



Bewertung klimatischer Beanspruchungen von Anschlüssen mit eingeklebten Stangen in Buchenholz in Feuchtekasse 1

- BiRods in Buchenholz in FK 1 -

Abschlussbericht

Bericht Nr.	31HT-012935-R-01
Verfügungs-Nr.	01.0101.P2 I 1F811 F945 I 2021.02
Datum	18. April 2024
Auftraggeber/in	Bundesamt für Umwelt – BAFU Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung 3003 Bern
Adresse der Forschungsstelle	Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur Kompetenzbereich Holzbau Solothurnstrasse 102, CH-2504 Biel www.ahb.bfh.ch
Verfasser/in	Steffen Franke, Jeremias Bohl, Joel Philippe Karolin, Fabrice Donald Frei, Dio Hans Lins
Projektverantwortlicher	Prof. Dr. Steffen Franke
Leiter FDW	Prof. Dr. Frédéric Pichelin

Abstract

Anschlüsse mit eingeklebten Stangen (BiRods) in Buchenholz sind äusserst leistungsfähig und die Zukunft der Verbindungstechnologie von Holzhochhäusern, die in der Schweiz aktuell in Planung sind. Dennoch sind offene Fragen bzgl. der zusätzlichen Klimabelastung in Feuchtekategorie 1 in der Praxis existent und normative Prüfbestimmungen fehlen. Mit dem vorliegenden Forschungsprojekt konnte der erste Schritt zur Bewertung von zusätzlichen Spannungszuständen infolge der klimatischen Holzfeuchteänderung und zur Entwicklung eines realistischen Prüfprogrammes genommen werden. Für StabBuche konnte im Vergleich mit BauBuche ein gutmütigeres Quellverhalten erkannt werden. Für beide bauaufsichtlich zugelassenen Klebstoffsysteme (EPX und PUR) konnte kein tertiäres Kriechen nach EN 17334:2021 Abschnitt 10 festgestellt werden, wobei die Prüfung vorzeitig beendet werden musste, da bei sechs von sechs Prüfreiheiten mindestens zwei Probekörper versagt hatten.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Ziel der Arbeit und Vorgehensweise	6
2	Material und Methode	7
2.1	Material	7
2.2	Probekörper	7
2.2.1	Geometrien der Hauptprobekörper	7
2.2.2	Rohlingszuschnitt und Referenzproben für wägungsbasiertes Holzfeuchtemonitoring	8
2.2.3	Probekörper für messtechnikbasiertes Holzfeuchtemonitoring	9
2.3	Prüfeinrichtung und Messtechnik	9
2.3.1	Klimaerzeugung	9
2.3.2	Spannvorrichtung	9
2.3.3	Klimasensoren und Datenlogger	10
2.3.4	Wegmessuhren	10
2.4	Nomenklatur der Probekörper	10
2.5	Prüfmethode	11
2.5.1	Versuchsaufbau	11
2.5.2	Probekörperanordnung in der Klimakammer	12
2.5.3	Versuchsablauf	13
3	Ergebnisse	15
3.1	Dokumentiertes Klima der Auffeuchtungs- und Trocknungsperiode	15
3.2	Wägungsbasierte Holzfeuchteänderung der Referenzhölzer bei schwankender rel. Luftfeuchtigkeit	16
3.3	Prüfkörperversagen	16
3.4	Auswertung des messtechnikbasierten Holzfeuchtemonitorings	19
3.5	Klimainitiiertes Kriechverhalten von BiRods in Buchenholz in FK 1	20
4	Diskussion	22
4.1	Diskussion der Forschungsergebnisse	22
4.2	Anmerkungen zum Aufbau der Klimakammer	23

4.2.1 Auf- und Entfeuchten der Klimakammer	23
4.2.2 Spannvorrichtung, Monitoring der Spannkraft und der Messuhren	23
5 Zusammenfassung und Ausblick	25
6 Verzeichnisse	26
6.1 Literaturverzeichnis	26
6.2 Abbildungsverzeichnis	27
6.3 Tabellenverzeichnis	27
7 Anhang	28
7.1 Anhang A – Prüfkörperversagen	28
7.2 Anhang B – Messtechnikbasiertes Holzfeuchtemonitoring	33
7.3 Anhang C – Tertiäres Kriechen	34

1 Einleitung

Nadelholz hat sich in der Moderne als bevorzugtes Baumaterial bei Holzbauten gegenüber dem Laubholz durchgesetzt, was in seiner hohen Verfügbarkeit, seiner einfachen Bearbeitbarkeit und den guten Verklebungsmöglichkeiten begründet liegt. Die höhere Leistungsfähigkeit der Laubhölzer ist allerdings seit Jahrhunderten bekannt und mittlerweile konnte die Problematik der Verklebung für viele Holzarten behoben werden, wodurch die leistungsfähigsten Holzbauwerkstoffprodukte heutzutage aus verklebten Laubhölzern bestehen. Buchenholz, mit einer mittleren Rohdichte von 690 kg/m^3 , weist im Vergleich zum Fichtenholz (M Rohdichte: 460 kg/m^3) ein 1.5-mal höheres CO_2 -Speicherpotential auf, was ein klimaneutrales Bauen zusätzlich unterstützt und womit der Bundesrat das Ziel «bis 2050 eine klimaneutrale Schweiz» erreichen kann (bafu.ch, 2023). Die Buche stellt gleichermassen mit 18 % und 16 % den grössten Anteil der Laubhölzer im Schweizer respektive deutschen Forst dar (Eid. Forschungsanstalt WSL (2010); Bundeswaldinventur (2018)), wobei klimawandelbedingte Witterungsextreme eine Regression des Nadelwaldanteils und eine Progression des Laubwaldanteils bewirken. Laut dritter Bundeswaldinventur 2012 setzt sich die nächste Waldgeneration aus 53 % Laub-, 10 % Nadel- und 37 % Mischwald aus Laub- und Nadelbäumen zusammen (Schmitz, 2012). Dieser Baumartenwandel erfordert entsprechend eine Anpassung der Holzwirtschaft, sodass hochwertige Verwendungsmöglichkeiten für die heranwachsenden Laubhölzer geschaffen werden, wodurch eine höhere Wertschöpfung erreichen werden kann und es möglich wird, dem Klimawandel, basierend auf der Kaskadennutzung durch langfristige CO_2 -Speicherung, entgegenzuwirken.

Neue und hochtragfähige Holzwerkstoffprodukte auf Laubholzbasis leisten dabei einen entscheidenden Beitrag zur effektiven Nutzung der neuen Wälder. Produkte wie Buchenfurnierschichtholz, Brett-, Stab- und eventuell auch bald Segmentschichtholz aus Laubhölzern, können dem Stahl- und Stahlbetonbau Konkurrenz machen, was in erster Linie an der fortschreitenden Klebetechnik liegt. Geklebte Anschlüsse ermöglichen stoffschlüssige Verbindungen von Holz auch mit anderen Werkstoffen. Klebstoffverbindungen sind dabei nicht nur steifer als herkömmliche mechanische Verbindungsmittel wie Nägel, Stabdübel, Passbolzen etc., sondern geradezu immer auch tragfähiger (Vallée, 2020).

Eingeklebte Gewindestangen (engl. Bonded in Rods - BiRods) bilden eine der erwähnten geklebten Hochleistungs-Verbindungsmittelarten. Bei BiRods handelt es sich um drei-Komponenten-Systeme bestehend aus Klebstoff, Gewindestange und Holz. Dieses System gilt als eines der leistungsfähigsten Verbindungen im Ingenieurholzbau, wobei ein Abstimmen der beteiligten Komponenten aufeinander massgebend für die Zuverlässigkeit der Anschlüsse ist. Anschlüsse mit BiRods sind hauptsächlich für die Übertragung von Zug- bzw. Druckkräften vorgesehen. Je nach Anschlusstyp werden die Stangen parallel, geneigt oder senkrecht zur Faser eingebracht. Die Zug- und Druckkräfte werden dabei über die Klebefuge von der Stange in den Holzquerschnitt eingeleitet. Ziel ist es, eine Tragwiderstandshierarchie zu schaffen, die dem Duktilitätskriterium genügt (Franke, 2021). Damit die Verbindung duktil versagt, müssen die spröden Versagensmodi der Komponenten Klebstoff und Holz, bei gleichzeitiger maximaler Ausnutzung des Holzquerschnitts, ausgeschlossen werden. Dies stellt bei gewöhnlich eingesetzten Stahlfestigkeitsklassen von 8.8 und höher, besonders große Anforderungen an den verwendeten Klebstoff. Die Adhäsion des Klebstoffs zum Holz und die Klebstoffkohäsionskräfte sollten entsprechend größer sein als die Scherfestigkeit des Holzes an sich. Sind diese Voraussetzungen erfüllt, lässt sich die Verbindung im nächsten Schritt maximal wirtschaftlich über den duktilen Stahl bemessen, womit Folgendes gilt: $R_{5\%_{\text{spröd}}} \text{ (mit } R_{5\%_{\text{Klebstoff}}} > R_{5\%_{\text{Holz}}}) \geq R_{95\%_{\text{duktil}}}$. Um des Weiteren Deformationen aufgrund von Klebstoffsteifigkeiten auszuschließen, muss die Klebstofffuge eine höhere Steifigkeit aufweisen als das mittels Adhäsion verbundene Holz. Eine geeignete Tragfähigkeitshierarchie kann mittels Auszugversuchen und Dauerbelastungsversuchen bestimmt werden. Entsprechende Forschungsergebnisse zeigen, dass die Anwendung von BiRods in Buchenholz und in BauBuche Anschlüsse mit mehreren Meganewton ermöglichen, vgl. GSA®-Technologie, Heubuch et al. (2019), Franke et al. (2019), was sie, ergänzt durch ihre architektonischen, korrosions- und brandschutztechnischen Vorzüge, zu attraktiven Verbindungsmitteln im Holzhochbau macht.

Die Leistungsfähigkeit von BiRods wird durch zahlreiche Faktoren beeinflusst. Neben Anschlussgeometrien, Steifig- und Festigkeiten der Materialien und der Art der Krafteinleitung bergen besonders die anisotropen und die hygroskopischen Eigenschaften des Holzes zusätzliche Herausforderungen. Abhängig von dem Umgebungsklima aus Temperatur und relativer Luftfeuchte stellt sich im Holz eine Ausgleichsfeuchte ein. Buchenholz weist gegenüber Nadelholz ein wesentlich dynamischeres Schwind- und Quellverhalten auf. Nach SIA 265:2021 Abschnitt 3.6.2 ist das mittlere differenzielle Schwind- und Quellmass von Vollholz aus Buche um 20 % höher als das von Nadelholz ($\alpha_{90, \text{Buche}} = 0.30$ vs. $\alpha_{90, \text{Nadelholz}} =$

0.25). Eine Spannungsüberlagerung von statischen Lasten mit feuchteinduzierten Spannungen aufgrund von klimatischer Wechselbelastung birgt ein hohes Risiko, da bereits sehr kleine Mikrorisse, in Folge des behinderten Quell- und Schwindverhaltens, den notwendigen Verbund in der Klebefuge negativ beeinflussen und zum Tragfähigkeitsverlust führen können. Für BiRods in Nadelholz sind umfangreiche Untersuchungen zum Einfluss von konstruktiven Vorgaben, Temperatur und Holzfeuchte auf das Tragverhalten im europäischen Verbundprojekt «GIROD – Glued in Rods for Timber Structures», Bengtson et al. (2002) erfolgt. Die klimatischen Untersuchungen an BiRods in Nadelholz zeigen, dass es mitunter zu Traglastminderungen kommen kann und diese in der Bemessung und Qualitätssicherung nicht vernachlässigt werden können. Für Buche und ihre Holzwerkstoffprodukte sind vergleichbare Untersuchungen nicht verfügbar und die höhere klimatische Beeinflussbarkeit des Buchenholzes kann ausserdem zu deutlich anderen Spannungssituationen führen, welche eine Vielzahl an Versagensmodi bedeuten können. Typische, festgestellte Versagensmechanismen für BiRods sind die Folgenden:

- Versagen der Stahlstange
 - o Zugbruch unter Zugbelastung
 - o Ausknicken unter Druckbeanspruchung
- Versagen der Klebefuge
 - o im Übergang zum Holz (Adhäsionsversagen)
 - o in der Klebefuge (Kohäsionsversagen)
- Versagen des Holzbauteils
 - o Aufspalten
 - o Schubbruch Holz-Klebstoff-Interface
 - o Zugversagen des Nettoquerschnitts

Es ist bekannt, dass das Klima in Tragstrukturen, auch in der Feuchtekategorie 1, selten konstant ist und auch stark vom Gebäudetyp abhängt. Veröffentlichte Monitoring Kampagnen von Gamper et al. (2014) oder Franke et al. (2019) zeigen, dass durch normale Nutzungen Feuchteschwankungen von bis zu $\Delta u = 6 \text{ M \%}$ auch in Feuchtekategorie 1 auftreten können. Für die klimatisch beeinflussenden Effekte auf BiRods in Buchenholz liegen keine normativen oder bemessungsrelevanten Regelungen vor. Es fehlen auf diesem Gebiet auch einheitlich geregelte Prüfgrundlagen zur Einschätzung dieses Effektes. EN 17334:2021 mit dem Titel «Eingeklebte Stangen in tragenden geklebten Holzprodukten – Prüfung, Anforderungen und Scherfestigkeitsklassifizierung», gibt nur sehr strenge Prüfbedingungen für Anwendungen in Feuchtekategorie 2 vor und ist für Nadelholz geschrieben. EN 17334:2021 - Absatz 10 definiert Verklebungs-Kriechprüfungen bei sehr hohem und niedrigem Feuchtegehalt. Das Prüfprozedere beinhaltet in zeitlicher Reihenfolge eine Auffeuchtung von $12 \pm 1 \text{ \%}$ auf $18 \text{ \%} - 20 \text{ \%}$ und eine Abtrocknung auf $8 \pm 1 \text{ \%}$ des Anschlusses unter einer stetigen Lasteinwirkung mit $80 \text{ \%}$ des charakteristischen Tragwiderstandes. Entsprechend ist eine 1:1 Anwendung für BiRods in Buchenholzprodukten und auch für die FK 1 kritisch zu sehen. In einem möglichen Beanspruchungsszenario in der FK 1 können über die Stufen der Herstellung, Bauphase, Nutzung und Havarie eine Auffeuchtung mit anschliessender Abtrocknung auftreten. Laut Herstellerrichtlinie kann man von einer Herstellungsfeuchte von $8 \pm 2 \text{ \%}$ für Buchen-BSH oder Stabschichtholz und von $6 \pm 2 \text{ \%}$ bei BauBuche ausgehen, weswegen es einer differenzierten Evaluierung der BiRod-Verbindung in Feuchtekategorie 1 bedarf. Hier schloss das vorliegende Forschungsprojekt an und der vorliegende Bericht gibt Auskunft über die obigen Fragestellungen.

1.1 Ziel der Arbeit und Vorgehensweise

Anschlüsse mit eingeklebten Stangen (BiRods) in Buchenholz sind äusserst leistungsfähig und die Zukunft der Verbindungstechnologie von u.a. Holzhochhäusern, da sie durch ihr Einbetten im Holz zusätzlich ästhetischen Vorzügen und Anforderungen an den Brand- und Korrosionsschutz genügen. Mit dem vorliegenden Forschungsprojekt sollten offene Fragen bzgl. der zusätzlichen Klimabelastung in Feuchtekategorie 1 eruiert und Wissenslücken der normativen Prüfbestimmungen geschlossen werden. Ziel war es daher, Rand- und Prüfgrössen für die Feuchtekategorie 1 zu erarbeiten, um eine dauerhafte qualitätssichere Leistungsfähigkeit von BiRods zu ermöglichen und bisher verwendeten Festigkeiten zu bewerten.

Die Beurteilung zusätzlicher Spannungszustände, infolge der klimatischen Holzfeuchteänderung, stand genauso wie die Entwicklung eines realistischen Prüfprogrammes im Vordergrund. Gemeinsam mit Vertretern aus der Branche sollten erste Prüfgrundlagen und bemessungsrelevante klimatische Kenngrössen für die Anwendung von eingeklebten Stangen in Buchenholz erarbeitet und öffentlich diskutiert, wie auch publiziert werden.

2 Material und Methode

In diesem Kapitel werden Prüfmethode und geprüfte Materialien dargestellt. 2.1 gibt hierbei eine Übersicht über verwendete Materialien und 2.5 zeigt die Prüfmethode in Anlehnung an EN 17334:2021 auf.

2.1 Material

In dem Forschungsvorhaben wurden drei Probekörperkonfigurationen getestet. Dabei kamen zwei Klebstoffsysteme (PUR: Henkel CR821; EPX: GSA-Harz) und zwei Holzwerkstoffarten (Stabschichtholz aus Buche - SSH; Furnierschichtholz aus Buche / BauBuche – BB) mit den Abmessungen 60 mm x 60 mm und 120 mm x 120 mm zum Einsatz. Es ergaben sich insgesamt sechs Prüfserien mit jeweils fünf Probekörpern (in Anlehnung an EN 17334:2021 - Abschnitt 10). Die untenstehende Abbildung 1 stellt die Materialkonfigurationen und Prüfserien dar. Eine genauere Definition der Nomenklatur wird in 2.4 gegeben.

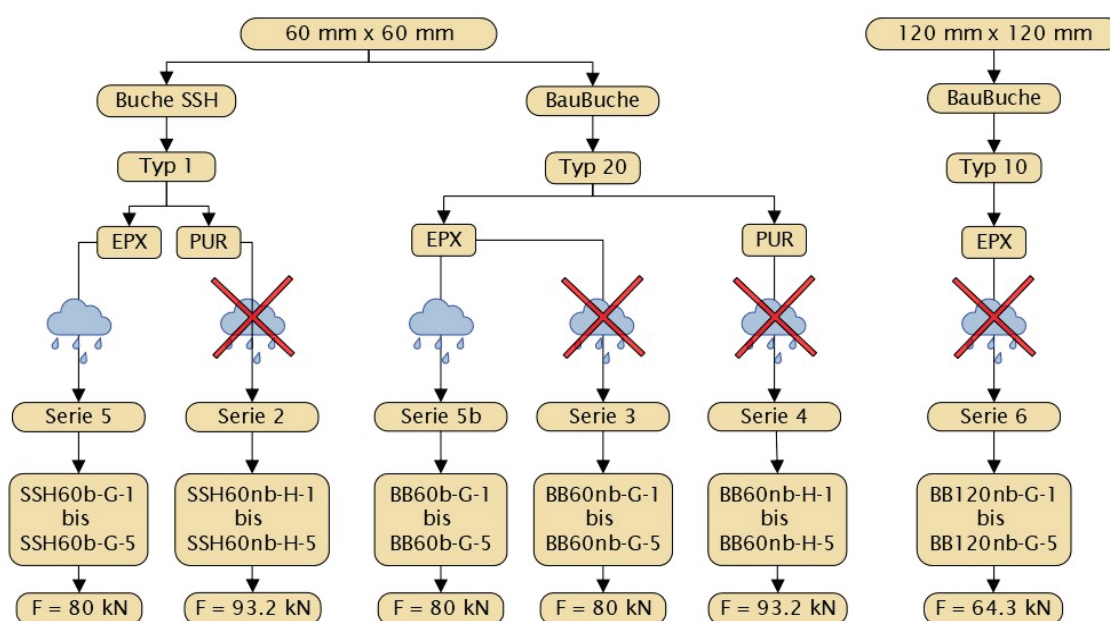


Abbildung 1: Übersicht über Materialkonfigurationen und Prüfserien

2.2 Probekörper

Bei dem vorliegenden Forschungsvorhaben fanden mehrere Probekörperarten Verwendung. Die Geometrien der Hauptprobekörper werden in 2.2.1 aufgezeigt. Diese wurden aus den in 2.2.2 dargestellten Rohlingen geschnitten, wodurch gleichzeitig sowohl Referenzproben für das Feuchtemonitoring während des Versuchs als auch Darrproben zur Bestimmung der Anfangsholzfeuchte entstanden.

2.2.1 Geometrien der Hauptprobekörper

Abbildung 2 zeigt die unterschiedlichen Probekörpertypen, welche in dem Forschungsprojekt untersucht wurden. Bei Typ 1 und Typ 20 handelte es sich um Probekörper mit einem quadratischen Querschnitt von 60 mm Kantenlänge. Typ 10 wies den vierfachen Querschnitt auf und bestand genau wie Typ 20 aus BauBuche. Typ 1 wurde aus Stabschichtholz aus Buche hergestellt. Typ 1 und Typ 20 wurden sowohl mit GSA-Harz (Epoxid-Klebstoff; Z-9.1-778) als auch mit Henkel CR821 (Polyurethan-Klebstoff; Z-9.1-896) verklebt, während Typ 10 lediglich mit dem Klebstoff der *neuen Holzbau AG* produziert wurde. Der Bohrlochdurchmesser mass bei allen Typen 18 mm; die Festigkeitsklasse der M16 Gewindestangen war 8.8 zuzuordnen; diese wurden zentriert und faserparallel eingeklebt. Bei den 60

mm x 60 mm Probekörper (Typ 1 und Typ 20) wurde eine Länge von 290 mm verklebt; die unverklebte Länge am Stirnholzende wies 65 mm auf und war im unteren Bereich für 55 mm auf $\varnothing 13.5$ mm abgedreht. Typ 10 wurde um 90 mm kürzer verklebt, die abgedrehte Länge betrug 40 mm und der unverklebte Bereich mass 50 mm vom Hirnholzende. Die beidseitig faserparallel verklebten M16 BiRods ragten bei allen Typen um 75 mm über das Hirnholz hinaus und das Hirnholz wurde versiegelt. Die *neue Holzbau AG* produzierte alle Probekörper.

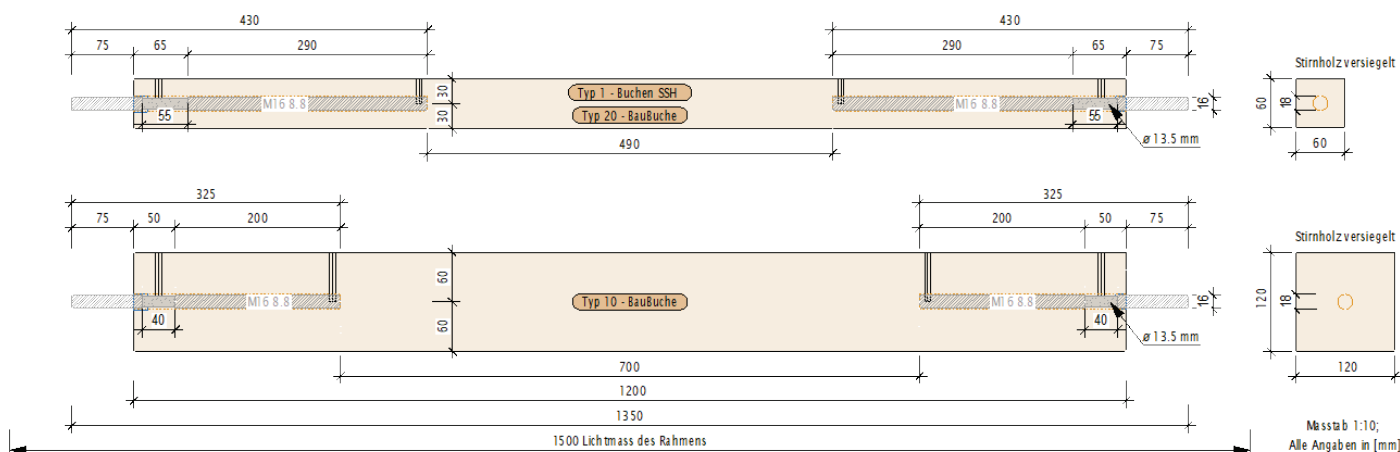


Abbildung 2: Probekörpertypen der BiRod-Serien

2.2.2 Rohlingszuschnitt und Referenzproben für wägungsbasiertes Holzfeuchtemonitoring

Die obig dargestellten Proben (vgl. Abbildung 2) der verschiedenen Serien wurden mitunter nach dem in Abbildung 3 (beispielhaft für Prüfkörper vom Typ 1) gezeigten Prinzip hergestellt. Muster vom Typ 10 und Typ 20 folgten einem ähnlichen Herstellungsprozess, jedoch wurden nicht allen Probekörpern Referenzhölzer zugewiesen. In 2.5.2 wird die Zuordnung in der Klimakammer dargestellt. Den Probekörpern konnte so ein Referenzholz zugewiesen werden, welches während des Tests zum Erfassen der Holzfeuchteänderung genutzt wurde. Mittels drei Darrproben je Rohling (entnommen an den Stabenden und an zentraler Position) wurde die Anfangsholzfeuchte der Haupt- und Referenzproben bestimmt. Zusätzlich wurden drei 120 mm x 120 mm und zehn 60 mm x 60 mm Referenzen für Fichtenholz hergestellt.

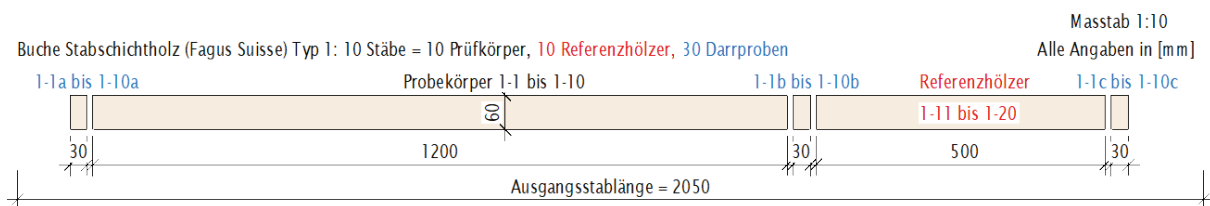
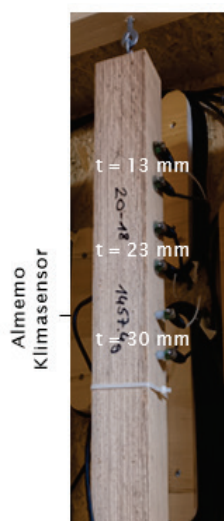


Abbildung 3: Zuschnittsplan für die Probekörperrohlinge

2.2.3 Probekörper für messtechnikbasiertes Holzfeuchtemonitoring



In der nebenstehenden Abbildung 4 ist das messtechnikbasierte Holzfeuchtemonitoring beispielhaft für Zuschnittsnummer 20-18 dargestellt. Sechs 60 mm x 60 mm Probekörper (2 x BauBuche, 2x Buchen-SSH, 2 x Fichte) wurden auf diese Weise überwacht. Elektrodenpaare wurden auf 13 mm, 23 mm und 30 mm in die Probekörper eingeschlagen, was ein Aufzeichnen der Holzfeuchte mittels Widerstandsmessungen (*Thermofox Universallogger* der *Scantronik Mugrauer GmbH*) ermöglichte. Referenzprobekörper 1-11 und 20-18 erhielten ausserdem einen Klimasetensor, welcher mittig in ein 30 mm tiefes Loch eingebracht wurde. Diese Sensoren ermöglichte es die Temperatur und die Umgebungsfeuchte in diesem isolierten Raum aufzuzeichnen, wodurch die resultierende Holzfeuchte mittels Sorptionsmethode bestimmt werden konnte. Die Daten des Sensors wurden mit dem *Almemo Datenlogger 2690-8A* der Firma *Ahlborn* aufgezeichnet.

Zwei 120 mm x 120 mm Referenzprüfkörper wurden ebenfalls mit Widerstandsmessern ausgestattet. Die Zuschnittsnummern 30-1 (Fichte) und 10-14 (BauBuche) wurden zusätzlich zu den oben genannten Messtiefen mit Elektrodenpaaren auf 38 mm und 60 mm Tiefe ausgerüstet.

Abbildung 4: Messtechnikbasiertes Holzfeuchtemonitoring

2.3 Prüfeinrichtung und Messtechnik

Nachfolgend werden die Messtechnik und die Prüfeinrichtung des Forschungsvorhabens kurz vorgestellt. Anordnung der einzelnen Elemente sind Abbildung 6 und Abbildung 7 zu entnehmen.

2.3.1 Klimaerzeugung

Der *Condair 505 Rotationszerstäuber* der *Condair Group AG* zusammen mit *mechanischem Kanalhygrostat MHD* ermöglichte eine präzise Kontrolle der Luftfeuchtigkeit in der Klimakammer. In der Aufbereitungsphase konnte so das gewünschte Raumklima erzeugt werden.

In der Trocknungsphase wurde das Luftentfeuchtungsgerät *TTK 355 S* der *Trotec GmbH* eingesetzt, um die Luftfeuchtigkeit in der Kammer gezielt zu reduzieren.

Unmittelbar neben dem Rotationszerstäuber und direkt oberhalb des Luftentfeuchters wurde ein Ventilator angebracht (vgl. Abbildung 7), um ein gleichmässiges Klima in der Kammer zu erzeugen. Es befanden sich keine Probekörper in direkter Wirkrichtung.

2.3.2 Spannvorrichtung

Die Vorspannkraft wurde mittels *RCH-1211-Hohlkolbenzylinder* mit *P-202 Handpumpe* der *Schalcher GmbH* generiert, mittels Manometer auf den Zieldruck gebracht und anschliessend mit dem *CY-M16 Superbolt* der *Nord-Lock Group* während des Dauerbelastungsvorgangs auf dem gewünschten Lastniveau gehalten. Referenzprüfkörper wurden mit anfänglich kalibrierten Kraftmessringen (200 kN HBM KMR und 200 kN Burster 8438 6200) gerüstet, welche eine kontinuierliche Kontrolle des Kraftniveaus ermöglichten. Ein weiteres Element der Spannvorrichtung waren am Fusspunkt des Rahmens gegensätzlich angeordnete (<>) *50CrV4-Tellerfedern* (125 x 61 x 8 x 10.9) der *Alcomex Federn GmbH*, deren Last-Verformungsverhalten zuvor bestimmt wurden. Sie trugen zu einem stabilen Kraftniveau bei.

Ein *Almemo Datenlogger 2690-8A* ermöglichte das kontinuierliche Aufzeichnen des Kraftniveaus der Kraftmessringe. Mit ihm wurden ausserdem die *Almemo Temperatur-/ Feuchte-/ Luftdrucksensor FHAD 46-COLO5* der Firma *Ahlborn* (vgl. 2.3.3) und damit das Referenzprobekörper-Klima aufgezeichnet.

2.3.3 Klimasensoren und Datenlogger

Das Klima in der Klimakammer wurde mittels zweier voneinander unabhängiger Systeme überwacht. Für beide System wurden jeweils zwei Datenlogger verwendet, um maximale Genauigkeiten bei der Klimaaufzeichnung zu erreichen. Namentlich handelte es sich um die folgenden Geräte:

- *Almemo 2470 1 SCRH* mit Klimasensor der Firma *Ahlborn*
- *Thermofox Universallogger* mit Gigamodul und Hygrofox der *Scantronik Mugrauer GmbH*

Wie bereits zuvor erwähnt, wurde das Klima innerhalb zweier Referenzprobekörper mittels *Almemo Temperatur-/ Feuchte-/ Luftdrucksensor FHAD 46-COL05* der Firma *Ahlborn* aufgezeichnet.

2.3.4 Wegmessuhren

Zwei Messuhrtypen fanden in den Untersuchungen Gebrauch:

- *Futuro-Feinmessuhr* (0.001 mm Skalierung)
- *Futuro-Messuhren* (0.01 mm Skalierung)

Die feiner skalierten Messuhren dienten zur Bestimmung der Tellerfederdeformation, worüber mittels Kraft-Weg Korrelation zu Beginn der Untersuchungen das Kraftniveau der Prüferie bestimmt werden sollte. Diese Herangehensweise stellte sich allerdings als fehleranfällig heraus, weswegen später lediglich die dauerhaft überwachten Kraftmessringe als Referenz des Nach- oder Entspannens der Probekörper genutzt wurden. Auch würde eine Verwendung von Kraft-Weg-Korrelationen der Tellerfedern bedeuten, dass diese Abhängigkeit bei weiteren Forschungsvorhaben für die einzelnen Pakete erneut getestet werden müsste, da die insgesamt Verformung sehr gering ist, die Federkraft bei erneutem Belasten abweichen kann und das Kraftniveau daher verfehlt werden könnte. Dies widerspricht im gewissen Mass dem Ziel einer fehlerminimierten Prüfvorschrift.

Mit dem zweiten Messuhrentyp (0.01 mm Skalierung) wurden Relativverformungen der eingeklebten Stangen am Hirnholzende gemessen und dokumentiert, worüber das Kriechverformungsverhalten der Verbindung unter klimatischen Einflüssen (EN 17334:2021 Abschnitt 10) bestimmt werden konnte.

2.4 Nomenklatur der Probekörper

Abbildung 5 zeigt die Nomenklatur der Probekörper. Die einzelnen Prüferien lassen sich anhand deren Probekörperbezeichnung differenzieren, weswegen auf ein explizites Erwähnen in der Nomenklatur verzichtet wurde.

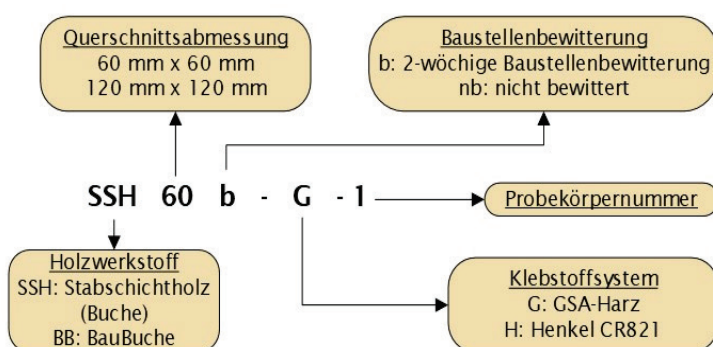


Abbildung 5: Prüfkörpernomenklatur

2.5 Prüfmethode

In diesem Abschnitt wird die Prüfmethode dargestellt. Anfangs wird hierfür der Versuchsaufbau beschrieben. 2.5.2 stellt anschliessend die Anordnung der Probekörper und Messtechnik in der Klimakammer dar und abschliessend wird der Versuchsablauf beschrieben.

2.5.1 Versuchsaufbau

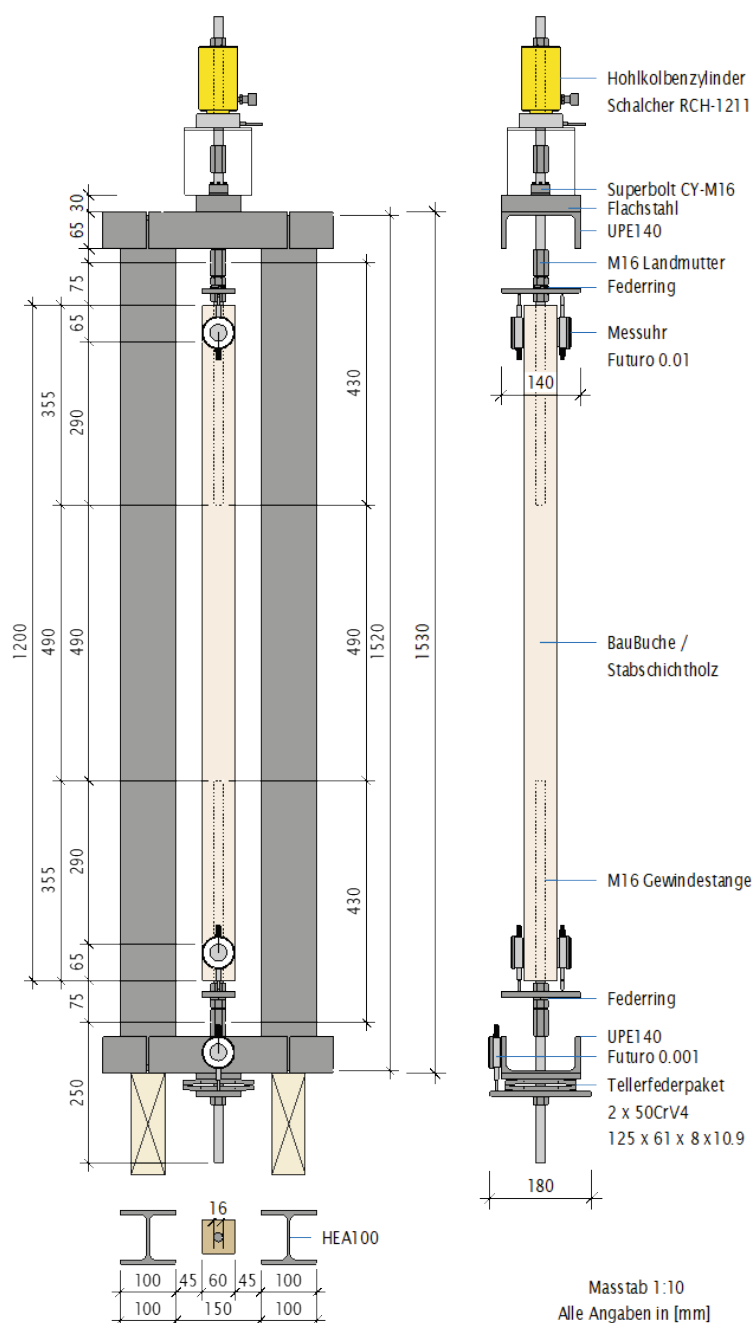


Abbildung 6: Versuchsaufbau BiRods in FK 1

damit ein stabiles 80 %-Kraftniveau (gefordert in EN 17334:2021 Abschnitt 10) über die Versuchsdauer ermöglichte. Zur ersten Vorspannung des Systems wurde ein *RCH-1211-Hohlkolbenzylinder* der *Schaller GmbH* verwendet, welcher mit der dazugehörigen *P-202 Handpumpe* (0-700 bar) betrieben wurde. Die zur Kopplung und Krafteinleitung dienende Langmutter oberhalb des *CY-M16 Superbolts* wurde nach dem Vorspannprozess zusammen mit dem verwendeten Rundprofil und dem Hohlkolbenzylinder entfernt.

Der Versuchsaufbau ist in der nebenstehenden Abbildung 6 beispielhaft für 60 mm x 60 mm Probekörper dargestellt. Dieser Aufbau gilt gleichermaßen für Serie 6 (120 mm x 120 mm).

Zwischen einen Prüfraumen von 1530 mm Länge, bestehend aus vertikalen HEA100 und horizontalen UPE140 Profilen, wurden die 1200 mm langen Holzwerkstoffkörper gespannt. Auf der Unterseite des UPE140-Profils wurde ein zuvor getestetes Tellerfederpaket angebracht. Mit einer Futuro-Feinmessuhr (0.001 mm Skalierung) sollte die Verformung des Tellerfederpakets aufgezeichnet werden. Unterhalb des Flachstahls des Tellerfederpakets wurden in zwei Fällen (BBS60nb-H-5 und SSH60nb-H-5 vgl. Abbildung 7) Kraftmessringe angebracht, die eine genaue Überwachung des Lastniveaus erlaubten. Eine Langmutter diente oberhalb des UPE140-Profils als Kopplung der M16 Gewindestangen von Probekörper und Tellerfederpaketaufbau. Ein Flachstahl wurde an den Enden der eingeklebten Gewindestange des Probekörpers mittels Sechskantmutter und Federring in Position gehalten. Futuro-Messuhren (0.01 mm Skalierung) wurden für jeweils 2 Probekörper je Serie hirnholznahe an die Seiten der Probekörper geklebt. Die Taster waren auf dem Flachstahl positioniert und erlaubten es die Verformungen der Verbindungen aufzuzeichnen. Am oberen Hirnholzende wurden die metrischen Gewindestangen erneut mittels Langmutter gekoppelt und durch das obere UPE140-Profil und einen 30 mm dicken Flachstahl (L: 140 mm; B: 80 mm) geführt. Auf diesem war wiederum ein *CY-M16 Superbolt* der Nord-Lock Group angeordnet, welcher ein progressives Nach- oder Entspannen und

2.5.2 Probekörperanordnung in der Klimakammer

Die Anordnungen der Probekörper und Referenzhölzer werden in Abbildung 7 aufgezeigt. Die Serien mit zweiwöchiger Beregnungs-Simulation (Serien 5 und 5b) sind blau hervorgehoben. Die obere Kachel benennt den Probekörper und dessen Zuschnittsnummer. Die den Probekörpern zugeordneten Referenzhölzer zur wägungsbasierten Holzfeuchtemessung sind in der darunterliegenden Kachel vermerkt. Sofern Messuhren oder Kraftmessringe an dem Probekörper angebracht wurden, ist diese Zuordnung ebenfalls in der unteren Kachel zu finden. Die Positionen des Luftbefeuchters, des Ventilators und der Tür zur Klimakammer sind der Abbildung ebenfalls zu entnehmen. Der Luftentfeuchter der Trocknungsphase wurde unter dem Ventilator positioniert. Ersatzprobekörper BBS60-G-11 (Zuschnittsnummer 20-16) wurde nach Versagen des ersten Probekörpers an dessen Stelle eingespannt. Abbildung 7 zeigt ausserdem die Orte der drei Messstationen.

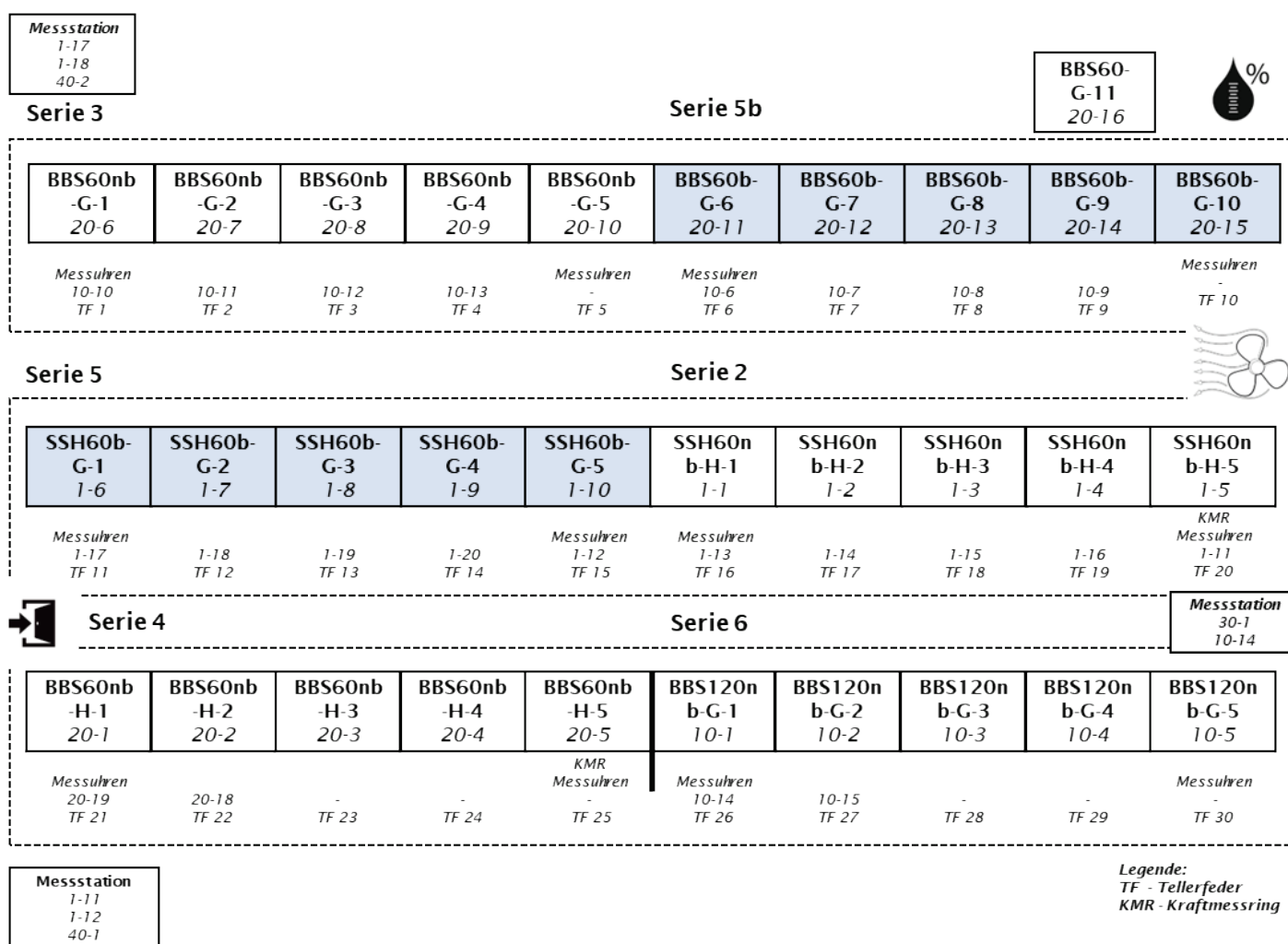


Abbildung 7: Probekörper- und Referenzkörperanordnung in der Klimakammer



Die nebenstehende Abbildung 8 zeigt die Klimakammer des Forschungsvorhabens aus Blickwinkel der Tür. Gut ersichtlich sind die Probekörper mit ihren darüber angeordneten Referenzhölzern zur wägungsbasierten Holzfeuchtebestimmung. Im hinteren Teil ist des Weiteren die Messstation mit den Referenzhölzern 30-1 und 10-14 erkennbar.

Abbildung 8: Prüfkammer des Forschungsvorhabens

2.5.3 Versuchsablauf

Der Ablauf des Forschungsvorhabens kann Abbildung 9 entnommen werden. Für die ersten 20 Tage wurde die Klimakammer bei 20 °C und 85 % relativer Luftfeuchte (rel. LF) scharf aufgefuehrt. In den ersten zwei Wochen wurde zusätzlich eine baustellenseitige Beregnung der Probekörper simuliert. Hierfür wurden die Serien 5 und 5b zweimal täglich mit einer mittleren Wassermenge von 430 ml besprüht. Appliziert wurde diese Gesamtmenge allseitig auf den Probekörpern und den Referenzhölzern. Nach dieser starken Aufuehrtungsphase von 20 Tagen wurde die rel. LF für 30 Tage leicht auf 80 % bei 20 °C reduziert. In dieser Zeit konnte in den Fichtenreferenzhölzern eine Ausgleichsfeuchte erreicht werden.

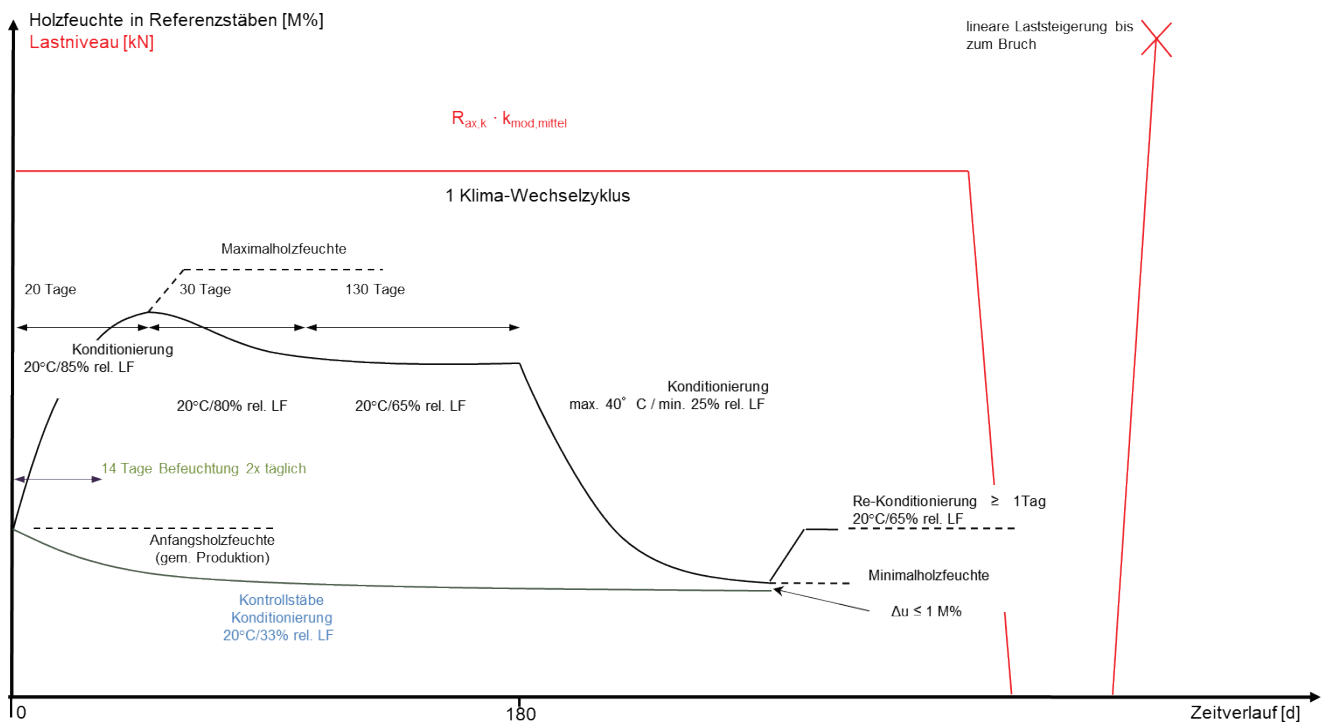


Abbildung 9: Versuchsablauf des Forschungsprojekts (erstellt von B. Zumbrunn-Maurer)

Die dritte Phase der Auffeuchtungsperiode von 130 Tagen wurde bei 20 °C und einer rel. LF von 65 % ausgeführt. Nach dem halbjährigen Auffeuchtungszeitraum wurde ein Entfeuchtungsgerät betrieben, um bei max. 40 °C die rel. LF bis auf min. 25 % zu reduzieren.

Die Vorspannkraft von 80 % wurde mittels hydraulischem Hohlkolbenzylinder und *CY-M16 Superbolts* aufgebracht, wobei die notwendigen Drehmomente für 64.3 kN, 80 kN und 93.2 kN nach dem Vorspannungsschema des Herstellers bestimmt wurden. Zwei Probekörper wurden mit Kraftmessringen ausgestattet (anfangs geplant für Serie 2 und Serie 4 – beide 93.2 kN; dann angepasst auf Serie 4 und Serie 5, um akkuratere Referenzen für 93.2 kN und 80 kN Probekörper zu bekommen). Eine Nach- oder Entspannung der Proben wurde bei Zielkraftniveau ± 5 % vorgenommen. Die Nachspannhäufigkeit ist in 3.5 Abbildung 16 dargestellt. Das Lastniveau wurde kontinuierlich mittels *Almemo Datenlogger 2690-8A* aufgezeichnet.

Um ein Nachstellen des Vorspannprozesses zu ermöglichen, wird dieser nachfolgend aufgezeigt:

- Zielniveau 64 kN
 - 300 Bar (53 kN) mit Hydraulikpumpvorrichtung
 - 11 kN mit Drehmomentenschlüssel (eingestellt auf 13 Nm): 2 x kreuzweise, 2 x im Uhrzeigersinn
- Zielniveau 80 kN
 - 360 Bar (68 kN) mit Hydraulikpumpvorrichtung
 - 12 kN mit Drehmomentenschlüssel (eingestellt auf 15 Nm): 2 x kreuzweise, 2 x im Uhrzeigersinn
- Zielniveau 93.2 kN
 - 440 Bar (80 kN) mit Hydraulikpumpvorrichtung
 - 13 kN mit Drehmomentenschlüssel (eingestellt auf 22 Nm): 2 x kreuzweise, 2 x im Uhrzeigersinn

Da Serie 6 (64.3 kN) nicht mit einem Kraftmessring bestückt war, wurde der 80 kN Probekörper als Referenz genutzt. Nach der Auffeuchtungsphase wurden alle Probekörper kurzzeitig entlastet und direkt wiederbelastet, um die Trocknungsphase mit maximal exakten Kraftniveaus zu beginnen. Die mittels Hubzylinder erzeugte Kraft diente bei diesem Vorgang der Abschätzung der ungefähr vorhandenen Zugkraft auf den Stäben am Ende der Auffeuchtung. Die Abweichung lag bei etwa ± 3 % vom Soll.

Zwei Prüfkörper je Serie wurden mit jeweils 4 Messuhren ausgerüstet, welche die Verformung der Verbindung aufzeichneten und eine «Verklebungs-Kriechbruchprüfung bei sehr hohem und niedrigem Feuchtegehalt» nach EN 17334:2021 Abschnitt 10 erlaubten. In den ersten drei Wochen nach Versuchstart wurden diese Messuhren einmal täglich abgelesen. Nach diesen 21 Tagen wurde die Ablesefrequenz auf einmal wöchentlich reduziert.

Die Anfangsholzfeuchte der Referenzhölzer wurde basierend auf den anfangs genommenen Darrproben berechnet. Von diesem Wert ausgehend wurde ein wägungsbasiertes Holzfeuchtemonitoring über den Verlauf des Forschungsprojekts ausgeführt. Hierfür wurden die Referenzhölzer wöchentlich gewogen und die Holzfeuchte ([M%]) entsprechend bestimmt. Nach eventuellem Probekörperversagen wurde die akkurate Holzfeuchte des versagten Probekörpers anhand von drei mittig entnommenen Darrproben ermittelt. Nach dem Beenden der Trocknungsphase wurden 3 Darrproben aus der Mitte der Referenzhölzer entnommen. Die wägungsbasierten Holzfeuchtekurven wurden auf Grundlage der akkuraten Darrproben-Holzfeuchten abschliessend korrigiert.

Das Raumklima wurde mit je zwei Loggern der Hersteller *Ahlborn* und *Scantronik* (vgl. 2.3.3) aufgezeichnet. Die Holzfeuchte der acht dauerüberwachten Probekörper, das Lastniveau der Kraftmessringe und das Innenklima der Referenzhölzer 1-11 und 20-18 wurden gleichermassen im 15-minütigen Abstand aufgenommen. Die Messtechnik wurde in 2-wöchigen Intervallen ausgelesen.

3 Ergebnisse

In dem nachfolgenden Kapitel werden die Ergebnisse des Forschungsprojekts unterbreitet. Dabei wird das Probekörper- und Referenzholzverhalten in Abhängigkeit der klimatischen Wechselbedingungen aufgezeigt und das Kriechverhalten der eingeklebten Stangen dargestellt.

3.1 Dokumentiertes Klima der Auffeuchtungs- und Trocknungsperiode

Abbildung 10 zeigt die Auswertung der mittleren messtechnikbasierte Klimamessungen der beiden Sensorsysteme (*Thermofox Universallogger*, *Almemo 2470 1 SCRH*). Die einzelnen Phasen der Auffeuchtungsperiode nach Abbildung 9 sind dabei kenntlich gemacht. Der gezeigte Mittelwert basiert auf jeweils 2 Datenloggern je System. Die Datenlogger-Abweichungen innerhalb der Messsysteme war mit 0.17 °C und 0.1 % rel. LF (*Thermofox*) respektive 0.1 °C und 0.5 % rel. LF (*Almemo*) im Mittel gering. Zwischen den Messsystemen kam es zu einer mittleren Abweichung von 0.43 °C und 0.64 % rel. LF.

In weiterführenden Auswertungen wird ein Mittelwert der beiden Messsysteme respektive der 4 Datenlogger verwendet.

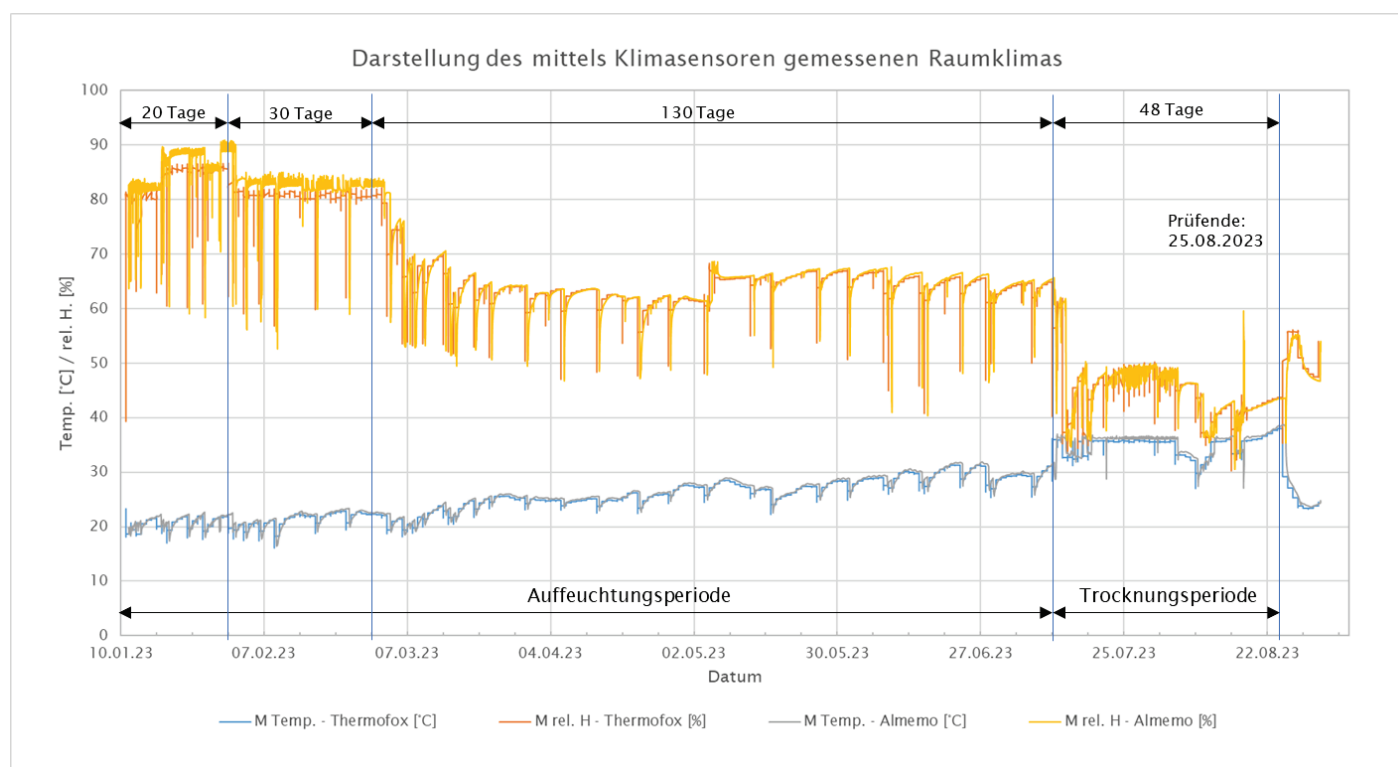


Abbildung 10: Messtechnikbasierte Klimamessungen

3.2 Wägungsbasierte Holzfeuchteänderung der Referenzhölzer bei schwankender rel. Luftfeuchtigkeit

Der Einfluss der klimatischen Wechselbedingungen auf die Holzfeuchte der Referenzhölzer ist in Abbildung 11 dargestellt. Die mittlere relative Luftfeuchtigkeit wird hierbei auf der Sekundärachse angegeben. Der Einfluss der unterschiedlichen Auffeuchtungsphasen nach Abbildung 9 ist klar erkennbar. Während die 60 mm x 60 mm Probekörper aus SSH (sowohl zweiwöchig bewässert -Serie 5- als auch unbewässert -Serie 2) ein ähnliches Auffeuchtungsverhalten wie Fichte (60/60) zeigen und in der dritten Auffeuchtungsphase eine beinahe gleiche Ausgleichsfeuchte (gleichermaßen mit Fichte 120 mm x 120 mm) erreichen, ist der Einfluss einer zweiwöchigen Bewässerung bei BauBuche -Serie 5b- klar erkennbar. Die versagten Probekörper sind ebenfalls in Abbildung 11 markiert. Eine übersichtlichere Darstellung des Einflusses der rel. Luftfeuchtigkeit auf das Tragverhalten respektive Prüfkörperversagen ist unter 3.3 zu finden.

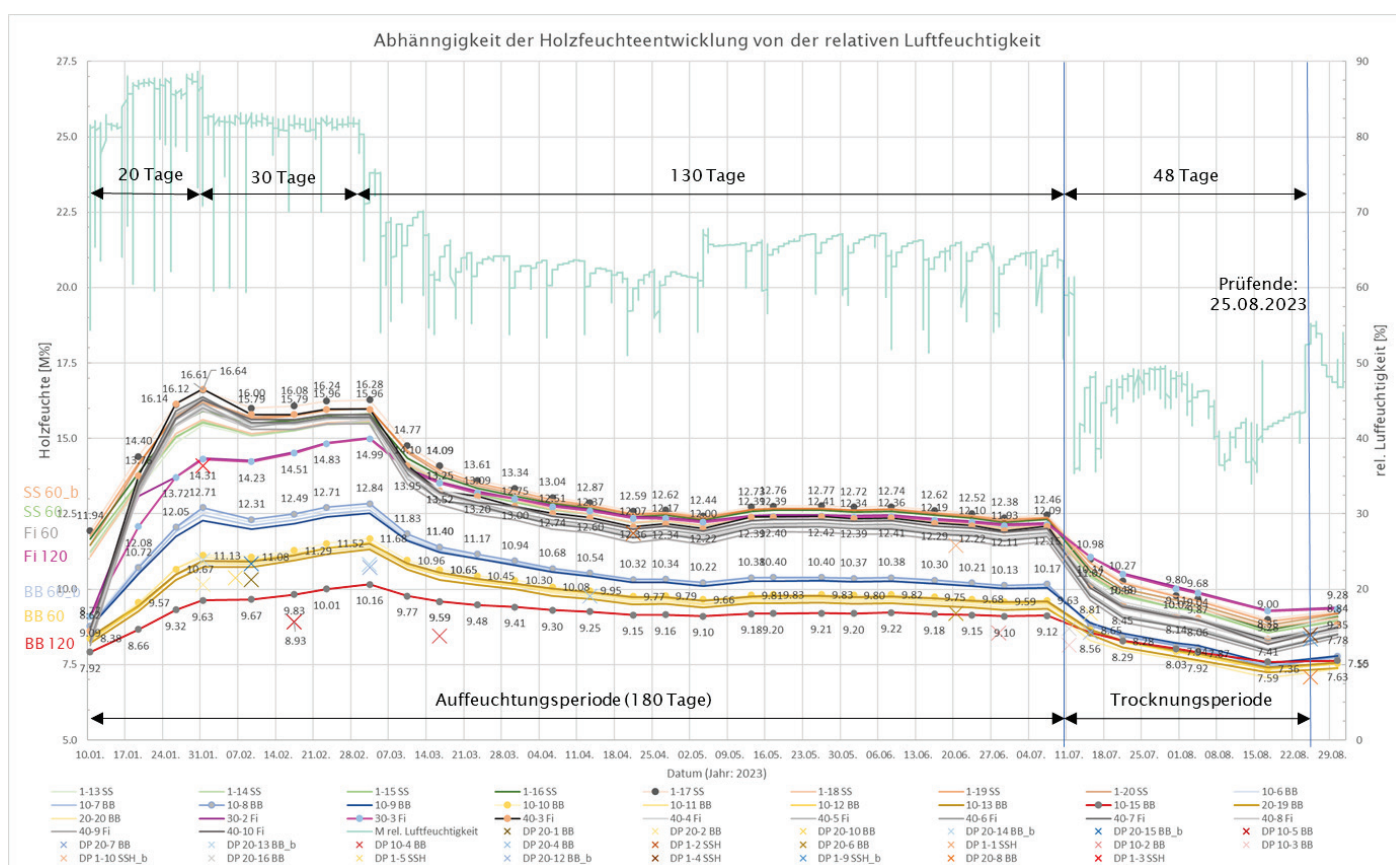


Abbildung 11: Darstellung der Holzfeuchteänderung unter klimatischen Wechselbedingungen

3.3 Prüfkörperversagen

Abbildung 12 zeigt das Prüfkörperversagen der einzelnen Serien und ergänzt damit Abbildung 7 in der unteren Kachel mit Angaben zum Versagensdatum. Die Versagensmodi können mittels Farbuordnung unterschieden werden. Rote Kreuze bedeuten ein Aufspaltversagen, blaue ein Herausziehen der Stange und grün ein Versagen im Nettoquerschnitt. Den unterschiedlichen Probekörpertypen kann dabei jeweils eindeutig ein Versagensmodus zugeordnet werden. Während BauBuche (Typ 20) mit geringem Randabstand unabhängig vom Klebstoffsystem und der Anfangsbewitterung einheitlich durch Aufspalten versagte, konnte bei Buchen-Stabschichtholz (Typ 1) ein Versagen im Nettoquerschnitt festgestellt werden. Auch hier war keine Abhängigkeit von der simulierten Baustellenbewitterung erkennbar. Probekörper mit grossem Randabstand (Typ 10), welche den geforderten Geometrien nach EN 17334:2021 genügten, versagten einheitlich aufgrund von Stangenherausziehens.

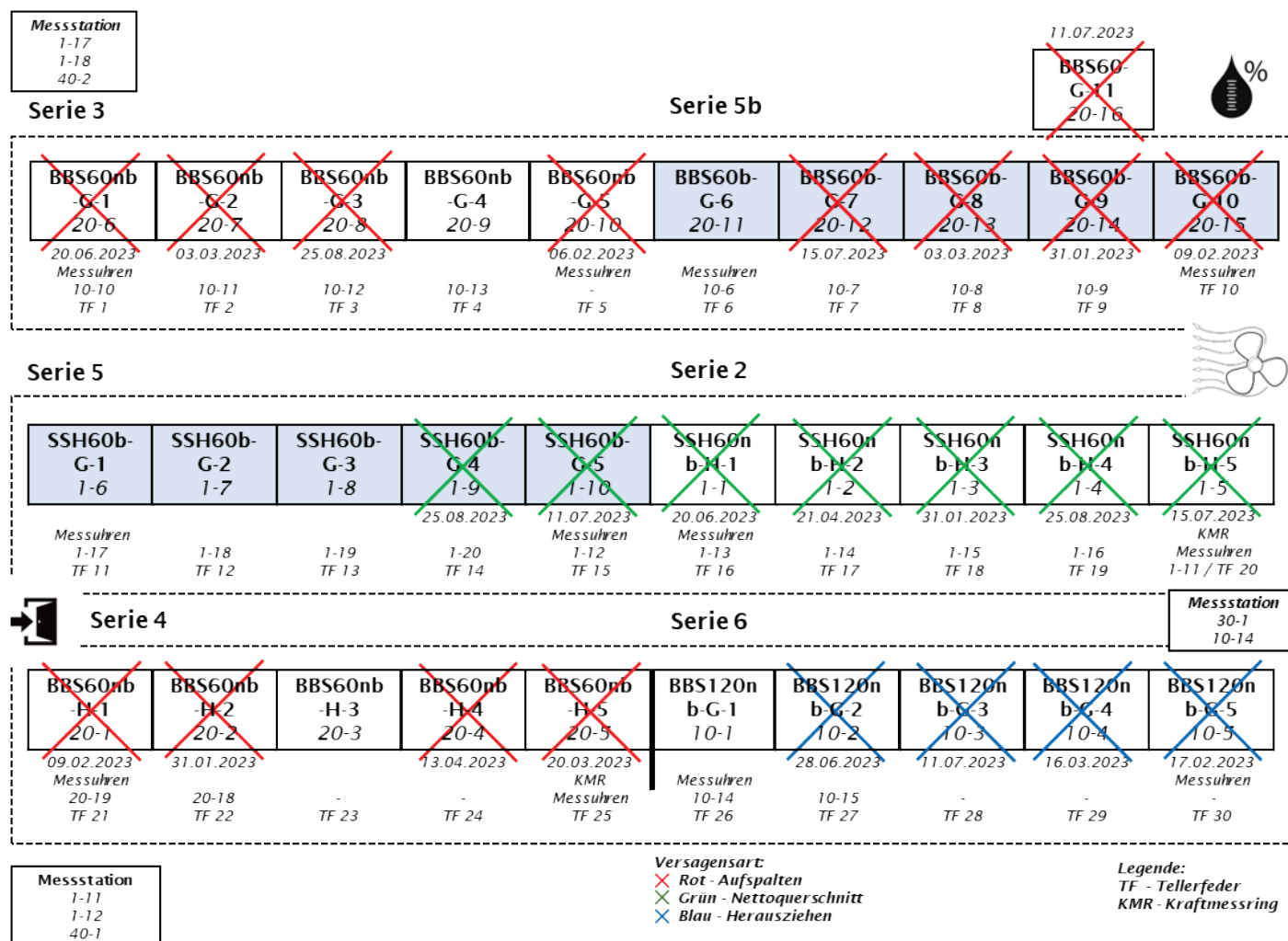


Abbildung 12: Darstellung des Probekörpersversagens, der Versagensmodi und des Versagensdatums

EN 17334:2021 Abschnitt 10 erlaubt einen versagten Probekörper während der Dauerbelastungsprüfung in dem simulierten Extremklima. Abbildung 12 ist zu entnehmen, dass keine Versuchsreihe des Forschungsvorhabens diesen Ansprüchen gerecht werden konnte.

Eine übersichtliche Darstellung zum Einfluss der schwankenden Luftfeuchtigkeit auf den Versagenszeitpunkt der Probekörper zeigt Abbildung 13.

In der untenstehenden Abbildung 13 werden die Holzfeuchten der Referenzhölzer über den Projektverlauf gezeigt. Bei den dargestellten Kurven handelt es sich um die Hölzer mit der höchsten Holzfeuchte der jeweiligen Serien. Auffällig ist, dass Fichte (40-7, unbewässert, 60/60 [mm]) und SSH (1-14, unbewässert / 1-17, bewässert; 60/60 [mm]) eine ähnliche Feuchtesensibilität aufweisen. Der Einfluss einer zweiwöchigen Regensimulation des Referenzholzes 1-17 (SSH_b) ist ersichtlich, verliert jedoch über den Projektverlauf an Relevanz. Trotz anfänglicher Regensimulation performte Serie 5 (SSH_b) über den Projektverlauf am besten. Die Auswirkung zweiwöchiger Baustellenschauer (zweimal täglich) war bei BauBuche höher, glich sich während des Projektverlaufs allerdings ebenfalls allmählich aus. Während die totale Holzfeuchtesteigerung geringer als bei SSH oder Fichte war, wirkten sich starke Schwankungen der rel. Luftfeuchtigkeit negativer auf das Tragverhalten der BB-Verbindung aus. Starke Zunahme der Luftfeuchte (20 Tage 85 % rel. LF und 30 Tage 80 % rel. LF) oder rapide Abnahme (nach 50 Tagen von 80 % rel. LF auf 65 % rel. LF und zu Beginn der Trocknungsperiode nach 180 Tagen von 65 % rel. LF auf 45 % rel. LF) kam es zu vermehrtem Probekörpersversagen. In den Serien 5b (bewässerte BB) und 3 (unbewässerte BB) versagten im ersten Monat des Aufweichens bereits je zwei Proben. Insgesamt versagten sieben BB-Prüfkörper mit geringen Randabständen und zwei BB-Proben mit grossen

Randabständen, womit Serie 3, 5b und 6 bereits nach 7 Wochen die Anforderungen nach EN 17334:2021 Abschnitt 10 nicht erfüllen konnten. Lediglich eine SSH-Probe versagte im gleichen Zeitraum.

Zu Beginn der Trocknungsperiode kam es erneut zu vermehrtem Probekörperversagen. Zwei SSH-Proben, ein 120/120 und zwei 60/60 BB-Prüfkörper. Auch hier ist der stark negative Einfluss rapiden Klimawechsels deutlich erkennbar.

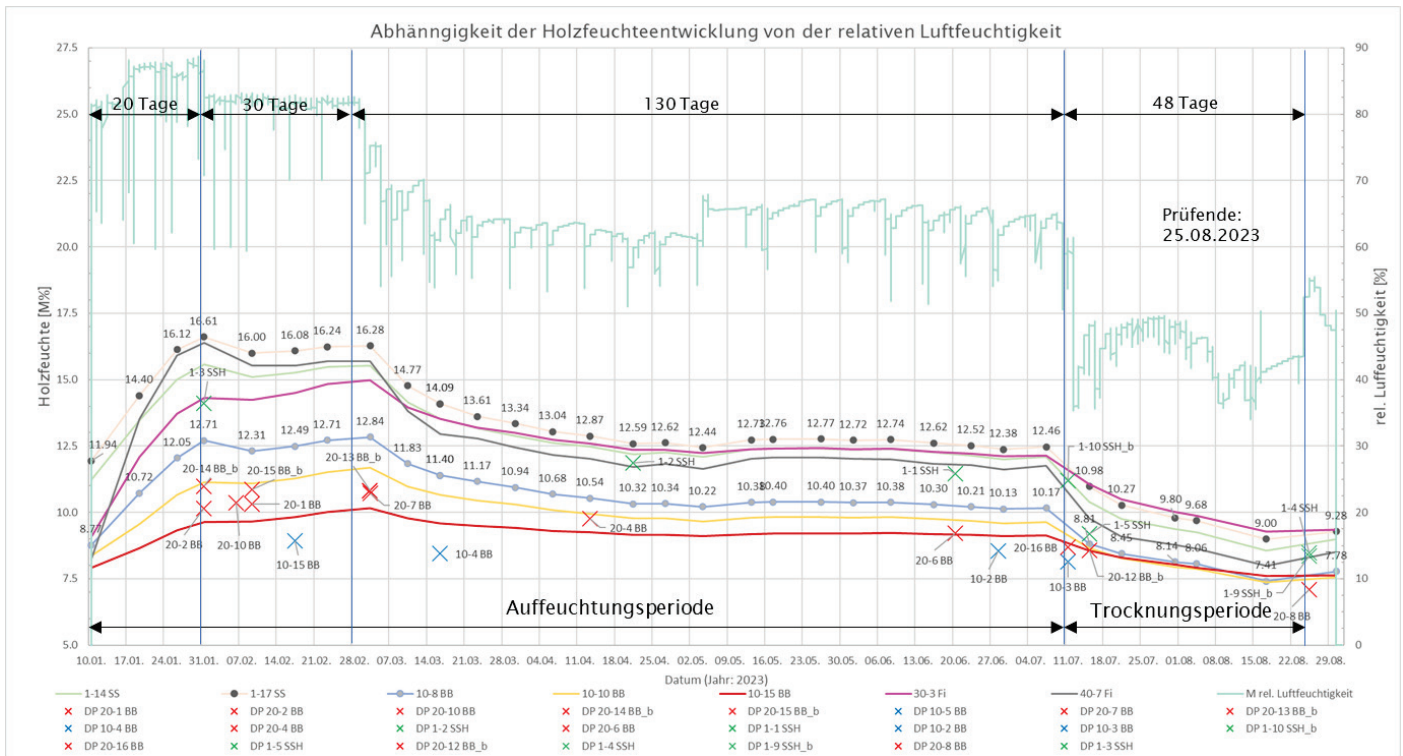


Abbildung 13: Darstellung des Wechselklimaeinflusses auf das Probekörperversagen der unterschiedlichen Probekörpertypen

EN 17334:2021 Abschnitt 10 erlaubt ein Versagensverhältnis von 1:5 (1 versagter PK je 5 Proben). Nachfolgend werden in Tabelle 1 die Serien der Untersuchungen aufgelistet, der Zeitpunkt des Serienscheiterns wird gegeben, die Gesamtanzahl der versagten PK je Serie wird aufgezeigt und die Versagen werden einer Klimaphase zugeordnet.

Tabelle 1: Datum des Serienscheiterns, Gesamtanzahl an versagten Proben je Serie und zugehörige Klimaphase

# Serie	Nomenklatur Serie	Versagensdatum 2 Proben	Versagensanzahl gesamt	Klimaphase
2	SSH60-nb-H	21.04.2023	5	3 x A / 2 x T
3	BBS60-nb-G	03.03.2023	4 + 1 (20-16)	4 x A / 1 x T (20-16)
4	BBS60-nb-H	09.02.2023	3	4 x A
5	SSH60-b-G	25.08.2023	2	1 x A / 1 x T
5b	BBS60-b-G	09.02.2023	4	3 x A / 1 x T
6	BBS120-nb-G	16.03.2023	4	3 x A / 1 x T

3.4 Auswertung des messtechnikbasierten Holzfeuchtemonitorings

Mittels widerstandsbasiertem Holzfeuchtemonitoring (*Thermofox Universallogger* der *Scantronik Mugrauer GmbH*) konnte die Holzfeuchteentwicklung an Referenzprobekörpern bei unterschiedlichen Messtiefen über den Projektverlauf überwacht werden. Abbildung 14 stellt die Daten für 60 mm x 60 mm Fichten-Probekörper dar. Die Auswertung basiert auf Forsén, H. und Tarvainen, V. (2000). Der Verlauf entspricht dem der wägungsbasierten Monitoringsmethode und ist entsprechend als plausibel anzusehen.

Die Holzfeuchteänderung (gemessen über Elektrodenpaare mit 13 mm, 23 mm und 30 mm Einschlagtiefe) ist nahezu gleichmässig über den gesamten Querschnitt, weswegen nur sehr geringe feuchteinduzierte Spannungen in den Querschnitten zu erwarten sind.

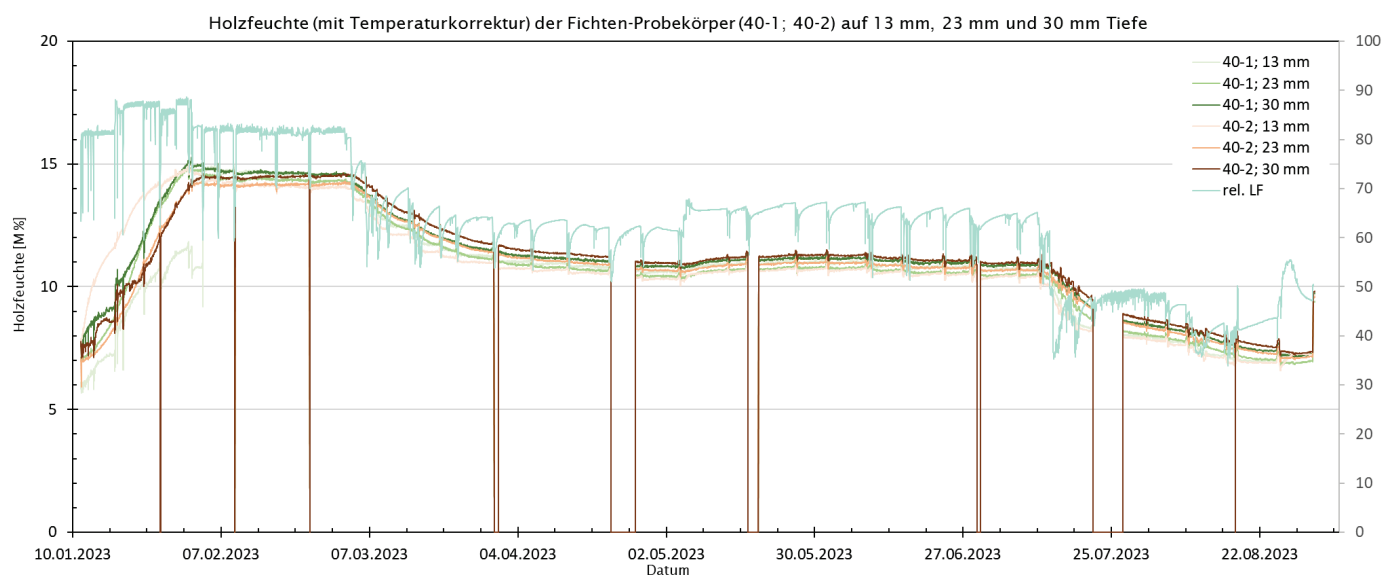


Abbildung 14: Auswertung des messtechnikbasierten Holzfeuchtemonitorings (elektrische Widerstandsmethode) für Fichte

Anders verhält es sich bei den dauerhaft feuchteüberwachten BauBuche-Probekörpern. Besonders rapid des Auffeuchten führte zu Feuchtedifferenzen zwischen Querschnittsrändern und deren Innerem.

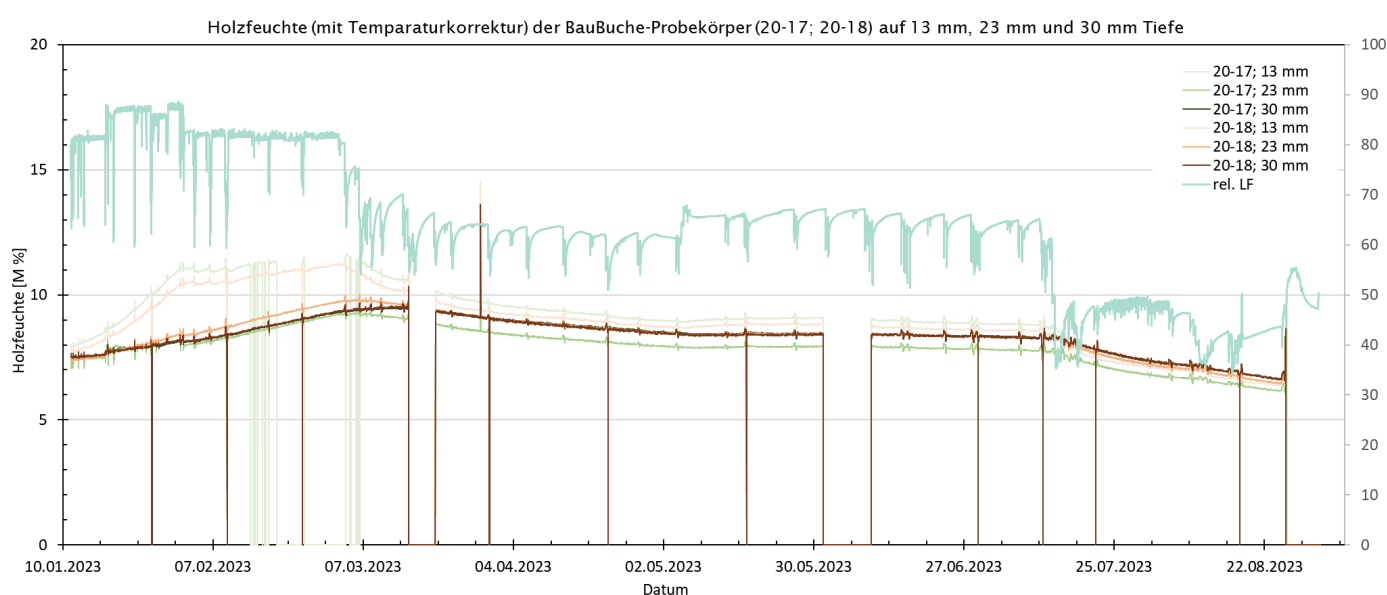


Abbildung 15: Auswertung des messtechnikbasierten Holzfeuchtemonitorings (elektrische Widerstandsmethode) für BauBuche

Die in Abbildung 15 dargestellte Auswertung basiert auf Schiere et al. (2021). Die Elektrodenpaare der Referenzprobekörper 20-17 und 20-18 zeichneten in 13 mm Messtiefe ein starkes Auffeuchten auf, während der restliche Querschnitt von dem rapiden Wechsel der rel. Luftfeuchtigkeit deutlich schwächer beeinflusst blieb. Ein solcher Feuchtegradient führt zu zentrumsnahen Querkzugspannungen, während der äussere Teil der Probe auf Querdruk belastet wird. Nach dem 50-tägigen Auffeuchtungszeitraum (80-90 % rel. Luftfeuchtigkeit) kam es zu einer einheitlicheren Holzfeuchteentwicklung der Querschnitte über den Versuchszeitraum.

Die Datenlage zeigt klare Differenzen zwischen dem Querschnittsverhalten bei Feuchteänderung von BauBuche und Fichte. Der negative Einfluss ist in Abbildung 13 anhand der BauBuche-PK-Versagenshäufigkeit während der Auffeuchtungsperiode erkennbar.

Die Daten der StabBuche waren aufgrund von fehlerhafter Messtechnik nicht sinnvoll auswertbar.

3.5 Klimainitiiertes Kriechverhalten von BiRods in Buchenholz in FK 1

Abbildung 16 stellt die mittels analoger Messuhren aufgezeichneten Verbindungsverformungen über die Projektlaufzeit in Abhängigkeit der klimatischen Wechselbeanspruchung und der Nach- und Entspannungszyklen der Untersuchungen im Gesamten dar. Unter Anhang B (7.3, Seite 34 ff.) werden die Daten nochmals detaillierter und unter unterschiedlichen Kriterien ausgewertet. Ausserdem ist die vollständige Referenz-Kriechkurve der Prüfnorm EN 17334:2021, Bild 5 in Anhang B hinterlegt.

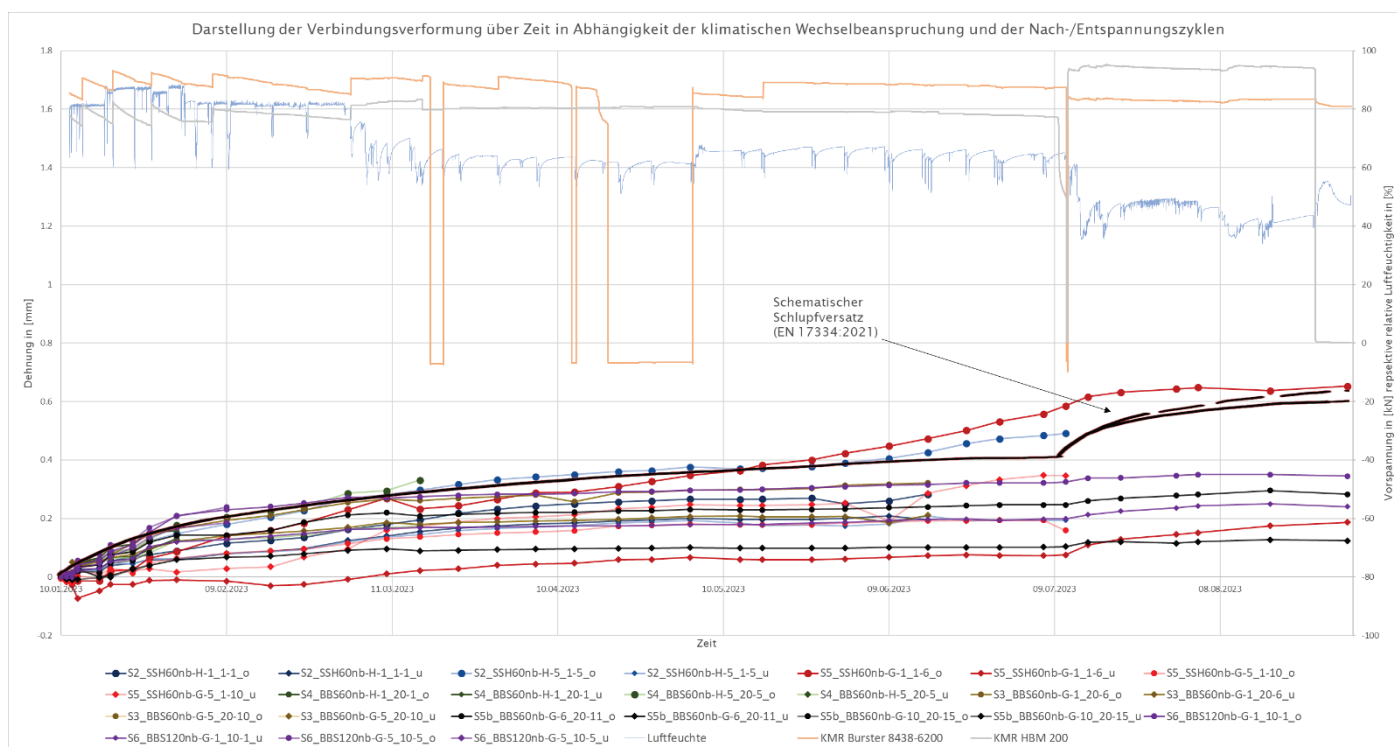


Abbildung 16: Darstellung der Verbindungsverformung über die Zeit in Abhängigkeit der klimatischen Wechselbeanspruchung und der Nach-/Entspannungszyklen

Es zeigte sich, dass die unterschiedlichen Spannungsniveaus keinen nennenswerten Einfluss auf die beobachtete Dehnung aufwiesen. Gleiches galt für beide Klebstoffsysteme. Unterschiede hingegen wurden in Bezug auf die verwendeten Holzwerkstoffprodukte festgestellt. Im Falle von BauBuche verhielten sich die einzelnen Prüfkörper bezüglich der Dehnungsänderung ähnlich, wiesen jedoch Unterschiede in der Dehnungsintensität auf. Von den ursprünglich acht Prüfkörpern, die mit Messuhren ausgestattet waren, hatten lediglich zwei den Feuchtezyklus unbeschadet überstanden und blieben bis zum Ende des Projekts intakt. Im Gegensatz dazu verhielten sich die einzelnen Prüfkörper bei Stabschichtholz

tendenziell zwar gleich, waren aber deutlich unregelmäßiger zueinander. Von den anfangs vier Prüfkörpern mit Dehnungsmessgeräten hatten drei den Feuchtezyklus überstanden, während am Ende des Versuchs nur noch einer intakt war.

Zu Beginn der Versuchsdurchführung war der Einfluss der Vorspannung und des Nachspannens deutlich ausgeprägt. Bei jeder Nachspannung zeigte sich in sämtlichen Versuchsreihen eine hohe Veränderung. Dieser Effekt nahm im Verlauf der Zeit ab und war nach etwa zwei Monaten nicht mehr zu beobachten. Bis zum siebten Monat befanden sich die Prüfkörper im Befeuchtungszyklus, wobei es zu einer Vielzahl an Versagensfällen kam. Der Trocknungszyklus wurde wiederum vorzeitig abgebrochen und wies eine vergleichsweise kurze Dauer von knapp zwei Monaten auf. Im Befeuchtungszyklus folgten das Dehnverhalten, mit Ausnahme von zweien, der Sollkurve. Im Trocknungszyklus setzte sich dieser Trend fort, und es schien, als würde die Verformungscharakteristik ohne Anzeichen für tertiäres Kriechen gemäss Normvorgabe verlaufen. Im Falle von BauBuche war eine geringfügige Dehnungsänderung zu beobachten, die sich schnell stabilisierte (festgestellt bei zwei Prüfkörpern). Zudem verlief die Kurve gleichmäßig ohne größere Abweichungen. Mit einer Endholzfeuchte von 7 - 9 % wurde der Versuch gemäß Norm abgeschlossen, ohne Anzeichen für tertiäres Kriechen. Die Dehnungsänderung war hingegen bei Stabschichtholz deutlich ausgeprägter, das Stagnieren weniger offensichtlich, und der Prüfkörper, der diese Daten lieferte, zeigte während des gesamten Versuchsverlaufs erhebliche Unregelmäßigkeiten und folgte nicht der schematischen Referenzkurve. Das Stagnieren der Dehnungsänderung weist darauf hin, dass tertiäres Kriechen nicht auftrat. Aufgrund fehlender verlässlicher Messdaten ist jedoch eine definitive Aussage für Stabschichtholz nicht möglich.

Es ist darauf hinzuweisen, dass die vorliegende Datensammlung lediglich von begrenztem Umfang war und nicht in optimaler Weise erfasst werden konnte. Eine visuelle Auswertung basierend auf einer schematischen Referenzkriechkurve der Prüfnorm EN 17334:2021, Bild 5 war zwar möglich, jedoch geprägt von einem hohen Mass an Spekulation und potenzieller Fehleranfälligkeit.

4 Diskussion

In diesem Kapitel werden die in Kapitel 3 dargestellten Ergebnisse interpretiert, analysiert, bewertet und reflektiert. Es werden Grenzen des Forschungsprojekts und der Messtechnik aufgezeigt und sowohl Verbesserungsvorschläge als auch die Notwendigkeit für zukünftige Forschungsvorhaben aufgezeigt.

4.1 Diskussion der Forschungsergebnisse

In dem vorliegenden Forschungsprojekt zur Bewertung klimatischer Beanspruchung von Anschlüssen mit in Buchenholz eingeklebten Gewindestangen in Feuchtekategorie 1 wurde basierend auf EN 17334:2021 -für Nadelholz geschrieben- ein Prüfprogramm für Buchenwerkstoffe abgeleitet. Ziel war die Erarbeitung von Rand- und Prüfgrößen für die FK 1 für eine dauerhafte qualitätsgesicherte Leistungsfähigkeit von BiRods und eine erste Bewertung der bisher verwendeten Festigkeiten.

Nach EN 17334:2021 Abschnitt 10 ist eine Verklebungs-Kriechbruchprüfung bei sehr hohem und niedrigem Feuchtegehalt zu erfüllen. Die Norm gibt vor, dass einer von fünf Probekörpern, während einer mindestens 6-monatigen Auffeuchtungsperiode mit anschliessender Trocknungsperiode, versagen darf, damit die Prüfung als bestanden beurteilt werden kann. Die klimatischen Wechselbeanspruchungen wurden im vorliegenden Projekt um simulierte Baustellenschauer ergänzt und die Feuchtigkeitsschwankungen wurden in extremere und weniger extreme Perioden unterteilt (vgl. Abbildung 9, Seite 13). Nach 228 Tagen mussten die Untersuchungen beendet werden, da in allen sechs Serien mindestens 2 Probekörper versagt hatten.

Auffällig war, dass besonders die BauBuche sehr sensibel auf abrupte klimatische Wechselbedingungen reagierte. So konnten geballte Probekörperversagen bei rapider Auffeuchtung und Abtrocknung festgestellt werden, obwohl die totale Holzfeuchteänderung der von Buchen-Stabschichtholz ähnlich war (BB_b: 3.94 M% vs. SSH_b: 4.67 M%; BB: 2.75 M% vs. SSH: 3.78 M%), wobei die Anfangsholzfeuchte variierte. Die Furnierorientierung und der höhere Klebstoffanteil der BauBuche führt vermutlich jedoch zu höheren internalen Spannungszuständen bei klimatischen Wechselbeanspruchungen, die bei Überlagerung mit der Vorspannkraft ein Aufspalten bewirken. Die Adsorptionsisotherme ist bei StabBuche höher und gleichmässiger als bei BauBuche, was der Hersteller als einen wesentlichen Vorteil gegenüber der BauBuche bewirbt. Weiterführende, genauere Angaben zu bauphysikalischen Eigenschaften werden allerdings in FAQ (2021) nicht gemacht. Begründet werden könnte dieses gutmütigere Quellverhalten mit der geringeren Menge Klebstoff (SSH: 1.5 % vs. BB: 6-10 %) und der Lamellenorientierung der BauBuche, welche ein differentielles Quellmass von 0.45 % je Prozent Holzfeuchteänderung rechtwinklig zur Furnierlage bedeutet. Somit übersteigt nach Pollmeier (2020) das Quellverhalten rechtwinklig zur Furnierlage das in Furnierquerrichtung um 12.5 %, was in Kombination mit der Feuchtetransport behindernden Wirkung des höheren Klebstoffanteils, zu zusätzlichen Spannungsspitzen an den Klebefugen-Holz-Interfaces führen könnte und bei Spannungsüberlagerung mit den Vorspannkraften das einheitliche Aufspalten der BB in Furnierlängsrichtung erklären könnte. Grundwald et al. (2020) schlussfolgerten, dass Verbindungsversagen von in Laubholzwerkstoffen eingeklebten Stangen primär durch Querspannungen hervorgerufen werden. Besonders für die BauBuche mit geringen Randabständen bestätigt dies der Versagensmechanismus bei Überlagerung mit zusätzlichen klimainduzierten Spannungen.

Wichtig ist auch den Versagensmechanismus zu berücksichtigen. Während es bei BauBuche-Proben mit geringem Randabstand zum Versagensmechanismus «Aufspalten» kam, versagten SSH-Probekörper im Nettoquerschnitt. Betrachtet man die versagten PK (siehe 7.1) kann man vermuten, dass ein Keilzinkenbruch das Versagen initiiert hat und der restliche Nettoquerschnitt anschliessend aufgrund von Spannungsumlagerungen im Reissverschlussprinzip überlastet wurde, was wiederum zu einem Komplettversagen führte. Bei praxisnäheren Verbindungsmittelgruppen und grösseren Probekörpern dürfte ein solcher Versagensmechanismus aufgrund des Laminierungseffekts weniger ausgeprägt sein. Stablamellen mit vollem 40/40 [mm] Querschnitt (nicht längs durchgeschnitten oder gehobelt), dürften einem solchen Versagen ebenfalls entgegenwirken. Der Hersteller bietet sein Produkt in Querschnittsabmessungen des Vielfachen der einzelnen Stablamelle (40 mm) an, womit halbe Lamellen, wie bei den getesteten 60 mm x 60 mm Proben, im Randbereich der Träger ausgeschlossen wären. Betrachtet man also die Auswirkung klimatischer Wechselbeanspruchungen auf die Buchen-Werkstoffe, kann man ein sensibleres Verhalten von BauBuche feststellen, während Stabschichtholz ähnlich zu Fichte reagiert. Im Fall von SSH wären Stablamellen mit unverändertem Querschnitt wünschenswert. Im Fall von BB könnten konstruktive oder bauteilinterne Massnahmen ein günstigeres Verhalten bedeuten. Konstruktive hirnholznahe Schrauben oder dünne Sperrholzplatten, welche auf das Hirnholz geklebt werden, wären

denkbare, vermutlich zielführende Möglichkeiten. Höhere Randabstände eignen sich ebenfalls – der Versagensmechanismus änderte sich bei Serie 6, wobei das Herausziehen der Stange vermutlich einem zu hohen Kraftniveau zu verschulden ist.

Ziel der vorliegenden Untersuchungen war es auch ein geeignetes Prüfprogramm für Buchenwerkstoffe in FK 1 zu finden. EN 17334:2021, angepasst für Buchenwerkstoffe in FK 1, bildete die Grundlage des Prüfprogramms und ist sinnvoll. Die Berücksichtigung einer kurzzeitigen Baustellenbewitterung ist praxisrelevant und bedeutet mehr Sicherheit für ausführende Gewerke. Die Menge des Niederschlags muss hierbei zukünftig genau definiert werden.

Die Thermofox-Messtechnik zur Holzfeuchteüberwachung lieferte für StabBuche keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Der von Schiere et al. (2021) erweiterte Auswertungsansatz nach Forsén, H., Tarvainen, V. (2000) ist für Buchen-Furnierschichtholz geeignet. Mit diesem Ansatz bestimmte Holzfeuchtegradienten innerhalb von Querschnitten können die Versagenshäufigkeiten von BauBuche während rapider Auffeuchtung erklären.

Im Hinblick auf das tertiäre Kriechverhalten der Verbindungen ist zu erwähnen, dass die Verwendung von analogen Messuhren zu mehreren Herausforderungen und Ungenauigkeiten führte. Zum einen bedeutete das Ablesen und das darauffolgende Abtippen der Werte gelegentlich Fehler, zum anderen traten Probleme im Zusammenhang mit der Befestigung der analogen Messuhren auf. Während des Versuchs lösten sich gelegentlich einzelne Messgeber, mussten neu angebracht und kalibriert werden. Dies führte zu unerwünschten Unterbrechungen und zusätzlichen Unsicherheiten in den erfassten Daten. Auffällige Werte konnten fotobasiert überprüft und richtiggestellt werden.

Insgesamt trugen die genannten Schwierigkeiten zur Erhöhung der Ungenauigkeiten in den experimentellen Ergebnissen bei. Diese Herausforderungen sollten in zukünftigen Experimenten berücksichtigt werden, um sicherzustellen, dass die Datenerfassung und -auswertung präziser und zuverlässiger erfolgen kann. So wird empfohlen mit digitalen Messuhren zu arbeiten, welche sicher und fest angebracht werden, sodass ein Abfallen in jedem Fall unterbunden werden kann.

4.2 Anmerkungen zum Aufbau der Klimakammer

In diesem Abschnitt werden Anmerkungen zum Versuchsaufbau gemacht und ggf. Verbesserungsvorschläge gegeben.

4.2.1 Auf- und Entfeuchten der Klimakammer

Die Position des Geräts zur Auffeuchtung und Abtrocknung belasten naheliegende Probekörper stärker als andere. Besonders die hohe Hitzentwicklung des Luftentfeuchters spielt hier eine grosse Rolle. Der Versagensanteil an Probekörpern nahe der Hitze- und Entfeuchtungsquelle war zu Beginn der Trocknungsperiode auffällig hoch. Passivere Auffeuchtungs- und Entfeuchtungsmassnahmen sind als Grundlage der Uniformität wünschenswerter. Anstatt von einer grossen Feuchtequelle sollte ein weniger ausgeprägtes Zerstäuben an mehreren Orten in der Klimakammer stattfinden. Gleiches gilt für die Raumentfeuchtung und die Luftverwirbelung. Hier müssen zukünftig bessere Massnahmen gefunden werden. Des Weiteren war die Kapazität des Entfeuchtungsgeräts nicht ausreichend, um die gesetzte Zielluftfeuchte der Trocknungsperiode zu erreichen.

Um die erzeugte Datenmenge zu minimieren sind grösser gewählte Aufzeichnungsintervalle beim Holzfeuchtemonitoring ausreichend. Eine stündliche Aufzeichnung ist zielführend.

4.2.2 Spannvorrichtung, Monitoring der Spannkraft und der Messuhren

Die Massnahmen und Mittel des Vorspannvorgangs sind zielführend. Eine Kombination von hydraulischem Hubzylinder und Spannmutter mit einfacher Nachspannmöglichkeit sind gut geeignet für den Versuchsablauf. Ein Nachteil des *CY-M16 Superbolts* ist die Möglichkeit ihn kontinuierlich auch bei gleichbleibendem Drehmoment anzuziehen, wodurch ein Zielkraftniveau bei falschem Vor- oder

Nachspannablauf leicht verfehlt werden kann. Ein Zielkraftniveau anhand von feinen Messuhren zu halten, hat sich als kompliziert herausgestellt -besonders bei analoger Anzeige-, weswegen diese Aufgabe auf Referenz-Kraftmessdosen übergeben wurde. Für die Untersuchungen waren allerdings lediglich zwei Kraftmessdosen verfügbar, was als nicht ausreichend zu sehen ist. Es konnte nur ein Probekörper mit 80 kN und 93.2 kN kontinuierlich überwacht werden. Es liegt daher nahe, dass Probekörper der Serie 6 (64.3 kN) mit zu hohen Lasten nachgespannt wurden, da auch hier der 80 kN Spannzyklus als Referenz galt, worin die hohe Anzahl an auf «Herausziehen» versagten Proben erklärt werden kann. Für zukünftige Untersuchungen sollten bestenfalls alle Probekörper mit Kraftmessringen (KMR) ausgestattet sein; jedoch mindestens 2 je Serie (falls ein mit KMR ausgestatteter Probekörper versagt, kann der andere weiterhin als Referenz dienen), um ein akkurates Kraftniveau sicher zu stellen. Eine Dauerüberwachung bedeutet ausserdem, dass auf das Entlasten und sofortige Wiederbelasten -eine Massnahme, welche am Ende der Aufweichungsperiode ergriffen wurde, um ein akkurates Kraftniveau sicherzustellen- verzichtet werden kann.

Das Befestigen der analogen Messuhren muss ebenfalls überarbeitet werden. Es sind Massnahmen anzuwenden, die ein Abfallen der Messuhren unter klimatischen Wechselbedingungen verhindern, was eine höhere Messgenauigkeit und Kontinuität in der Datenaufbereitung bedeutet. Ausserdem ist eine digitale Anzeige sinnvoll, wodurch Ablesefehler minimiert werden können. Digitale Messuhren mit automatischer Auslesefunktion würden ausserdem den Arbeitsaufwand des Ablesens enorm minimieren und bei multipler Versuchsabwicklung Kosten sparen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das vorliegende Forschungsprojekt diente der Bewertung klimatischer Beanspruchungen in Feuchteklasse 1 von Anschlüssen mit in Buchenholz eingeklebten Gewindestangen. Die Untersuchungen basierten auf der für Nadelholz geschriebenen Prüfnorm 17334:2021 und zielte darauf ein einheitliches Prüfprogramm für Buchenwerkstoffe in FK 1 zu entwickeln. Gleichzeitig sollte Randabstände und Prüfgrössen eruiert werden, um die hohe Leistungsfähigkeit der Verbindung qualitätssichernd beurteilen zu können.

Es konnte gezeigt werden, dass es einen grossen Bedarf zusätzlicher Informationen für das Verhalten von in Buchenholz eingeklebten Gewindestangen unter wechselnder Klimabeanspruchung in Feuchteklasse 1 gibt. Keine der sechs Versuchsserien konnte den angepassten Ansprüchen nach EN 17334:2021 Abschnitt 10 genügen und die Untersuchungen mussten nach halbjähriger Auffeuchtungsperiode und weiteren 48 Tagen in der Trocknungsperiode abgebrochen werden, da mindestens zwei Proben je Serie versagt hatten. Der Versuchsaufbau und dessen Durchführung bedarf einzelner Anpassungen, die eine akkuratere Datenerfassung bedeuten würden. In dem durchgeführten Projekt kann nicht ausgeschlossen werden, dass das Spannkraftniveau, welches bei 30 Probekörpern lediglich über zwei Referenzprobekörper gesteuert werden konnte, in einzelnen Probekörpern vom Soll abwich.

Die durchgeführte Forschungsarbeit legt die Vermutung nahe, dass StabBuche ein gutmütigeres Quellverhalten als BauBuche ausweist. Zwar konnten auch die Serien 5 und 2 den Anforderungen nach EN 17334:2021 Abschnitt 10 nicht genügen, jedoch war der Versagensmechanismus ein anderer. Während BB ein Querzugversagen aufwies, versagte SSH aus Buche im Nettoquerschnitt. Die Feuchteeinwirkung auf die Verbindung im Hirnholz war entsprechend nicht massgebend, sondern die Tragfähigkeit der Keilzinkenverbindung unter wechselndem Klima. Abschnitt 10 der Prüfnorm EN 17334:2021 befasst sich mit dem Verklebungs-Kriechbruchverhalten von BiRods bei sehr hohem und niedrigem Feuchtegehalt. Die Norm gibt hierfür eine schematische Ansicht für sowohl das zulässige als auch das nicht konforme Verbindungsverhalten vor. Die Auswertungen der Messuhraufzeichnungen wiesen keine Verformungscharakteristik einer tertiär kriechenden Verbindung bis zum Zeitpunkt des Versuchsabbruchs auf. Dies gilt gleichermassen für beide getesteten Klebstoffsysteme. Nichtsdestotrotz war die Performance der Serien nicht ausreichend, da die Verbindungen auf Aufspalten, Herausziehen oder Nettoquerschnittsüberlastung versagten.

Die verfügbaren Daten deuten darauf hin, dass es bei den Verbindungen zu keinem tertiären Kriechen kommt. Bei BauBuche-PK kann man dies anhand zweier Prüfkörper schlussfolgern, die die Versuchsdauer -bei vorzeitigem Abbruch- erfolgreich überstanden haben und gute Messdaten lieferten. Für Stab-schichtholz ist eine ähnliche Aussage nicht möglich, da die Datenmenge aufgrund frühzeitigen Prüfkörperversagens zu gering ist. Die Daten im Allgemeinen sind durch das frühzeitige Abbrechen des Versuches und vor allem aufgrund des Versagens vieler Prüfkörper unvollständig. Es kann somit keine abschliessende Aussage über das Kriechverhalten der Verbindung gemacht werden.

Im Diskussionsteil der Arbeit wurden diverse Massnahmen vorgeschlagen, die die Performance der Verbindung unter kumulierter Dauer- und klimatischer Wechselbeanspruchungen vermutlich verbessern würden. Zielt man darauf den Holzquerschnitt möglichst effektiv auszunutzen und die Randabstände weiterhin möglichst gering zu halten, wären querzugverstärkende Massnahmen am Hirnholzendende bei BauBuche als sinnvolle Massnahmen zur Performanceverbesserung zu sehen. Entsprechende Prüfserien könnten in einem Folgeprojekt aufgenommen werden.

Mit diesem abgeschlossenen Forschungsprojekt konnte der erste Schritt zu einem standardisierten Prüfprogramm für in Buchenwerkstoffe eingeklebte Gewindestangen unter Wechselklimabeanspruchungen in FK 1 genommen werden. Es konnten Erfahrungen gesammelt werden, potenzielle Fehlerquellen erkannt und verbesserte Grundlagen für weiterführende Untersuchungen geschaffen werden. Das durchgeführte Forschungsvorhaben zeigt eine eindeutige Notwendigkeit weitergehender, vertiefender Untersuchungen, um das Verhalten von BiRods in FK 1 bei klimatischer Wechselbelastung für Buchenwerkstoffe und unterschiedliche Klebstoffsysteme besser verstehen und die Qualität dieser hochleistungsfähigen Verbindungsmittelart sicherstellen zu können.

6 Verzeichnisse

6.1 Literaturverzeichnis

- Bengtsson C., Johansson C.J. (2002) GIROD-Glued in rods for timber structures, SMT4-CT97-2199, Research report, Borås, Sweden
- Bundeswaldinventur (2018) Der Wald in Deutschland, Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur, BMEL - Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Berlin, Deutschland, Tech. Rep. 3. korrigierte Auflage, Jul. 2018.
- EN 17334:2021, Eingeklebte Stangen in tragenden geklebten Holzprodukten, CEN-CENELEC Management-Zentrum, Brüssel
- Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald Schnee und Landschaft (2010): Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung 2004 -2006, Birmensdorf
- FAQ (2021) Die wichtigsten Fragen und Antworten zu Fagus Stabschichtholz aus Schweizer Laubholz, FAGUS Suisse, Schweiz
- Forsén, H., Tarvainen, V. (2000) Accuracy and Functionality of Hand-Held Wood Moisture Content Meters. Technical Research Centre of Finland, VTT Publications 420 (Espoo)
- Franke, S., Franke, B., Müller, A., Heubuch, S. (2019) Stabdübelverbindungen und eingeklebte Gewindestangen in Buchen-BSH, 25. Internationales Holzbau-Forum IHF 2019, Innsbruck
- Franke, B., Franke, S., Schiere, M., Müller, A. (2019) Praxisleitfaden – Beurteilung der Holzfeuchte für Tragwerke und Brücken für die Planung, Errichtung und Nutzung, Berner Fachhochschule, ISBN 978-3-906878-03-04
- Franke, B., Franke, S., Schiere, M., Müller, A. (2019) Quality Assurance of Timber Structures Berner Fachhochschule, ISBN 978-3-906878-04-01
- Franke, S. (2021) Verbindungen mit eingeklebten Gewindestangen in *Verklebte Laubholzprodukte für den statischen Einsatz*, Zürich, Schweiz, Lignum, Schweiz, 2021, pp. 50-58.
- Gamper A., Dietsch P., Merk M., Winter S. (2014) Gebäudeklima – Langzeitmesung zur Bestimmung der Auswirkungen auf Feuchtegradienten in Holzbauteilen, Abschlussbericht, Fraunhofer IRB Verlag 2015, ISBN 978-3-8167-9518-6
- Heubuch, S., Franke, S., Franke, B., Müller, A. (2019) Eingeklebte Gewindestangen in Buchen Brettschichtholz, S-Win-Kurs, Weinfelden
- Heubuch, S. (2019) Bewertung der Tragfähigkeit von eingeklebten Gewindestangen in Laubholz, Master-Thesis, BFH-AHB, Abschluss Sept. 2019
- Grunwald C, Myslicki S, Diehl F, Bletz-Mühldorfer O (2020) In Laubholz eingeklebte Stäbe – experimentelle und numerische Bewertung der Tragfähigkeit. Bautechnik 97, Sonderheft Holzbau
- Pollmeier (2020) BauBuche Buchen-Furnierschichtholz – Bauphysik 03; Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG, Deutschland
- Schiere, M., Franke, B., Franke, S., Müller, A. (2021) Calibration and comparison of two moisture content measurement methods for in situ monitoring of beech laminated veneer lumber. Wood Material Science & Engineering
- Schmitz (2012) Ergebnisse der Bundeswaldinventur 2012, Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Berlin, Deutschland
- SIA 265 (2012), Holzbau, Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein, Zürich
- Vallée T. (2020) „Mit voller Zuversicht hoch hinaus,“ *Bautechnik*, Sonderheft Holzbau Nr. 1, pp. 1-2, 2020.

6.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht über Materialkonfigurationen und Prüfserien	7
Abbildung 2: Probekörpertypen der BiRod-Serien	8
Abbildung 3: Zuschnittsplan für die Probekörperrohlinge	8
Abbildung 4: Messtechnikbasiertes Holzfeuchtemonitoring	9
Abbildung 5: Prüfkörpernomenklatur	10
Abbildung 6: Versuchsaufbau BiRods in FK 1	11
Abbildung 7: Probekörper- und Referenzkörperanordnung in der Klimakammer	12
Abbildung 8: Prüfkammer des Forschungsvorhabens	13
Abbildung 9: Versuchsablauf des Forschungsprojekts (erstellt von B. Zumbrunn-Maurer)	13
Abbildung 10: Messtechnikbasierte Klimamessungen	15
Abbildung 11: Darstellung der Holzfeuchteänderung unter klimatischen Wechselbedingungen	16
Abbildung 12: Darstellung des Probekörperversagens, der Versagensmodi und des Versagensdatums	17
Abbildung 13: Darstellung des Wechselklimaeinflusses auf das Probekörperversagen der unterschiedlichen Probekörpertypen	18
Abbildung 14: Auswertung des messtechnikbasierten Holzfeuchtemonitorings (elektrische Widerstandsmethode) für Fichte	19
Abbildung 15: Auswertung des messtechnikbasierten Holzfeuchtemonitorings (elektrische Widerstandsmethode) für BauBuche	19
Abbildung 16: Darstellung der Verbindungsverformung über die Zeit in Abhängigkeit der klimatischen Wechselbeanspruchung und der Nach-/Entspannungszyklen	20

6.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Datum des Serienseiterns, Gesamtanzahl an versagten Proben je Serie und zugehörige Klimaphase	18
--	----

7 Anhang

7.1 Anhang A – Prüfkörperversagen

Serie 3



Serie 5b



Serie 5



Serie 2



Serie 4

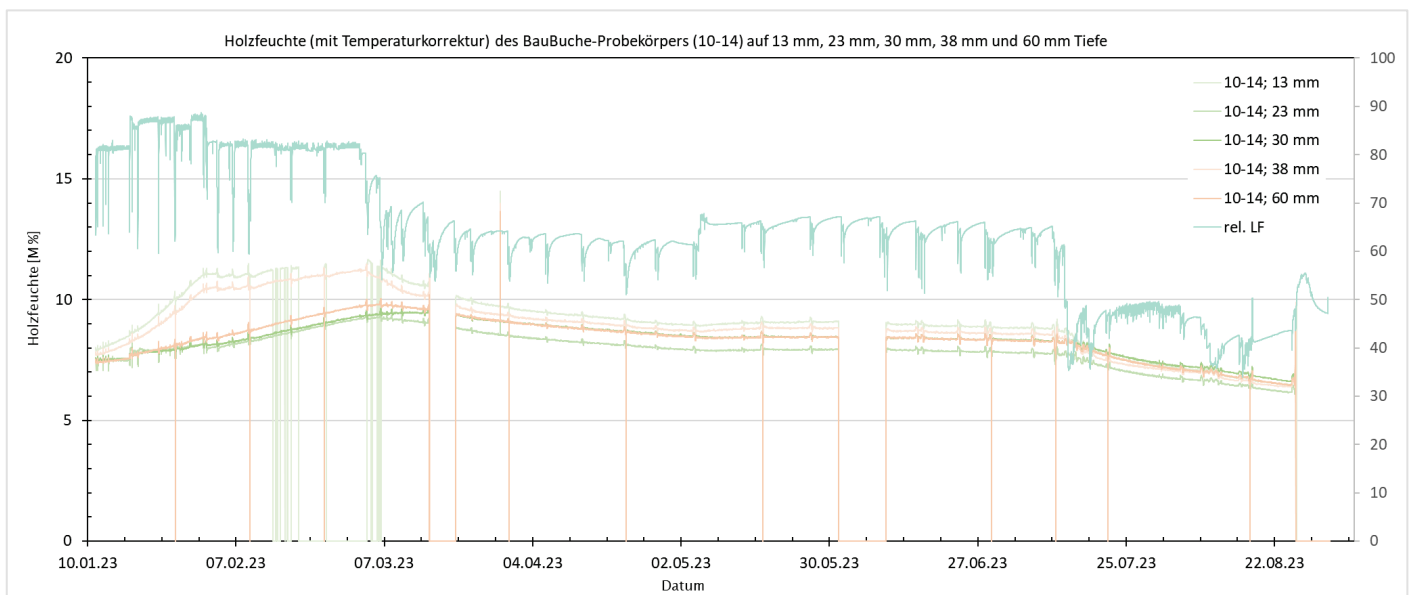
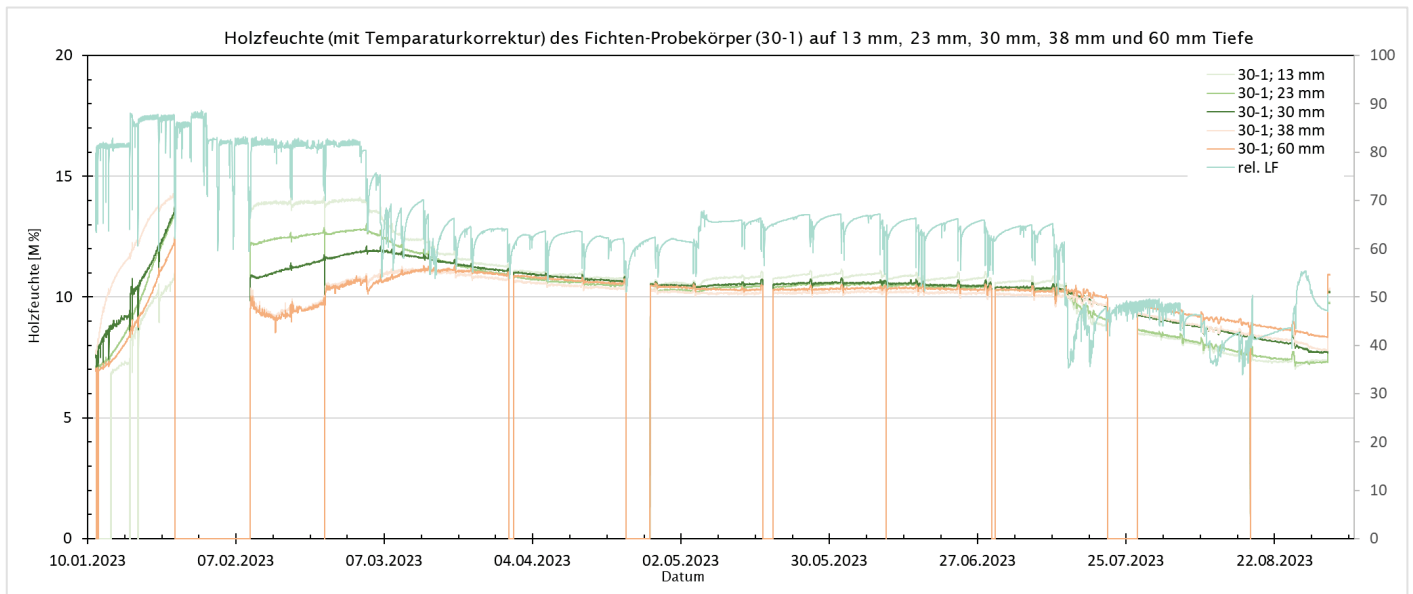


Serie 6



Anmerkung: Falsche Beschriftung bei 20-2. Bei diesem PK handelt es sich um 10-2.

7.2 Anhang B – Messtechnikbasiertes Holzfeuchtemonitoring



7.3 Anhang C – Tertiäres Kriechen

