

Berücksichtigung des klimatischen Einflusses auf mechanische Verstärkungen

Prof. Dr. Steffen Franke, Dr. Bettina Franke
Bernere Fachhochschule, Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur

1 EINLEITUNG

Die aktuellen Entwicklungen im Holzbau werden mit imposanten und leistungsfähigen Objekten, Projekten und Strukturen weltweit beschrieben. Die Leistungsfähigkeit von Holztragelementen kann durch mechanische Verstärkungen, z. B. in Form von eingeklebten Stäben, selbstbohrenden Vollgewindeschrauben oder Gewindestangen, partiell noch erhöht werden. Verstärkungen von Verbindungen oder Tragelementen werden im Holzbau notwendig, wenn die Querschnittsgeometrie eingeschränkt ist oder wenn z. B. gebogene, gekerbte oder durchbrochene Bauteile verwendet werden. Die Wirkungsweise wie auch das statische Trag- und Versagensverhalten von Verstärkungen ist u. a. in Blass et al. (2006, 2010, 2017), Dietsch (2012, 2017) und Trautz & Koj (2008) gezeigt. Zusätzlich zu den statischen Beanspruchungen ergeben sich auch klimatische Beanspruchung aufgrund der Hygroskopie des Holzes und des variierenden Umgebungsklima übers Jahr.

Holz als hygroskopisches, kapillarporöses Material nimmt Wasser aus der Umgebungsluft auf oder gibt es wieder ab. Beginnend an der Holzoberfläche stellt sich in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte und Temperatur eine Ausgleichsfeuchte ein. Die Feuchteaufnahme und der -transport im Querschnitt erfolgt mittels Diffusion zeitlich verzögert und es entsteht ein Feuchteprofil. Aufgrund des ungleichmäßigen Quellens und Schwindens führt dies zu feuchteinduzierten Spannungen (MIS), Jönsson & Svensson (2004). Innenliegende mechanische Verstärkungen verändern/beschränken das freie Verformungsverhalten des Querschnittes zusätzlich. Die beiden Aspekte, feuchteinduzierte Spannungen und innenliegenden Verstärkungen, treten daher gemeinsam in Holzkonstruktionen auf. Die Untersuchungen von Danzer et al. (2022) zeigen, dass die Tragfähigkeit von verstärkten Holzbauteilen mit Ausklinkungen im Vergleich zu unverstärkten Holzbauteilen sich unter diesen Beanspruchungen sogar reduzieren kann. Aus diesen Gründen wurde das Tragverhalten von verstärkten Holzkonstruktionen unter dem Einfluss von Klimaänderungen systematisch untersucht. Mit praxisrelevanten Brettschichtholzträgern wurde ein Prüfprogramm mit unterschiedlichen Verstärkungsmassnahmen und klimatischen Beanspruchungen umgesetzt. Die erhaltenen Ergebnisse geben Erkenntnisse zu den zusätzlichen feuchteinduzierten Spannungen, dem Verformungs- und Versagensverhalten und dienen zur Ableitung von orientierenden effektiven Quell- und Schwindmassen für verstärkte Holzkonstruktionen.

2 STAND DER TECHNIK

2.1 Klimatischer Einfluss auf Holztragwerke

In Studien zu Bauschäden an bestehenden Objekten aus Holz wurde festgestellt, dass die Hälfte der Bauschäden auf eine Änderung der Holzfeuchtigkeit zurückzuführen ist, Frese & Blass (2011), Dietsch & Winter (2018). Zu nass, zu trocken oder unterschiedliche Feuchtigkeitsverhältnisse führten zu Schäden an der Holzkonstruktion. Etwa 90 % der Schäden wurden in Brettschichtholz festgestellt. Die nicht feuchtebedingten Schäden betrafen u. a. falsche Lastannahmen oder Fehler in der Tragfähigkeitsberechnung. Unterschiedliche klimatische Beanspruchungen treten nicht nur in Aussenbauteilen, sondern auch in Innenbauteilen bei nicht klimatisierten Konstruktionen oder durch spezifische Nutzerprofile auf, Gamper et al. (2012), Franke et al. (2019). Die Auswertungen von Monitoring-Daten zur Holzfeuchte zeigen, dass in beheizten, nicht klimatisierten Bauwerken (i. d. R. Feuchteklasse 1 nach

SIA 265-1:2012) die relative Luftfeuchtigkeit im Winter geringer ist als im Sommer. In nicht beheizten, aber belüfteten Gebäuden (i. d. R. Feuchtekategorie 2 nach SIA 265-1:2012) ist die relative Luftfeuchtigkeit im Sommer niedriger, während sie im Herbst/Winter zunimmt.

2.2 Verstärkungen in Holzkonstruktionen unter Klimaeinwirkungen

Zur Erhöhung des Tragverhaltens von Holzkonstruktionen können lokal mechanische Verstärkungen eingebracht werden. In nationalen Normen oder Anhängen sind Angaben zur Bemessung der mechanischen Verstärkung, zu den Abständen untereinander respektive zum Rand wie auch den Einbindelängen bei gekrümmten Trägern oder Satteldachträgern gegeben. Hinweise zur Berücksichtigung zusätzlicher feuchteinduzierter Spannungen infolge einmaliger oder wechselnder Klimaänderungen sind aktuell normativ in der Schweiz und International nicht gegeben. Es ist bekannt, dass der Feuchteausdehnungskoeffizient aufgrund des viskoelastischen Verhaltens nicht vollständig wirksam ist, aber es werden nur wenige Angaben gemacht [16].

Die Forschung zu mechanischen innenliegenden Verstärkungen, wie eingeklebte Stäbe, selbstbohrende Vollgewindeschrauben oder Gewindestangen, konzentriert sich hauptsächlich auf das statische Kurzzeittragverhalten bei konstantem Klima, vgl. u. a. Danielsson (2012), Jockwer (2014). Für verstärkte Holztragelemente unter klimatischen Einflüssen erfolgten vereinzelt erste Untersuchungen, die eine verminderte Tragfähigkeit darlegen, vgl. Danzer et al. (2022), Sjödin (2008) und Trautz (2008). Wallner (2012) untersuchte das allgemeine Verhalten während des behinderten Schwindens von verstärkten Brettschichtholzträgern. Untersuchungen zum behinderten Schwinden infolge von innenliegenden Verstärkungen unter wechselnden klimatischen Bedingungen liegen nicht vor. Abminderungen des Quell- und Schwindmasses von 50 % sind nach SIA 265/1:2012, Blass et al. (2004) und Aicher (1997) realistisch und würden theoretisch die zulässige Feuchteänderung verdoppeln. Dietsch (2017) gibt zudem an, dass eine Feuchtereduktion von 1 % die Wirkung der Verstärkungsmassnahme bereits aufhebt. Dies wurde für einen gekrümmten Satteldachträger und 50 % Relaxation berechnet.

3 PRÜFPROGRAMM, MATERIALIEN UND KLIMA

3.1 Materialien

Brettschichtholz aus Nadelholz ist nach wie vor einer der wichtigsten Baustoffe im Holzbau. Daher wurde GL24h aus Fichte für das experimentelle Prüfprogramm verwendet. Die Brettschichtholzträger wurden mit SFS WB-T-Gewindeschrauben mit einem Durchmesser von 16 mm verstärkt.

3.2 Klimatische Beanspruchung

Das Umgebungsklima an Bauteilen hängt von der Gebäudeart, seiner Nutzung, den meteorologischen Bedingungen, der örtlichen Topografie wie auch Umgebung und Höhe über Meer ab. Das Umgebungsklima bei nicht klimatisierten Objekten unterliegt zusätzlich jahreszeitlichen Schwankungen, welche mit einem Sinusmodell vereinfachend beschrieben werden können, Franke et al. (2019). Zur weiteren Vereinfachung wurde im experimentellen Prüfprogramm eine stufenweise Klimaänderung in drei Varianten A, B und C verwendet. Die Klimavarianten unterscheiden sich dahingehend, wann das Holz inkl. Verstärkung der Klimaänderung ausgesetzt ist, vgl. Abb. 1:

- Im Klimaszenario A erfolgt die Verstärkung des Holzbauteils während der Produktion. Das Holzbauteil geht direkt in die Nutzungsphase, wie z. B. in einer Sporthalle, d. h. in einen Trocknungs-/Desorptionsprozess.
- Im Klimaszenario B erfolgt ebenfalls eine Verstärkung des Holzbauteils während der Produktion. Das Holzbauteil geht dann aber zunächst in eine Bauzeit von 38 Tagen mit einer Erhöhung der Holzfeuchte/Adsorptionsprozess über, bevor die Betriebszeit mit einem Trocknungs-/Desorptionsprozess beginnt.

- Im Klimaszenario C wird die Verstärkung am Ende der Bauzeit von 38 Tagen auf der Baustelle eingebracht. Anschliessend erfolgt die Nutzungsphase mit einem Trocknungsprozess. Dies führt zu einer höheren Feuchtigkeitsbelastung nach der Verstärkungsmassnahme.

Die Prüfkörper wurden für jede Situation in Klimakammern klimatisiert. Der Beginn der Klimaänderungen bezieht sich immer auf den Feuchtigkeitsgehalt von 12 M%, welcher der aus der Produktionsphase entspricht.

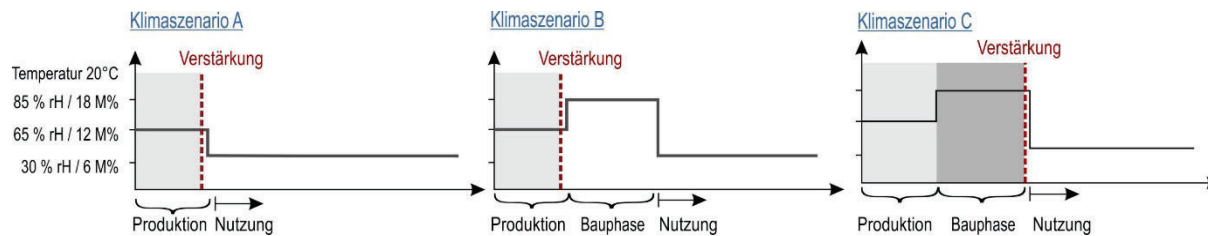


Abb. 1: Veranschaulichung der drei stufenweisen Klimaszenarien im Versuchsprogramm

3.3 Prüfprogramm

Die Prüfreihe umfasst unbewehrte und bewehrte Prüfkörper je Klimavariante. Die Prüfkörpergeometrie hat eine Standardträgerbreite von 160 mm und -höhe von 600 mm, vgl. Abb. 2. Die Elementlängen betragen 160 mm oder 320 mm, in Anlehnung an das Prüfprogramm von Wallner (2012). Die Größe der Elemente und das Bewehrungsverhältnis wurden so definiert, dass die Bewehrung ungefähr die gleiche Steifigkeit wie das Brettschichtholz hat respektive die doppelte Steifigkeit des Brettschichtholzes, vgl. Gleichung (6). Die Stirnseiten der meisten Prüfkörper wurden gegenüber der Feuchtigkeitsaufnahme mit Aluminiumband abgedichtet und repräsentieren hierdurch einen durchgehenden Balken. Die Prüfkörper ohne stirnseitige Abdichtung stehen für Verstärkungsmassnahmen am Trägerende, wie u. a. Ausklinkungen, Durchbrüche oder Auflagerverstärkungen.

Klimaszenario							
[mm]	160/160/600	160/320/600	160/320/600	160/160/600	160/320/600	160/320/600	160/320/600
	Referenz	Referenz	Referenz	$EA_{\text{Stahl}} = 2 EA_{\text{Holz}}$	$EA_{\text{Stahl}} = EA_{\text{Holz}}$	$EA_{\text{Stahl}} = EA_{\text{Holz}}$	$EA_{\text{Stahl}} = 2 EA_{\text{Holz}}$
A	# P9	# P10	# P23	# P1	# P2 ¹⁾	# P3 ¹⁾ , P11 ¹⁾ , P12	# P4
B			# P25	-	-	# P15 ²⁾ , P16	-
C			# P27	# P5	# P6 ¹⁾	# P7 ¹⁾ , P19 ¹⁾ , P20	# P8

¹⁾ Messung des Holzfeuchtegehaltes in den Tiefen von 15 und 40 mm

²⁾ Messung des Holzfeuchtegehaltes in den Tiefen von 15, 25, und 40 mm

Abb. 2: Zusammenfassung des Prüfprogramms mit Darlegung der Geometrie, Verstärkung wie auch der Zuordnung der Klimabeanspruchung und durchgeführten Holzfeuchtemessung

4 MESSTECHNIKEN UND MESSMETHODEN

4.1 HOLZFEUCHTEGEHALT

Die Messung des Holzfeuchtegehaltes innerhalb der Brettschichtholzträger wurden mit der elektrischen Widerstandsmethode gemessen. In vorgebohrte Löcher wurden teilisolierte GANN-Elektrodenpaare in Messtiefen von 15 mm, 25 mm und 40 mm eingesetzt, vgl. Abb. 2 und Abb. 4. Zur Temperaturkompensation bei der Umrechnung vom elektrischen Widerstand auf den Holzfeuchtegehalt wurden zusätzlich Temperatursensoren eingebaut. Die Genauigkeit dieser Messmethode liegt nach Forsén & Tarvainen (2000) bei 2 M%. Der Feuchtigkeitsgehalt an der Oberfläche wurde als Gleichgewichtsfeuchtigkeitsgehalt angenommen, der aus dem Umgebungsklima unter Verwendung der Gleichung von Simpson (1973) berechnet. Die Messfrequenz betrug 1 Stunde.

4.2 Verformung der Verstärkung und des Brettschichtholzträgers

Für die Erfassung des Verformungsverhaltens der Verstärkung/Gewindeschraube wurde ein Messrahmen mit einer Messuhr und Messbereich von 10 mm und Auflösung von 0,01 mm verwendet, siehe Abb. 3. Die zu erwartende Verformungen der Verstärkung innerhalb eines 600 mm hohen Balkens wurde auf rund 2 mm bei einer Zugfestigkeit senkrecht zur Faser von $f_{t,90} = 0,5 \text{ N/mm}^2$ mit $E_{t,90,m} = 300 \text{ N/mm}^2$ und $\alpha_{90} = 0,25\%/M\%$ (lt. SN EN 14080:2013, SIA 265/1:2012) ermittelt. Zur Reduzierung der Messunsicherheiten aufgrund thermischer Ausdehnung, wurde ein Referenzstab aus dem gleichen Material zusammen mit den Brettschichtholzträgern klimatisiert und zur Dehnungskorrektur gemessen. Der resultierende Messfehler liegt bei einer Größenordnung von 0,01 mm und damit innerhalb der Messauflösung des Messgeräts.

Die Erfassung der Verformung der Brettschichtholzelemente erfolgte an der Oberfläche über die Höhe in mehreren Messabschnitten von 100 mm und 200 mm mit einem Deformometer (siehe Abb. 4). Vor jeder Messung wurde der Deformometer mit Referenzstäben kalibriert. Die Oberflächenmessungen wurden auf beiden Seiten des Prüfkörpers durchgeführt und gemittelt.

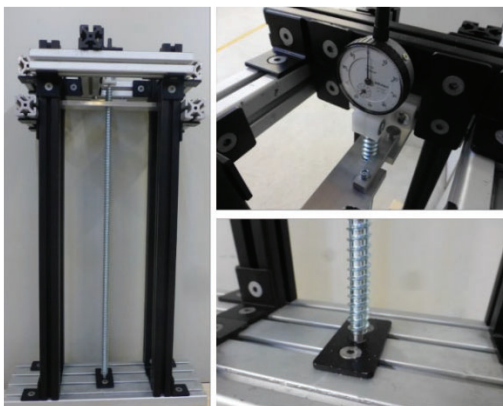


Abb. 3: Rahmen zur Verformungsmessung der Verstärkung (links), Messuhr (r. o.), Zentrierhilfe zum Einsetzen des Prüfkörpers (r. u.)

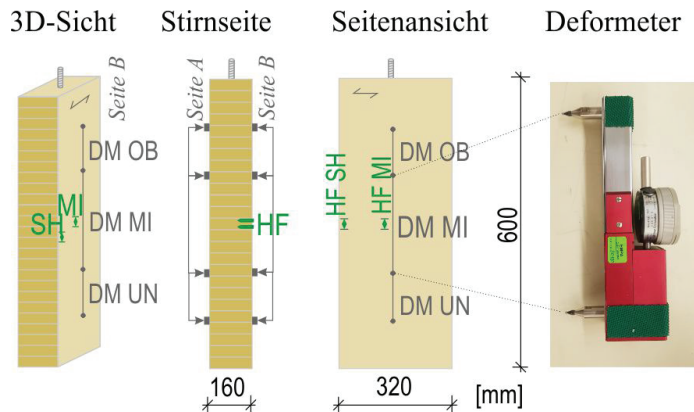


Abb. 4: Positionen zur Messung der Verformungen (DM, grau) an der Holzoberfläche in 3D-, Stirn- und Seitenansicht sowie Holzfeuchtemessstellen (HF, grün); Deformometer - Messgerät

5 EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE

5.1 Holzfeuchtegehalt über den Querschnitt

In jeder Klimavariante und Prüfgruppe wurde mindestens ein Prüfkörper mit Feuchtesensoren ausgestattet, vgl. Abb. 2, und die Messdaten wurden innerhalb einer Prüfgruppe auf alle Prüfkörper übertragen. Die erhaltenen Verteilungen der Holzfeuchte über die Zeit und Messtiefen sind je Klimaszenario in Abb. 5 dargestellt. In den ersten Prüfreiheiten (P1 bis P10) konnte die beabsichtigte Vorklimatisierung der Prüfkörper auf einen Feuchtegehalt von 12 M% bzw. 18 M% für das Klimaszenario A (erreicht 10 M%) bzw. C (erreicht 14 M%) nicht vollständig erreicht werden. Die Klimatisierung der zweiten Serie (P11 bis P27) wurde entsprechend angepasst und die Prüfkörper wurden mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von 85 % und einer Temperatur von fast 40 °C anstatt wie vorher 20°C klimatisiert. Zur Beschleunigung der Klimatisierung wurden die Elemente an der Oberfläche mit Wasser zusätzlich besprüht. Der hiermit erreichte Holzfeuchtegehalt in der zweiten Prüfserie lag bei ca. 13 M% und 18 M%.

Die Wirkungsweise der Versiegelung an den Stirnseiten ist sehr deutlich in den Klimaszenarien A und C zu erkennen; der allgemeine Feuchtigkeitstransport wird reduziert. Ist das Hirnholz nicht versiegelt, wie bei P2 und P6, nimmt der Feuchtigkeitsgehalt im Querschnitt schneller ab, und nach etwa 20 Tagen ist bereits ein Gleichgewicht erreicht. Es entwickelt sich nicht nur ein Feuchtigkeitsgradient über die Querschnittsbreite, sondern auch über die Prüfkörperlänge. Für die versiegelten Prüfelemente (P3 und P7) wird das Gleichgewicht erst nach 50 Tagen erreicht, und es gibt annähernd kein Unterschied zwischen den Messpunkten in der Mitte (MI) und nahe der Hirnholzoberfläche (SH).

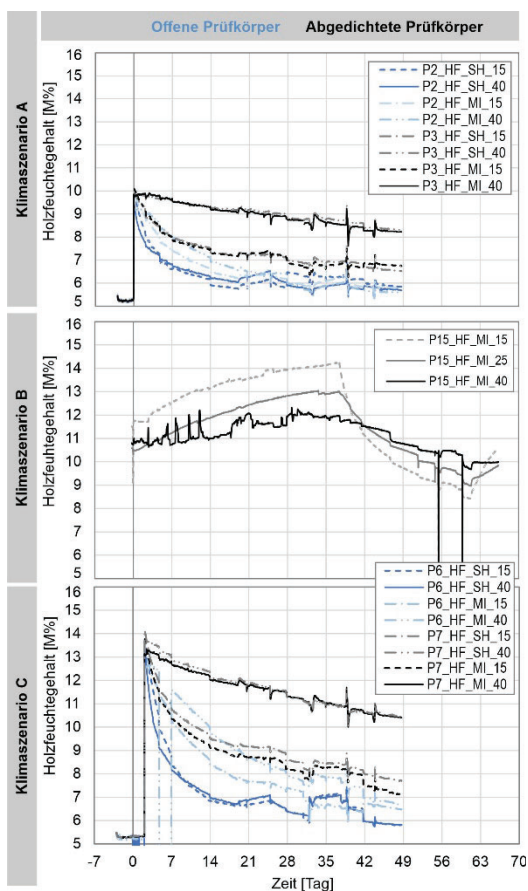


Abb. 5: Verlauf der Holzfeuchte je Klimaszenario in unterschiedlichen Messtiefen und -positionen für abgedichtete und offene Prüfkörper

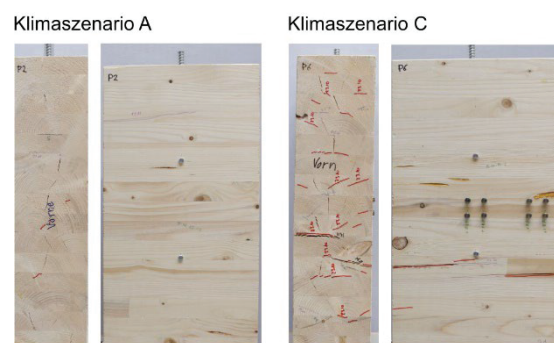


Abb. 6: Rissbilder der Stirn- und Seitenflächen für die Proben P2 und P6 mit halber Bewehrungssteifigkeit

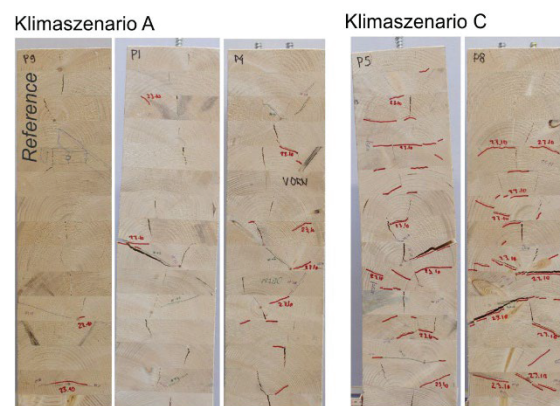


Abb. 7: Rissbilder der Stirnseiten der Referenzprobe P9 und der Proben mit gleicher Bewehrungssteifigkeit (AE Verhältnis =1) P1, P4, P5 und P8 (v.l.n.r.)

5.2 Visuelle Beurteilung des Verhaltens

Innerhalb der Versuchsdurchführung wurde an allen Prüfkörpern eine Rissbildung festgestellt, s. Abb. 6 und Abb. 7. Bei der höheren Feuchtebelastung von $\Delta = 12$ M% (Klimaszenario C) sind mehr Risse am Hirnholz und sogar Risse an der Seite aufgetreten, Abb. 6. Bei der geringeren Feuchtebelastung mit $\Delta = 6$ M% (Klimaszenario A) entwickelten sich an den Seitenflächen kaum Risse. Die Prüfkörper mit einfacher Verstärkung zeigen im Vergleich zu den Prüfkörpern mit doppelter Verstärkung, trotz gleichem AE-Verhältnis, eine deutlich erhöhte Rissentwicklung auf einer Seite zusammen mit recht großen Biegeverformungen, Abb. 7. Der Zusammenhang zwischen der Änderung des Feuchtigkeitsgehalts und dem Risswachstum ist in Abb. 8 dargestellt. Die gerissenen Prüfkörper zeigen im Vergleich zu den ungerissenen Prüfkörpern im Durchschnitt geringere Änderungen der Holzfeuchte zum Zeitpunkt des Versagens. Der Prüfkörper P19 war möglicherweise sensibler für die Rissentwicklung, da bereits vor Versuchsbeginn ein Riss sichtbar war.

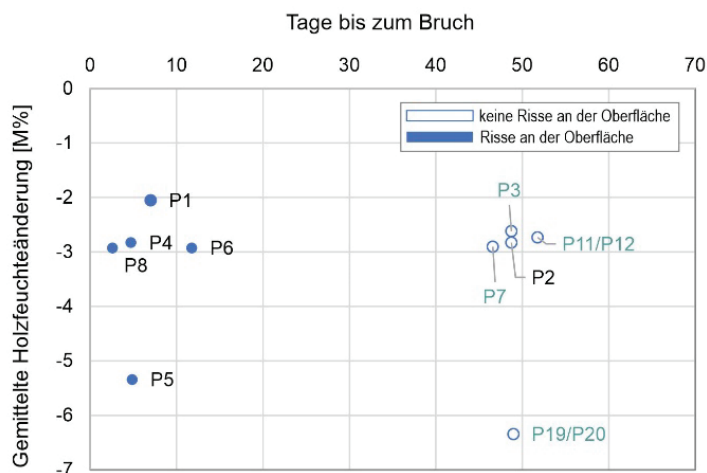


Abb. 8: Versagenszeitpunkt vs. Holzfeuchteänderung zum Zeitpunkt des Versagens

5.3 Verformungsverhalten der Prüfkörper

Die gemessenen Verformungen an der Verstärkung und an der Holzoberfläche sind als Dehnungen für jedes Klimaszenario und jede Prüfkörperkonfiguration in Abb. 9 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass:

- Offene Prüfkörper zeigen deutlich grössere Verformungen und schnellere Rissentwicklungen
- Die Dehnungen an der Holzoberfläche mit doppelter Verstärkung (Verstärkung näher an der Oberfläche) sind wesentlich geringer und in der gleichen Grössenordnung wie die Dehnungen direkt in der Verstärkung (P1, P2 zu P4).
- Für die abgedichtete Prüfkörper ergeben sich geringere Unterschiede zwischen den Dehnungen mit oder ohne Verstärkung, wobei jeweils die Referenz ohne Verstärkung die geringeren Dehnungen aufweist. Die Erklärung hierfür ist noch offen.

5.4 Charakterisierung des klimatischen Einflusses auf Verstärkungen

Auf der Grundlage der gemessenen Änderung des Feuchtigkeitsgehalts und der Dehnungen im Holz respektive der Verstärkung konnte ein effektives Schwind- und Quellmass abgeleitet werden. Die Grundlage hierfür ist die Analogie von Verbundquerschnitten aus zwei verschiedenen Materialien 1 und 2 mit gleichen Dehnungen in den Materialien, s. Abb. 10, wie auch den bekannten Beziehungen des Quell-/Schwindmasses zu den Spannungs-Dehnungsbeziehungen am Querschnitt, Gl. (2) bis (4). Das effektive Quell- und Schwindmass für die verstärkten Brett-schichtholzprüfkörpern unter klimatischen Einfluss ist nach Gl. (5) berechnet. Dies ist wie ein Hygroexpansionskoeffizient mit der Einheit %/M%:

$$\Delta \varepsilon = \Delta \sigma / E + \alpha \Delta u \quad (1)$$

$$\Delta \varepsilon_0 = (F_e + \alpha_1 \Delta u_1 A_1 E_1) / (A_1 E_1 + A_2 E_2) \quad (2)$$

$$\Delta\sigma_1 = \left((F_e + \alpha_1 \Delta u_1 A_1 E_1) / (A_1 E_1 + A_2 E_2) - \alpha_1 \Delta u_1 \right) E_1 \quad (3)$$

$$\Delta\sigma_2 = (F_e + \alpha_1 \Delta u_1 A_1 E_1) / (A_1 E_1 + A_2 E_2) E_2$$

$$\Delta\sigma_1 = \alpha_1 \Delta u_1 (\gamma - 1) E_1 \quad (4)$$

$$\Delta\sigma_2 = \alpha_1 \Delta u_1 \gamma E_2$$

wobei ε die Dehnungen [-], σ die Spannung [MPa], E der Elastizitätsmodul [N/mm²], α das Quell-/Schwindmass [%/M%], u [M%] der Holzfeuchtegehalt und A [mm²] die Querschnittsfläche sind. γ ist das Verhältnis der Steifigkeit zwischen dem Holzquerschnitt und dem Gesamtquerschnitt, mit einem Wert zwischen 0 und 1, Gl. (6).

$$\gamma = \frac{A_1 E_1}{A_1 E_1 + A_2 E_2} \quad (5)$$

Die Spannung in der Verstärkung wird mit der S-Faktor von 1.42 korrigierten Dehnung für 600 mm hohe Träger berechnet, wobei die ungleichmäßige Dehnungsverteilung über die Tiefe des Trägers berücksichtigt wird, s. Abb. 10. Außerdem wird eine Korrektur der Probenhöhe von 0,68 vorgenommen,

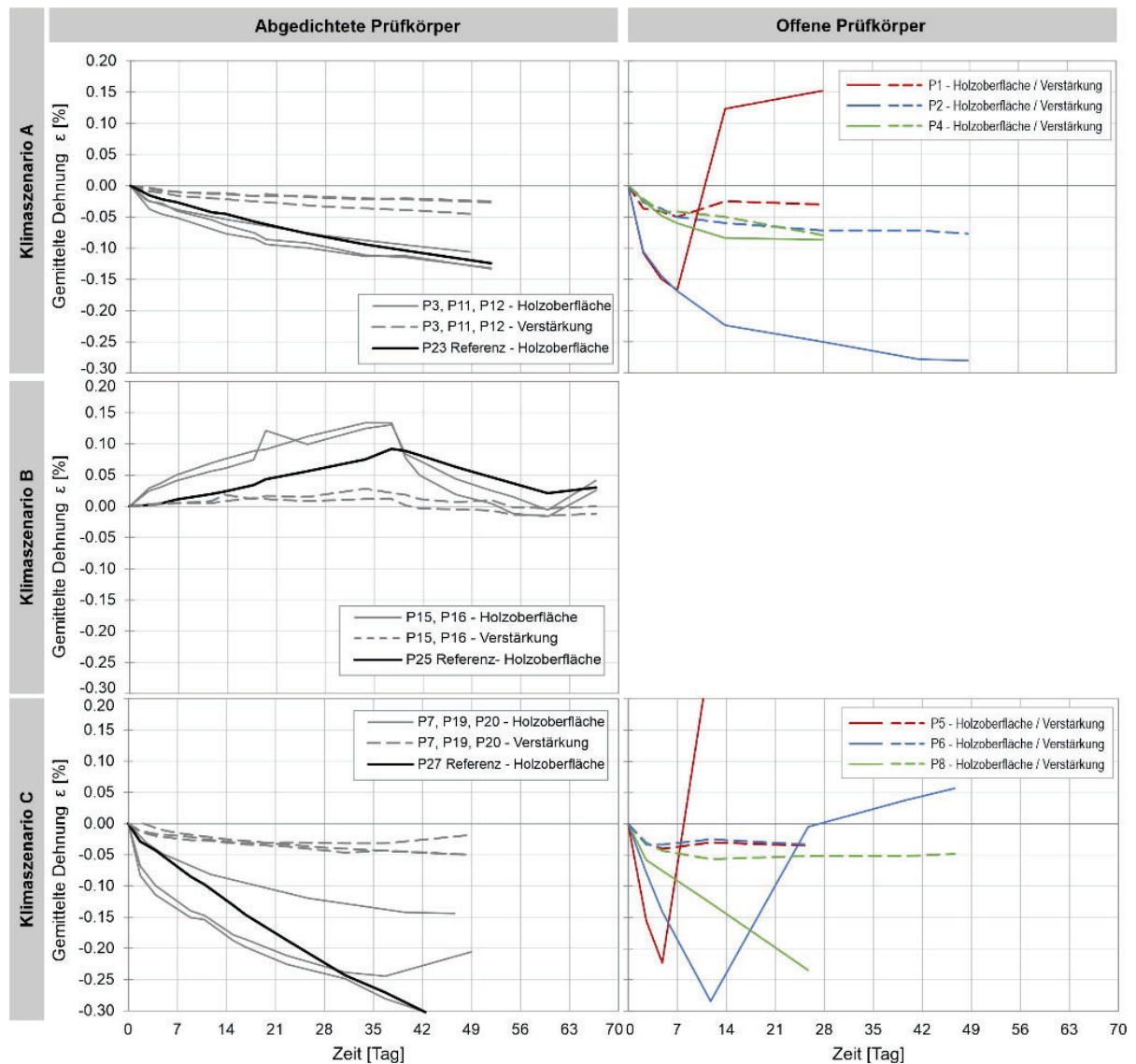


Abb. 9: Dehnungsentwicklung in der Bewehrung und an der Oberfläche

um die Spannungen in einer unendlich hohen Probe zu erhalten. Daher können Untersuchungen mit unterschiedlichen Höhen direkt miteinander verglichen werden. Alle Dehnungen und der Holzfeuchtegehalt wurden von der letzten Messung vor dem Bruch oder am Ende der Klimatisierung verwendet. Abb. 11 zeigt die berechneten Werte als Funktion der Zeit für die Probekörper des Klimaszenarios A. Der Hygroexpansionskoeffizient endet für diese Probenserie zwischen 0,05 und 0,10 %/M%. Nur der Probekörper P1 weist gerade zu Beginn der Klimaänderung deutlich höhere Werte auf. Dies war auch der Zeitpunkt, an dem der Bruch auftrat.

Die berechneten effektiven Hygroexpansionskoeffizienten vor dem Versagen sind in Relation zu den endgültigen Holzfeuchtegehaltsänderungen aufgetragen, die die Elemente kurz vor dem Versagen erfahren haben, siehe Abbildung 13. Der Wert von Probe P1 kann aufgrund des frühen Versagens und des unsicheren Wertes ausgeschlossen werden. Im Durchschnitt wird ein effektiver Hygroexpansionskoeffizient von 0,055 %/M% berechnet. Es wird kein Unterschied im Hygroexpansionskoeffizienten zwischen Elementen mit oder ohne Hirnholzversiegelung oder Trocknungs- und Befeuchtungsprozessen festgestellt. Im Allgemeinen beträgt die Ausdehnung der Bewehrung also etwa 1/5 des Hygroexpansionskoeffizienten von Holz senkrecht zur Faser (0,24 %/M%, SIA 265).

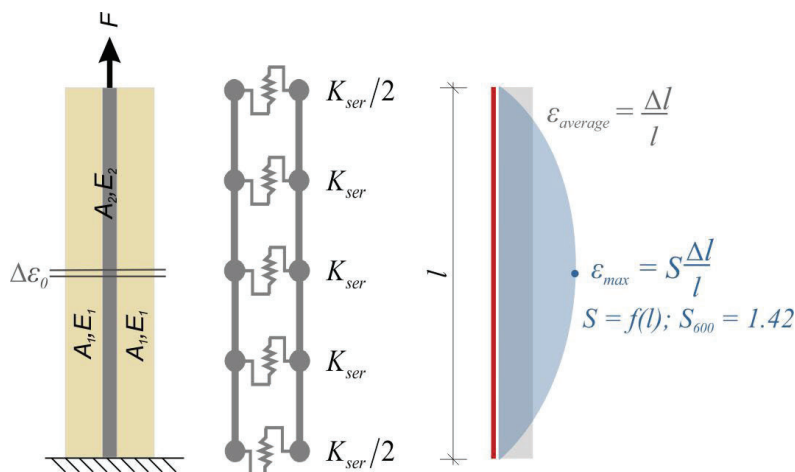


Abb. 10: Verbundanalogie für zwei verschiedenen Materialien 1 und 2 und Korrektur der Spannungsverteilung über die Querschnittshöhe

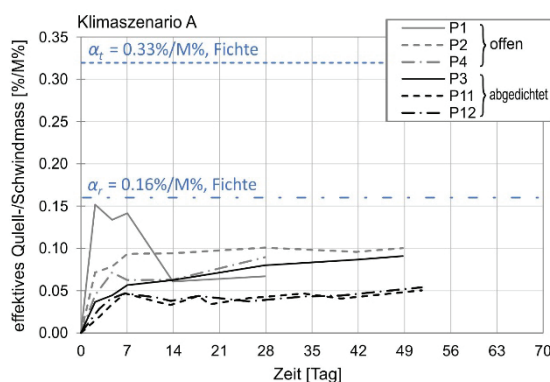


Abb. 11: Entwicklung der berechneten Hygroexpansionskoeffizienten für Klimaszenario A im Zeitverlauf

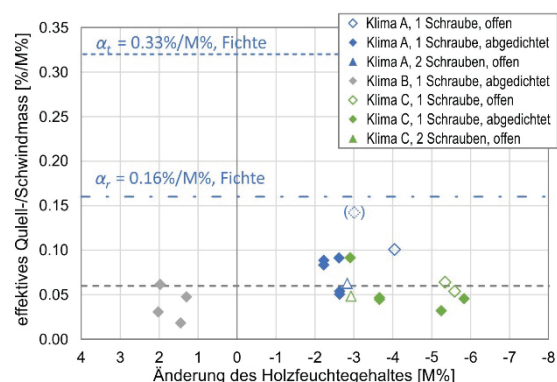


Abb. 12: Ableitung des effektiven Hygroexpansionskoeffizienten des Brettschichtholzquerschnitts nach der Verbundstrukturtheorie

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die berechneten effektiven Hygroexpansionskoeffizienten für alle vorgestellten Proben und Klimaszenarien zeigen einen ziemlich konstanten reduzierten Koeffizienten im Vergleich zu den Hygroexpansionskoeffizienten für freies Quellen und Schwinden oder dem halben Wert für behindertes Schwinden, wie in [16] angegeben.

Mit Hilfe eines vereinfachten Modells konnten effektive Hygroexpansionskoeffizienten berechnet werden. Bei diesen Berechnungen mussten die theoretischen Bemessungswerte für E-Moduli (300 N/mm^2) verwendet werden. Eine wichtige Schlussfolgerung ist, dass die theoretischen Hygroexpansionswerte von Holz senkrecht zur Faser bei etwa $0,24 \text{ \%}/\text{M}\%$ liegen (SIA 265, 2012), während sie bei der Anwendung von verstärkten Bauteilen bei etwa einem Fünftel dieses Wertes liegen können. Dies erklärt, warum grössere Feuchteänderungen ohne Rissbildung möglich sind und die Realität besser widerspiegeln. Inwieweit dieser Wert auch für andere Querschnittsverhältnisse und Verstärkungsgrade gilt, muss noch geprüft werden.

Die Verwendung eines Wertes von $0,055 \text{ \%}/\text{M}\%$ in Kombination mit einer Korrektur für einen Höheneffekt ermöglicht die Abschätzung realistischer feuchtebedingter Dehnungsänderungen von verstärkten Brettschichtholzquerschnitten. Die $0,055 \text{ \%}/\text{M}\%$ spiegeln nicht den realen Hygro-Expansionskoeffizienten wieder, sondern sind eher ein "effektiver" Wert, der die Effekte der mechano-sorptiven Relaxation und des zeitabhängigen Kriechens auch bei Vorhandensein von Verstärkungen einschliesst. Zur Berechnung der möglicherweise erzeugten zusätzlichen Spannung in einem Querschnitt aufgrund von Änderungen des Feuchtigkeitsgehalts kann Gleichung (5) verwendet werden, wobei ein Hygroexpansionskoeffizient von $0,05 \text{ \%}/\text{M} \%$ empfohlen wird.

DANKSAGUNG

Die Forschungsarbeit wurde vom Schweizerischen Bundesamt für Umwelt im Rahmen des Grant WHFF 2018.14 finanziert. Vielen Dank auch an die Forschungspartner, Experten und Unternehmen, die die Arbeit unterstützt haben.

7 REFERENZEN

- Aicher S., Dill-Langer G. (1997) Climate induced stresses perpendicular to the grain in glulam, *Otto-Graf Journal*, 8, 209-231.
- Blass H.J., Bejtka I., Uibel T. (2006) Tragfähigkeit von Verbindungen mit selbstbohrenden Holzschrauben mit Vollgewinde, Universitätsverlag Karlsruhe.
- Blass H.J., Krüger O. (2010) Schubverstärkung von Holz mit Holzschrauben und Gewindestangen, *Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau*, Band 15, 2010.
- Blass H.J. (2017) Selbstbohrende Schrauben und Systemverbinder - Stand der Technik und Herausforderungen, 23. Internationales Holzbau-Forum, Garmisch-Partenkirchen.
- Blaß H.J., Ehlbeck J., Kreuzinger H., Steck G. (2004) Erläuterungen zu DIN 1052:2004-08 Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken, DGfH Innovations und Service GmbH München.
- Danielsson H. (2013) Perpendicular to grain fracture analysis of wooded structural elements - models and applications. PhD Thesis, Lund University, Sweden.
- Danzer M., Dietsch P., Winter S. (2020) Shrinkage behavior of reinforced glulam members, *INTER Conference proceedings*, Karlsruhe.
- Danzer M., Dietsch P., Winter S. (2022) Effect of shrinkage on cracking and structural behaviour of reinforced glulam members, *Construction and Building Materials*, 327, 1-14.
- Dietsch P. (2012) Einsatz und Berechnung von Schubverstärkungen für Brettschichtholzbauteile. Phd-Thesis. Technical University Munich.
- Dietsch P., Brandner R. (2015) Reinforcement with self-tapping screws and threaded rods in Reinforcement of timber structures: a state-of-the-art report. *Construction and Building Materials*, 97, 78–89.

- Dietsch P. (2016) Reinforcement of timber structures – A new section for Eurocode 5, World Conference on Timber Engineering, Vienna.
- Dietsch P. (2017) Effect of reinforcement on shrinkage stresses in timber members. *Construction and Building Materials*, 150, 903-915.
- Dietsch, P., Winter, S. (2018) Structural failure in large-span timber structures: A comprehensive analysis of 230 cases. *Journal of Structural Safety*, 71, 41-46.
- Forsén H., Tarvainen V. (2000) Accuracy and functionality of hand-held wood moisture content meters, VTT Publications 420, Technical Research Centre of Finland, Finland.
- Franke B., Franke S., Schiere M., Müller A (2019) Quality assurance of timber structures. Research report, Bern University of Applied Sciences, Switzerland.
- Franke, S., Franke, B., Harte, A.M. (2015) Failure Modes and reinforcement techniques for timber beams – State of the Art, *Construction and Building Materials*, 97, 2-13.
- Frese M., Blass H.J. (2011) Statistics of damages to timber structures in Germany, *Engineering Structures*, 33 (11), 2969–2977.
- Gamper A., Dietsch P., Merk M. (2012) Gebäudeklima - Langzeitmessung zur Bestimmung der Auswirkungen auf Feuchtegradienten in Holzbauteilen. Research Report, TU Munich, Germany.
- Jönsson, J., Svensson, S. (2004) A contact free measurement method to measure internal stress states in glulam. *Holzforschung*, 58, 148–153.
- Jockwer R. (2014) Structural behaviour of glued laminated timber beams with unreinforced and reinforced notches. Ph Thesis. ETH-Zurich.
- Simpson W. (1973), Predicting equilibrium moisture content of wood by mathematical models, *Wood and Fiber*, 5 (1), p. 41-49
- SIA 265:2012, *Holzbau*. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich.
- Sjödin, J. (2008) Strength and moisture aspects of steel-timber dowel joints in glulam structures - an experimental and numerical study, Thesis (PhD). Växjö University.
- SN EN 1995-1-1:2004, Eurocode 5. Design of Timber Structures – Part 1-1: General – Common Rules and Rules for Buildings, European Committee for Standardization
- Trautz M., Koj C. (2008) Mit Schrauben fügen und bewehren - Langzeitversuche an biegesteifen Rahmenecken im Außenklima, *Bautechnik* 91 (1), 38-45.
- Wallner B (2012) Versuchstechnische Evaluierung feuchteinduzierter Kräfte in Brettschichtholz verursacht durch das Einbringen von Schraubstangen. Msc Thesis. TU Graz.