

Einführung

Das Projekt Towards Adhesive Free Timber (AFTB) hat führende Wissenschaftler aus sechs europäischen Ländern zusammengebracht, um Bausysteme zu entwickeln, die vollständig aus natürlichen erneuerbaren Rohstoffen bestehen. Es wurden ein- und zweidimensionale Bauelemente in Form von gedübelten Balken und Stützen sowie Wände und Decken unter Verwendung von einheimischen Holzarten und Hochleistungs-Pressholzdübelverbindern hergestellt und optimiert. Darüber hinaus wurden neuartige Verbindungssysteme entworfen und entwickelt, die den Bau von Strukturen aus diesen Elementen ermöglichen, wobei verdichtete Platten und Dübel verwendet werden, die die Möglichkeit bieten, nicht nur klebstofffreie (AF), sondern auch metallfreie Strukturen zu schaffen. Diese Broschüre fasst die wichtigsten Ergebnisse des AFTB-Projekts zusammen.

Verdichten von Holz

Durch die Anwendung von hohem Druck und hoher Temperatur kann nachhaltiges, schnell wachsendes Nadelholz in ein Material umgewandelt werden, das höhere Festigkeit, Steifigkeit und Härte als einige der wertvollsten tropischen Harthölzer hat. Durch genaue Regelung von Temperatur und Druck in einer hydraulischen Presse wird das Holz plastifiziert und kann ohne das Holz zu beschädigen komprimiert und verdichtet werden.

Bei Anwendung eines Drucks von 16 MPa bei einer Temperatur von 130 °C über mehrere Stunden kann das Nadelholz um bis zu 68% komprimiert werden, wodurch ein modifiziertes Holzprodukt mit einer Dichte von bis zu 1400 kg/m³ entsteht (Abb. 1).



Abb. 1 – Holzprofile aus Hemlocktanne vor und nach dem Verdichten von 400 kg/m³ auf 1400 kg/m³ [U Liverpool].

Eigenschaften von verdichtetem Holz

Es wurde ein umfassendes Versuchsprogramm zur Charakterisierung von Materialkennwerten durchgeführt, um eine Datenbank mit notwendigen Eigenschaften für die Bemessung von Bauteilen und Verbindungen unter Verwendung von Dübeln und Platten aus Pressholz aufzubauen. Folgende Eigenschaften wurden ermittelt: Dichte, Biegefestigkeit und Steifigkeit, Scherfestigkeit und Fließmoment für Dübel, Lochleibungsfestigkeit und Schlagbiegefestigkeit.

In Versuchen, die an verschiedenen Partnerinstitutionen an einer Vielzahl von Holzarten durchgeführt wurden, konnte gezeigt werden, dass die Verdichtung von Holz durch thermische Verdichtung die mechanischen Eigenschaften signifikant verbessert. Wie die Abb. 2 zeigt, ist der Grad der Verbesserung der Dichte, des Elastizitätsmodul und der Biegefestigkeit signifikant und variiert je nach Holzart. Bei verdichteter Hemlocktanne stieg jede dieser Materialeigenschaften im Vergleich zum unverdichteten Holz um über 200%. Bei Waldkiefer und Douglasie waren die Zunahmen geringer, aber immer über 70%.

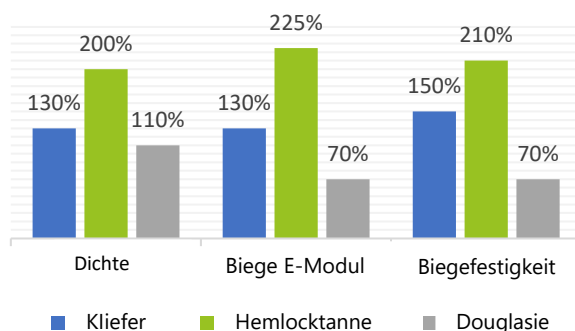


Abb. 2 – Anstieg von Dichte, Biegemodul und -festigkeit verschiedener Holzarten infolge der Verdichtung [U Liverpool].

Verdichtetes Holz unterliegt einem Rückerinnerungs-Effekt, wodurch es mit der Zeit unter Einfluss von Temperatur und relativer Feuchte zu seiner ursprünglichen Form zurückkehrt. Dies kann durch Wärmebehandlung oder andere Maßnahmen verhindert werden. Das AFTB-Projekt nutzt jedoch dieses charakteristische Verhalten aus, da es gewährleistet, dass Dübelverbindungen in CW-Bauelementen und Verbindungen über ihre gesamte Lebensdauer einen festen Sitz aufweisen.

Holzwerkstoffe mit Pressholzdübeln

Es wurden verschiedene Arten von Holzwerkstoffen (EWPs), die mit unter Hitze verdichteten Holzdübeln verbunden wurden, hergestellt und getestet, einschließlich:

- Balken und Stützen (Abb. 3)
- Verdübelte Deckenplatten (Abb. 4 & 5)



Abb. 3 – AF Brettschichtholzträger mit Dübel [U Liverpool].



Abb. 4 – Untersuchungen an gedübelten Deckenplatten [U Liverpool].

Die untersuchten Systeme umfassten Nadel- und Hartholzlamellen sowie verdichtete Hart- und Nadelholzdübel. Diese EWP's sind bis zum Versagen getestet worden, um die zulässigen Bemessungslasten und -spannungen zu bestimmen. Die Dübellage und -abstände wurden ebenfalls untersucht. Auf diese Weise konnte der optimale Dübelabstand ermittelt werden. Versuche an AF-gedübelten Brettstichholzträgern mit unterschiedlichen Dübelabständen wurden mit Brettstichholzträgern der gleichen Querschnittsgröße verglichen. Die AF-EWP's erwiesen sich als deutlich weniger steif als die geklebten Produkte und versagten bei deutlich geringeren Belastungen. Die Forschung hat jedoch auch gezeigt, dass durch eine Optimierung der Konstruktion und insbesondere des Dübelabstands und der Lamellendicke die Steifigkeit und die Bruchlast erheblich verbessert werden können.

Das Dübelmaterial selbst scheint nicht der ausschlaggebende Faktor für das Biegeverhalten der AF-EWP's zu sein, aber unsere Tests im Labormaßstab deuten darauf hin, dass sich das Langzeitverhalten von EWP's mit Druckholzdübeln aufgrund des Formgedächtniseffekts, der einen außergewöhnlich festen Sitz während ihrer gesamten Lebensdauer gewährleistet, verbessern wird.

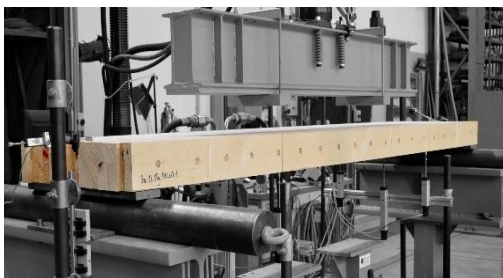


Abb. 5 – Biegeversuche an Brettstapel-Wandelement [TU Dresden].

Klebstofffreie und nichtmetallische Verbindungen

Die Machbarkeit von Momentverbindungen aus Vollholz wurde für typische Balken-Balken- und Balken-Stützen-Verbindungen bewertet. Die Verbindungssysteme bestanden aus verdichteten Platten, die in Nuten in den Trägern und Stützen eingelegt und mit Pressholzdübeln verbunden wurden, wie in Bild 6 dargestellt.

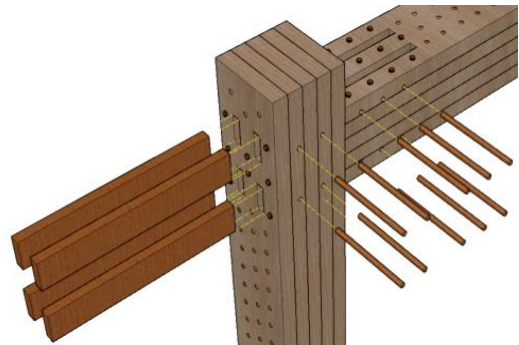


Abb. 6 – Klebstofffreie (AF), nicht-metallische Träger-Stütze-Verbindung [NUI Galway].

Zur Bestimmung der Tragfähigkeit der AF-Verbindung wurde ein kombinierter experimenteller und numerischer Modellierungsansatz verwendet. Eine Reihe von Verbindungskonfigurationen wurde untersucht, und die Ergebnisse ermöglichten es, die Leistung der Träger-Träger- und Träger-Stütze-Verbindungen zu optimieren. Bei Träger-Träger-Verbindungen betrug die mittlere Bruchlast, die bei AF-Holz-Verbindungen erreicht wurde, 80% der von vergleichbaren Stahl-Holz-Verbindungen erreichten Bruchlast. Die mittlere Drehsteifigkeit der Stahl-Holz-Verbindung ist um 19% höher als die von Stahl-Holz-Pressholzverbindungen. Für die AF-Träger-Stützen-Verbindungen wurde eine Reihe von Anschlusskonfigurationen experimentell untersucht und die Konstruktion mit Hilfe von Finite-Elemente-Methoden optimiert, um die optimale Anschlussgeometrie, Dübelanordnung, Dübelanzahl und Plattendicke zu ermitteln. Abb. 7 zeigt ein lokales Finite-Elemente-Modell einer AF-Träger-Stützen-Verbindung (Trägerquerschnitt aus Gründen der Übersichtlichkeit entfernt), bei der vier verdichtete Holzplatten und 10 verdichtete Holzdübel verwendet werden (sechs Dübel im Trägerquerschnitt und vier Dübel im Stützenquerschnitt).

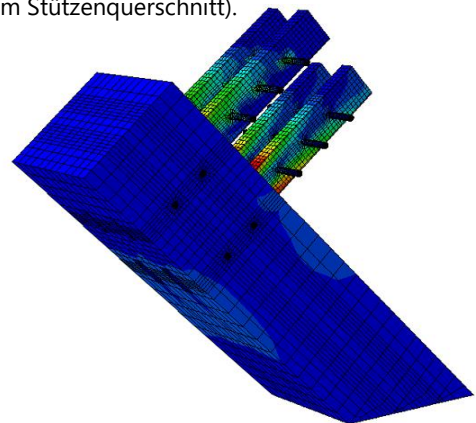


Abb. 7 – Numerisches Modell der Träger-Stützen-Verbindung [NUI Galway].

Abb. 8 zeigt Versuche an einem großflächigen Holzrahmen, der das optimierte klebstofffreie, nichtmetallische Verbindungsdesign nutzt.

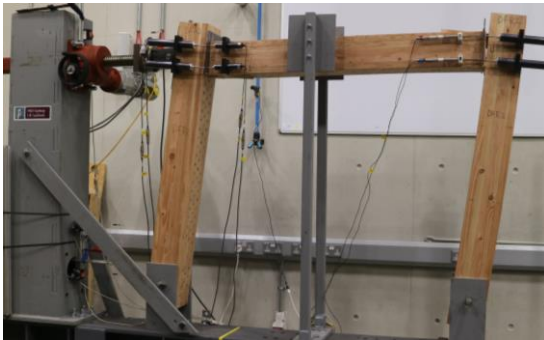


Abb. 8 - Versuch an klebstofffreiem, nichtmetallischem Holzrahmen [NUI Galway].

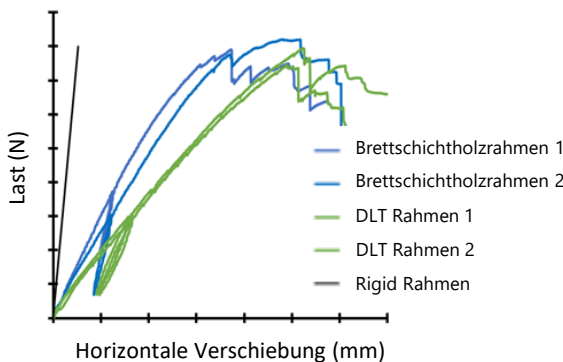


Abb. 9 - Vergleich von AF & Brettschichtholzrahmen mit AF-Verbindungen [NUI Galway]

Das halbstarre Verhalten der AF-Verbindungen ist in Abb. 9 dargestellt, die die Ergebnisse der Versuche an geklebten und mit AF-Verbindungen von AF-Elemente im Vergleich zu theoretischen Vorhersagen für einen starren Rahmen zeigt. Die Versagenslast für die getesteten Rahmen ist etwa gleich hoch. Der Steifigkeitsunterschied ist auf die geringere Steifigkeit der AF-Träger und -Säulen zurückzuführen.

Bei Versuchen an Kleinproben zeigten Verbindungen mit verdichteten Dübeln und gedübelten Elementen annähernd ähnliche Traglasten und Tragmomente wie Verbindungen von geklebten Teilen.

Die Forschung hat gezeigt, dass Pressholzverbinder eine brauchbare Alternative zu Stahl und Klebstoffen sind. Diese reinen Holzverbindungen sind nach dem Ende der Lebensdauer des Bauwerks zu 100% wiederverwertbar. Die Forschung hat gezeigt, dass AF-Verbindungen auch für die Verbindung von Massivholz und Brettschichtholz geeignet sind.

Strukturelles Entwurfswerkzeug

Größe, Anzahl und Anordnung der Dübel in, gedübelten Holzbalken sowie Decken und Scheiben haben einen wesentlichen Einfluss auf deren statische Leistung. Die Analyse solcher Komponenten ist komplex und erfordert in der Regel einen numerischen Modellierungsansatz, der die komplexe Geometrie nachbilden und auch das stark anisotrope Verhalten des Holzwerkstoffs berücksichtigen kann.

Dieser Ansatz ist zeitaufwendig und setzt voraus, dass der Benutzer über beträchtliche Modellierungskennnisse verfügt. Um dies zu überwinden, wurde im Rahmen des AFTB-Projekts am Luxemburger Institut für Wissenschaft und Technologie ein fortschrittliches Strukturdesign-Tool entwickelt.

Das Werkzeug verfügt über eine benutzerfreundliche Schnittstelle, die es dem Benutzer ermöglicht, auf einfache Weise den Aufbau und die Dübelanordnung für Brettschichtholzträger und gedübelte Brettschichtplatten festzulegen (Abb. 10). Das Werkzeug erzeugt dann die komplexe Modelleingabedatei für das Finite-Elemente-Paket ABAQUS, das ausgeführt werden kann, um numerische Ergebnisse zu erzeugen (Abb. 11). Die erzeugte Geometrie kann auch zur Verwendung in anderen Softwarepaketen exportiert werden. Dieses einfach zu bedienende Werkzeug kann verwendet werden, um die Geometrie schnell zu modifizieren, die numerischen Ergebnisse zu untersuchen und die Optimierung des Entwurfs zu ermöglichen.

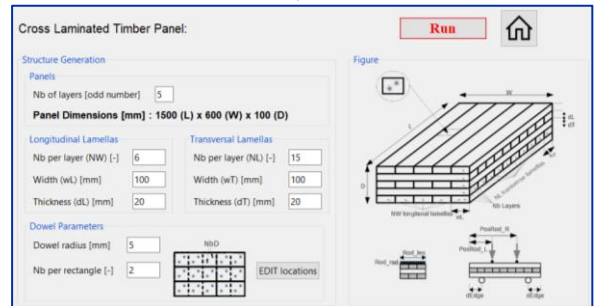
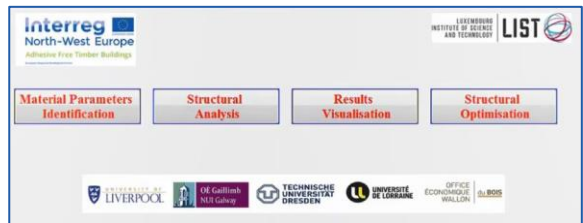


Abb. 10 - Benutzeroberfläche des Tragwerksplanungswerkzeugs, das zum Entwurf einer Brettspertholzplatte verwendet wird [Luxembourg IST].



Abb. 11 - Benutzerschnittstelle der numerischen Ergebnisse eines Doppelschubversuchs [Luxembourg IST].

Schwingungsverhalten

An der Universität Lothringen wurde mit experimentellen, numerischen und analytischen Ansätzen eine Untersuchung der Schwingungseigenschaften von klebstofffreien, gedübelten Holzbalken und -platten durchgeführt. Abb. 12 zeigt eine AF-eine gedübelte Platte, die einer Schwingungsprüfung unterzogen wurde, sowie die Ergebnisse einer numerischen Simulation

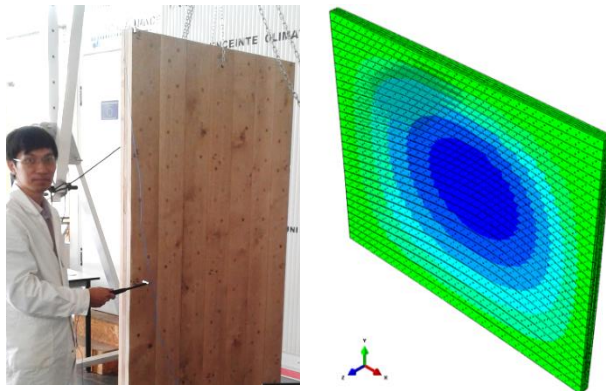


Abb. 12 - Experimentelle Prüfung und numerische Simulation der Schwingungseigenschaften der AF-Platte [U Lorraine].

Diese Studie hat gezeigt, dass sowohl AF-gedübelte Balken als auch Platten innerhalb der Schwingungsgrenzwerte des Eurocode 5 gut funktionieren. Tatsächlich wurde gezeigt, dass die Schwingungseigenschaften der gedübelten Balken mit verleimten Brettschichthölzern vergleichbar sind.

Brandverhalten

Zum Vergleich des Brandverhaltens von verdichtetem und normalem Holz wurden experimentelle Tests und numerische Modelle verwendet. Aufgrund des Mangels an inneren Hohlräumen zeigte das Pressholz ein deutlich besseres Brandverhalten mit geringeren Abbrandraten, längeren Entzündungszeiten und besserer Flammhemmung.

Es konnte auch gezeigt werden, dass verdichtete Dübelverbindungen bei einem Brandversuch an einem belasteten Rahmen Stahl-Dübelverbindungen übertreffen (Abb. 13). In Abb. 14 ist zu sehen, dass die Zeit bis zum Versagen der Stahldübeln aufgrund der größeren Wärmeleitung ins Innere der Verbindung und des schnellen Verlusts der mechanischen Eigenschaften des Stahldübeln um 10 Minuten kürzer war.



Abb. 13 - An AF-Verbindung durchgeführter Brandversuch [U Lorraine].

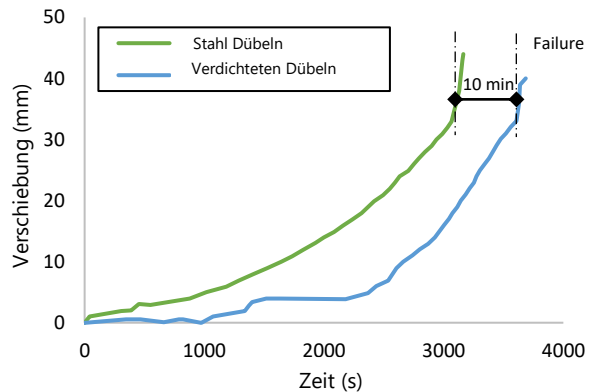


Abb. 14 - Ergebnisse des Brandversuchs an einer L-förmigen Struktur [U Lorraine].

Life-cycle Assessment (LCA)

Die Verwendung von Stahlverbindern und synthetischen Klebstoffen in der Bauindustrie ist oft mit einer hohen grauen Energie verbunden und wirkt sich negativ auf die Umweltleistung aus. Zur Charakterisierung der Umweltvorteile von AF EWPn und Pressholzverbindungen, die zu 100% wiederverwendbar und nach dem Ende ihrer Lebensdauer wiederverwertbar sind, wurde eine Ökobilanz (LCIA) durchgeführt. Die LCIA-Daten wurden für drei verschiedene Produkte entwickelt, nämlich Pressholzdübel, Pressholzdübel-Deckenplatten und Pressholz-Dübelbalken. Die Systemgrenze der Analyse für die verdichteten Dübel von der Wiege bis zum Werkstor (A1-A3) und die Systemgrenze für die gedübelten Brettschichtholzplatten und -balken ist von der Wiege bis zum Werkstor (A1-A3) mit Optionen zur Berücksichtigung von End-of-Life-Effekten (D) gemäß ISO 14040 und ISO 14044.

Die Analyse hat die Umweltauswirkungen von AF EWPn charakterisiert und gezeigt, dass unter Berücksichtigung der End-of-Life-Effekte negative Nettoauswirkungen in Kategorien wie dem globalen Erwärmungspotenzial erzielt werden können. Es hat sich gezeigt, dass die Produktion von Pressholzdübeln durch den Energieaufwand für die thermische Verdichtung signifikant beeinflusst wird. In einer Sensitivitätsanalyse wurde gezeigt, dass eine 50%ige Reduzierung des Energieverbrauchs der Presse zu einer 36%igen Reduzierung des globalen Erwärmungspotenzials und des Ozonschichtabbaupotenzials im Zusammenhang mit der Dübelherstellung führen kann. Es wurde auch gezeigt, dass es einen signifikanten Einfluss auf die Umweltauswirkungen der AF EWPn hat.

Eine vergleichende Studie, in der die Umweltauswirkungen (A1-A3, D) im Zusammenhang mit der Herstellung des Ness-Garden-Demonstrators unter Verwendung von AF-Holzelementen und einer CLT-Struktur, die für die gleichen Lasten ausgelegt ist, verglichen wurden, zeigte, dass das globale Erwärmungspotenzial (GWP) beider Strukturen von der Wiege bis zum Tor ähnlich ist, wenn die Effizienz der Dübelproduktion optimiert wird. Wenn die End-of-Life-Phase mit einbezogen wird, wird das mit der AF-Struktur verbundene GWP deutlich gesenkt.

Demonstrator-Strukturen

Ein Schlüsselergebnis des AFTB-Projekts ist die Bereitstellung von drei Demonstratorstrukturen. Eine 12 m x 8,6 m und 7,6 m hohe, lagerhausähnliche Struktur an der Universität Lothringen, Épinal, Frankreich, umfasste gedübelte Eichensäulen und Dachbinder aus Pressholz (Abb. 15). Die zweite ist eine 35 m2 große Feldstation im Botanischen Garten von Ness, Liverpool, Großbritannien (Abb. 16). Dieses Gebäude zeigt dübelverleimte Balken, Stützen, Paneele und Verbindungen aus Pressholz. Der letzte Demonstrator ist die Installation BenDit an der Universität Dresden, Deutschland, für die dampfgebogenes Holz in einen Raumstruktur verwendet wird (Abb. 17).

Diese Demonstratorstrukturen werden den Interessengruppen und der Öffentlichkeit die Möglichkeit bieten, eine klebstofffreie Struktur zu besichtigen und die Technologie im Einsatz zu sehen.



Abb. 17 – Installation BenDit in Dresden [TU Dresden].



Abb. 15 - Dachkonstruktion aus Fichtendübeln in Épinal [U Lorraine].



Abb. 16 - Forschungsbüro im Botanischen Garten von Ness [U Liverpool].

Schlussfolgerung

Diese Zusammenfassung der Ergebnisse gibt einen kurzen Überblick über die Themen und Ergebnisse der Forschungsaktivitäten des AFTB-Projekts. Ziel des AFTB-Projekts war die Untersuchung des Potenzials der Verwendung von modifiziertem Holz zur Herstellung von Bauholzprodukten ohne die Verwendung von Klebstoffen oder metallischen Befestigungsmitteln. Durch experimentelle, statistische und numerische Methoden hat das AFTB-Projekt das Verhalten der AF EWPs erfolgreich charakterisiert und drei Demonstratorstrukturen aufgebaut, die zur Information von Interessengruppen wie Architekten, Ingenieuren und Baufachleuten sowie der breiten Öffentlichkeit dienen, die an der Nutzung dieser Technologie für umweltfreundliche und nachhaltige Holzstrukturen interessiert sind.

Für weitere Informationen:

Weitere Informationen zu verschiedenen Aspekten des Projekts sind in einer umfassenden Reihe von Technischen Anmerkungen (in englischer Sprache) und anderen Berichten enthalten, die von der Projekt-Website heruntergeladen werden können

<http://www.nweurope.eu/AFTB>

- Technische Anmerkung 1 - Marktstudie
- Technische Anmerkung 2 - Verdichten von Holz
- Technische Anmerkung 3 - Eigenschaften von verdichtetem Holz
- Technische Anmerkung 4 - gedübelte laminierte Bauelemente mit Pressholz
- Technische Anmerkung 5 - Schwingungen
- Technische Anmerkung 6 - Brandverhalten
- Technische Anmerkung 7 - klebstofffreie und nichtmetallische Verbindungen
- Technische Anmerkung 8 - numerische Modellierung
- Technische Anmerkung 9 - AFTB Demonstrator-Strukturen
- Technische Anmerkung 10 - CE-Kennzeichen

A key aim of the project is to engage with businesses, regulators and other interested parties. Adhesive-free timber building technology could be of interest to your business. Please get in touch via the e-mail addresses below:

For more information please visit the Adhesive Free Timber Buildings (AFTB) project website <http://www.nweurope.eu/AFTB> or use the contacts.



Project manager
University of Liverpool
Dan Bradley
Tel: +44 151 795 7363
dbradley@liverpool.ac.uk

Finance manager
University of Liverpool
Caroline Chandler
Tel: +44 151 795 7424
chandler@liverpool.ac.uk

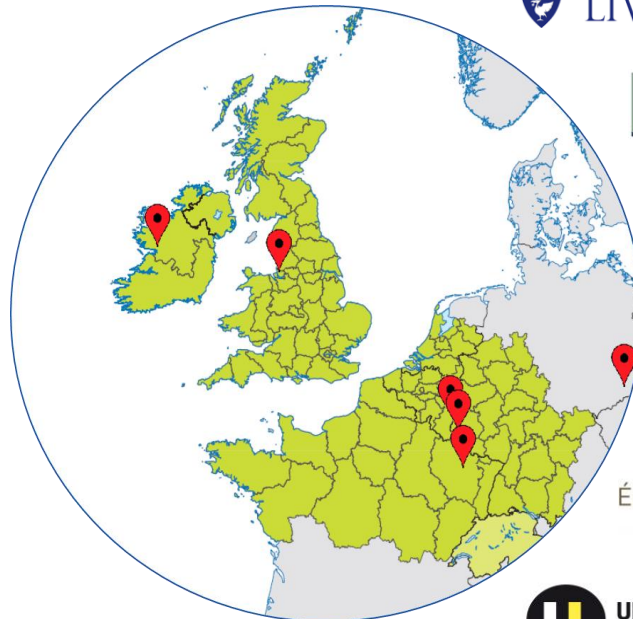
Communications manager
National University of Ireland Galway, Ireland
Conan O'Ceallaigh
School of Engineering
Tel: +353 91 49 2210
conan.oceallaigh@nuigalway.ie

Partners

Lead partner
University of Liverpool
Zhongwei Guan
765 Brownlow Hill
Liverpool
L69 7ZX
United Kingdom
Tel: +44 151 794 520
zguan@liverpool.ac.uk

National University of Ireland Galway, Ireland
Annette Harte
School of Engineering
Tel: +353 91 492732
annette.harte@nuigalway.ie

Technical University of Dresden, Germany
Peer Haller
Institut für Stahl- und Holzbau
Tel: +49 351 463 35575
peer.haller@tu-dresden.de



Luxembourg Institute of Science and Technology
Salim Belouettar
Design and Durability Research Group
Tel: +352 42 59 91 45 30
salim.belouettar@list.lu

Office Economique Wallon du Bois
François Deneufbourg
Tel: +32 84 46 03 45
f.deneufbourg@oewb.be



University of Lorraine, France
Marc Oudjene
LERMAB
Tel: +33 372 74 96 37
marc.oudjene@univ-lorraine.fr