



AiF-
Forschungsvorhaben
Nr. 17274 N

Neuartige geklebte
hybride Bauteile aus
Holz und Beton –
Untersuchungen zur
Verbundfestigkeit bei
thermisch-hygrischer
Beanspruchung der
Klebfuge

Prof. Dr.-Ing. Werner Seim
Dipl.-Ing. Lars Eisenhut
Sonja Kühlborn M.Sc.
Dipl.-Ing. Horst Ulrich

Laufzeit: 01.10.2011 – 31.03.2015

Fachgebiet Bauwerkserhaltung und
Holzbau
Kurt-Wolters-Str. 3
D - 34125 Kassel

U N I K A S S E L
V E R S I T Ä T

1 Motivation und Zielsetzung

Im Holzbau werden zunehmend Verbundkonstruktionen aus Holz und Beton aufgrund ihrer Effizienz und der bauphysikalischen Vorteile eingesetzt. Der Verbund der Fügepartner Holz und Beton wird bisher in der Regel durch Formschluss oder durch Verbindungselemente aus Metall hergestellt. Durch den Einsatz der Klebtechnologie als Verbundmittel zwischen Holz und hochfestem oder ultrahochfestem Beton können die Vorteile einer „trockenen Bauweise“ mit den Vorteilen der Vorfertigung kombiniert werden.

Die Eignung der Klebtechnologie und das Tragverhalten bei Kurzzeitbeanspruchung wurden bereits von Schäfers [1] untersucht. Für die Einführung dieses Konstruktionsprinzips in die Baupraxis ist jedoch die Kenntnis des Langzeitverhaltens unabdingbar. Hier setzt das Forschungsprojekt an.

Bisher wurden Untersuchungen zum Langzeitverhalten an Holz-Beton-Verbundsystemen ausschließlich für formschlüssige Verbindungen bzw. Verbindungselemente aus Metall durchgeführt. Ziel des Forschungsvorhabens ist die Absicherung des Langzeitverhaltens geklebter Konstruktionen aus Holz und hochfestem Beton unter baupraktischen Umgebungsbedingungen. Dabei sollen die Einflüsse der klimatischen Randbedingungen und der permanenten Belastung, denen ein Bauteil während seiner Nutzungsdauer ausgesetzt ist, systematisch untersucht werden.

Als Grundlage für eine verallgemeinerte Prognose des Langzeitverhaltens sollen numerische Berechnungsverfahren entwickelt werden, die auch als Basis für die Optimierung der Bauteilgeometrie, der Herstellungsprozesse sowie der Materialauswahl und zur Absicherung vereinfachter Berechnungsmethoden herangezogen werden können.

2 Experimentelle Untersuchungen

2.1 Versuchsprogramm

Für die Untersuchungen zum Langzeitverhalten von geklebten Konstruktionen aus Holz und hochfestem Beton wurden die von Schäfers [1] vorgeschlagenen drei Skalen übernommen (siehe Abb. 2.1). An kleinformatischen Scher- und Verbundproben werden die hygrothermischen Einflüsse auf die Entwicklung der Verbundfestigkeit und auf das zeitabhängige Verformungsverhalten untersucht. Dazu werden die Scher- und Verbundproben unter Last für die Dauer von 14 Monaten künstlichen Klimabedingungen ausgesetzt. Anhand der Ergebnisse sollen numerische Modelle zur Prognose des Verbundverhaltens und der Tragfähigkeit validiert werden.



Abb. 2.1: Skalen der experimentellen Untersuchungen

An vier Bauteilen wird das Langzeitverhalten unter baupraktischen Bedingungen bei natürlichem Klima über den Zeitraum von zwei Jahren untersucht. Nach der Bestimmung der mechanischen Eigenschaften werden die Bauteile den klimatischen Bedingungen direkt über einem Gewässer ausgesetzt und mit einer kriecherzeugenden permanenten Last beaufschlagt. Die Höhe der Belastung orientiert sich an Trägern für Fußgängerbrücken.

2.2 Experimentelle Untersuchungen zum Verbundverhalten

Die Verbundproben wurden während der Lagerung im künstlichen Wechselklima einer Dauerlast ausgesetzt. Diese Dauerlast verursachte in der Klebefuge eine mittlere Verbundspannung von $2,0 \text{ N/mm}^2$, die auf 25 % der aus Vorversuchen bekannten mittleren Kurzzeitfestigkeit festgelegt wurde. Das Wechselklima bestand aus zwei Klimastufen: Klimastufe 1 mit 20 °C und 85 % rel. Luftfeuchte und Klimastufe 2 mit 45 °C und 40 % rel. Luftfeuchte. Jede Klimastufe dauerte sieben Tage.

Um die Festigkeitsentwicklung in kürzeren Zeitabständen und möglichst unabhängig von Schwind- und Quellverformungen zu überprüfen, wurden auch Scherproben einer Wechselklimabeanspruchung unter Dauerlast ausgesetzt. Es wurde eine Kraft parallel zur Faserrichtung des Holzes eingetragen. Diese führte wie bei den Verbundproben zu mittleren rechnerischen Scherspannungen von $2,0 \text{ N/mm}^2$ in der Verbundzone.

Während der Klimalagerung wurden die Verformungen der Verbundproben regelmäßig gemessen. In Abb. 2.2 sind die Mittelwerte der auf beiden Seiten der Probe gemessenen Längenänderung zwischen den Lasteinleitungsstellen über den Zeitraum von 230 Tagen dargestellt. Die Ergebnisse zeigen eine große Streuung der absoluten Größe der Kriechverformungen und der Kriechgeschwindigkeit, die aus der Steigung der Kurven abgeleitet werden kann. Die Messungen der Kriechverformungen an insgesamt 16 Klimazyklen zeigen, dass bei einer Verbundspannung unterhalb von $2,0 \text{ N/mm}^2$ von Verformungen ausgegangen werden kann, welche sich einem Endwert nähern. An keiner Probe wurde das Erreichen des tertiären Kriechbereichs festgestellt.

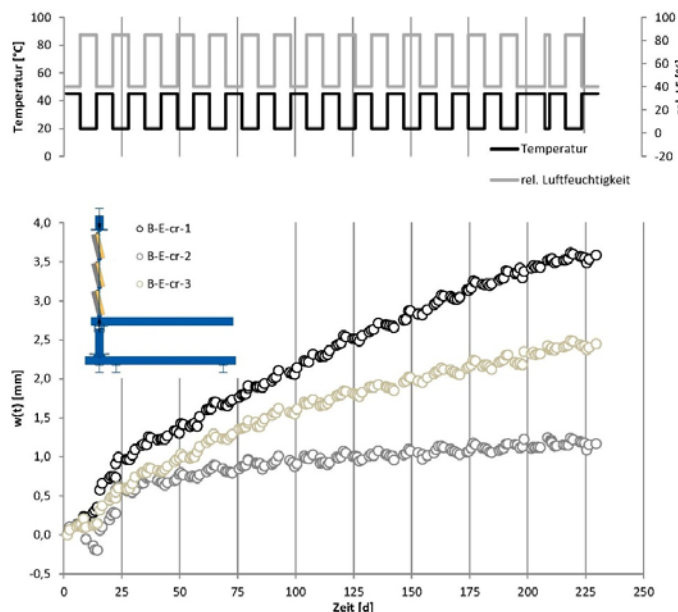


Abb. 2.2: Kriechverformung der Verbundproben

In regelmäßigen Abständen wurden Verbundproben, die dem künstlichen Wechselklima ausgesetzt waren, entnommen und die Resttragfähigkeit wurde bestimmt. Dies sollte Aufschluss über die Festigkeitsentwicklung des Verbundes bei Dauerlast und thermisch-hygrischer Beanspruchung liefern. Insbesondere war in diesem Zusammenhang die Alterung des Klebstoffes von Interesse, welche sich bei einer Abnahme der Bruchlasten und gleichzeitig kohäsivem Bruch des Klebstoffes gezeigt hätte.

Abb. 2.3 zeigt typische Bruchbilder der Verbundproben. Bei der in Abb. 2.3a dargestellten Probe B-E-t6-3 handelt es sich um Scherversagen des Holzes an der Grenzfläche zum Klebstoff. Holzversagen war dadurch gekennzeichnet, dass auf der Seite des Klebstoffs Holzfasern an der Oberfläche der Bruchfläche anhafteten. Bei Probe B-E-t0-1 in Abb. 2.3b ist eine Kombination aus Holzversagen und kohäsivem Versagen des Klebstoffes erkennbar. Kohäsives Versagen des Klebstoffs lag dann vor, wenn auf beiden Seiten der Probe Klebstoffreste vorhanden waren. Bei keiner Probe trat Betonversagen im Verbundbereich auf.



Abb. 2.3: Typische Bruchbilder bei den Verbundproben (a) Versagen im Holz; (b) Kombination von Holzversagen und kohäsivem Versagen im Klebstoff

Bei 71 % der Verbundproben lag der Anteil des Holzversagens bei über 75 %. Die Bruchflächen der übrigen 29 % der Proben zeigten eine Kombination aus Holzversagen und kohäsivem Versagen des Klebstoffes.

Ein Zusammenhang zwischen Bruchflächenanteilen und Belastungsdauer konnte nicht festgestellt werden. Es scheint ebenfalls keinen Zusammenhang zwischen den Bruchflächenanteilen und der Höhe der Bruchlast zu geben. So war bei Proben mit hoher Verbundfestigkeit sowohl eine Kombination aus Holzbruch und kohäsivem Bruch, als auch reiner Holzbruch zu beobachten.

Zunächst nahm die Festigkeit des Verbundes mit zunehmender Belastungsdauer ab (siehe Abb. 2.4) Die Verbundfestigkeit nach 434 Tagen Belastungsdauer war jedoch wieder überdurchschnittlich hoch. Es war kein zunehmender Anteil von kohäsivem Versagen des Klebstoffs mit zunehmender Belastungsdauer zu beobachten.

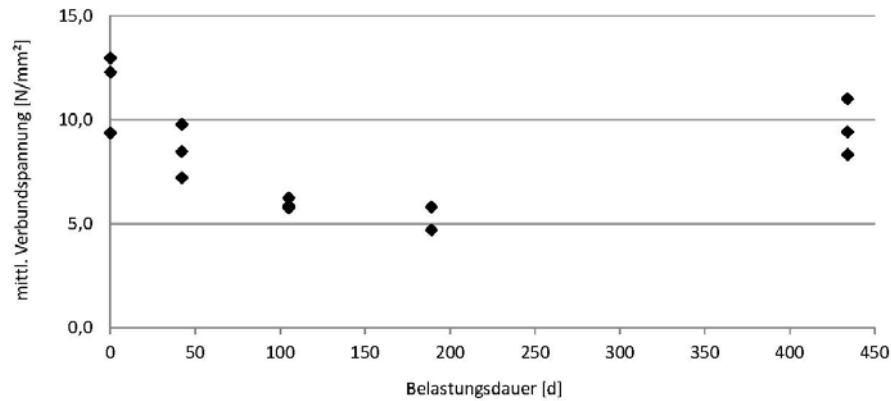


Abb. 2.4: Verbundfestigkeit in Abhängigkeit von der Belastungsdauer

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass weder eine Abnahme der Festigkeit über den betrachteten Zeitraum, noch ein zunehmender Anteil der Bruchflächen mit kohäsivem Versagen des Klebstoffes zu beobachten waren. Im Hinblick auf eine Bemessung des Klebeverbundes bei Dauerbeanspruchung unter thermisch-hygrischen Einwirkungen kann davon ausgegangen werden, dass die Schubfestigkeit des Holzes maßgebend bleibt.

2.3 Experimentelle Untersuchungen zum Bauteilverhalten

Die Auswirkungen von thermisch-hygrischen Einflüssen auf das Langzeitverhalten der Holz-Beton-Verbundbauteile wurden bei natürlichen Klimabedingungen untersucht. Dazu wurden die Bauteile für einen Zeitraum von zwei Jahren im Außenbereich über einem Gewässer im Schwalm-Eder-Kreis in Hessen ausgelagert und einer Dauerlast ausgesetzt (siehe Abb. 2.5). Aufgrund der örtlichen Situation war von realitätsnahen hygrischen Beanspruchungen auf das Holz auszugehen.



Abb. 2.5: Versuchsstand der Bauteile über einem Gewässer im Winter 2012 - 2013

Die Einwirkungen auf die Bauteile orientieren sich an typischen Trägern für eine Fußgängerbrücke mit Spannweiten zwischen 10,0 m und 12,0 m. Die Dauerlast wurde so gewählt, dass an der Verbundfuge der Bauteile Schubspannungen entstehen, welche den Schubspannungen von Brückenträgern mit 10,0 bis 12,0 m Spannweite entsprechen würden.

Um die thermisch-hygrischen Einflüsse auf das Langzeitverhalten bestimmen zu können, wurde die Temperatur und die Luftfeuchte am Versuchsstand mit zwei Datenloggern vom Typ Testo 174H stündlich aufgezeichnet. Der Verlauf von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit im Zeitraum der Auslagerung ist in Abb. 2.6 dargestellt. In den Wintermonaten steigt die relative Luftfeuchte zeitweise für die Dauer von sechs Tagen auf

95,3 % bis 99,9 % an. Die kleinsten Werte der Luftfeuchte betragen um die 40 %. Insgesamt ist das Klima am Standort der Bauteile vergleichsweise feucht.

Der zeitliche Verlauf der Durchbiegungen in Feldmitte bei den Bauteile E 1.1, E 1.2, E 2.1 und E 2.2 ist in Abb. 2.6 dargestellt. Nach dem Aufbringen der Last im September 2012 steigt die Durchbiegung bei allen Bauteilen kontinuierlich an und erreicht im Winter 2012/2013 bei tiefen Temperaturen und hoher rel. Luftfeuchte ihren ersten Maximalwert. Mit steigenden Temperaturen und sinkender rel. Luftfeuchte im Frühjahr gehen die Durchbiegungen bei den Bauteilen E 1.1, E 1.2 und E 2.1 auf rd. 90 % des bisher erreichten Niveaus zurück. Vom April bis zum August 2013 bleiben die Durchbiegungen bei den Bauteilen E 1.1, E 1.2, E 2.1 und E 2.2 auf annähernd konstantem Niveau oder steigen nur leicht an. Im Herbst 2013 ist verbunden mit rückläufigen Temperaturen und steigender rel. Luftfeuchte ein erneuter Anstieg der Durchbiegungen mit einem zweiten Maximum im Winter 2013/2014 zu verzeichnen. Das Maximum im zweiten Winter liegt über dem Maximalwert des ersten Winters. Im Frühjahr 2014 werden wieder leicht rückläufige Durchbiegungen beobachtet.

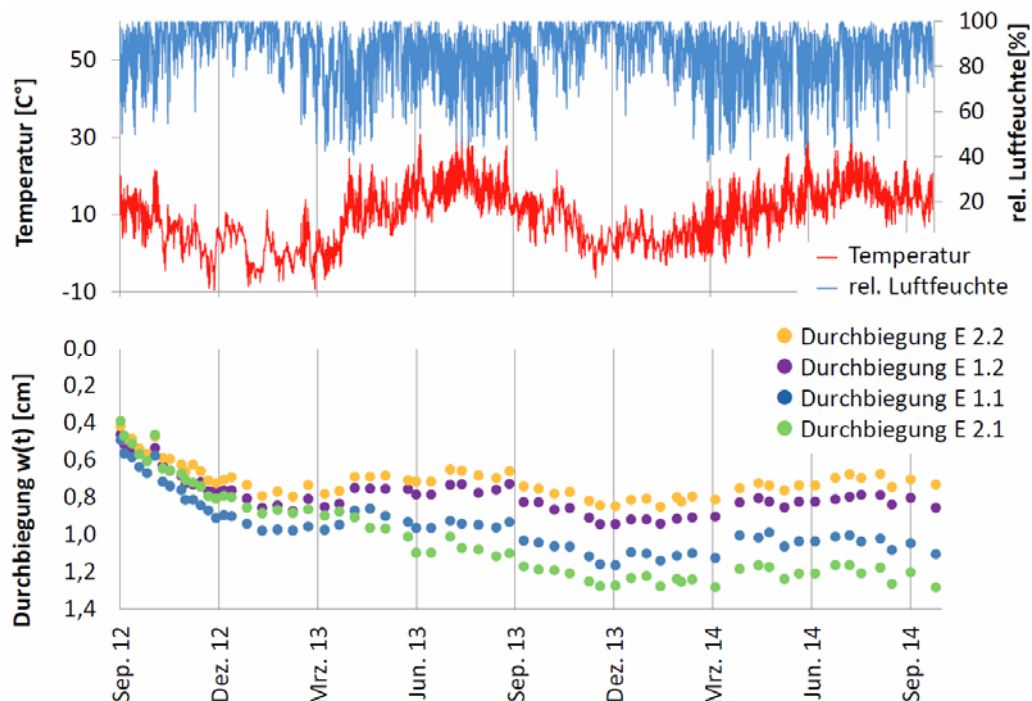


Abb. 2.6: Messwerte der Durchbiegungen der Bauteile E 1.1, E 1.2, E 2.1 und E 2.2 in Feldmitte im Untersuchungszeitraum

Der Verlauf der Durchbiegungen ist durch Temperaturdehnungen und viskoelastisches Verhalten von Holz, Beton und Klebstoff und durch das hygrische Verhalten des Holzes zu erklären. Durch das viskoelastische Verhalten nehmen die Durchbiegungen unter Last stetig zu. Die Feuchteaufnahme führt zu Quellen im Holz. Durch die daraus resultierenden Längsdehnungen des Holzes stellen sich zusätzliche Durchbiegungen ein. Das ist in den Phasen mit hoher Luftfeuchte jeweils im Winter der Fall. In den Sommermonaten steigen die Temperaturen an. Da die Wärmedehnzahl des Betons größer ist als die Wärmedehnzahl des Holzes dehnt sich der Beton bei hohen Temperaturen stärker aus als das Holz. Dies führt zum Rückgang der Durchbiegungen. Gleichzeitig schwindet das Holz bei rückläufiger rel. Luftfeuchte und verstärkt diesen Effekt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass das Konstruktionsprinzip des geklebten Verbundes aus Holz und Beton für Bauteile in natürlichen Umgebungsbedingungen geeignet ist. Jahreszeitliche Änderungen der Temperatur und der relativen Luftfeuchte beeinflussen das

Langzeitverhalten. Temperaturänderungen führen zu materialspezifischen Wärmedehnungen und Änderungen der rel. Luftfeuchte zum Quellen und Schwinden des Holzes. Aus unterschiedlichen Wärmedehnungen sowie dem Quellen und Schwinden des Holzes resultieren Vertikalverformungen.

3 FE-Modellierung von geklebten Holz-Beton-Verbundbauteilen und –Prüfkörpern

3.1 Modellierung der Verbundfestigkeit

Mit den Simulationsroutinen zum Verbundverhalten sollen die Festigkeit und das Verformungsverhalten des geklebten Holz-Beton-Verbundes bei vorwiegender Beanspruchung auf Schub abgeschätzt werden können. Im Wechselklima wird der Einfluss von Temperatur und Holzfeuchte auf die Verformungen deutlich.

Bei den experimentellen Untersuchungen mit Epoxidharzklebstoff war die Tragfähigkeit des Verbundes von der Festigkeit des Holzes dominiert. Eine Reduktion der Verbundfestigkeit nach Dauerbeanspruchung und Klimalagerung war nicht feststellbar. Abb. 3.1a zeigt den Versuchsaufbau zur Bestimmung der Verbundfestigkeit mit eingebauter Probe und das verwendete FE-Netz. Für das Holz, den Beton und den Klebstoff wurden 8-Knoten Volumenelemente mit reduzierter Integration vom Typ C3D8R verwendet. Für die beobachtete Bruchfläche zwischen Holz und Klebstoff wurden kohäsive Elemente in 1 mm Schichtdicke vom Typ COH3D8 angeordnet. Der Holzquerschnitt wurde mit elastischen anisotropen Materialeigenschaften versehen. Für den Beton, den Klebstoff und den Stahl wurden isotrope Materialeigenschaften (Beton: $E = 31.800 \text{ N/mm}^2$; $\nu = 0,2$, Klebstoff: $E = 6.730 \text{ N/mm}^2$; $\nu = 0,4$, Stahl: $E = 210.000 \text{ N/mm}^2$; $\nu = 0,3$) angesetzt.

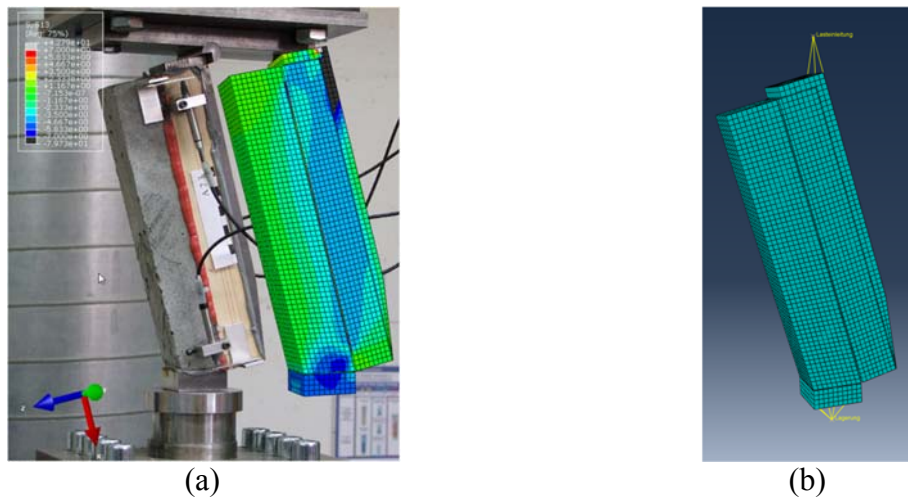


Abb. 3.1: Simulationsmodell für die Bestimmung der Festigkeit des Verbundes
 (a) Versuchsaufbau und FE-Netz mit Darstellung der Schubspannungen τ_{xz} ;
 (b) Referenzpunkte und Lasteinleitung

In einer Parameterstudie soll der Einfluss der Schubfestigkeit von f_v auf das Ergebnis der Simulation gezeigt werden. Bei der vorliegenden Beanspruchung wird das Spannungs-kriterium durch die Schubbeanspruchung τ dominiert. Es wird zwischen $f_v = 6,0 \text{ N/mm}^2$, was in der Größenordnung der Scherfestigkeit des verwendeten Holzes liegt, $f_v = 10,0 \text{ N/mm}^2$, was der mittleren Scherfestigkeit in [2] entspricht und $f_v = 14,0 \text{ N/mm}^2$ variiert. Abb. 3.2 zeigt die Ergebnisse der Simulation mit den im Verbundversuch bestimmten Verbundfestigkeiten. Die

Mittelwerte der Verbundfestigkeiten werden beim Ansatz von $f_v = 14,0 \text{ N/mm}^2$ am besten abgebildet. Auf der sicheren Seite liegend kann die Verbundfestigkeit bei Dauerlast und Wechselklimabeanspruchung mit $f_v = 6,0 \text{ N/mm}^2$ bestimmt werden.

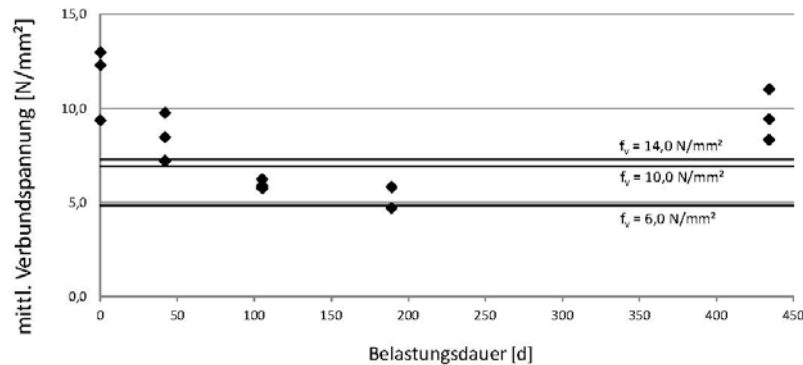


Abb. 3.2: Simulationsergebnis im Vergleich zu den Verbundversuchen

3.2 Modellierung von Bauteilen

Das Langzeitverhalten der Bauteile wird vom viskoelastischen Verhalten und von der Temperaturdehnung des Holzes, des Klebstoffs und des Betons, vom Quellen/Schwinden des Holzes und vom Schwinden des Betons beeinflusst. Zielsetzung bei der Modellierung der Bauteile ist es, die genannten Phänomene zu erfassen, um einerseits die Spannungsverteilung in den Querschnitten im Hinblick auf die Bemessung abbilden zu können und andererseits das Verformungsverhalten im Hinblick auf die Gebrauchstauglichkeit bestimmen zu können. Die Erkenntnisse sollen dann auf andere Umgebungsbedingungen und Geometrien übertragbar sein.



Abb. 3.3: Finite-Elemente-Netz für die numerischen Berechnungen im Vergleich zur Bauteilgeometrie

Unter Ausnutzung der doppelten Symmetrie wird ein Viertel des Querschnitts abgebildet. Die gewählte Netzgeometrie im Vergleich zur Gestalt des Bauteils ist in Abb. 3.3 dargestellt. Der Holzquerschnitt wird mit 8-Knoten Volumenelementen vom Typ C3D8T diskretisiert. Für den Feuchteausaustausch zwischen Außenklima und Holzquerschnitt werden in der Subroutine DFLUX die Parameter für natürliche Klimabedingungen verwendet. Die Betonplatte, die Klebschicht und die Stahllager werden mit 8-Knoten Volumenelementen vom Typ C3D8 diskretisiert.

Der Feuchtetransport zwischen dem Holzquerschnitt und der Umgebung findet über die Oberflächen der drei Längsseiten und stirnseitig statt. Die Temperatur und die relative

Luftfeuchte der Umgebung wurden am Standort des Versuchs stündlich aufgezeichnet. Diese Daten werden in die DFLUX-Subroutine eingetragen.

Durch die experimentellen Untersuchungen zum Verbundverhalten und im Bauteilmaßstab wurden systematisch Erkenntnisse zum Langzeittragverhalten geklebter Konstruktionen aus Holz und hochfestem Beton unter baupraktischen Umgebungsbedingungen gewonnen und die Eignung dieses Konstruktionsprinzips für die Baupraxis gezeigt. Durch die Entwicklung numerischer Modelle zur Verbundfestigkeit sowie zum Langzeitverhalten der Bauteile und die Validierung der Modelle durch die experimentellen Erkenntnisse existieren numerische Berechnungsverfahren, die als Basis für die Optimierung der Bauteilgeometrie, der Herstellungsprozesse sowie der Materialauswahl und zur Absicherung vereinfachter Berechnungsmethoden herangezogen werden können.

Fachschrifttum

- [1] Schäfers, M.: *Entwicklung von hybriden Bauteilen aus Holz und hochfesten bzw. ultrahochfesten Betonen - Experimentelle und theoretische Untersuchungen*. Dissertation, Schriftenreihe Bauwerkserhaltung und Holzbau, Heft 4, Universität Kassel. 2010.
- [2] DIN 68364: *Kennwerte von Holzarten - Rohdichte, Elastizitätsmodul und Festigkeiten*. 2003-05.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben 17274 N der Forschungsvereinigung Internationaler Verein für Technische Holzfragen e.V. (iVTH), Bienroder Weg 54 E, 38108 Braunschweig wurde über die AiF im Rahmen des Programmes zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und –entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Der vollständige Bericht kann bestellt werden bei:

Internationaler Verein für Technische Holzfragen e.V. (iVTH e.V.)
Bienroder Weg 54E
38108 Braunschweig