Kapitel 4 zeigen auf, dass alle in diesem Projekt geplanten Versuche erfolgreich durchgeführt und ausgewertet werden konnten. Das schrittweise Vorgehen in mehreren Gruppen und Reihen hat sich bewährt. So ist es schliesslich gelungen, dass in allen drei Versuchsreihen mit Ermüdungsversuchen mindestens 3 Prüfkörper die angestrebten 2 Mio. Lastwechsel erreichten. Dank den produzierten Reserve-Prüfkörpern konnten sogar zusätzliche Erkenntnisse gewonnen werden. Diese und alle gemäss Zielsetzung geplanten Erkenntnisse fassen die nachfolgenden Abschnitte zusammen.

5.1 Klimatisierung der Prüfkörper

Die geplante Holzfeuchte der Prüfkörper konnte mit den eingesetzten Mitteln grundsätzlich erreicht werden. Wie die Abb. 3.18 zusammenfassend zeigt, liess sich die Klimatisierung der Prüfkörper in den konzipierten Klimakisten gut ausführen. Dieser Prozess dauerte jedoch deutlich länger als vorgesehen. Der Grund dafür lässt sich an der EMC-Kurve erkennen (Abb. 3.18). Die Kurve bildet ab, dass das Klima in den Kisten nicht von Anfang an dem angestrebten Niveau entsprach. Offenbar war die Wasseroberfläche am Boden der Kiste im Verhältnis zum darin gelagerten Holzvolumen eher zu klein. In der Anfangsphase der Klimatisierung nahm das Holz deshalb mehr Feuchtigkeit auf, als die Lösung an die Luft abzugeben vermochte.

Weshalb sich in den Kisten schliesslich eine relative Luftfeuchte von annähernd 100 % einstellte, obwohl man sich von der gewählten Kaliumchlorid-Lösung nur 85 % versprach, wurde nicht näher untersucht. Die sich auf den Holzoberflächen bildenden Schimmelpilze und mehrfach ausgetauschte Sensoren, legen die Vermutung nahe, dass es sich nicht nur um Messfehler oder Messungenauigkeiten handelte.

Anhand der Kontrollstäbe liess sich die Zunahme der Holzfeuchte beobachten und so konnten die Zeitpunkte für die Versuche korrekt festgelegt werden. Die Messwerte für drei verschiedene Querschnitte in zwei Holzarten zeigen auf, dass die Erreichung einer Holzgleichsfeuchte für grössere Abmessungen zunehmend länger dauert. Ein Unterschied zwischen den Holzarten ist kaum feststellbar, weil die Holzfeuchte zu Beginn nicht einheitlich war.

Aufgrund der unterschiedlichen Volumina wurde erwartet, dass sich die Kontrollstäbe schneller und deutlicher an das Umgebungsklima anpassen als die Prüfkörper. Bei den Eschen-Prüfkörpern war dies zu beobachten. Bei den Fichten-Prüfkörpern wurden hingegen anhand des Gesamtgewichts höhere Holzfeuchten errechnet, als dies bei den Kontrollstäben der Fall war. Die in der Tabelle 4.32 dargestellten Unterschiede lassen vermuten, dass die verhältnismässig grossen Stirnholzflächen bei den Prüfkörpern trotz Versiegelungsanstrich zu stärkeren Feuchteaufnahmen führten. Der auf die Stirnholzflächen aufgetragene Anstrich wird bei Kontrollstäben und Prüfkörpern als zweckmässig erachtet, um die Sorption über diese Flächen zu verlangsamen. Auch die zusätzliche Abdeckung mit Kunststoff-Klebeband während den Ermüdungsversuchen hat sich als nützlich erwiesen.

5.2 Versuchskonfiguration und Versuchsprocedere

Die Versuchskonfiguration orientierte sich an Knotenverbindungen von Fachwerkstäben mit eingeklebten Gewindestangen (Abb. 1.4). Der Anschluss an die Füllstäbe (Streben) erfolgt parallel zur Faserrichtung. Hier wird oft Laubholz eingesetzt, weil sich damit aufgrund des im Vergleich zu Nadelholz höheren Tragwiderstands die Anzahl benötigter Stangen reduzieren lässt. Für die Klebfugen bedeutet der Einsatz im Laubholz die höchste Beanspruchung. Dies gilt sowohl für statische als auch für dynamische Beanspruchungen. Die Wahl von Eschen-BSH für die Prüfkörper der Versuchsgruppe A begründet sich in erster Linie mit dem Ziel, eine möglichst hohe Scherspannung in den Klebfugen der eingeklebten Gewindestangen prüfen zu können. Daraus ergaben sich Erkenntnisse, die bei differenzierter Betrachtung auch für Anwendungen in Fichten-BSH nützlich sein können.

Ober- und Untergurte von Fachwerken werden bisher fast ausschliesslich aus Fichten-BSH hergestellt, weil die benötigte Holzmenge im Vergleich zu den Streben in der Regel deutlich grösser ist und die

Ausführung in Fichten-BSH daher kostengünstiger ist. Generell, wie auch bezüglich Rollschub-Bearbeitung im Speziellen, weist Nadelholz eine niedrigere Festigkeit im Vergleich zum Laubholz auf. Die Wahl von Fichten-BSH für die Prüfkörper der Versuchsgruppen B, C und D begründet sich somit mit dem Ziel, das in der Baupraxis am häufigsten verwendete Material zu prüfen. Im Hinblick auf Anwendungen in Laubholz werden die gewonnenen Erkenntnisse als konservativ erachtet. Bei Bedarf könnten gleichartige Versuche mit Laubholz durchgeführt werden, was dessen Wirtschaftlichkeit steigern würde.

5.2.1 Ermüdungsfeste Stahlteile zur Krafteinleitung

Bei den Stahlteilen hat sich die Werkstoffwahl und die Ausgestaltung der Geometrien bewährt. Die Anschlussplatten liessen sich in den Klemmbacken der Prüfmaschine sicher klemmen, ohne dass dabei den Prüfkörpern eine schädigende Verformung aufgezwungen wurde. Das T-förmige Stahlteil am 2 x 2-Anschluss der Fichten-Prüfkörper liess sich in beiden Versuchsreihen unbeschadet wiederverwenden. So konnten die Duplex-Gewindestangen ihre hohe Ermüdungsfestigkeit unter Beweis stellen. In der Versuchsreihe A1 sowie bei den ersten drei Prüfkörpern der Versuchsreihe A3 überstanden die Stangen jeweils 2 Mio. Lastwechsel bei einer Spannungsdifferenz $\Delta\sigma_s$ von 287 N/mm² (bezogen auf den Spannungsquerschnitt der 2 Gewindestangen M16, $A_s = 157 \text{ mm}^2$). Der einzige Bruch einer Stange ereignete sich beim Versuch am Prüfkörper A3-04 nach über 56'000 Lastwechseln bei einer Spannungsdifferenz von $\Delta\sigma_s = 401 \text{ N/mm}^2$. Hervorzuheben ist, dass das Versagen beim Ansatz des Innengewindes auftrat und nicht im deutlich kleineren Querschnitt des abgedrehten Bereichs (siehe Abb. 4.23).

5.2.2 Klebfugen-Temperaturen und Prüffrequenzen bei den Ermüdungsversuchen

Bei fast allen Ermüdungsversuchen, welche im Rahmen dieses Projekts durchgeführt wurden (Versuchsreihen A3, C2 und D2), blieben die Klebfugen-Temperaturen im angestrebten Bereich. Über 45°C stiegen die Temperaturen nur beim Prüfkörper D2-01, welcher nach gut 420'000 Lastwechseln versagte. Man war sowohl mit der Belastung von $F_0 = 90 \text{ kN}$ (Oberlast) als auch mit der Frequenz von 6.25 Hz bewusst optimistisch in diese letzte Versuchsreihe gestiegen. Schliesslich hatte der Prüfkörper C2-04 3 Mio. Lastwechsel mit einer Prüffrequenz von 7 Hz erreicht, ohne zu versagen. Die niedrigste Prüffrequenz (4 Hz) wurde beim Versuch am Prüfkörper D2-04 gewählt, damit der Versuch über ein Wochenende durchlaufen konnte. Interessanterweise stellte sich hier mit 37.6° C die zweithöchste Temperatur in den Klebfugen der Gewindestangen-Verankerung ein. Über alle 12 Ermüdungsversuche dieses Projekts lässt sich beobachten, dass im Frequenzbereich von 4 Hz bis 6 Hz die Temperatur nicht mit der gewählten Frequenz korreliert. Wenn jedoch höhere Beanspruchungen gewählt wurden, wurden jeweils erhöhte Temperaturen gemessen. Bei den 160 mm breiten Prüfkörpern der Versuchsreihen C2 und D2 wurden in der inneren Stangenreihe des oberen Anschlusses immer die höchsten Temperaturen gemessen. Wahrscheinlich lag dies an der höheren Belastung in diesen Stangen und an der wärmedämmenden Wirkung des Holzes. Beim Prüfkörper D2-02 fällt auf, dass sich die Klebfugentemperaturen und deren «Rangfolge» zu dem Zeitpunkt änderten, als sich auch Änderungen beim Traversenweg einstellten (vgl. Abb. 4.42 b) und 4.43 b).

Aus Sicht der Kosten wären höhere Prüffrequenzen und damit eine kürzere Versuchsdauer erstrebenswert. Bei Epoxidharzen findet jedoch infolge einer Temperatur-Erhöhung stets eine Nachvernetzung statt, welche sich günstig auf die mechanischen Eigenschaften des Klebstoffs auswirkt. In der Regel entspricht eine solche Warmaushärtung nicht der tatsächlichen Situation in der Praxis entspricht. Bezüglich der Planung ähnlicher Versuche wird daher empfohlen, die Frequenz von 5 Hz anzunehmen und Klebfugen-Temperaturen unter 40°C anzustreben. Wenn die Temperaturen in den Klebfugen der eingeklebten Stangen überwacht werden, können Frequenzen bis 7 Hz brauchbare Ergebnisse liefern. Eine Raumtemperatur unter 25 °C hilft, während Ermüdungsversuchen die Temperatur im Prüfkörper niedrig zu halten.

5.2.3 Prüfkörper mit rechtwinklig zur Faserrichtung eingeklebten Gewindestangen

Im Rahmen der Versuchsgruppe B wurde ein für Ermüdungsversuche geeigneter Prüfkörper entwickelt, um rechtwinklig zur Faserrichtung eingeklebte Gewindestangen möglichst praxisnah zu belasten. Daraus wurden Erkenntnisse für die Produktion und die Anordnung der Messinstrumente gewonnen. Diese Erkenntnisse konnten in den nachfolgenden Versuchsgruppen C und D erfolgreich umgesetzt werden. Wie in der Einleitung zum Abschnitt 4.3 erläutert, entspricht der Belastungszustand nicht ganz den typischen Verhältnissen eines Fachwerkträger-Knotens. Im Vergleich zu einem Fachwerkknoten wird die in diesem Projekt untersuchte Konfiguration jedoch als konservativ erachtet.

Wie sich in den Versagensbildern (siehe Abschnitte 4.3.2 und 4.4.1.2) zeigte, entstehen im oberen Bereich des Prüfkörpers Querkzugspannungen, die sich mit der Beanspruchung auf Rollschub überlagern. In der Versuchsreihe D2 kamen während der Ermüdungsprüfung im Raumklima auch noch Schwindspannungen aufgrund der Trocknung hinzu. Laut den im Abschnitt 4.6 beschriebenen Holzfeuchtedifferenzen, konnte das Austrocknen durch Abdecken der Stirnholzflächen etwas verringert werden. Trotzdem werden Querkzug- und / oder Schwindrisse aufgrund von Austrocknung als Ursache für die Schwächen des Prüfkörpers D2-02 erachtet (siehe Tabelle 4.29). Um in Prüfkörpern und Tragwerken mit ähnlichen Konfigurationen die Querkzugbeanspruchung zu minimieren, sollten die Abstände zwischen den Ankerreihen, im Verhältnis zur Bauteilhöhe, nicht übermässig gross gewählt werden. In den Prüfkörpern dieses Projekts lag das Verhältnis von Übergreifungslänge (260 mm) zu Ankerabstand (45 mm) bei 5.8.

5.3 Tragwiderstand von eingeklebten Gewindestangen

5.3.1 Steifigkeit und Festigkeit bei statischer Belastung

5.3.1.1 Parallel zur Faserrichtung in Eschen-BSH eingeklebte Gewindestangen

Die Versuchsreihe A2 führte im Rahmen dieses Projekts zu ersten mechanischen Eigenschaften für parallel zur Faserrichtung in Eschen-BSH eingeklebte Gewindestangen unter Bedingungen der Feuchteklasse 2. Trotz einer Holzfeuchte von etwa 20 % erreichten alle vier Prüfkörper das Stahlfließen bei einer Höchstlast von im Mittel 249 kN. Die in der Versuchsreihe A2 ermittelten Anschlusssteifigkeiten lassen sich nicht direkt mit den Versuchsreihen A1 und A3 vergleichen, weil die Verbindungen zwischen den Stangen und den Stahlteilen unterschiedlich waren. Die freie Länge der Stangen war in der Versuchsreihe A2 um 53 mm länger (siehe Anhang E). Mit dem E-Modul von Stahl ($210'000 \text{ N/mm}^2$) für die zwei Gewindestangen M16 gerechnet, ergibt sich daraus ein zusätzlicher Verformungsanteil mit einer Steifigkeit von 1244 kN/mm. Wird die mittlere Anschlusssteifigkeit der Versuchsreihe A2 damit korrigiert, erhöht sie sich auf 334 kN/mm und weicht so nur noch um -3 % von den Anschlusssteifigkeiten der im trockenen Zustand geprüften Prüfkörper der Versuchsreihe A1 ab. Derselbe Vergleich zwischen den geometrisch identischen Versuchsreihen A1 und A3 ergibt eine Steifigkeitsreduktion von -10 %. Die Anschlusssteifigkeit der Prüfkörper der Versuchsreihe A3 wurde sowohl durch die n'H als auch an der Empa gemessen. In diesem Vergleich ergaben die präziseren Messinstrumente der Empa in 6 von 8 Fällen eine grössere Steifigkeit (im Durchschnitt +3 %).

5.3.1.2 Rechtwinklig zur Faserrichtung in Fichten-BSH eingeklebte Gewindestangen

Für die Fichten-BSH-Prüfkörper mit rechtwinklig zur Faserrichtung eingeklebten Gewindestangen lässt sich ein mittlerer Tragwiderstand von 201 kN angeben. Dieser basiert auf den 6 Prüfkörpern der Versuchsreihen B und C1 und wurde bei einer Holzfeuchte von etwa 9 % ermittelt. Aus den 3 Prüfkörpern der Versuchsreihe D1 und den zwei Reserve-Prüfkörpern der Versuchsreihe D2 ergibt sich für 20 % Holzfeuchte ein Mittelwert von 187 kN und damit eine Reduktion von -7 %. Für die Vergleiche der Anschlusssteifigkeiten wird der obere Anschluss (1 x 3) analysiert, weil hier die Messergebnisse weniger stark streuten. Dies dürfte auf das einheitliche Verbindungsdetail zwischen Stangen und Stahlteil zurückzuführen sein. Die Steifigkeiten des unteren Anschlusses wurden je nach Versuchsreihe beeinflusst durch zwei verschiedene Stahlteile mit unterschiedlichen Muttern. Zudem hat die Biegeverformung der Stahlteile den ohnehin schon kleinen Anschlussverformungen entgegengewirkt. Der Einfluss der unterschiedlichen Referenzpunkte bei den Messungen an der Empa und durch die n'H sollte sich mittels Auswertung der Empa-Holzdehnungen berechnen lassen. Darauf wurde jedoch im Rahmen dieses Projekts verzichtet. Für den 1 x 3-Anschluss lässt sich also bei trockenem Holz eine mittlere Steifigkeit von 260 kN/mm angeben. Dieser Wert basiert auf den 9 untersuchten Anschlüssen der Versuchsreihen B, C1 und D1 und weist eine Streuung (Variationskoeffizient, Coefficient of Variation CoV) von 6 % auf. Für die Steifigkeit im feuchten Zustand lassen sich die 9 Prüfkörper der Gruppe D zusammenfassen. Der Mittelwert der Anschlusssteifigkeit liegt bei 198 kN/mm (CoV = 4 %) und damit um -24 % tiefer. Hier gilt es hervorzuheben, dass auch dieser Wert für die Baupraxis eine sehr hohe Steifigkeit darstellt. Die gemessene Verformung von nur etwa 0.4 mm bei einer Belastung von 72 kN veranschaulicht dies. Der Grundsatz, wonach die Anschlusssteifigkeiten bei GSA-Fachwerken in der Regel vernachlässigt werden dürfen, gilt also auch für ermüdungsbeanspruchte Fachwerke.

5.3.2 Tragwiderstand bei Ermüdungsbelastung

5.3.2.1 Parallel zur Faserrichtung in Eschen-BSH eingeklebte Gewindestangen

Die Versuche in der Versuchsreihe A3 führten zu positiven Ergebnissen für parallel zur Faserrichtung in Eschen-BSH eingeklebte Gewindestangen unter Ermüdungsbelastung bei Bedingungen der Feuchtekategorie 2. Trotz einer Holzfeuchte von etwa 20 % erreichten 3 Prüfkörper die angestrebten 2 Mio. Lastwechsel ohne zu versagen, obwohl die Belastung auf dem Niveau der trocken geprüften Versuchsreihe A1 gehalten wurde. Die Spannung in der Klebfuge bei Oberlast betrug in diesen Versuchen 3.4 N/mm^2 (bezogen auf den Nenndurchmesser der Gewindestange und die wirksame Verankerungslänge).

5.3.2.2 Rechtwinklig zur Faserrichtung in Fichten-BSH eingeklebte Gewindestangen

Bei den Fichten-BSH-Prüfkörpern mit rechtwinklig zur Faserrichtung eingeklebten Gewindestangen konnte in einem Versuch (D2-01) Versagen im Ermüdungsversuch beobachtet werden. Dabei zeigte sich dasselbe Versagensbild wie in den statischen Zugversuchen. Es bestätigte sich, dass bei solchen Anschlüssen die Eigenschaften des Holzes (Rollschubfestigkeit) auch unter der gewählten zyklischen Belastung massgebend bleiben. In den Versuchen der Versuchsreihe C2, bei einer Holzfeuchte von etwa 9 %, wurden 3 Prüfkörper planmässig auf 2 Mio. Lastwechsel geprüft. Ein vierter Prüfkörper konnte sogar mit 3 Mio. Lastwechsel belastet werden, weil es die Belegung der Prüfmaschine mit der gewählten Frequenz von 7 Hz gerade zulies. Die Spannung in der Klebfuge bei Oberlast betrug in diesen Versuchen 2.1 N/mm^2 . In der Versuchsreihe D2, bei einer Holzfeuchte von anfänglich etwa 20 %, erreichten 3 Prüfkörper die angestrebten 2 Mio. Lastwechsel. Dazu musste jedoch die Belastung auf 80 % des anhand der trockenen Prüfkörper festgelegten Niveaus reduziert werden. Obwohl die Zielsetzung somit grundsätzlich erreicht wurde, ist zu beachten, dass beim Prüfkörper D2-02 die Traversenwege bei der Unterlast und bei der Oberlast ab 1.37 Mio. Lastwechseln zu steigen begannen (siehe Abb. 4.43 b). Dies wird auf die infolge Trocknung des Prüfkörpers entstehenden Schwind- und / oder Querkugrisse zurückgeführt. Ob eine solche Veränderung des Verhaltens bereits als Versagen gilt, kann nur im Zusammenhang mit den Ergebnissen der Ausziehprüfung beurteilt werden.

5.3.3 Reststeifigkeit und Restfestigkeit nach den Ermüdungsversuchen

5.3.3.1 Parallel zur Faserrichtung in Eschen-BSH eingeklebte Gewindestangen

Die statischen Zugversuche an parallel zur Faserrichtung in Eschen-BSH eingeklebten Gewindestangen, welche nach den Ermüdungsversuchen durchgeführt wurden, bestätigten, dass die Verbindungen durch die aufgetragenen zyklischen Beanspruchungen nicht wesentlich beeinträchtigt wurden. Sowohl im trockenen Zustand wie auch bei einer Holzfeuchte von etwa 17 % wurde das Stahlfließen der Gewindestangen erreicht und der für trockenes Holz definierte charakteristische Wert für statische Kurzzeitprüfungen wurde deutlich übertroffen. Der Unterschied von +8 % beim Mittelwert des Tragwiderstands der Prüfkörper der Versuchsreihe A3 (Duplex) gegenüber jenem der Prüfkörper der Versuchsreihe A2 (FK 8.8) ist auf die Stahlqualität der Gewindestangen zurückzuführen. Der Einfluss der Ermüdungsversuche auf die Anschlusssteifigkeit liess sich, wie im Abschnitt 4.2.1.6 beschrieben, für die Versuchsreihe A1 nicht auswerten. Anhand der Versuchsreihe A3 liess sich jedoch messen, dass auch diesbezüglich keine Schädigung in den Anschlüssen eingetreten war. Ganz im Gegenteil: Es wurde sogar bei jedem der 6 Anschlüsse eine Steigerung der Steifigkeit zwischen der Vorbelastung und dem Ausziehversuch festgestellt. Diese Erhöhung des Mittelwerts um +10 % wird auf das Absinken der Holzfeuchte (von etwa 20 % auf etwa 17 %) und auf die Nachvernetzung (Warmaushärtung) des Klebstoffs während des Ermüdungsversuchs zurückgeführt.

5.3.3.2 Rechtwinklig zur Faserrichtung in Fichten-BSH eingeklebte Gewindestangen

An den 8 auf Ermüdung geprüften Fichten-BSH-Prüfkörpern mit rechtwinklig zur Faserrichtung eingeklebten Gewindestangen konnten 7 Ausziehversuche durchgeführt werden. Bei einer Holzfeuchte von etwa 7 % ergaben sich bei den ersten 3 Prüfkörpern der Versuchsreihe C2 kaum schlechtere Tragwiderstände nach 2 Mio. Lastwechseln. Diese lagen im Mittel um -2 % tiefer. Nach 3 Mio. Lastwechseln lag der Tragwiderstand beim Prüfkörper C2-04 um -17 % unter dem Mittelwert der Prüfkörper der Versuchsreihen B und C1. Die Steifigkeit des 1 x 3-Anschlusses nahm beim Prüfkörper C2-02 um +4 % zu und beim Prüfkörper C2-03 um -13 % ab. Nach 3 Mio. Lastwechseln wurde beim Prüfkörper C2-04 eine um -18 % geringere Anschlusssteifigkeit gemessen.

Ein deutlicheres Bild zeigte sich bei der Versuchsreihe D2 an den Prüfkörpern mit rund 18 % Holzfeuchte nach den Ermüdungsversuchen. Als Mittelwert der 2 Prüfkörper D2-03 und D2-04 ergab sich ein Tragwiderstand von 166 kN. Gegenüber den 5 statischen Zugversuchen bei gleicher Holzfeuchte (Reihe D1 sowie D2-05 und D2-06) entspricht dies einer Reduktion von -11 %. Im Vergleich zum Mittelwert der trocken geprüften Prüfkörper der Versuchsreihen B und C1 beträgt die Abnahme -18 %. Der Prüfkörper D2-02 wies einen Auszieh-widerstand von 117 kN auf und liegt somit um -37 % unter dem Mittelwert von feuchten Prüfkörpern ohne Ermüdungsversuch. Die Steifigkeit des oberen Anschlusses lag bei diesem Prüfkörper nach dem Ermüdungsversuch -76 % niedriger als bei der Vorbelastung. Die Anschlussverformung bei 72 kN erreichte fast 1.6 mm. Daraus kann gefolgert werden, dass der Prüfkörper D2-02 während dem Ermüdungsversuch eine wesentliche Schädigung erlitten hatte. Die oberen Anschlüsse der zwei verbleibenden Prüfkörper waren nach dem Ermüdungsversuch ebenfalls deutlich weniger steif. Beim Prüfkörper D2-03 betrug die Reduktion -24 % und beim Prüfkörper D2-04 waren es -37 %. Der Mittelwert der Anschlusssteifigkeiten dieser beiden Prüfkörper von 128 kN/mm liegt um -51 % tiefer als der Mittelwert ohne Ermüdungsversuche im trockenen Zustand.

5.3.4 Einfluss der Holzfeuchte

5.3.4.1 Generelles

Im Vergleich mit den Beiwerten η_w zur Erfassung des Einflusses der Holzfeuchte auf die mechanischen Eigenschaften (Festigkeiten und Steifigkeiten) nach Norm SIA 265 [1] dürfen die Ergebnisse dieser Untersuchung als eher konservativ gesehen werden. Die Holzfeuchte der trockenen Prüfkörper war mit etwa 8 bis 9 % niedriger als der normative Referenzwert von 12 %. Sowohl die Prüfkörper der Versuchsreihe A2 mit den gesägten «Schwindrissen» als auch diejenigen der Versuchsreihe D2 zeigten die Relevanz von auftretenden Rissen in den geprüften Konfigurationen auf.

5.3.4.2 Parallel zur Faserrichtung in Eschen-BSH eingeklebte Gewindestangen

Bei den parallel zur Faserrichtung in Eschen-BSH eingeklebten Gewindestangen war nur der Einfluss der Holzfeuchte auf die Steifigkeit (Anschluss und E-Modul) messbar. Aufgrund des eingetretenen Stahlfließens in den Gewindestangen lässt sich der Einfluss der Holzfeuchte auf den Tragwiderstand nicht quantifizieren. Für die Bemessung eines Tragwerks in der Feuchteklasse 2 wird vorgeschlagen, die Holzfeuchtebeiwerte gemäss Norm SIA 265 von $\eta_w = 0.8$ für die Festigkeit und $\eta_w = 0.9$ für die Steifigkeit anzusetzen. Die Versagensbilder nach den Ausziehversuchen bei etwa 20 % Holzfeuchte zeigten, dass in diesem Zustand die zerbröselten Bereiche in den Klebfugen kürzer waren oder gar nicht auftraten. Dies bestätigt, dass die niedrigere Steifigkeit die Bruchdehnung des Holzes parallel zur Faserrichtung ($\epsilon_{u, \text{tim}}$ gemäss FprEN 1995-1-1:2024 [2]) tendenziell erhöht.

5.3.4.3 Rechtwinklig zur Faserrichtung in Fichten-BSH eingeklebte Gewindestangen

Aus den Versuchen an den Fichten-BSH-Prüfkörpern mit rechtwinklig zur Faserrichtung eingeklebten Gewindestangen lässt sich folgern, dass die Holzfeuchte einen Einfluss auf die Ergebnisse der geprüften Konfiguration hat. Das Versagen des auf Rollschub beanspruchten Holzes in den beiden Ebenen zwischen den Stangenreihen trat bei höherer Holzfeuchte auf niedrigerem Beanspruchungsniveau ein. Während der mittlere Tragwiderstand im statischen Zugversuch lediglich -7 % tiefer lag, führten die bei den Ermüdungsversuchen entstandenen Risse zu einer Reduktion im anschliessenden Ausziehversuch von -18 %. In Übereinstimmung mit der gewählten Belastung im Ermüdungsversuch, wird für die Bemessung eines Tragwerks in der Feuchteklasse 2 empfohlen, den Holzfeuchtebeiwert gemäss Norm SIA 265 von $\eta_w = 0.8$ anzusetzen, die Festigkeit also um 20% zu reduzieren. Was die Steifigkeit betrifft, sollte bei der Bemessung eines Tragwerks weiterhin die Relevanz von Anschlussverformungen im konkreten Fall beurteilt werden. Zudem hängt der zu wählende Reduktionsfaktor zur Berücksichtigung des Einflusses der Holzfeuchte davon ab, wie hoch der Ausgangswert der Anschlusssteifigkeit in der Feuchteklasse 1 für einen spezifischen Gewindestangen-Anschluss festgelegt wird.

5.4 Fazit

Die im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Versuche zeigten, dass mit in BSH eingeklebten Gewindestangen auch in Bauteilen mit Holzfeuchten bis 20 % tragfähige und steife Verbindungen realisiert werden können. Dabei liess sich feststellen, dass die Klebfugen in keinem der untersuchten Prüfkörper die schwächste Komponente darstellten. Wie bei der Projektplanung beabsichtigt, konnten Versagensmodi in Holz und Stahl erforscht werden. So brachte das Projekt wertvolle Erkenntnisse für die Praxis-Anwendung von eingeklebten Gewindestangen als Verbindungsmittel im Holzbau generell. Dies unterstützt die sichere Anwendung der Holzbauweise für stark frequentierte Brücken mit Ermüdungsbeanspruchung.

Das gewählte Versuchskonzept mit den Prüfkörpern aus Eschen-BSH ermöglichte erfolgreiche Ermüdungsversuche mit 2 Mio. Lastwechseln, in welchen die Oberlast eine nominelle Scherspannung in der Klebfuge von 3.4 N/mm^2 erzeugte. Die Prüfkörper der Versuchsreihe A1 werden als bewährte Methode vorgeschlagen, auf Basis derer sich auch andere Varianten von Verbindungen mit eingeklebten Gewindestangen auf ihre Beständigkeit gegenüber Ermüdungsbelastungen prüfen lassen. Die zweite Konfiguration mit den Prüfkörpern aus Fichten-BSH erfüllte die Erwartungen ebenfalls, wonach sich das Versagen der zwischen den Stangenreihen liegenden, auf Rollschub beanspruchten Holzschicht in allen Versuchsreihen als kritisch erwies. Ein Prüfkörper zeigte auf, dass die Beobachtung der Verformungen während dem Ermüdungsversuch wichtig ist und dass Ausziehversuche nach den Ermüdungsversuchen deren Aussagekraft erhöhen. Entsprechende Kriterien für einen zulässigen Verlauf der Ganglinien und bezüglich der Restfestigkeit und Reststeifigkeit sind noch zu definieren. Bezüglich der Planung ähnlicher Versuche wird auf die lange Zeitdauer hingewiesen, welche für die Herstellung von BSH mit besonderer Holzfeuchte und für die Klimatisierung der Prüfkörper benötigt wurde. Dank sorgfältiger Sortierung des Grundmaterials (Brettschichtholzlamelle) konnten Prüfkörper mit homogenen Eigenschaften produziert werden. Die einheitliche Dichte als primäres Kriterium hat es ermöglicht, die Streuungen zu minimieren. So liessen sich die Effekte beobachten, wie dies mit den gewählten, über die Versuchsreihen gezielt veränderten Parametern angestrebt worden war. Die Verwendung des GSA-Systems und dessen qualitätskontrollierte Ausführung hat ebenfalls zu den angestrebten geringeren Streuungen in den Ergebnissen beigetragen.

Aus Sicht der Forschung sind die durchgeführten Versuche als aussergewöhnlich zu bezeichnen, da es bisher nur wenig experimentelle Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten von Holzverbindungen gibt. Gemäss dem Kenntnisstand der Autoren wurden im Rahmen dieses Projekts erstmals Holzverbindungen mit praxisnahen Abmessungen in der Feuchteklasse 2 auf Ermüdung untersucht. Somit konnte ein Beitrag zur Füllung dieser Wissenslücke geleistet werden. Die grosse Relevanz von Holzfeuchte und von Feuchtigkeitsschwankungen, was die mechanischen Eigenschaften von Verbindungsmitteln im Holzbau betrifft, wurde bestätigt. Für die Zukunft bleibt zu hoffen, dass die Praxis und die Normung die Forschung zu diesem Thema mit geklebten und mechanischen Verbindungsmitteln gleichermassen weiter vorantreiben.

5.5 Literatur zum Kapitel 5

1. SIA (2021): Norm SIA 265 Holzbau. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich, Schweiz,
2. CEN (2024): FprEN 1995-1-1. Design of timber structures, Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium,

Anhang A

Eingeklebte Gewindestangen im Brückenbau

Pläne der Prüfkörper

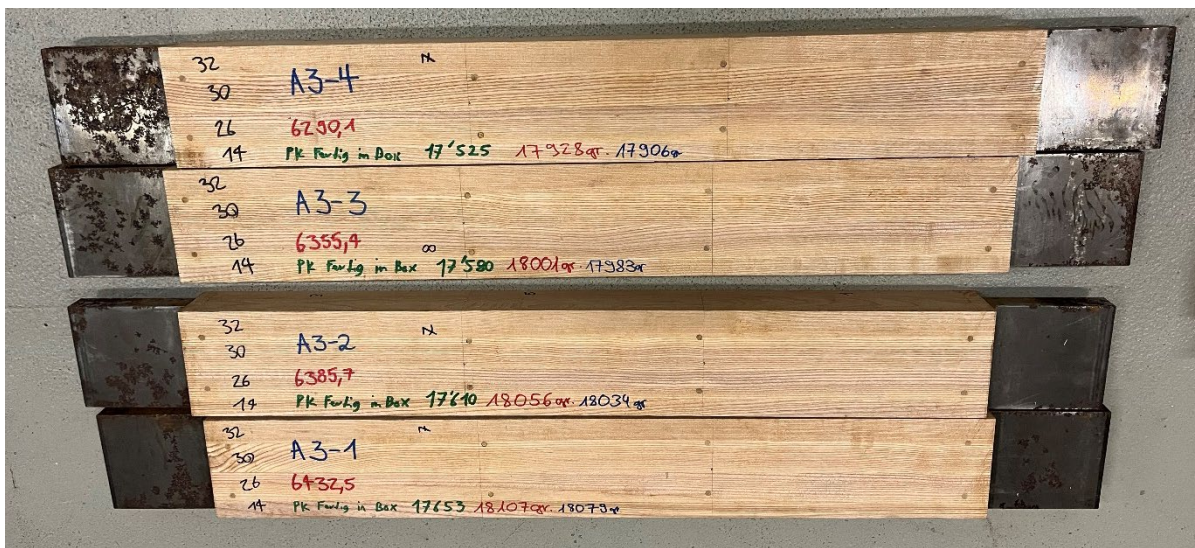
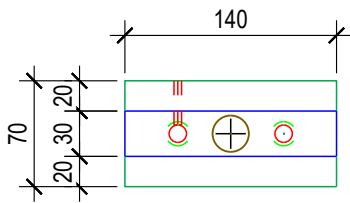
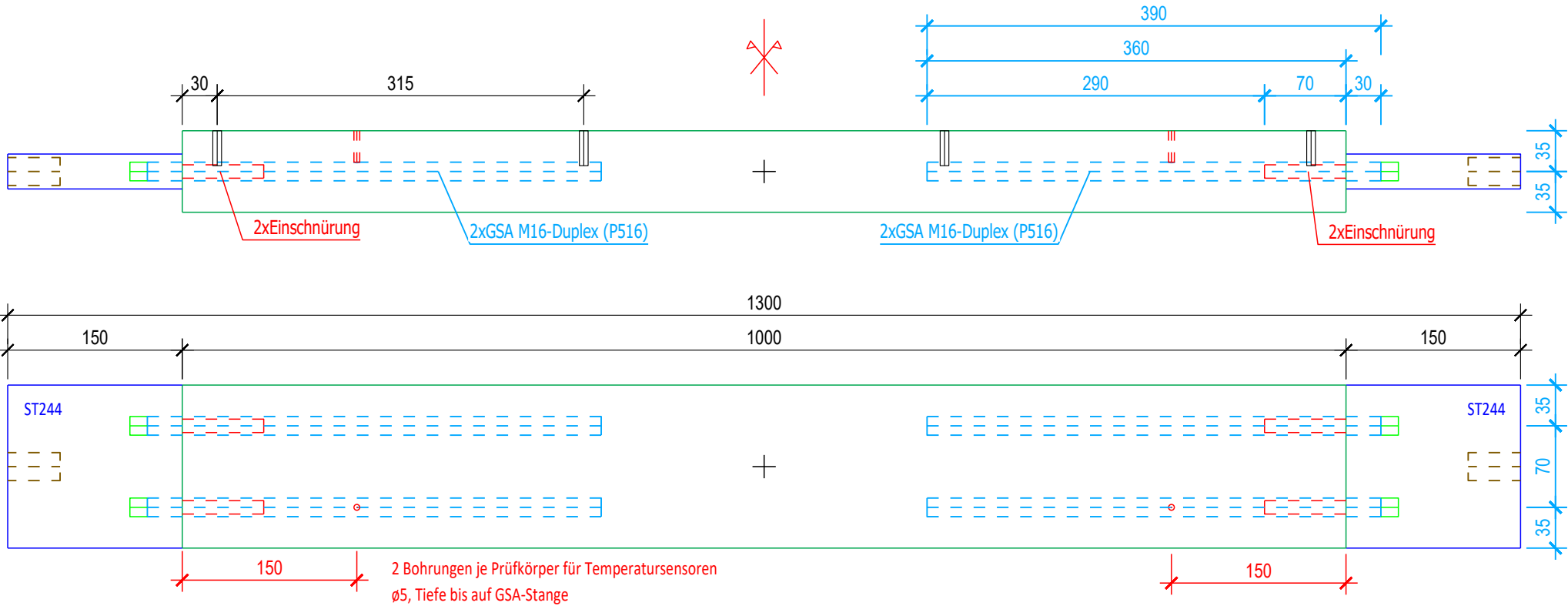
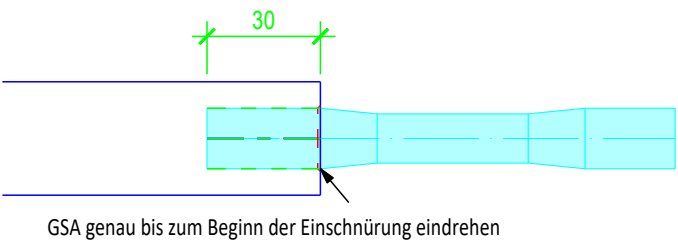
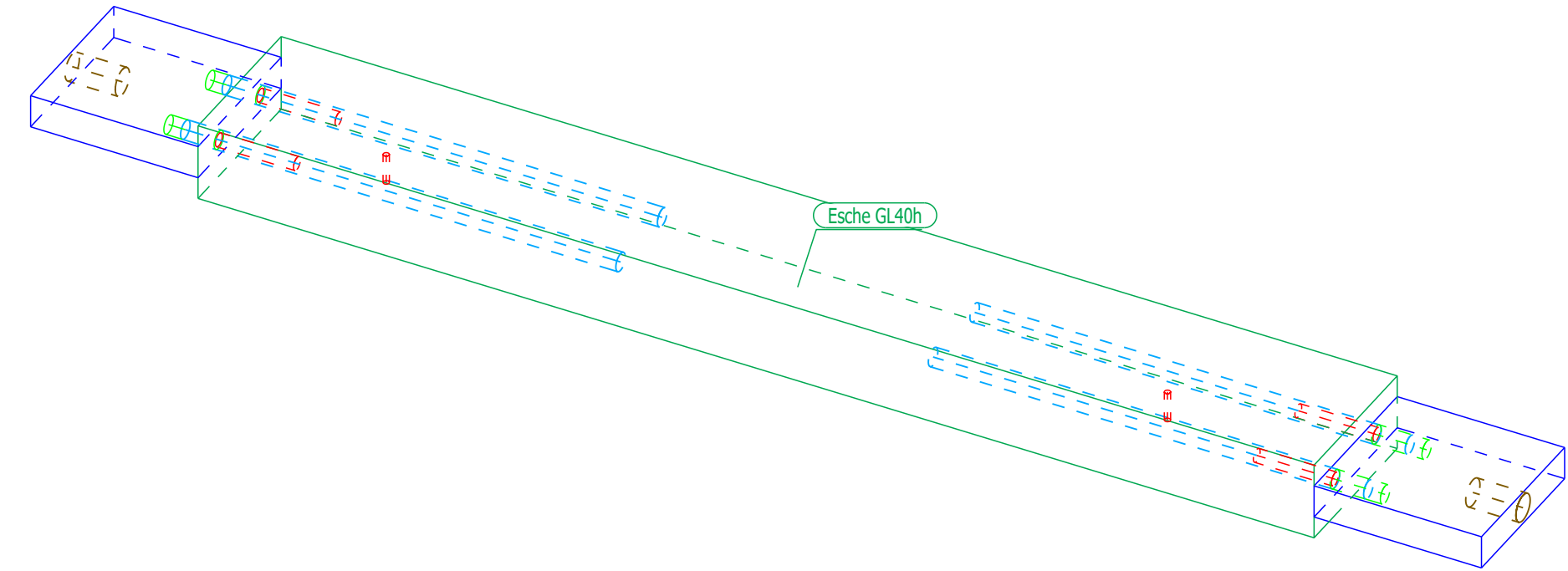


Abb. A.1: Prüfkörper der Gruppe A (Beispiel: Versuchsreihe A3).



Abb. A.2: Prüfkörper der Gruppen B, C und D (Beispiel: Versuchsreihe C2).

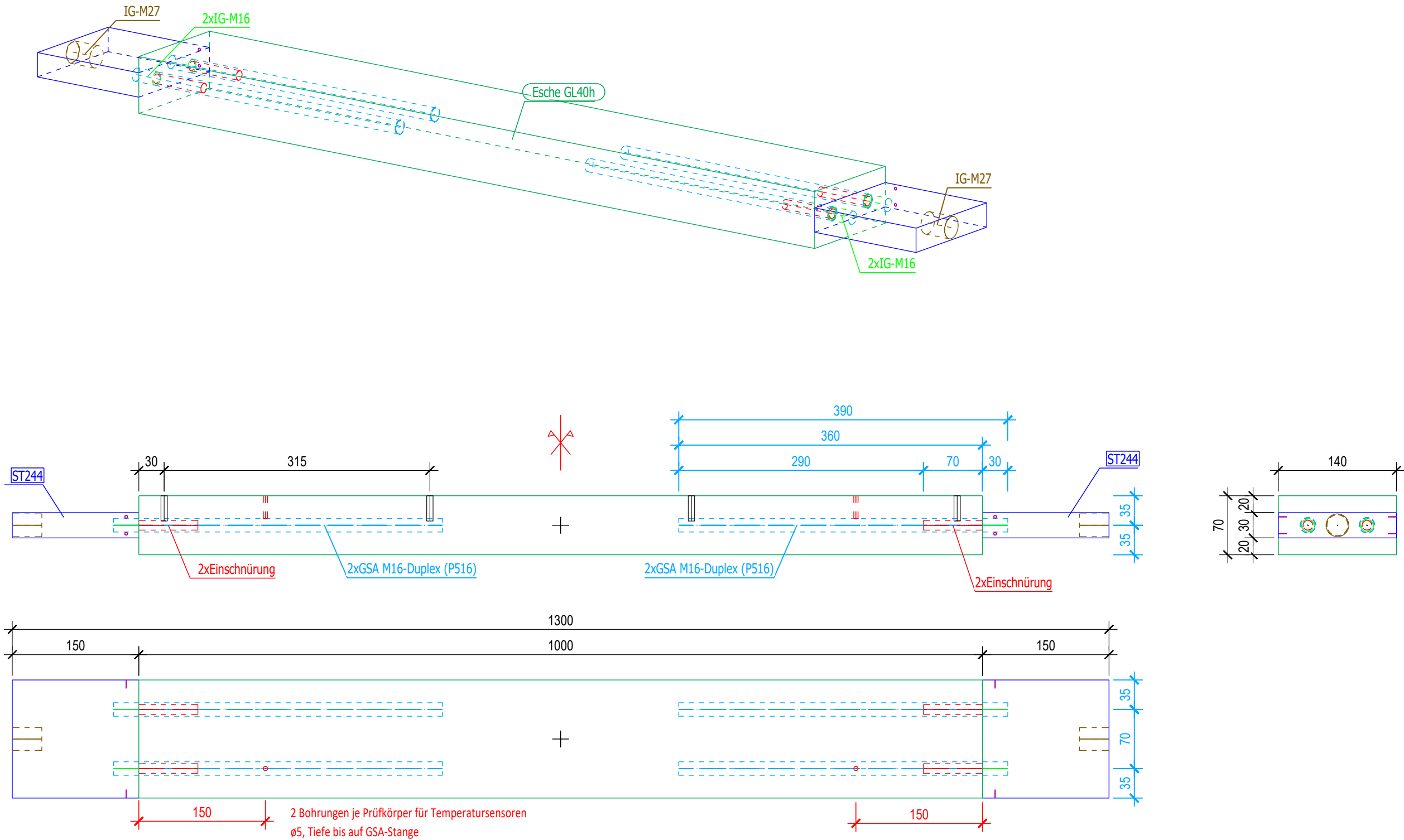
Bauherr / owner	Ermüdung ohne Vorspannung		
Objekt / project	F&E intern		
Kunde / client	neue Holzbau AG Lungern		
Werkplan Prüfkörper A1 (5 Stück)		scale:	1:5
		drawing:	10.05.21 brm
		control class:	KK2 brm
		size:	A3
© neue Holzbau AG Lungern		N:\500_Engineering\531_F+E\02_Projekte\9505-123_WHFF-Ermüdung\650.Statik\9505-123_Statik_22-07-05_brm.2d	
neue Holzbau AG		Holzleimbau	
6078 Lungern		Ingenieur-Holzbau	
041/679 70'80		GSA®-Technologie	
holzbau@neueholzbau.ch		CNC-Abbundtechnik	
		Plan-No.	9505-122



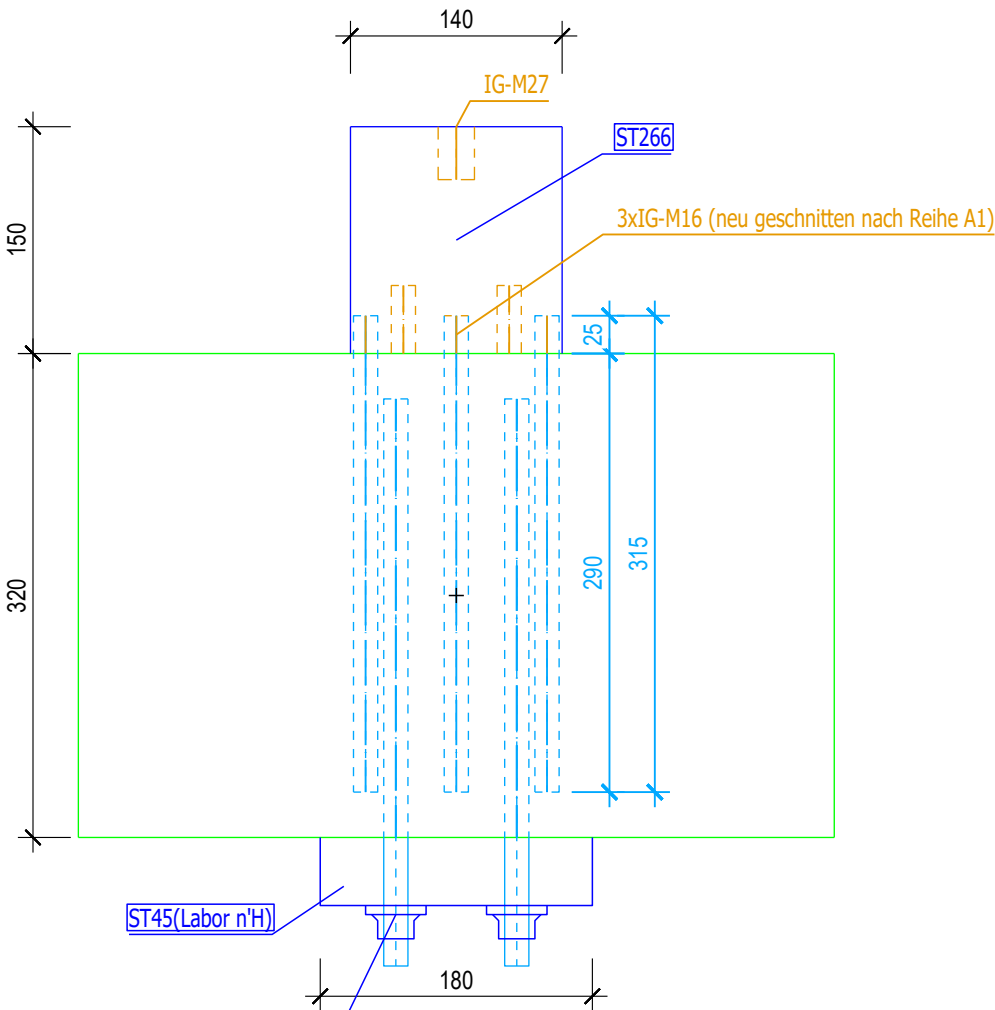
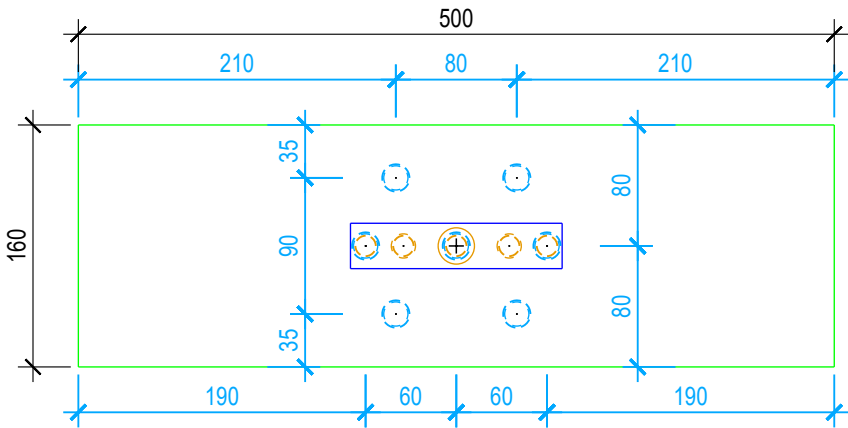
Bauherr / owner	GSA-Ermüdung		
Objekt / project	WHFF		
Kunde / client	neue Holzbau AG Lungern		
Werkplan Prüfkörper A3 (4 Stück)		scale:	1:5
		drawing:	28.06.23 brm
		control class:	KK2 brm
		size:	A3
© neue Holzbau AG Lungern		N:\500_Engineering\531_F+E\02_Projekte\9505-123_WHFF-Ermüdung\650.Statik\9505-123_Statik_22-07-05_brm.2d	
neue Holzbau AG		Holzleimbau	
6078 Lungern		Ingenieur-Holzbau	
041/679 70 80		GSA®-Technologie	
holzbau@neueholzbau.ch		CNC-Abundtechnik	
www.neueholzbau.ch		Plan-No.	
		9505-123	

Vorgaben

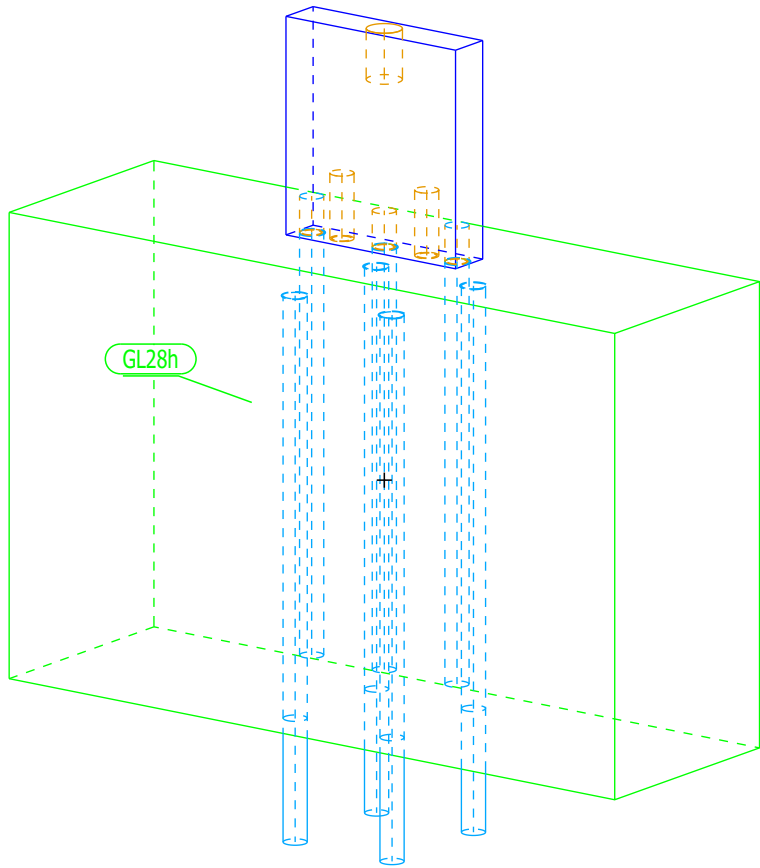
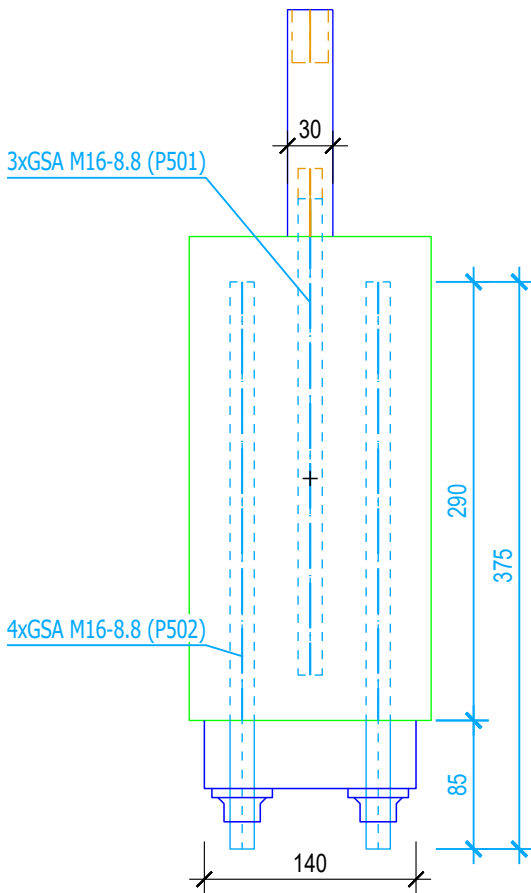
- Nach Fertigung gemäss separatem Plan in die Klimaboxen verteilen



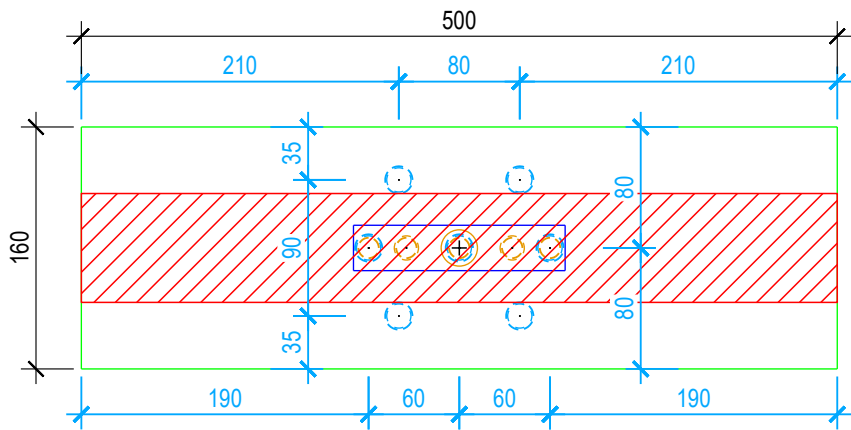
Bauherr / owner	GSA-Ermüdung			
Objekt / project	WHFF			
Kunde / client	neue Holzbau AG Lungern			
Werkplan Prüfkörper B (3 Stück)			scale:	1:5
			drawing:	15.05.23 brm
			control class:	KK2 brm
			size:	A3
© neue Holzbau AG Lungern				
N:\500_Engineering\531_F+E\02_Projekte\9505-123_WHFF-Ermüdung\650.Statik\9505-123_Statik_22-07-05_brm.2d				
neue Holzbau AG		Holzleimbau		Plan-No. 9505-123
6078 Lungern		Ingenieur-Holzbau		
041/679 70'80		GSA®-Technologie		
holzbau@neueholzbau.ch		CNC-Abundtechnik		
www.neueholzbau.ch				



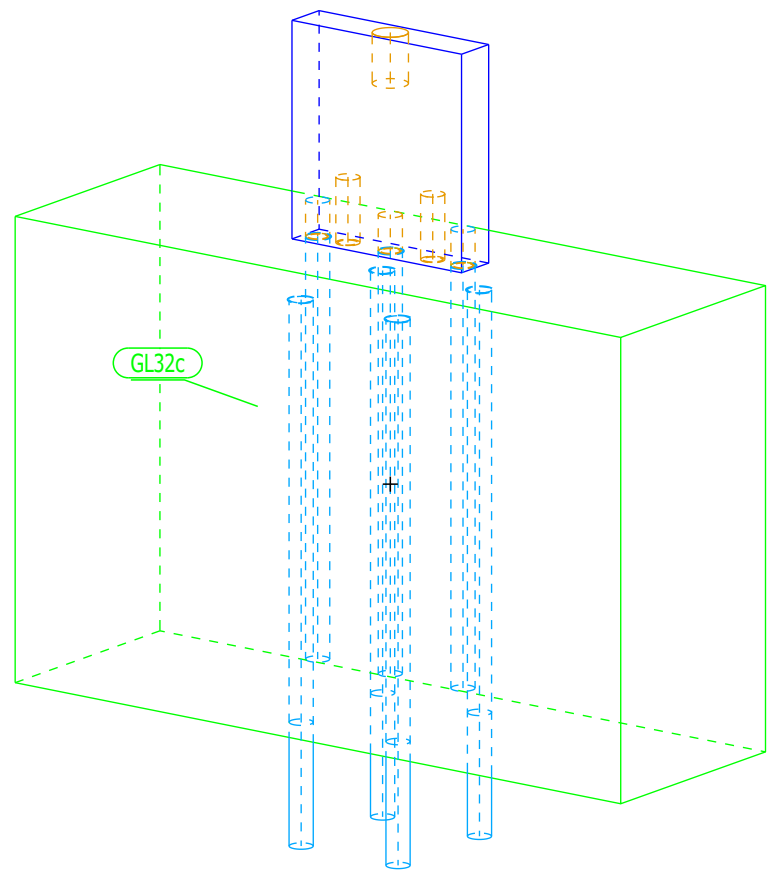
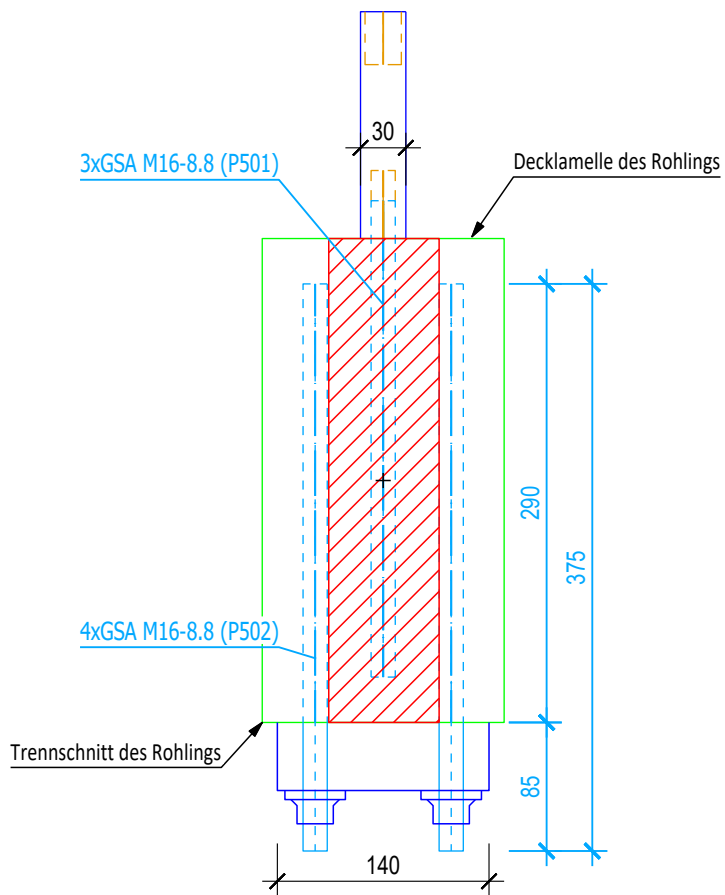
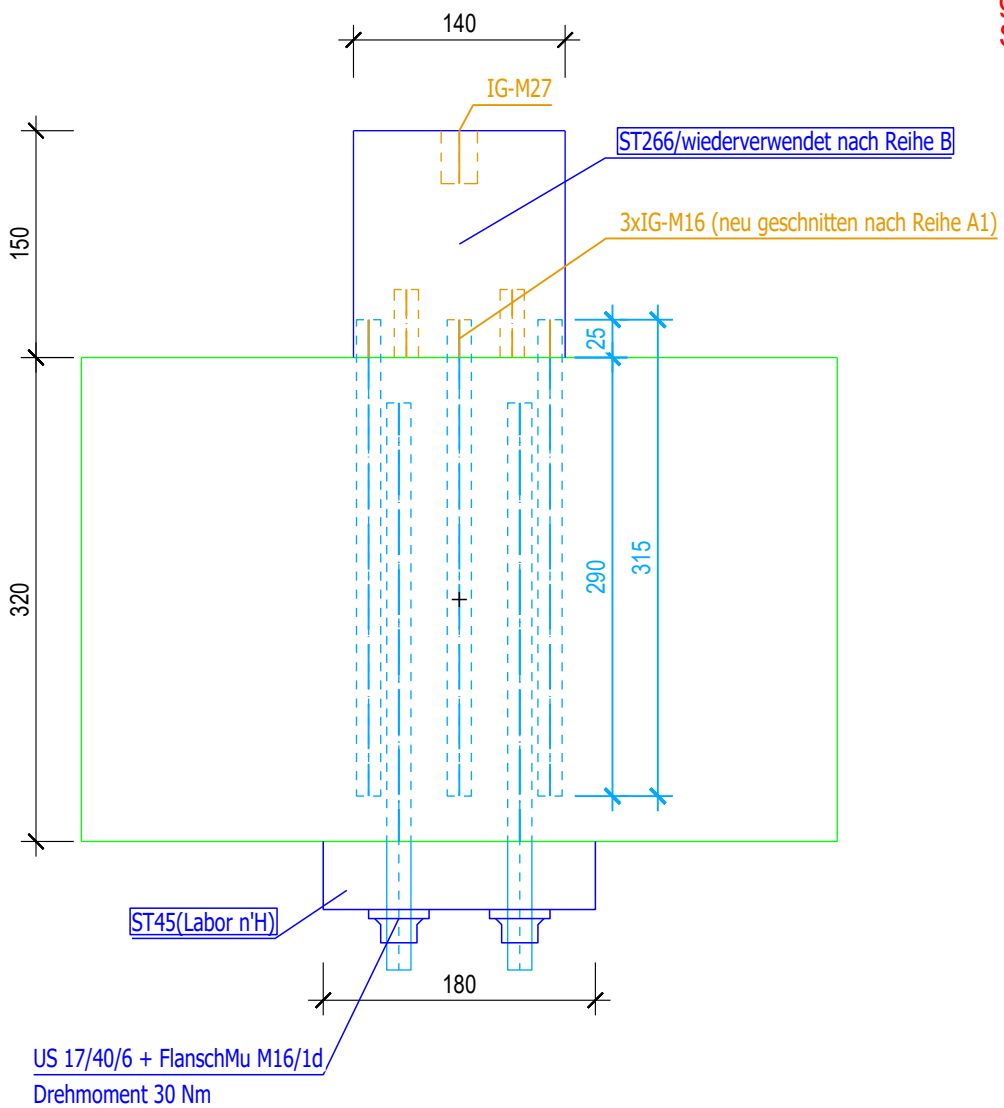
US 17/40/6 + FlanschMu M16/1d
Drehmoment 30 Nm



Bauherr / owner	GSA-Ermüdung		
Objekt / project	WHFF		
Kunde / client	neue Holzbau AG Lungern		
Werkplan Prüfkörper C1 (3 Stück) © neue Holzbau AG Lungern N°1500_Engineering\531_F+E\02_Projekte\9505-123_WHFF-Ermüdung\650.Statik\9505-123_Statik_22-07-05_brm.2d neue Holzbau AG 6078 Lungern 041/679 70'80 holzbau@neueholzbau.ch		scale:	1:5
		drawing:	02.06.23 brm
		control class:	KK2 brm
		size:	A3
 Holzeimbau Ingenieur-Holzbau GSA®-Technologie CNC-Abundtechnik		Plan-No.	9505-123



Im Bereich der rot schraffierten Fläche soll nicht geschraubt werden! -> 6er-Torx zur Befestigung des Stahlteils/GSA ausserhalb dieser Zone.



Bauherr / owner	GSA-Ermüdung			
Objekt / project	WHFF			
Kunde / client	neue Holzbau AG Lungern			
Werkplan Prüfkörper C2 (4 Stück)			scale:	1:5
			drawing:	27.06.23 brm
			control class:	KK2 brm
			size:	A3
© neue Holzbau AG Lungern				
N:\500_Engineering\531_F+E\02_Projekte\9505-123_WHFF-Ermüdung\650_Statik\9505-123_Statik_22-07-05_brm.2d				
neue Holzbau AG		Holzleimbau		Plan-No. 9505-123
6078 Lungern		Ingenieur-Holzbau		
041/679 70 80		GSA®-Technologie		
holzbau@neueholzbau.ch		CNC-Abundtechnik		

Vorgaben

- GSA 504 mit Hilfe von Schablonen, siehe Bild 1, ausrichten. Die Bohrungen der Stahlteile sind passgenau, Ø17mm =>Die Schablonen werden für die Reihe D2 nochmals benötigt

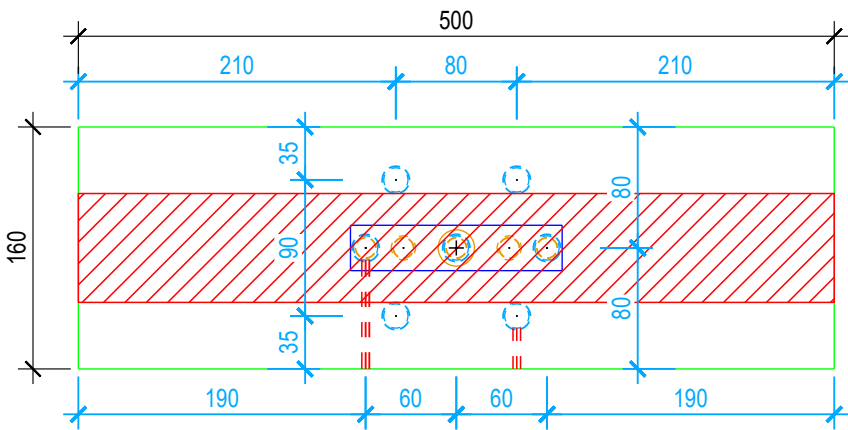
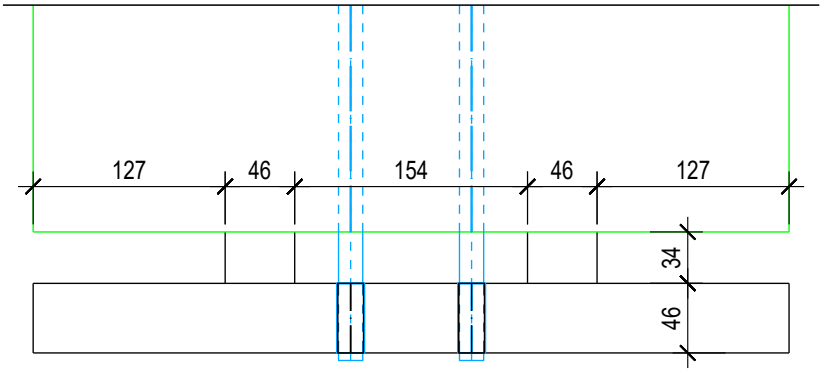
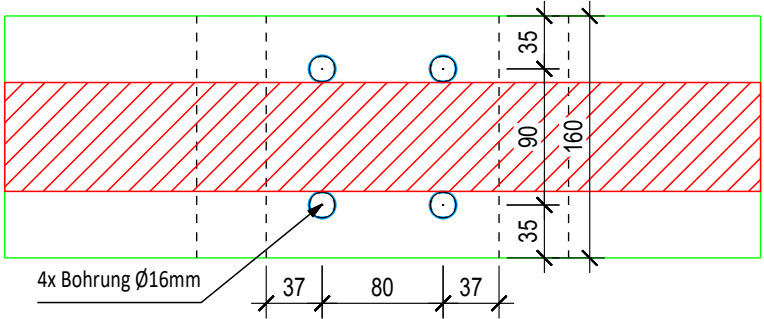
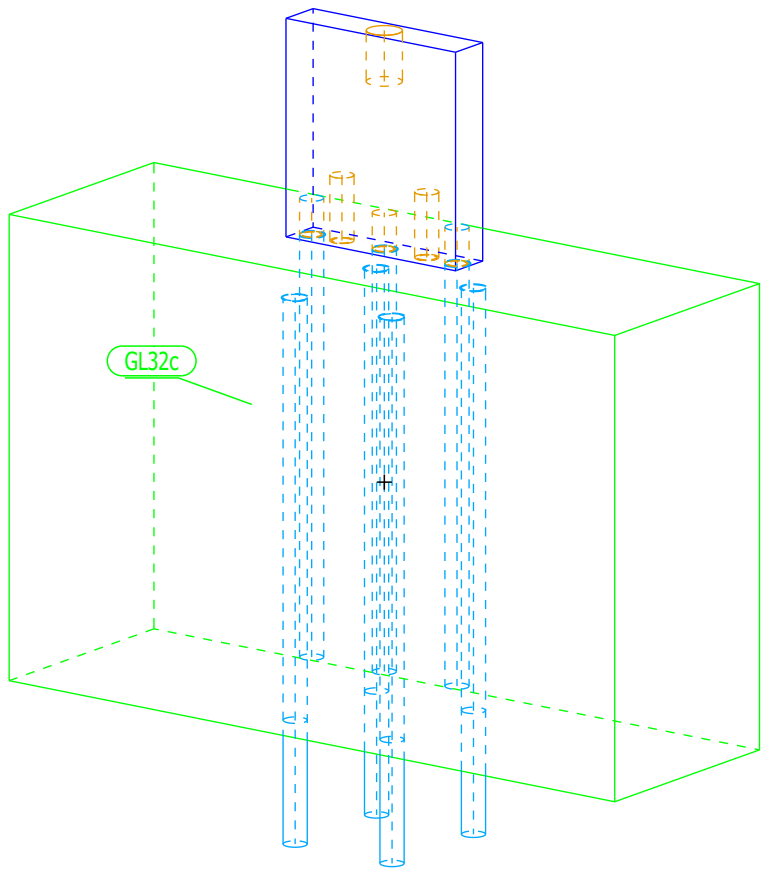
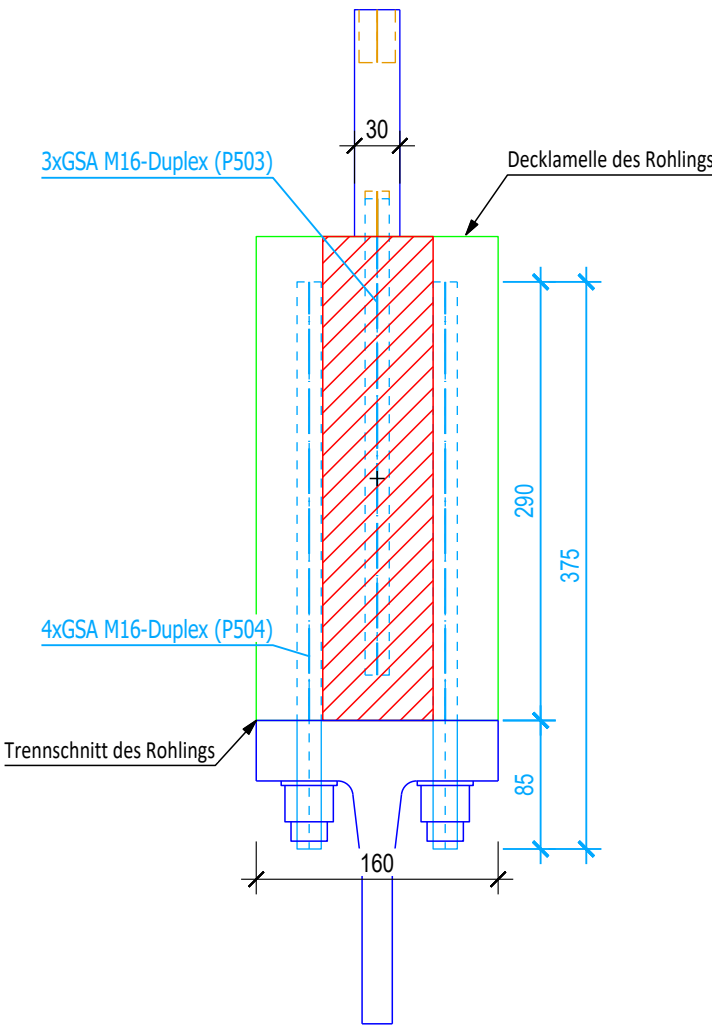
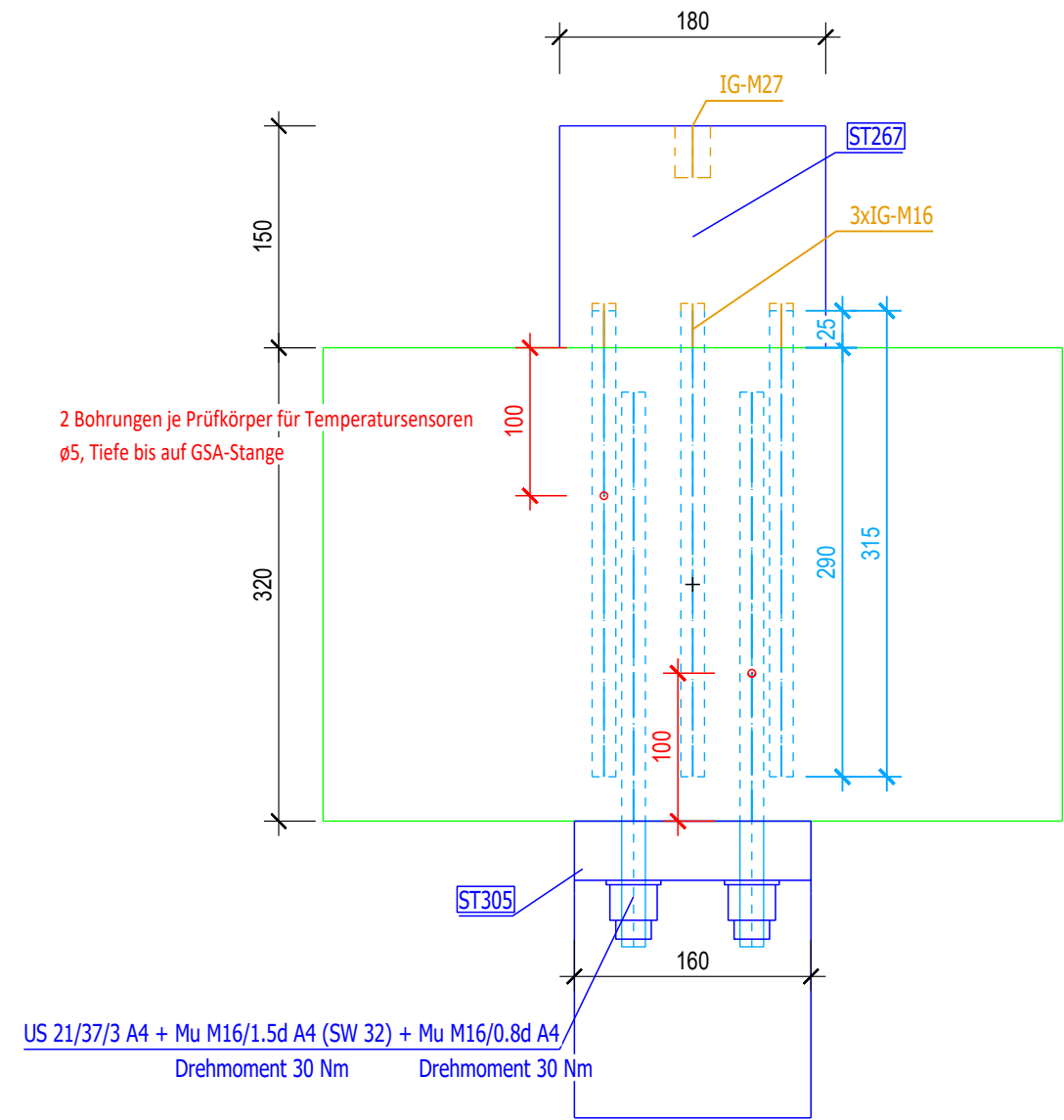


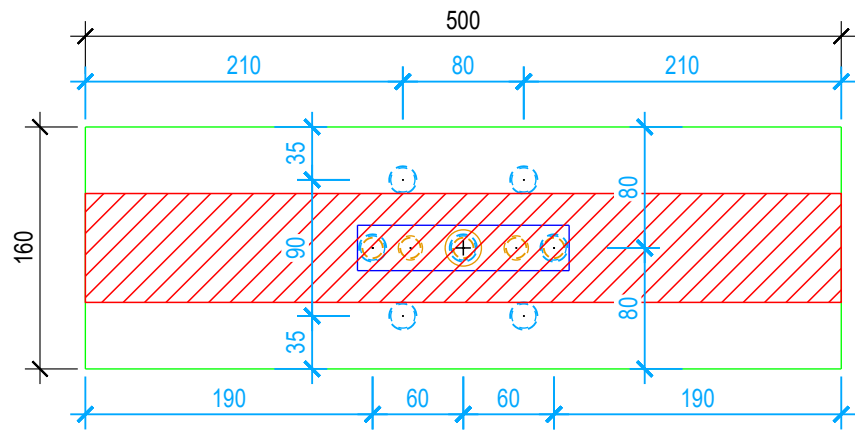
Bild 1



Im Bereich der rot schraffierten Fläche soll nicht geschraubt werden! -> 6er-Torx zur Befestigung des Stahlteils/GSA ausserhalb dieser Zone.



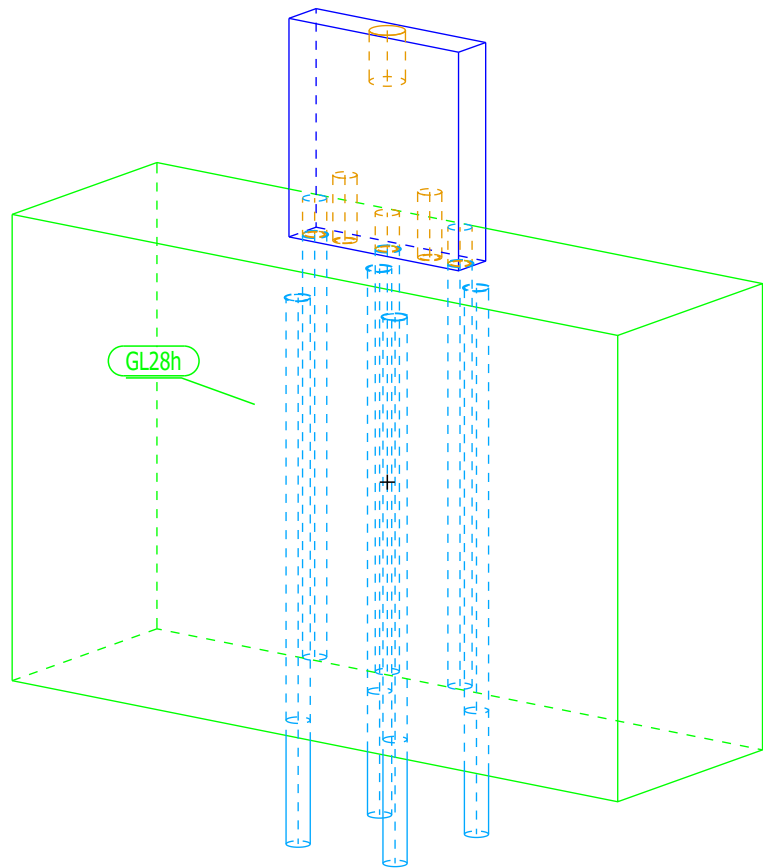
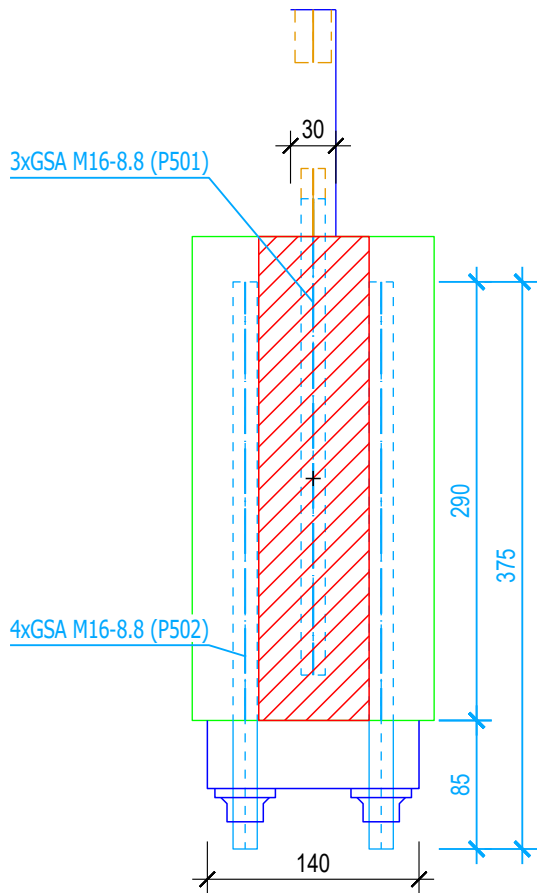
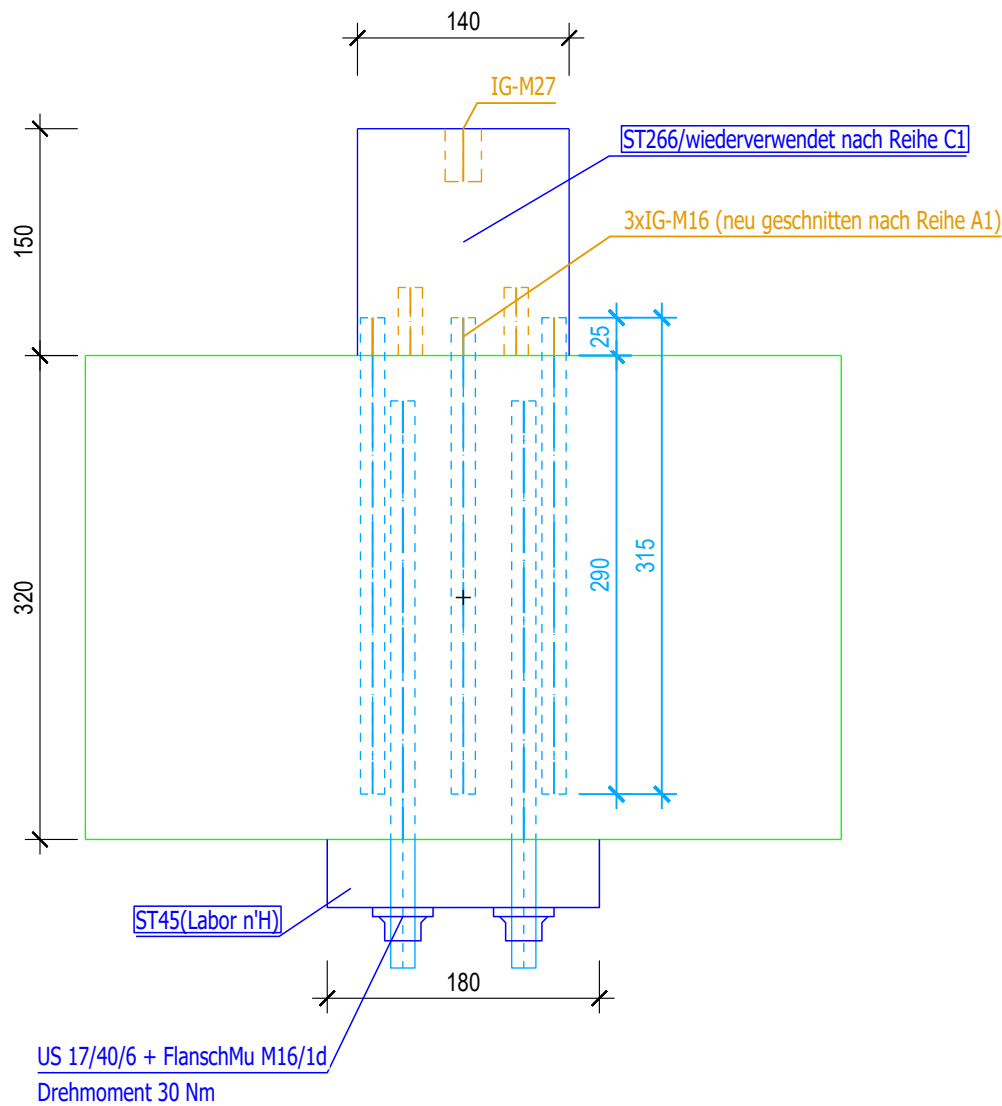
Bauherr / owner	GSA-Ermüdung		
Objekt / project	WHFF		
Kunde / client	neue Holzbau AG Lungern		
Werkplan Prüfkörper D1 (3 Stück)		scale:	1:5
		drawing:	28.06.23 brm
		control class:	KK2 brm
		size:	A3
© neue Holzbau AG Lungern		Plan-No.	
N:\500_Engineering\531_F+E\02_Projekte\9505-123_WHFF-Ermüdung\650.Statik\9505-123_Statik_22-07-05_brm.2d		9505-123	
neue Holzbau AG			
6078 Lungern			
041/679 70 80			
holzbau@neueholzbau.ch			
		Holzleimbau Ingenieur-Holzbau GSA®-Technologie CNC-Abundtechnik	
www.neueholzbau.ch			



Vorgaben

- GSA 502 einigermaßen exakt richten
- Nach Fertigung gemäss separatem Plan in die Klimaboxen verteilen

Im Bereich der rot schraffierten Fläche soll nicht geschraubt werden! -> 6er-Torx zur Befestigung des Stahlteils/GSA ausserhalb dieser Zone.



Bauherr / owner	GSA-Ermüdung			
Objekt / project	WHFF			
Kunde / client	neue Holzbau AG Lungern			
Werkplan Prüfkörper D2 (6 Stück)			scale:	1:5
			drawing:	28.06.23 brm
			control class:	KK2 brm
			size:	A3
© neue Holzbau AG Lungern				
N:\500_Engineering\531_F+E\02_Projekte\9505-123_WHFF-Ermüdung\650.Statik\9505-123_Statik_22-07-05_brm.2d				
neue Holzbau AG			Holzleimbau	
6078 Lungern			Ingenieur-Holzbau	
041/679 70 80			GSA®-Technologie	
holzbau@neueholzbau.ch			CNC-Abbundtechnik	
www.neueholzbau.ch			Plan-No. 9505-123	

Vorgaben

- GSA 504 mit Hilfe von Schablonen, siehe Bild 1, ausrichten. Die Bohrungen der Stahlteile sind passgenau, Ø17mm => evtl. Schablonen von Reihe C2 noch vorhanden
- Nach Fertigung gemäss separatem Plan in die Klimaboxen verteilen

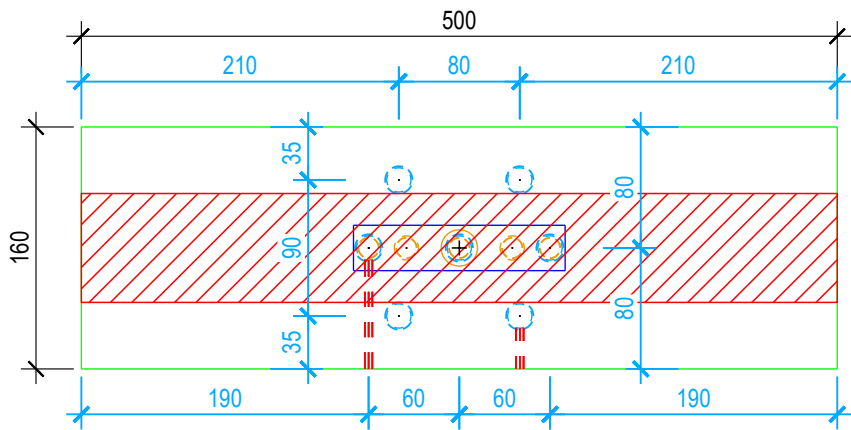
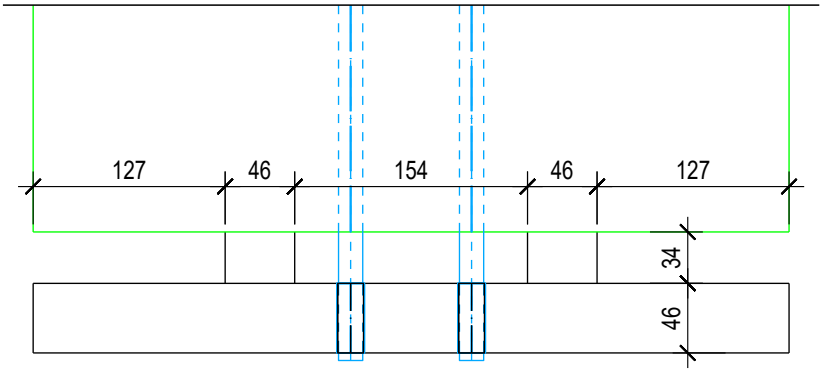
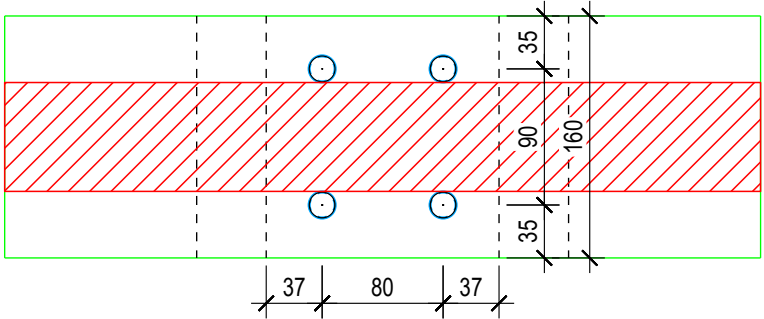
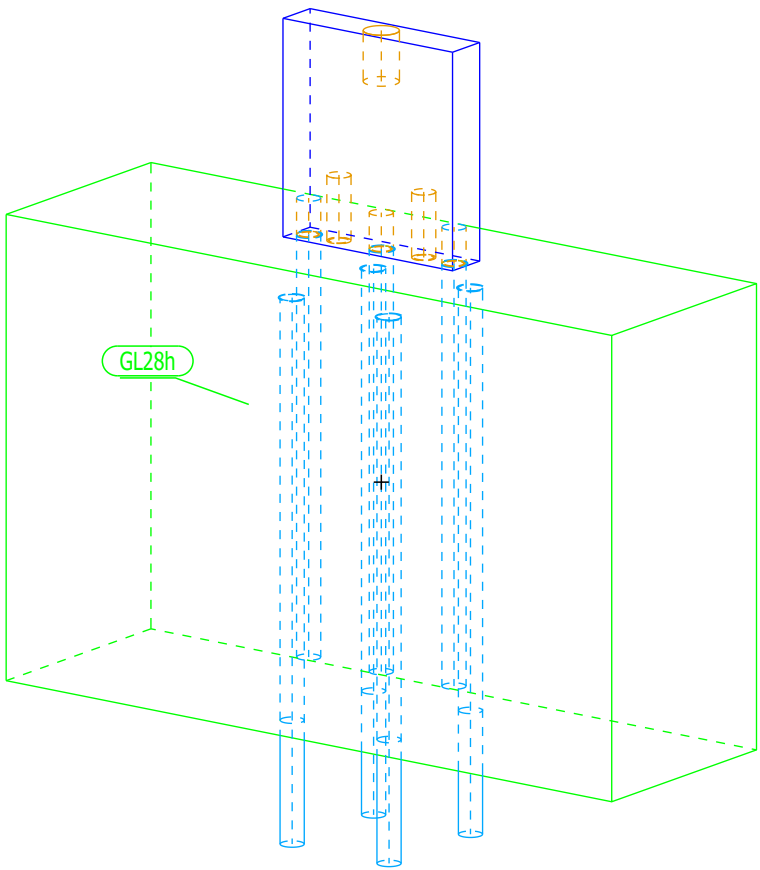
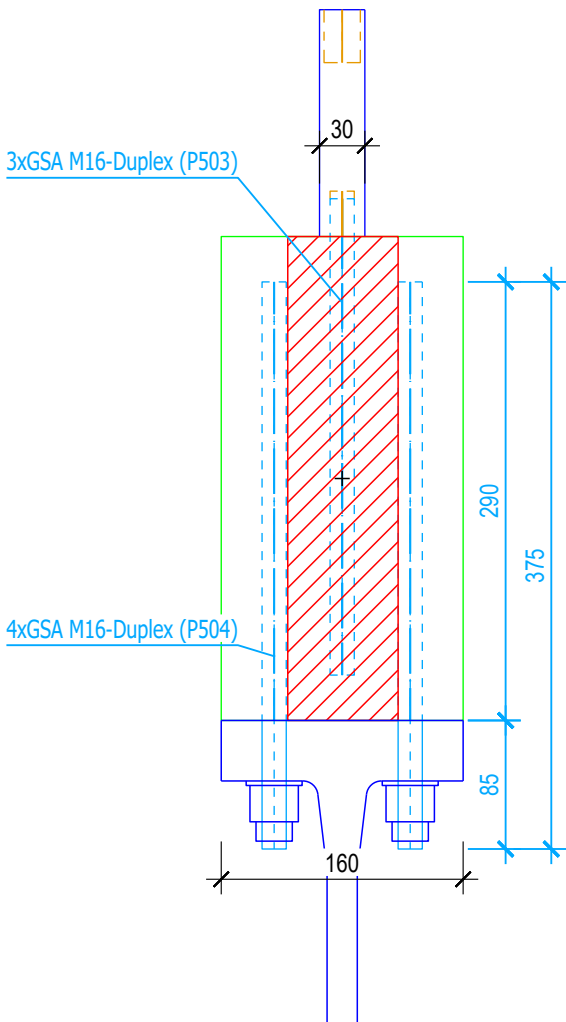
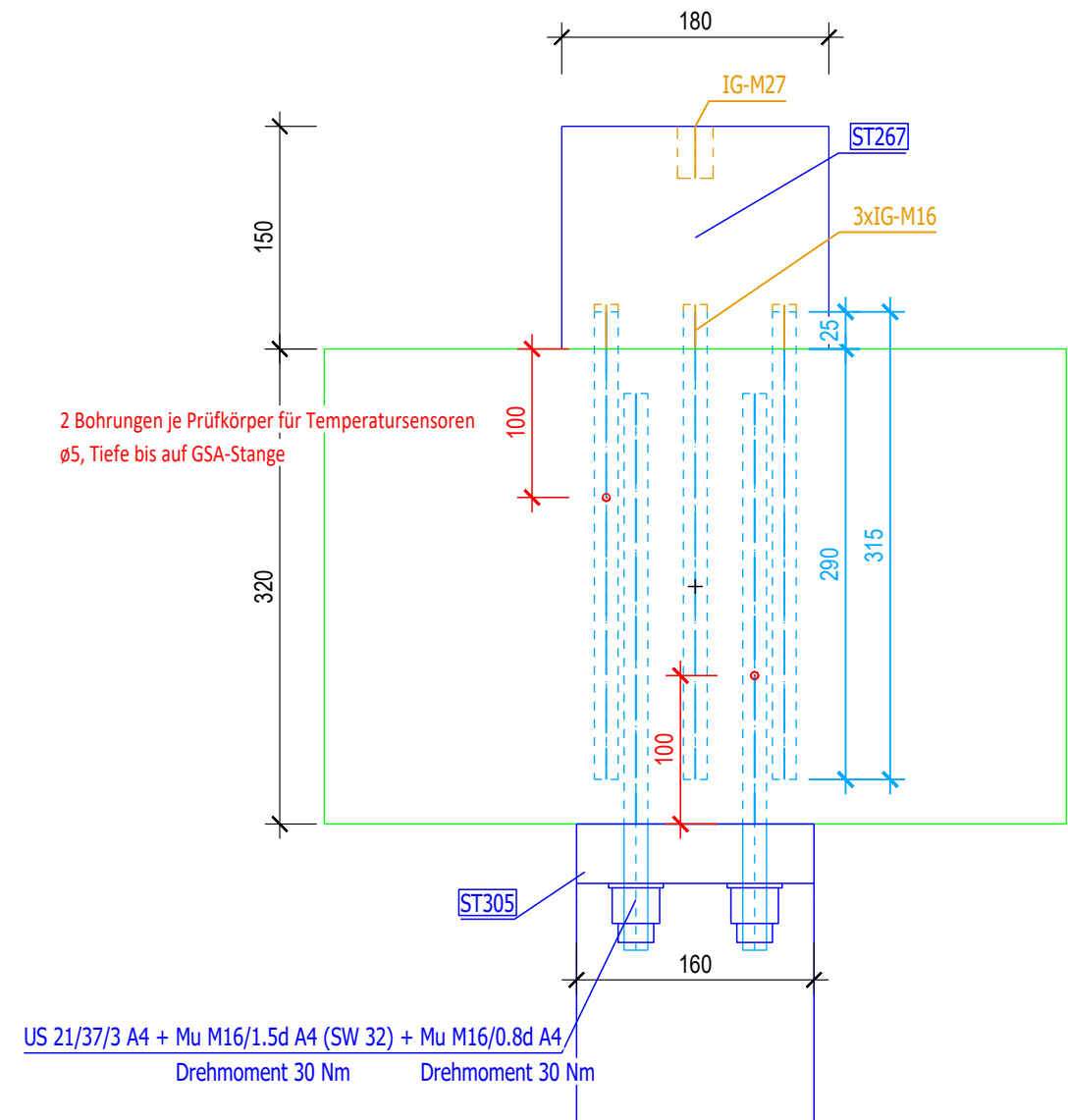


Bild 1



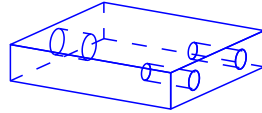
Im Bereich der rot schraffierten Fläche soll nicht geschraubt werden! -> 6er-Torx zur Befestigung des Stahlteils/GSA ausserhalb dieser Zone.

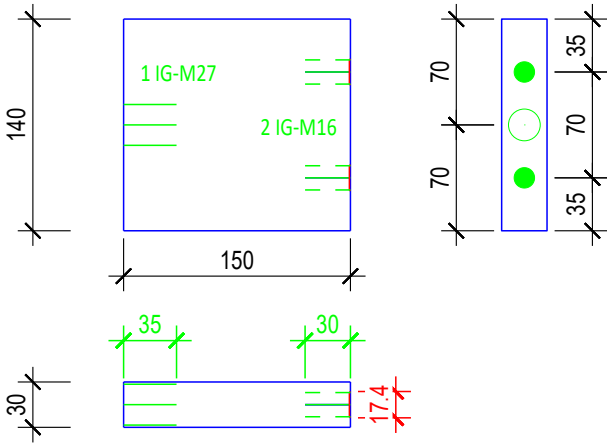


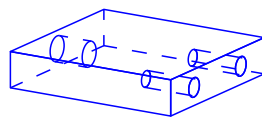
Anhang B

Eingeklebte Gewindestangen im Brückenbau

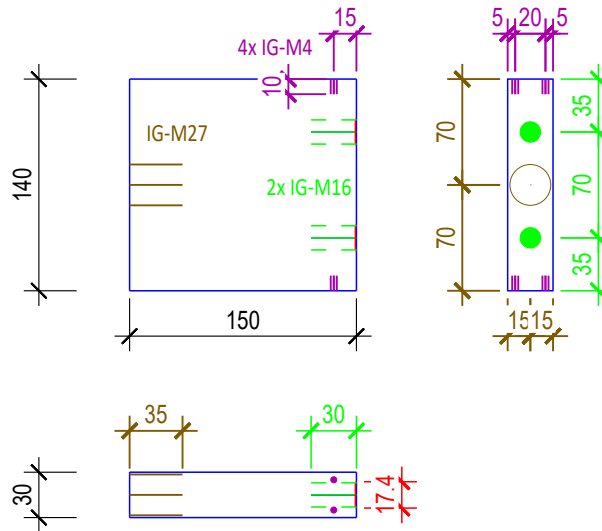
Pläne der Stahlteile

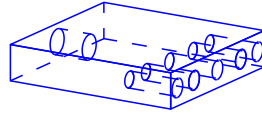
Bauherr		Ermüdung ohne Vorspannung		Anzahl: 10	Dim: FLA / 140mm x 30mm / 150mm
Objekt		F&E intern			
Auftraggeber		neue Holzbau AG, Lungern			
Stahlteil Einzelstückzeichnung P 244		Massstab:	1:5	Mat/Gew.: STAHL / 5.040 kg	Axonometrie 
		Datum	26.04.2021		
		Gezeichnet:	brm		
		Plangrösse:	A4		
N:\500_Engineering\531_F+E\02_Projekte\9505-123_WHFF-Ermüdung\650.Statik\9505-123_Statik_22-07-05_brm.2d				Festigkeit: S355J2	
neue Holzbau AG 6078 Lungern Tel. 041/679'70'80 Fax 041/679'70'59		Plan-Nr. 9505-122			
		Holzleimbau Ingenieur-Holzbau GSA®-Technologie CNC-Abbundtechnik			
Legende zu Plan: IG-M16 = metrisches Innengewinde möglichst passend zu M16 der Duplex-Gewindestangen = geringes Spiel Lochkante ganz leicht gefast				<u>Nummerierung:</u> ST244 <u>Ausführungsklasse:</u> EXC 1 <u>Behandlung / Farbton:</u> roh	



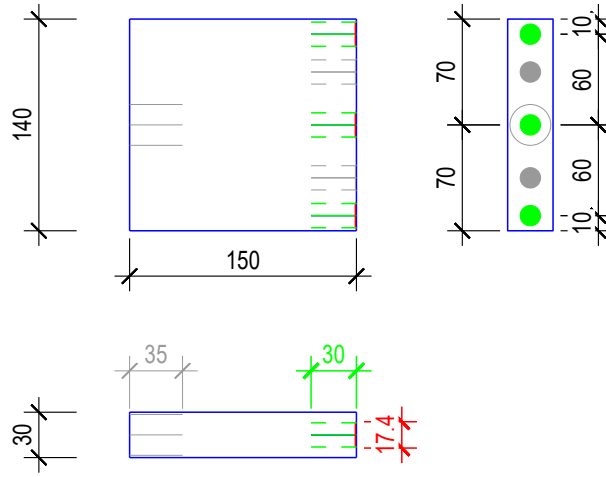
Bauherr		GSA-Ermüdung		Anzahl: 8	Dim: FLA / 140mm x 30mm / 150mm
Objekt		WHFF			
Auftraggeber		neue Holzbau AG, Lungern			
Stahlteil Einzelstückzeichnung P 244		Massstab:	1:5	Mat/Gew.: STAHL / 5.040 kg	Axonometrie 
		Datum	31.05.2023		
		Gezeichnet:	brm		
		Plangrösse:	A4		
N:\500_Engineering\531_F+E\02_Projekte\9505-123_WHFF-Ermüdung\650_Statik\9505-123_Statik_22-07-05_brm.2d				Festigkeit: S355J2	
neue Holzbau AG 6078 Lungern Tel. 041/679 70'80 Fax 041/679 70'59		 Holzleimbau Ingenieur-Holzbau GSA*-Technologie CNC-Abbundtechnik			
Legende zu Plan: IG-M16 = metrisches Innengewinde möglichst passend zu M16 der Duplex-Gewindestangen = geringes Spiel Lochkante ganz leicht gefast		Plan-Nr. 9505-123		<u>Nummerierung:</u> ST244 <u>Ausführungs-kategorie:</u> EXC 1 <u>Behandlung / Farbton:</u> roh	

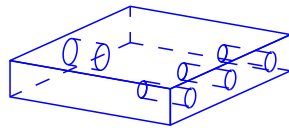
Reihe A3



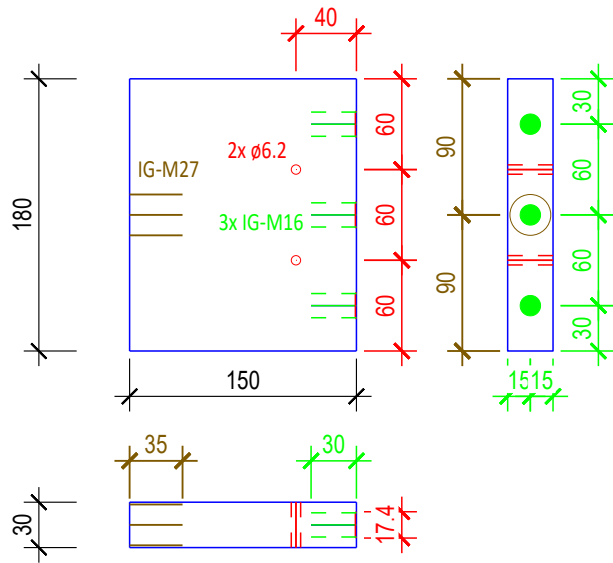
Bauherr		GSA-Ermüdung		Anzahl: 3	Dim: FLA / 140mm x 30mm / 150mm
Objekt		WHFF			
Auftraggeber		neue Holzbau AG, Lungern			
Stahlteil Einzelstückzeichnung P 266		Massstab:	1:5	Mat/Gew.: STAHL / 5.040 kg	Axonometrie
		Datum	31.05.2023		
		Gezeichnet:	brm		
		Plangrösse:	A4		
N:\500_Engineering\531_F+E\02_Projekte\9505-123_WHFF-Ermüdung\650.Statik\9505-123_Statik_22-07-05_brm.2d				Festigkeit: S355J2	
neue Holzbau AG 6078 Lungern Tel. 041/679'70'80 Fax 041/679'70'59			Plan-Nr. 9505-123		
Holzleimbau Ingenieur-Holzbau GSA®-Technologie CNC-Abbundtechnik					
Legende zu Plan: IG-M16 neu zu erstellen Lochkante ganz leicht gefast IG bestehend			<u>Nummerierung:</u> ST266 <u>Ausführungs-kategorie:</u> EXC 1 <u>Behandlung / Farbton:</u> roh		

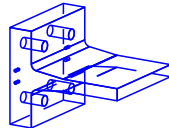
Reihe C1, D1 (werden weiterverwendet)



Bauherr		GSA-Ermüdung		Anzahl: 10	Dim: FLA / 180mm x 30mm / 150mm
Objekt		WHFF			
Auftraggeber		neue Holzbau AG, Lungern			
Stahlteil Einzelstückzeichnung P 267		Massstab:	1: 5	Mat/Gew.: STAHL / 6.480 kg	Axonometrie 
		Datum	Visum		
		Gezeichnet:	31.05.2023 brm		
		Plangrösse:	A4	Festigkeit: S355J2	
N:\500_Engineering\531_F+E\02_Projekte\9505-123_WHFF-Ermüdung\650.Statik\9505-123_Statik_22-07-05_brm.2d					
neue Holzbau AG 6078 Lungern Tel. 041/679'70'80 Fax 041/679'70'59		Holzleimbau Ingenieur-Holzbau GSA®-Technologie CNC-Abbundtechnik			
Tel. 041/679'70'80 Fax 041/679'70'59		Plan-Nr. 9505-123			
Legende zu Plan: IG-M16 = metrisches Innengewinde möglichst passend zu M16 der Duplex-Gewindestangen = geringes Spiel Lochkante ganz leicht gefast				<u>Nummerierung:</u> ST267 <u>Ausführungsklasse:</u> EXC 1 <u>Behandlung / Farbton:</u> roh	

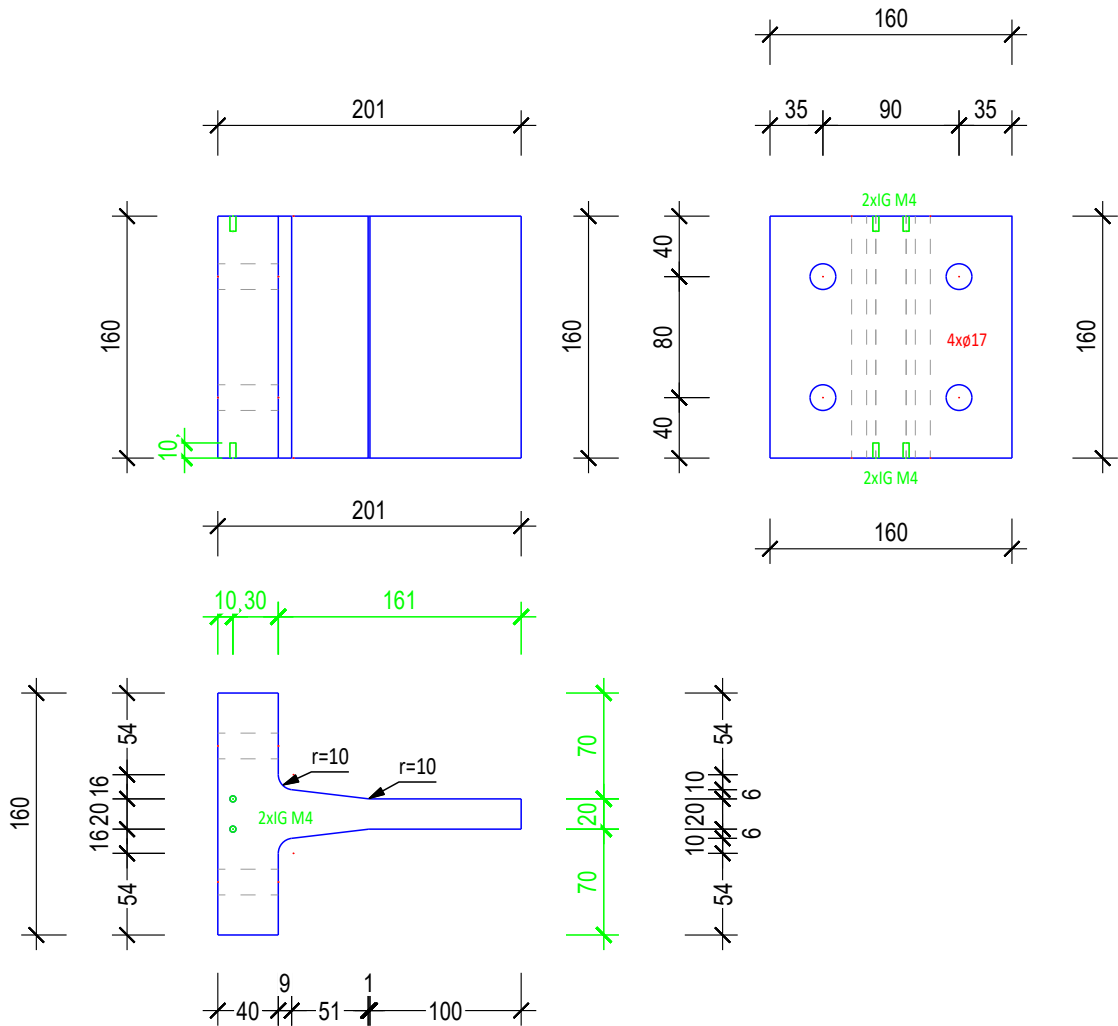
Reihe C2 und D2



Bauherr		GSA-Ermüdung		Anzahl: 1 /	Dim: Anschlussteil / 160mm x 160mm / 201mm
Objekt		WHFF			
Auftraggeber		neue Holzbau AG, Lungern			
Stahlteil Einzelstückzeichnung P 305		Massstab:	1: 5	Mat/Gew.: STAHL / 12.893 kg	Axonometrie
		Datum	Visum		
		Gezeichnet:	31.08.2023 jaz		
		Plangrösse:	A4		
N:\500_Engineering\531_F+E\02_Projekte\9505-123_WHFF-Ermüdung\650.Statik\9505-123_Statik_22-07-05_brm.2d				Festigkeit: S355J2	
neue Holzbau AG 6078 Lungern Tel. 041/679'70'80 Fax 041/679'70'59			Holzleimbau Ingenieur-Holzbau GSA®-Technologie CNC-Abbundtechnik		
Plan-Nr. 9505-123					

Legende zu Plan:

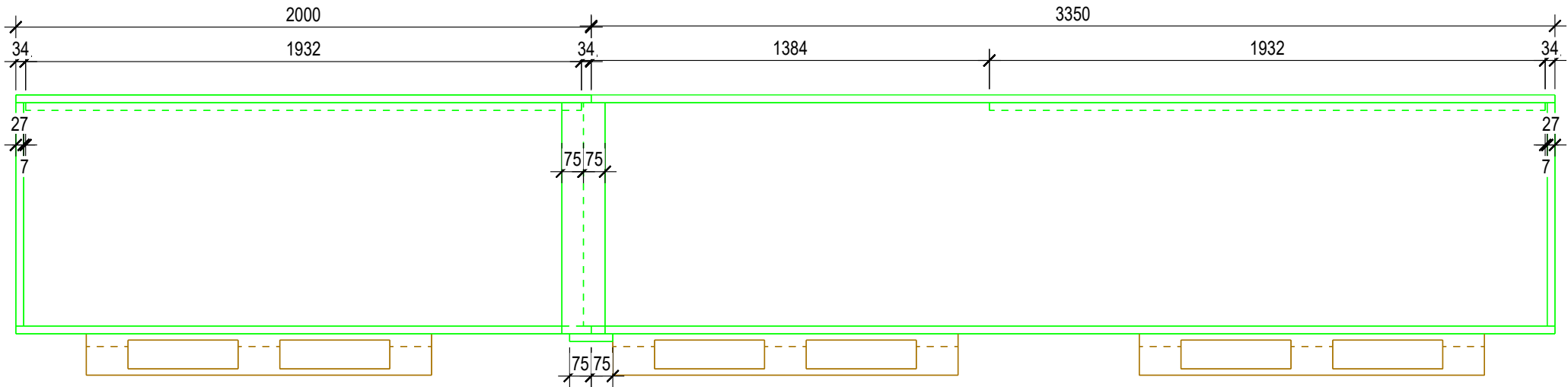
IG-M?? = metrisches Innengewinde



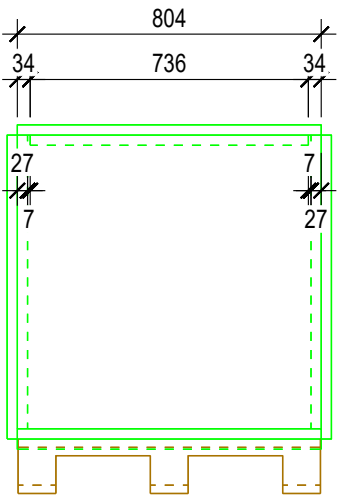
Anhang C

Eingeklebte Gewindestangen im Brückenbau

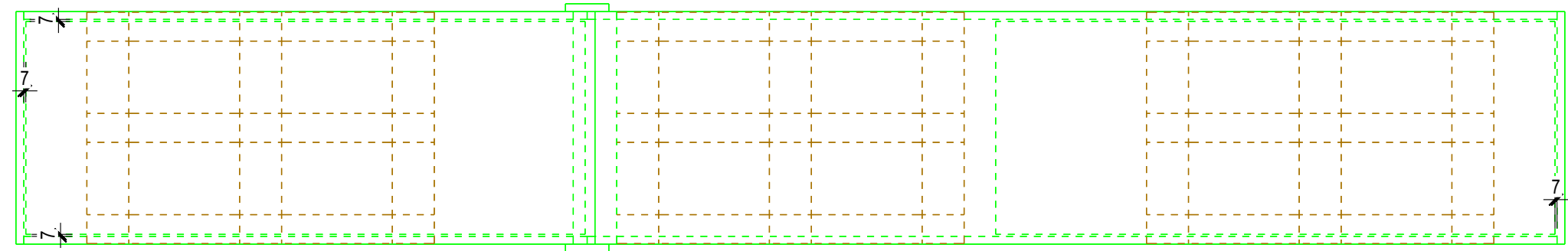
Pläne der Klimakisten



Ansicht: Klimabox Lamellen, Y
Msst: 1:20



Ansicht: Klimabox Lamellen, X
Msst: 1:20



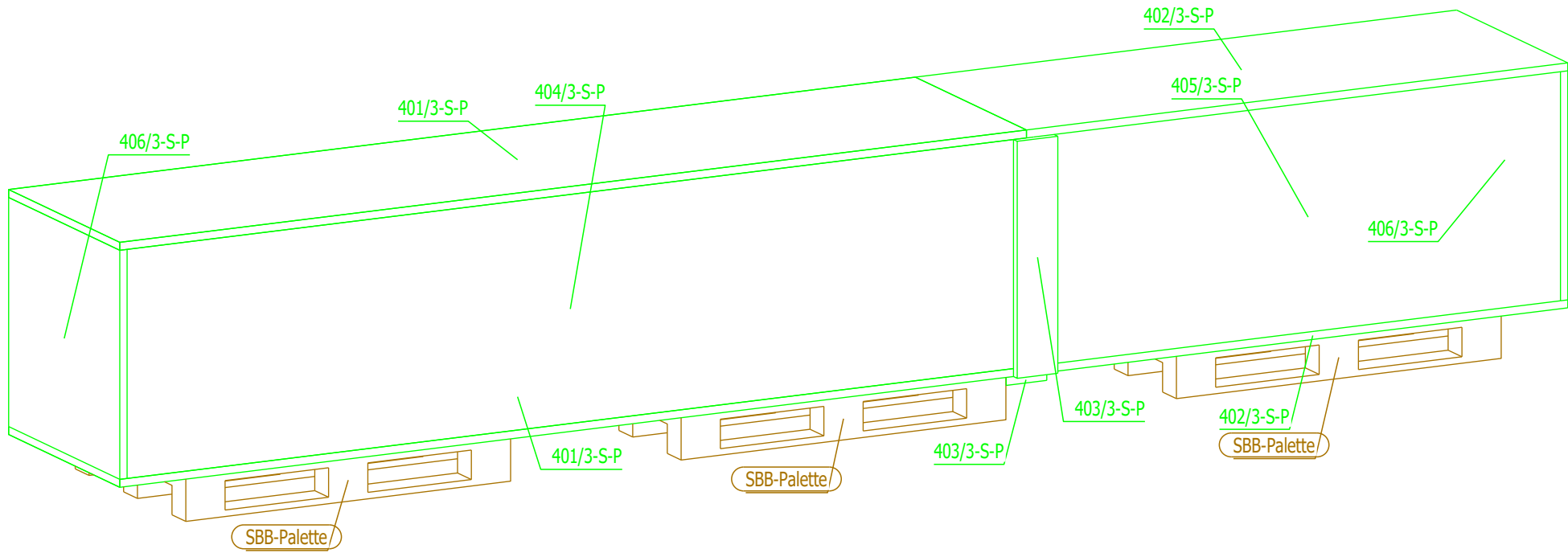
Ansicht: Klimabox Lamellen, Z
Msst: 1:20

Deckel + Streifen Verbindung TGS 5x50
Boden + Wände TGS 5x80

Klimabox Innen 6-seitig mit Plastikfolie verkleiden.

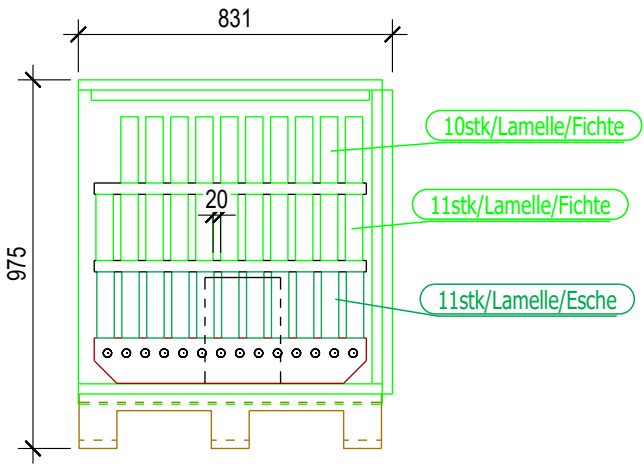
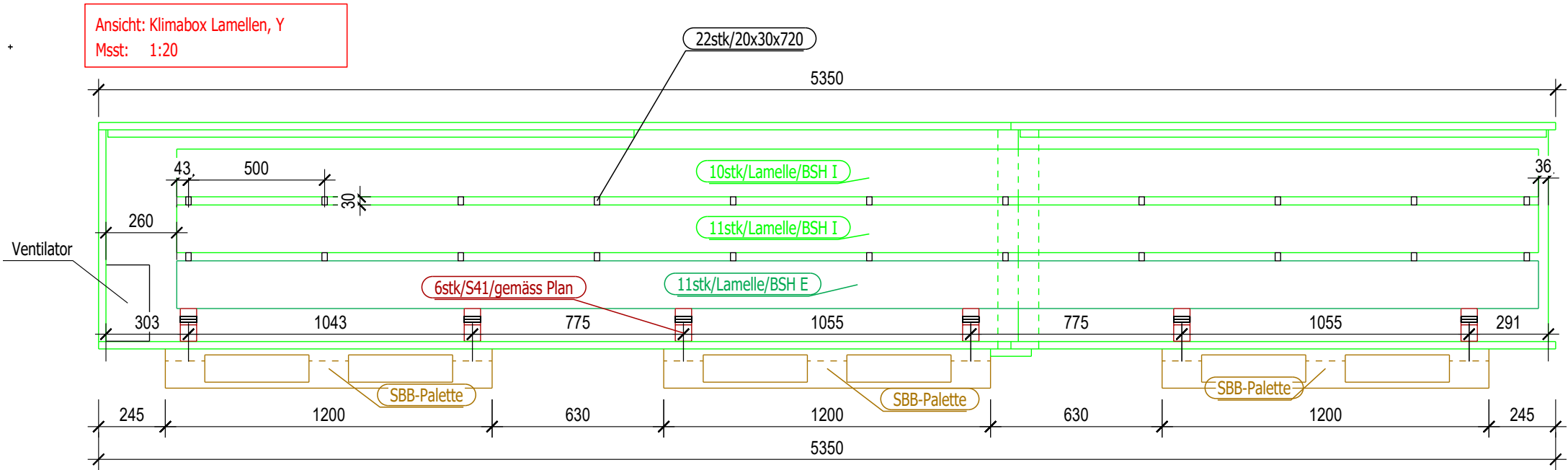
Achtung! Folie so anbringen das diese nach dem auffeuchten der Lamellen wieder entfernt werden kann.

Die Klimabox der Lamellen wird im Anschluss zu zwei Klimaboxen ,Box 2 & 3 identisch zu Box 1, für die Prüfkörper umgebaut.

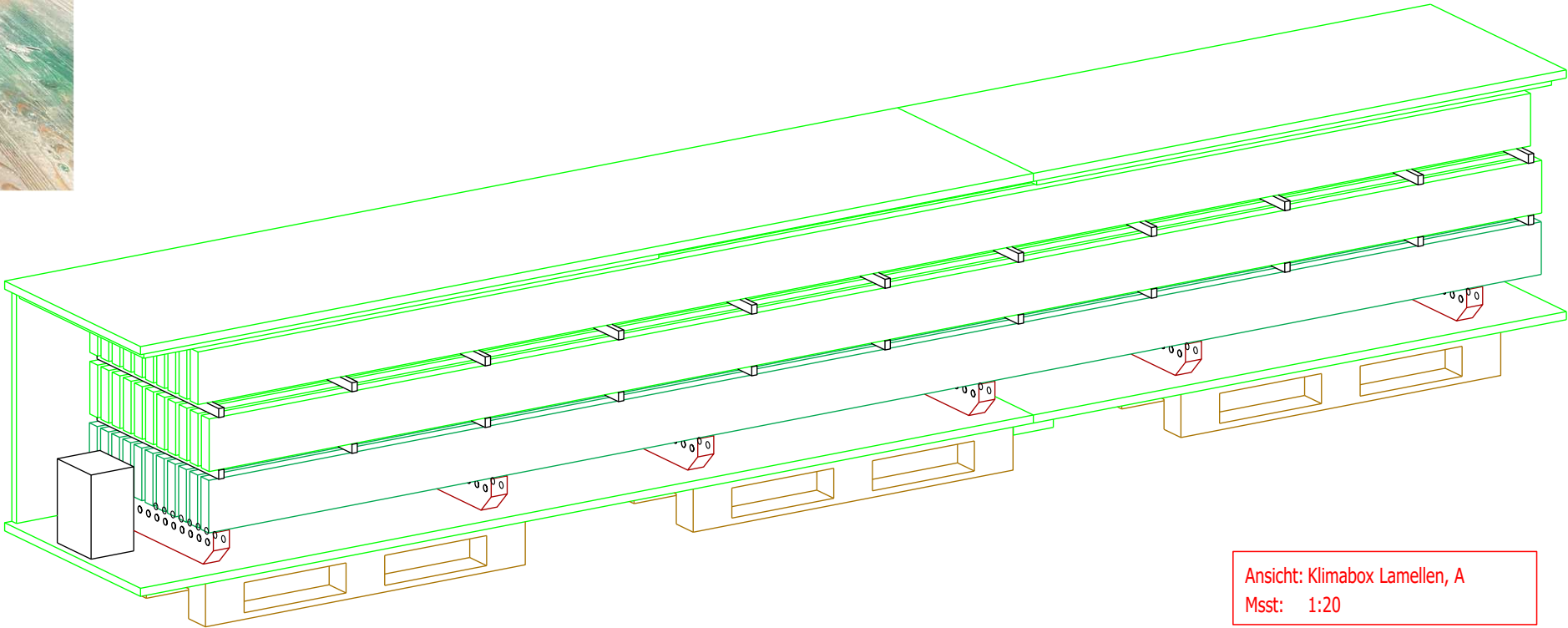


Ansicht: Klimabox Lamellen, A
Msst: 1:20

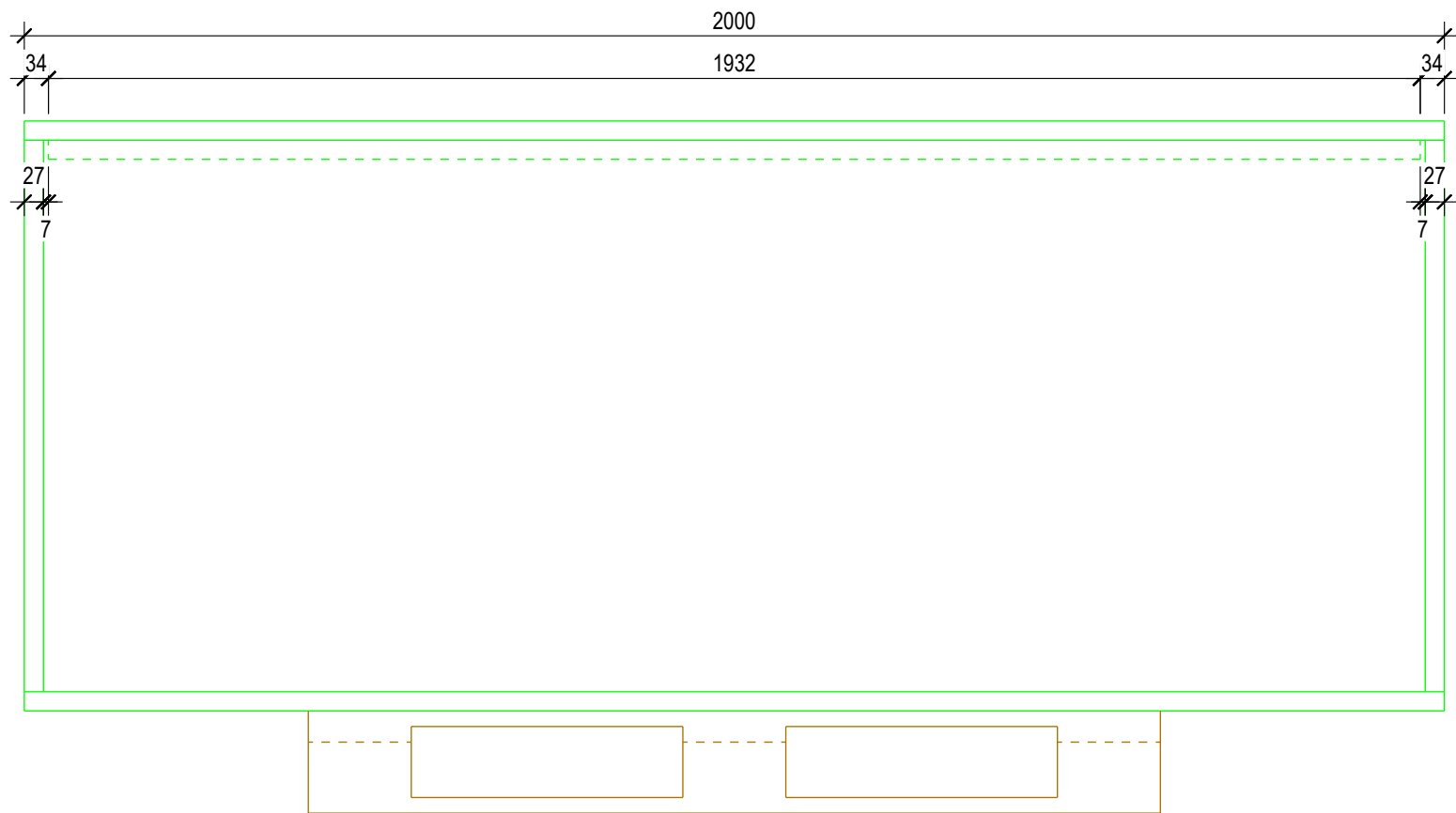
Bauherr / owner	GSA-Ermüdung
Objekt / project	WHFF
Kunde / client	neue Holzbau AG Lungern
Klimabox Lamellen	
© neue Holzbau AG Lungern	
N:\500_Engineering\531_F+E\02_Projekte\9505-123_WHFF-Ermüdung\650.Statik\9505-123_Statik_22-07-05_brm.2d	
neue Holzbau AG	
6078 Lungern	
041/679 70'80	
holzbaun@neueholzbau.ch	
www.neueholzbau.ch	
Holzleimbau	
Ingenieur-Holzbau	
GSA®-Technologie	
CNC-Abbundtechnik	
Plan-No.	
9505-123	



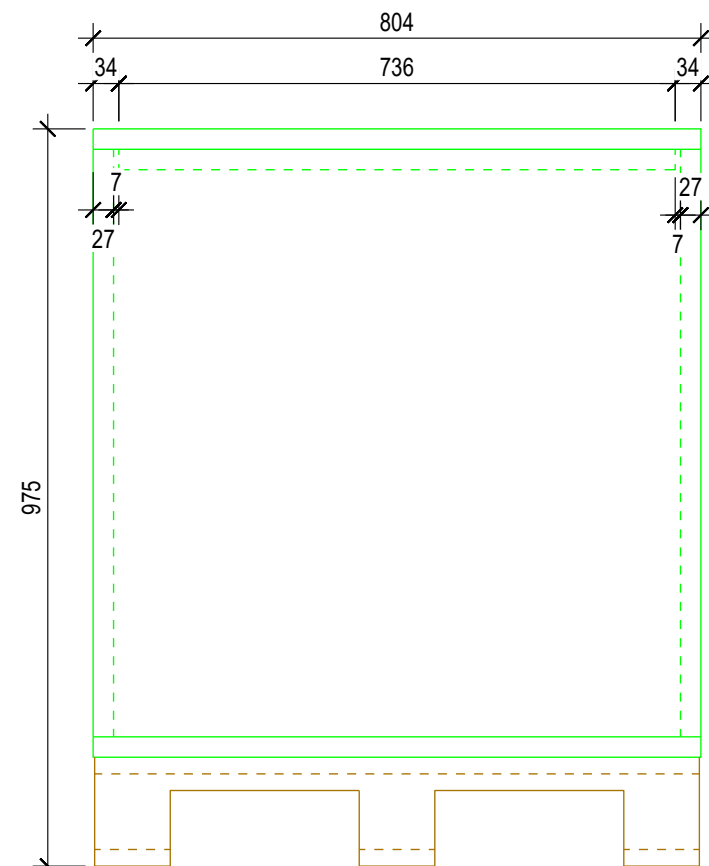
Box befüllt ohne Wasser ca. 1060kg



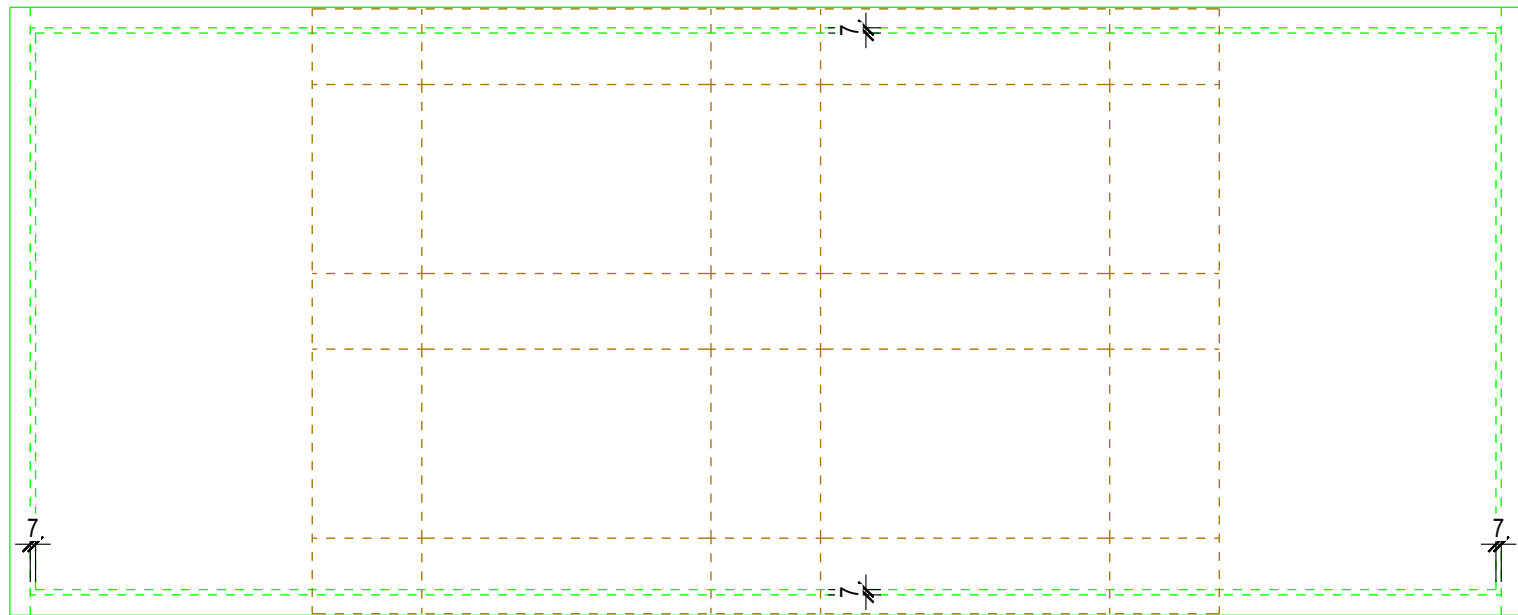
Bauherr / owner	GSA-Ermüdung
Objekt / project	WHFF
Kunde / client	neue Holzbau AG Lungern
Klimabox Lamellen Befüllen	
© neue Holzbau AG Lungern	
N:\500_Engineering\531_F+E\02_Projekte\9505-123_WHFF-Ermüdung\650-Statik\9505-123_Statik_22-07-05_brm.2d	
neue Holzbau AG	
6078 Lungern	
041/679 70 80	
holzba@neueholzbau.ch	
www.neueholzbau.ch	
Holzleimbau Ingenieur-Holzbau GSA®-Technologie CNC-Abundtechnik	
Plan-No. 9505-123	
scale:	1:20
drawing:	31.05.2023 brm
control class:	KK2 brm
size:	A3



Ansicht: Klimabox Prüfkörper, Y
Msst: 1:10

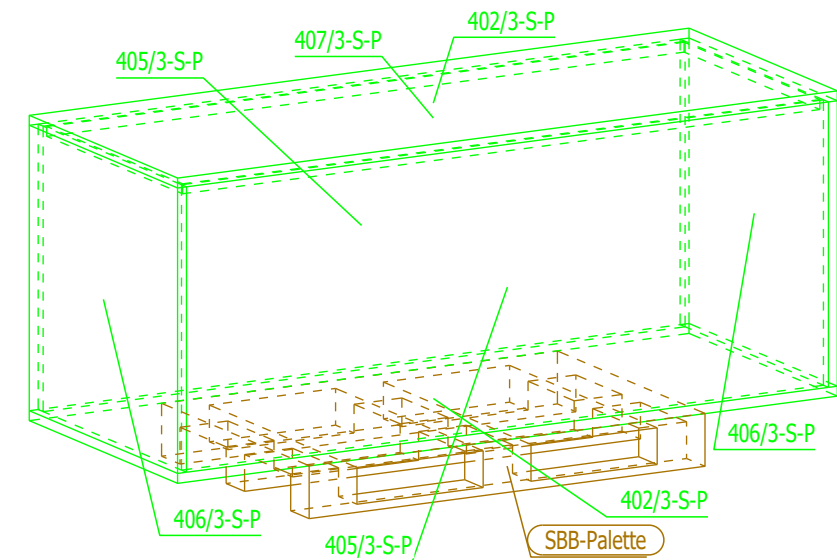


Ansicht: Klimabox Prüfkörper, X
Msst: 1:10



Ansicht: Klimabox Prüfkörper, Z
Msst: 1:10

Deckel + Streifen Verbindung TGS 5x50
Boden + Wände TGS 5x80



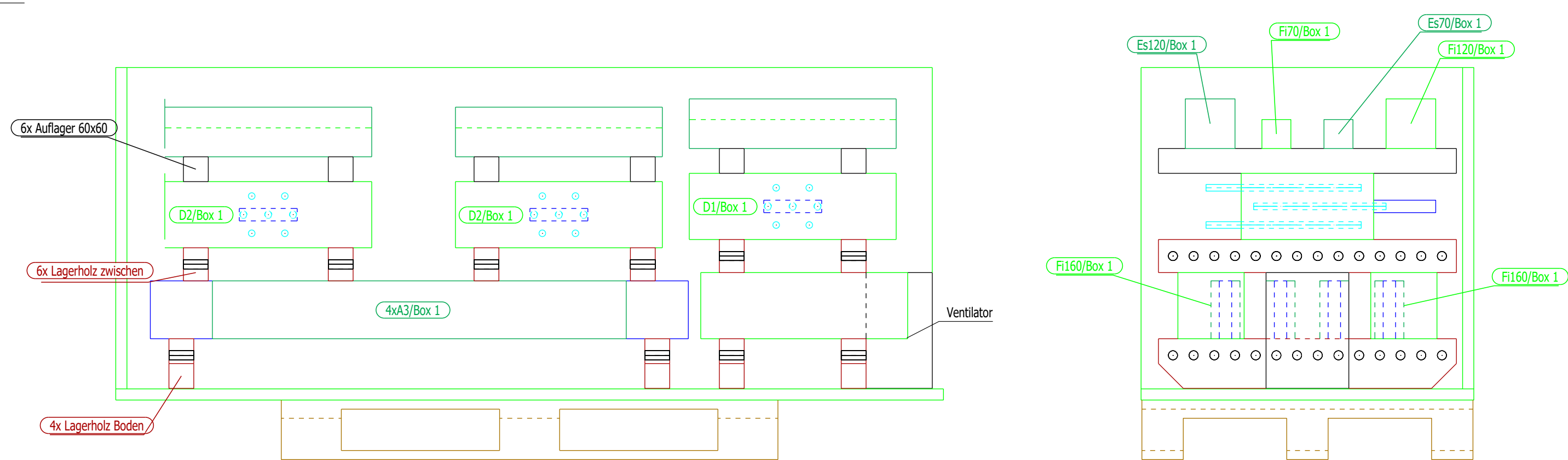
Klimabox Innen 6-seitig mit Plastikfolie verkleiden.

Box 1 aus bestellten Platten

Box 2 & 3 aus Klimabox der Lamellen

Ansicht: Klimabox Prüfkörper, A
Msst: 1:20

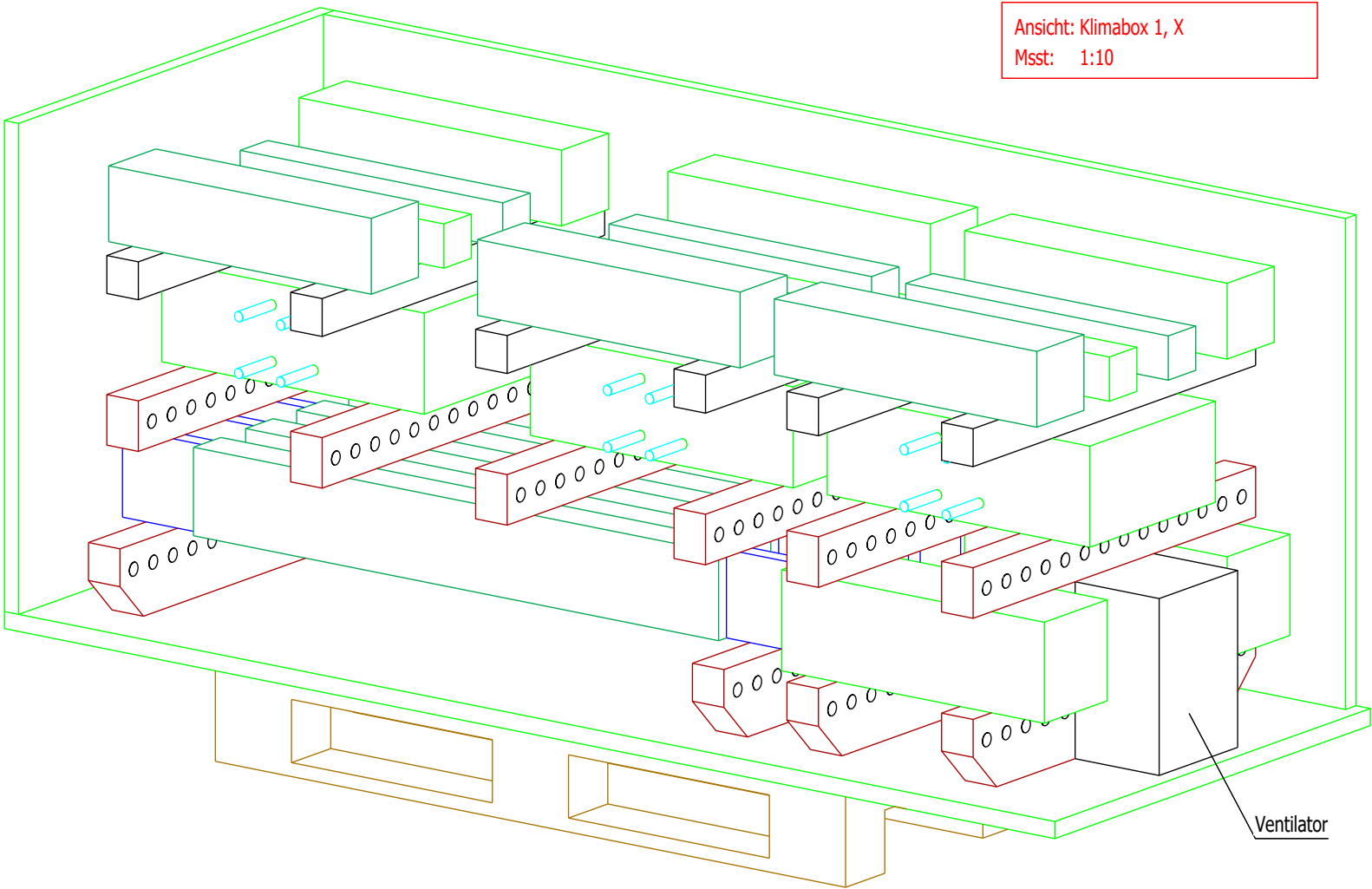
Bauherr / owner	GSA-Ermüdung		
Objekt / project	WHFF		
Kunde / client	neue Holzbau AG Lungern		
Klimabox Prüfkörper 3 Stück		scale:	1:10
© neue Holzbau AG Lungern		drawing:	01.06.2023 brm
N:\500_Engineering\531_F+E\02_Projekte\9505-123_WHFF-Ermüdung\650.Statik\9505-123_Statik_22-07-05_brm.2d		control class:	KK2 brm
neue Holzbau AG		size:	A3
6078 Lungern		Plan-No.	9505-123
041/679 70'80			
holzbaum@neueholzbau.ch			



Ansicht: Klimabox 1, Y
Msst: 1:10

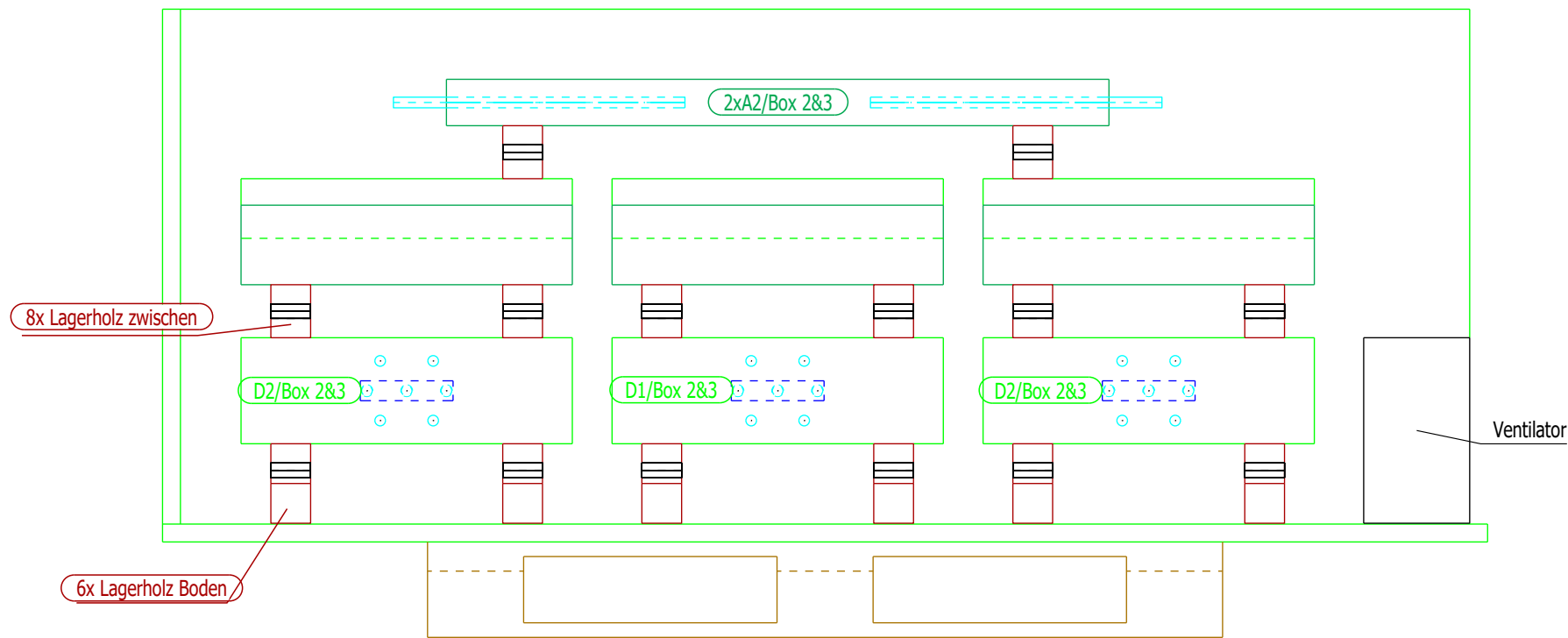
Ansicht: Klimabox 1, X
Msst: 1:10

Box befüllt ohne
Wasser ca. 340kg

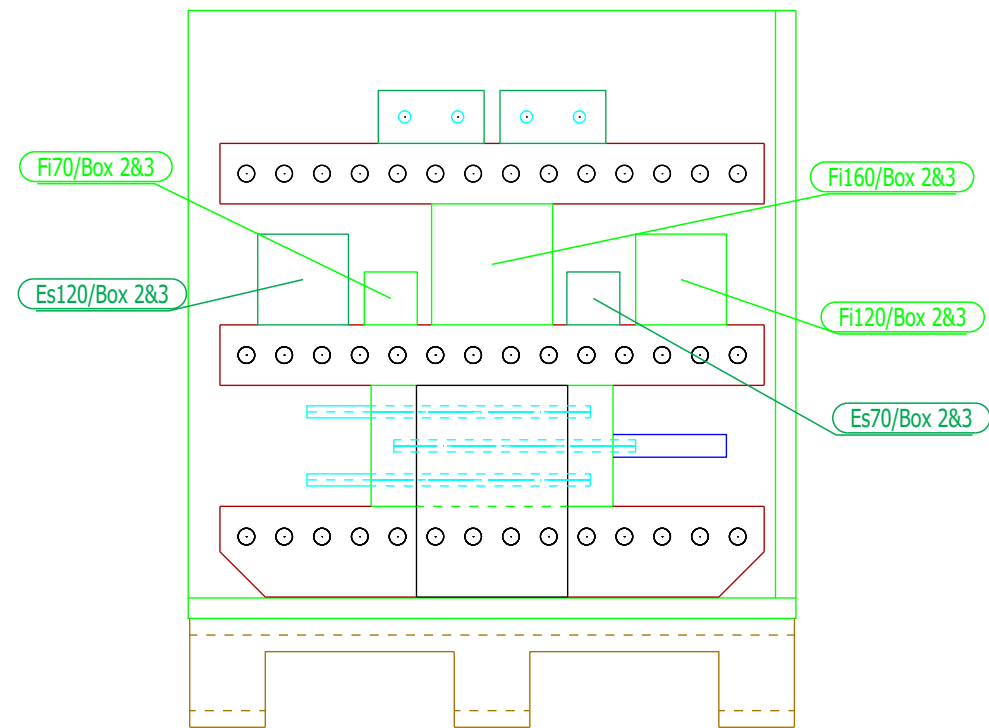


Ansicht: Klimabox 1, A
Msst: 1:10

Bauherr / owner	GSA-Ermüdung		
Objekt / project	WHFF		
Kunde / client	neue Holzbau AG Lungern		
Klimabox 1 befüllen		scale:	1:10
		drawing:	28.06.2023 brm
		control class:	KK2 brm
		size:	A3
© neue Holzbau AG Lungern			
N:\500_Engineering\531_F+E\02_Projekte\9505-123_WHFF-Ermüdung\650.Statik\9505-123_Statik_22-07-05_brm.2d			
neue Holzbau AG	6078 Lungern	041/679 70'80	holzbaum@neueholzbau.ch
Holzleimbau	Ingenieur-Holzbau	GSA®-Technologie	CNC-Abundtechnik
Plan-No.		9505-123	

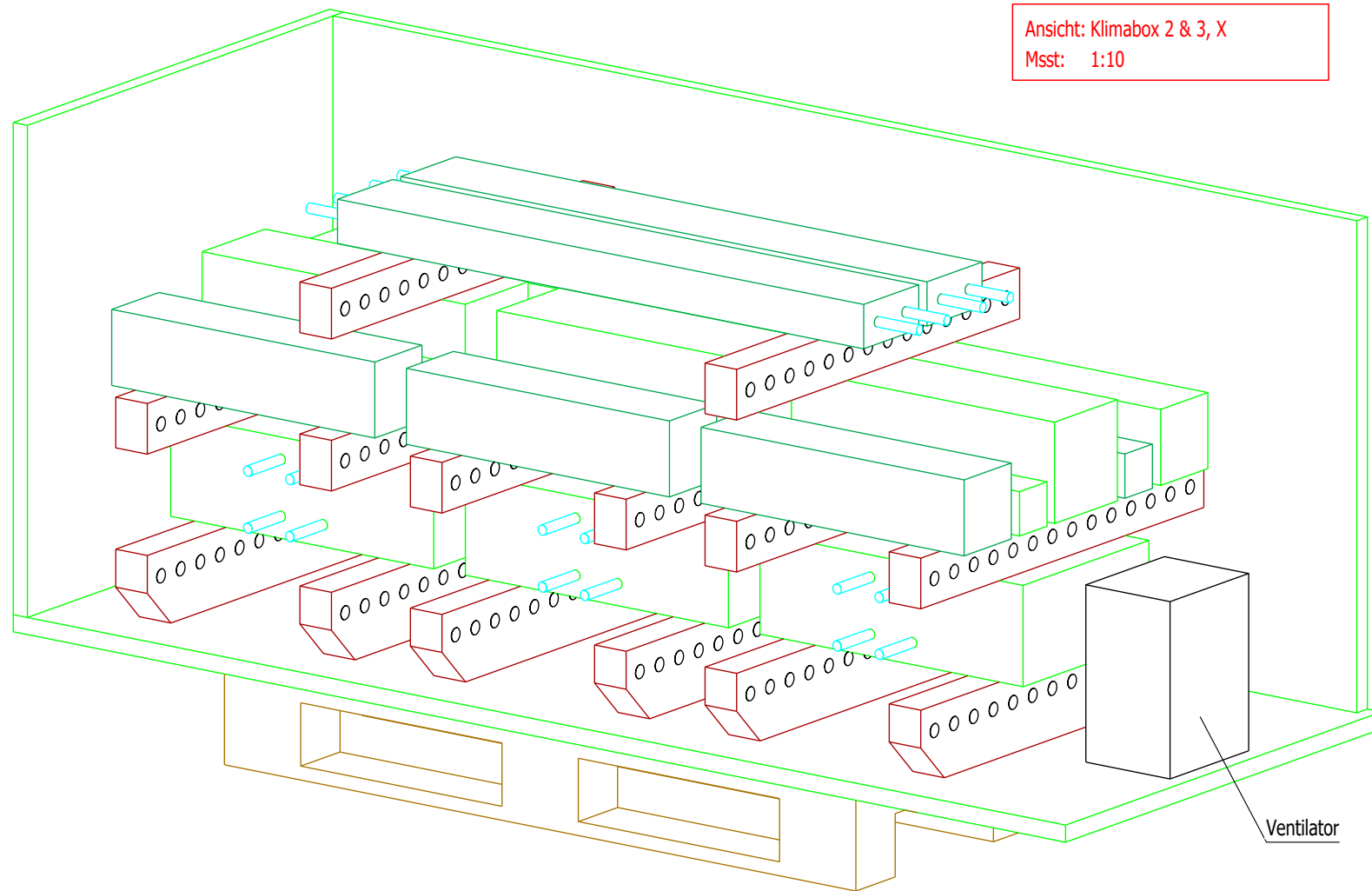


Ansicht: Klimabox 2 & 3, Y
Msst: 1:10



Ansicht: Klimabox 2 & 3, X
Msst: 1:10

Box befüllt ohne
Wasser ca. 300kg



Ansicht: Klimabox 2 & 3, A
Msst: 1:10

Bauherr / owner	GSA-Ermüdung		
Objekt / project	WHFF		
Kunde / client	neue Holzbau AG Lungern		
Klimabox 2 & 3 befüllen		scale:	1:10
		drawing:	28.06.2023 brm
		control class:	KK2 brm
		size:	A3
© neue Holzbau AG Lungern			
N:\500_Engineering\531_F+E\02_Projekte\9505-123_WHFF-Ermüdung\650.Statik\9505-123_Statik_22-07-05_brm.2d			
neue Holzbau AG		Holzleimbau	
6078 Lungern		Ingenieur-Holzbau	
041/679 70'80		GSA®-Technologie	
holzbau@neueholzbau.ch		CNC-Abundtechnik	
		Plan-No.	9505-123

Anhang D

Eingeklebte Gewindestangen im Brückenbau

Bemessung von GSA-Stangen parallel zur Faserrichtung in Laubholz und rechtwinklig zur Faserrichtung in Nadelholz

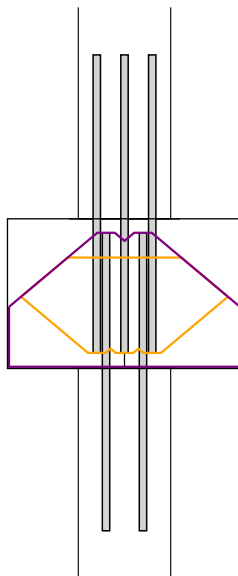
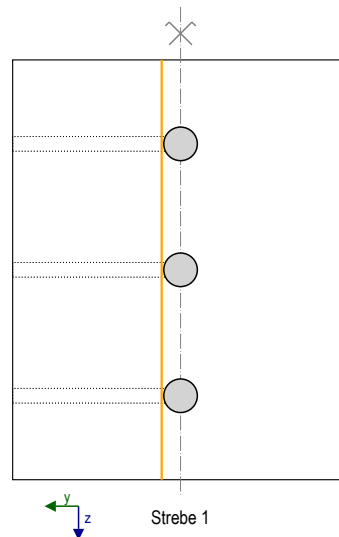
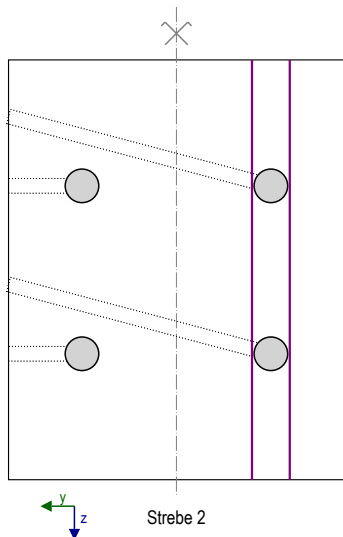
Knoten 0 (Feuchtebeiwert 1.00)

Strebe 2 160/200 GL40h 4x GSA-16.8 Länge: 645 mm Versenkung: 30 mm Anker: 54% (LK 0)
Exzentrizität: 0 mm Knicklänge: 1000 mm Nd: +125 kN (LK 0) k_{c,y}: 0.98 k_{c,z}: 0.96 Querschnitt: 20% (LK 0)
Neigung: 90° (quer) Rollschub: Fyd: 0 kN 0% Blockausziehen: Fyd: +125 kN 36% (LK 0)

y (Breite)	Ankeranzahl	a _{2c-z}	a ₂	a _{2c+z}
[mm]		[mm]	[mm]	[mm]
45	2	60	80	60

Strebe 1 160/200 GL40h 3x GSA-16.8 Länge: 645 mm Versenkung: 30 mm Anker: 71% (LK 0)
Exzentrizität: 0 mm Knicklänge: 1000 mm Nd: +125 kN (LK 0) k_{c,y}: 0.98 k_{c,z}: 0.96 Querschnitt: 20% (LK 0)
Neigung: 90° (quer) Rollschub: Fyd: +125 kN 100% (LK 0) Blockausziehen: Fyd: 0 kN 0%

y (Breite)	Ankeranzahl	a _{2c-z}	a ₂	a ₂	a _{2c+z}
[mm]		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0	3	40	60	60	40



Gurt 2 160/320 GL28h W_{z,net}: 1.37x10⁶ mm³ Anet: 51200 mm² Auslastung Normalkraft: 0% k_c / k_t: 1
Nd: 0 kN V_{z,d}: 0 kN W_{y,net,+z}: 2.73x10⁶ mm³ Auslastung Biegung +z: 0% k_m: 1
M_{y,d}: 0 kN LK 0 W_{y,net,-z}: 2.73x10⁶ mm³ Auslastung Biegung -z: 0% Nettoquerschnitt: 0%

Anhang E

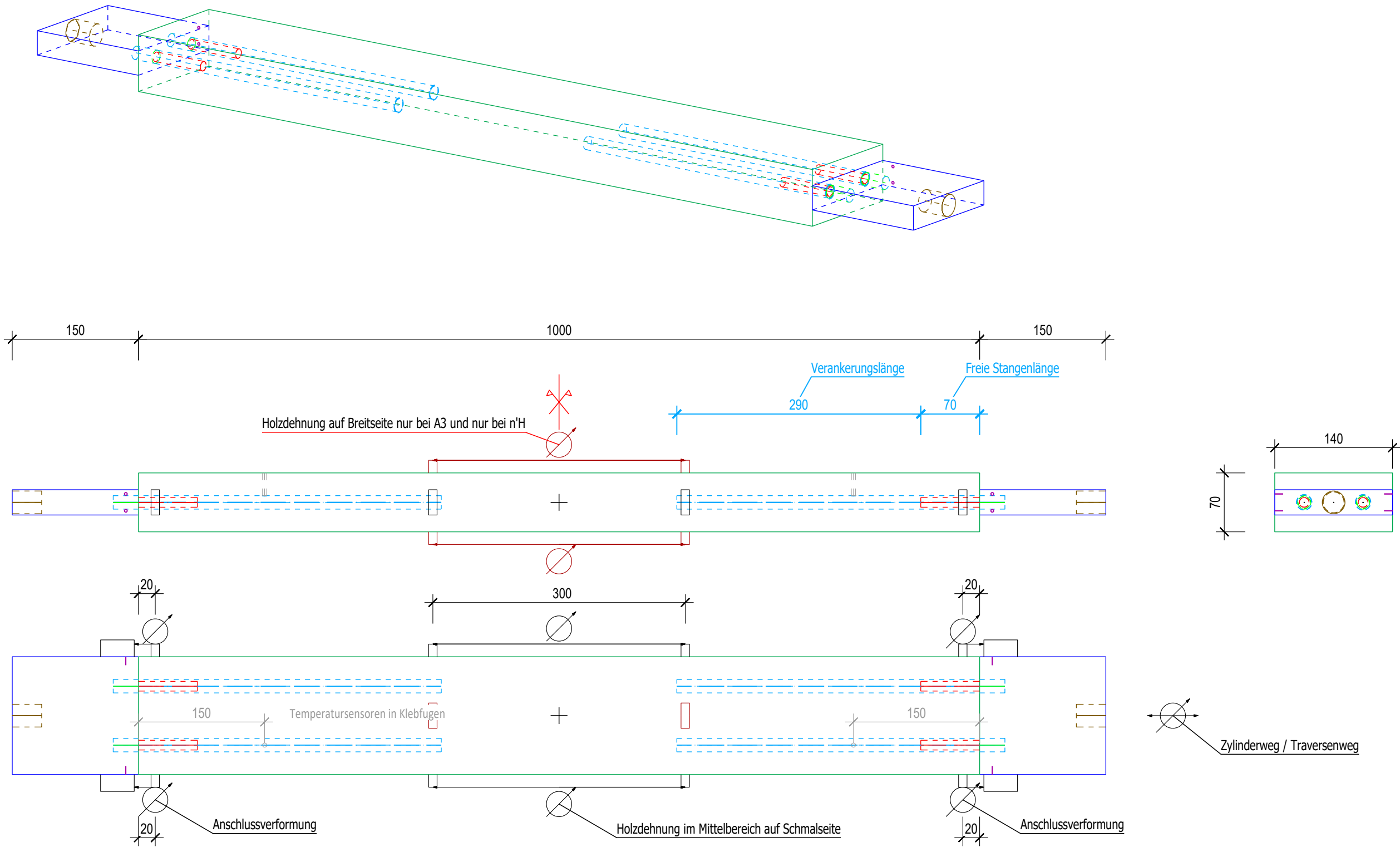
Eingeklebte Gewindestangen im Brückenbau

Messung der Verformungen

Bauherr / owner	GSA-Ermüdung		
Objekt / project	WHFF		
Kunde / client	neue Holzbau AG Lungern		
Reihen A1 und A3: Wegmessungen n'H & Empa		scale:	1:5
		drawing:	03.10.23 brm
		control class:	KK2 brm
		size:	A3
© neue Holzbau AG Lungern		Plan-No.	
N:\500_Engineering\531_F+E\02_Projekte\9505-123_WHFF-Ermüdung\650.Statik\9505-123_Statik_22-07-05_brm.2d		9505-123	
neue Holzbau AG		Holzleimbau	
6078 Lungern		Ingenieur-Holzbau	
041/679 70'80		GSA®-Technologie	
holzbau@neueholzbau.ch		CNC-Abbundtechnik	

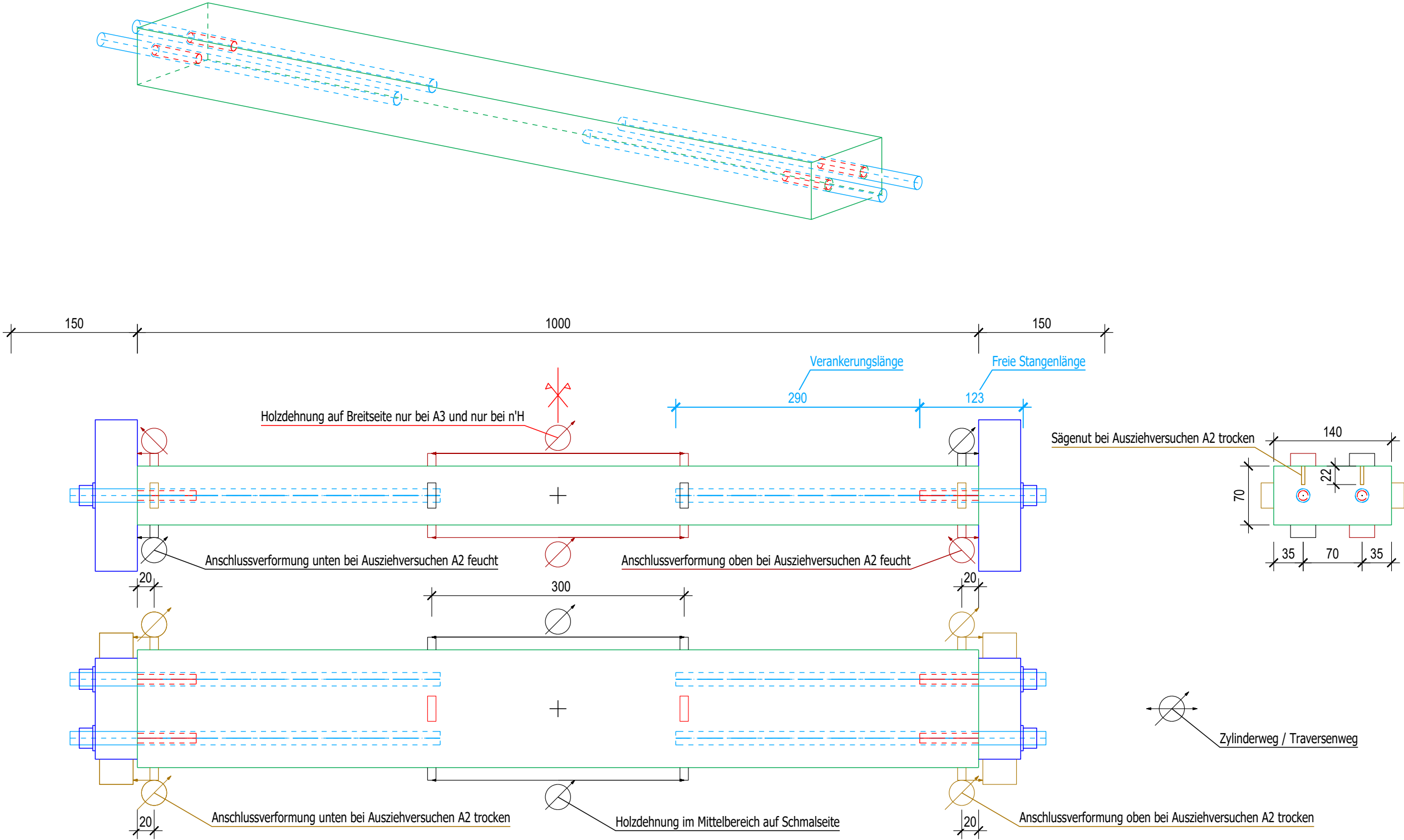


Messung der Verformungen während der Probelastung, der Vorbelastung, dem Ermüdungsversuchen und dem Ausziehversuch



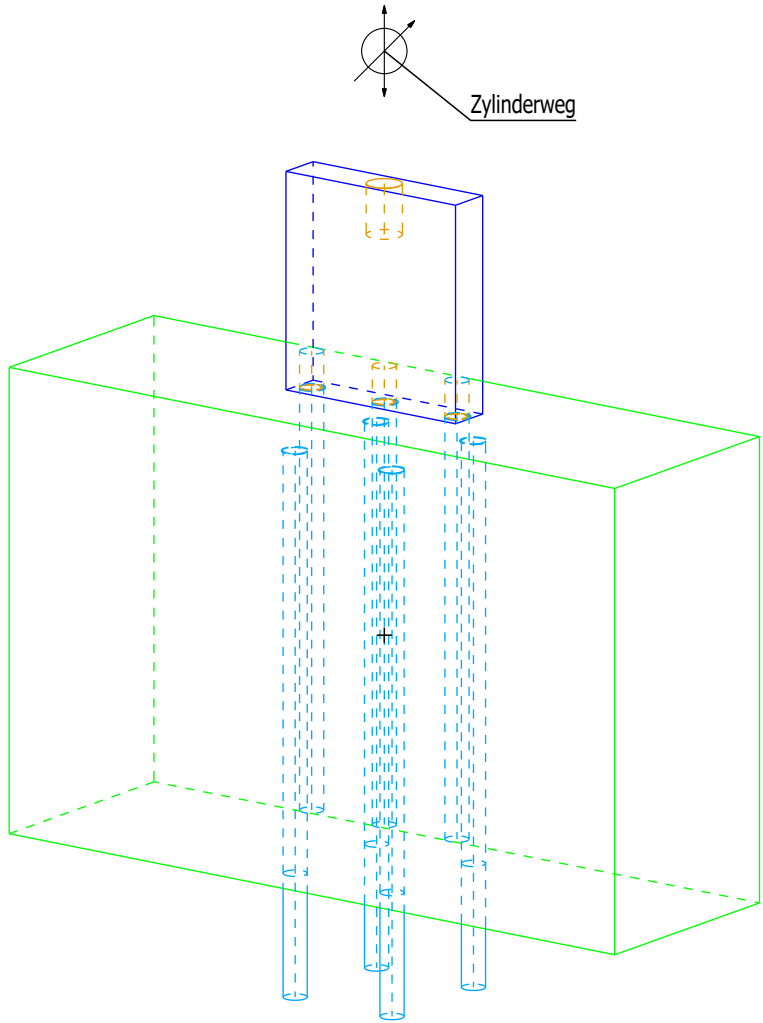
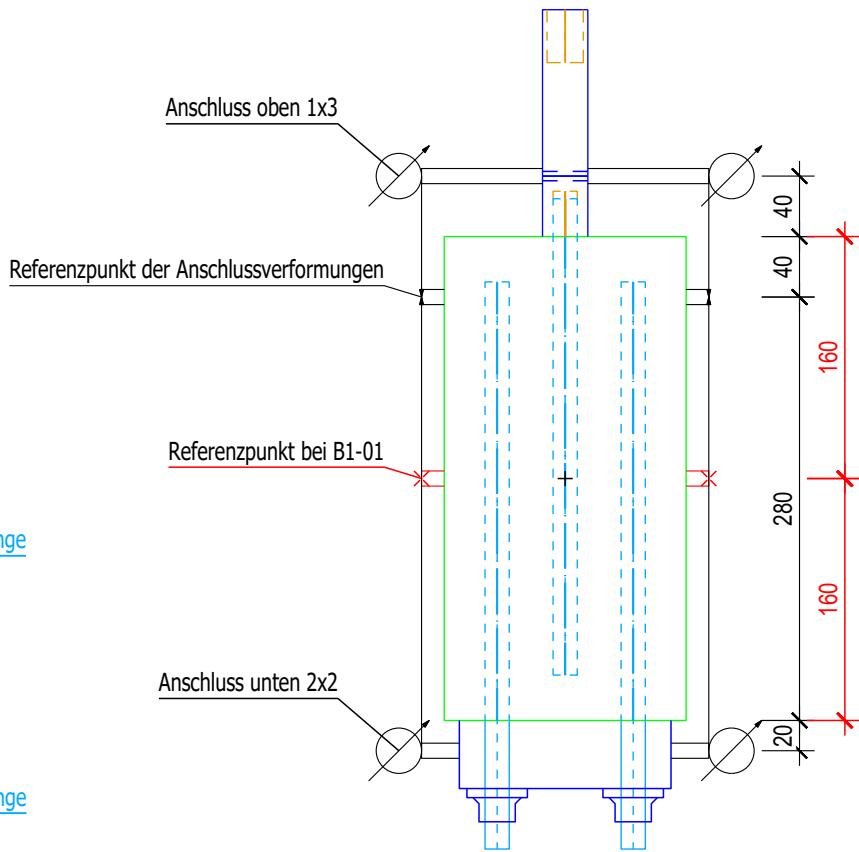
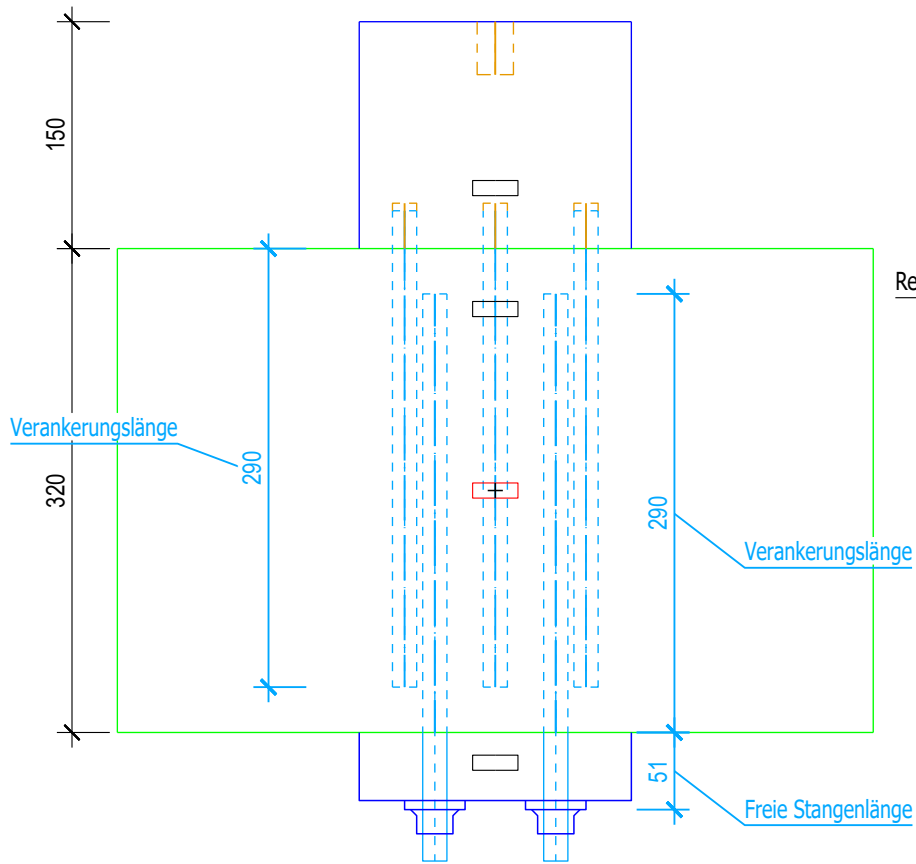
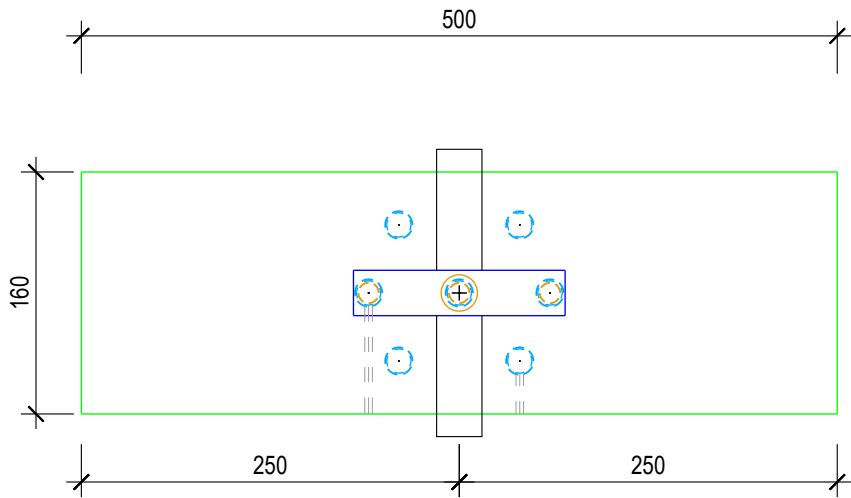
Bauherr / owner	GSA-Ermüdung		
Objekt / project	WHFF		
Kunde / client	neue Holzbau AG Lungern		
Reihe A2: Wegmessungen n'H		scale:	1:5
© neue Holzbau AG Lungern		drawing:	03.10.23 brm
N:\500_Engineering\531_F+E\02_Projekte\9505-123_WHFF-Ermüdung\650.Statik\9505-123_Statik_22-07-05_brm.2d		control class:	KK2 brm
neue Holzbau AG		size:	A3
6078 Lungern		Plan-No.	
041/679 70'80		9505-123	
holzbau@neueholzbau.ch		CNC-Abundtechnik	
www.neueholzbau.ch	Holzleimbau Ingenieur-Holzbau GSA®-Technologie		

Messung der Verformungen während den Ausziehversuchen
im feuchten und im trockenen Zustand



Bauherr / owner	GSA-Ermüdung				
Objekt / project	WHFF				
Kunde / client	neue Holzbau AG Lungern				
Gruppen B, C und D: Wegmessungen n'H			scale:	1:5	
			drawing:	03.10.23	brm
			control class:	KK2	brm
			size:	A3	
© neue Holzbau AG Lungern			N:\500_Engineering\531_F+E\02_Projekte\9505-123_WHFF-Ermüdung\650.Statik\9505-123_Statik_22-07-05_brm.2d		
neue Holzbau AG			Holzleimbau		Plan-No.
6078 Lungern			Ingenieur-Holzbau		9505-123
041/679 70 80			GSA®-Technologie		
holzbau@neueholzbau.ch			CNC-Abbundtechnik		
			www.neueholzbau.ch		

Messung der Verformungen während der Probelastung (C2 + D2),
respektive dem Ausziehversuch (B, C1 + D1)



Bauherr / owner	GSA-Ermüdung						
Objekt / project	WHFF						
Kunde / client	neue Holzbau AG Lungern						
Reihen C2 und D2: Wegmessungen Empa					scale:	1:5	
					drawing:	03.10.23	brm
					control class:	KK2	brm
					size:	A3	
© neue Holzbau AG Lungern							
N:\500_Engineering\531_F+E\02_Projekte\9505-123_WHFF-Ermüdung\650.Statik\9505-123_Statik_22-07-05_brm.2d							
neue Holzbau AG					Plan-No.		
6078 Lungern					Holzleimbau		
041/679 70 80					Ingenieur-Holzbau		
holzbau@neueholzbau.ch					GSA®-Technologie		
		www.neueholzbau.ch			CNC-Abbundtechnik		
		9505-123					

Messung der Verformungen während der Vorbelastung, dem Ermüdungsversuch und dem Ausziehversuch

