

Decken- und Rahmensysteme aus Laubholz – ETH House of Natural Resources

Hardwood floor and frame systems –
ETH House of Natural Resources

Planchers et éléments d'ossature en bois feuillu –
ETH House of Natural Resources

Prof. Dr. Andrea Frangi
Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich
CH-Zürich



Decken- und Rahmensysteme aus Laubholz – ETH House of Natural Resources

1. Einleitung

Dank naturnahem Waldbau wächst in der Schweiz mehr Mischwald mit Laubholz, insbesondere mit Buche. Buchenholz verfügt über sehr gute mechanische Materialeigenschaften, wird jedoch bisher primär als Energieholz genutzt. Es ist sinnvoll Buchenholz hochwertig zu nutzen und vermehrt mit Buchenholz zu bauen. Dazu ist es jedoch notwendig, dass innovative Ideen und neuartige Anwendungen für Buchenholz entwickelt und umgesetzt werden. Der Umzug der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) auf den ETH Campus Science City am Standort Höggerberg bietet die Chance zur Erforschung, Entwicklung, Umsetzung, Prüfung und Demonstration von Innovationen im Bereich „Nachhaltiges Bauen“ mit der nachwachsenden Ressource Holz. Neben dem Neubau HIA kann das ETH House of Natural Resources (HoNR), ein viergeschossiges Pilotheaus aus Laubholz erstellt werden (vgl. Abbildung 1). Das Pilotheaus wird als zukunftsweisendes grossmassstäbliches und transdisziplinäres Forschungs-, Lehr- und Demonstrationsobjekt mit innovativen Bauteilen aus Laubholz wirken, das zudem durch die VAW als Bürogebäude genutzt werden kann. Dank der Nutzung durch die Forscher der VAW liegen die Forschungsergebnisse nicht nur in messbaren Grössen (Verformungen, Schwingungen, Spannungen...) vor, sondern auch in subjektiven Wahrnehmungen der Nutzer (Wohlbefinden, Behaglichkeit, Empfinden von Schwingungen, Vibrationen...), ein Mehrwert, der mit reinen Laborversuchen nicht möglich wäre. Das ETH House of Natural Resources liegt in unmittelbarer Nähe der Lehr- und Forschungsgebäude der Departemente Bau, Umwelt und Geomatik (D-BAUG) und Architektur (D-ARCH). Nach dem Bau des Pilotheaus ist es in den folgenden Jahren vorgesehen, weitere aktuelle Fragen des nachhaltigen Bauens und der Konstruktion 1:1 zu untersuchen und die Ergebnisse für Besucher und Studierenden in der Lehre unmittelbar sichtbar und „begreifbar“ zu machen.



Abbildung 1: House of Natural Resources an der ETH Höggerberg (mml Architekten, Zürich)

2. Vorgespannte Holzrahmenkonstruktion mit Laubholz

Reine Skelettragwerke in Holzbauweise werden noch selten realisiert. Zur Aussteifung werden meist Wandscheiben verwendet, die nach einem Erdbeben bleibende Verformungen aufweisen. Skelettragwerke in Holzbauweise mit reiner Rahmentragwirkung ohne aussteifende Wandscheiben werden heute praktisch nicht realisiert mangels einfacher und wirtschaftlicher biegesteifer Knotenverbindungen wie sie mit Vorspannung möglich wären. Im Jahr 2004 wurde an der University of Canterbury, New Zealand, ein Forschungsprogramm gestartet mit dem Ziel, die duktile Rahmenverbindung des vorgespannten Beton-Elementbaus in den Holzbau zu übertragen. Das entwickelte vorgespannte Konstruktionssystem genannt Pres-Lam weist gute Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften auf und erlaubt in Kombination mit Energiedissipatoren vor allem ein

sehr gutes Tragverhalten im Erdbebenfall [3,4]. Im Jahre 2010 wurde am Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich in Zusammenarbeit mit der Firma Häring & Co. AG im Rahmen eines zurzeit laufenden KTI-Projektes der Prototyp einer neuartigen vorgespannten Holzrahmenkonstruktion entwickelt (vgl. Abbildung 2 links). Der Träger-Stütze-Knotenanschluss aus Brettschichtholz (BSH) mit einer zentrischen Vorspannung des Trägers überzeugt durch den hohen Vorfertigungsgrad und dem zeitsparendem Zusammenfügen auf der Baustelle dank des einfachen Aufbaus des Systems. Er zeigt das grosse Potential von vorgespannten Holzrahmenkonstruktionen insbesondere für mehrgeschossige Holzbauten. Der Knotenanschluss aus Brettschichtholz der durchlaufenden Stütze wird lokal mit Laubholz (Esche) verstärkt, um die mechanischen Eigenschaften (Querdrukfestigkeit) zu verbessern. Durch das Laubholz kann die Anschlusssteifigkeit erhöht werden.

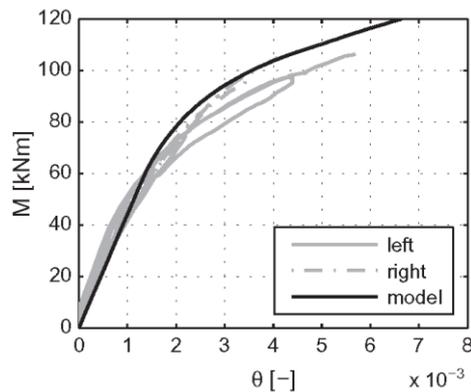


Abbildung 2: Vorgespannter Träger-Stütze-Knotenanschluss aus BSH mit lokaler Verstärkung aus Laubholz (links) und gemessenes und berechnetes Momenten-Rotationsdiagramm vom vorgespannten Knotenanschluss (rechts)

Das Trag- und Verformungsverhalten des entwickelten vorgespannten Knotens wurde mit umfassenden experimentellen Untersuchungen analysiert [7,8]. Die Versuchsergebnisse bestätigen die erwartete hohe Biegesteifigkeit des vorgespannten Knotens und zeigen ab dem Punkt der Dekompression ein ausgeprägtes nichtlineares Momenten-Verdrehungsverhalten (vgl. Abbildung 2 rechts). Es konnte gezeigt werden, dass selbst bei grossen Verdrehungen die Holzbauteile elastisch bleiben und durch die Vorspannung das Tragwerk in seine ursprüngliche Lage zurückkehrt (self-centering). Die Verbindung weist somit eine hohe Biegesteifigkeit sowie grosse Rotationsduktilität ohne plastische Verformungen auf. Mit dem Einsatz von Dissipatoren kann zudem ein äusserst günstiges Erdbebenverhalten ohne bleibende Schäden am Rahmentragwerk gewährleistet werden.



Abbildung 3: Pushover-Versuche an einem vorgespannten BSH Träger mit 3 Feldern auf dem Ausspannboden der HIF Bauhalle an der ETH Zürich Höggerberg

Die Ausbildung der Tragstruktur des ETH HoNR für die oberen zwei Geschosse erfolgt mit der entwickelten vorgespannten biegesteifen Holzrahmenkonstruktion. Die vorgespannte Holzrahmenkonstruktion übernimmt die horizontalen Kräfte in beiden Hauptrichtungen des Gebäudes vollständig. Keine aussteifenden Tragwände sind vorgesehen.

3. Holz-Beton-Verbunddecke aus Buche

Dank dem Zusammenwirken von Holz und Beton weisen Holz-Beton-Verbunddecken viele hervorragende Eigenschaften auf [1,5,9]. Ihre Tragfähigkeit und Steifigkeit liegt im Vergleich zu reinen Holzdecken deutlich höher. Zudem verfügen sie über einen hohen Feuerwiderstand und gute Schallschutzeigenschaften. Holz-Beton-Verbunddecken werden als massive Decken im mehrgeschossigen Holzbau und als effiziente Sanierungsmethode für bestehende Holzbalkendecken objekt-spezifisch eingesetzt. Im Vergleich zu herkömmlichen Stahlbetonflachdecken weisen Holz-Beton-Verbunddecken ökologische (z.B. geringere graue Energie und Treibhausgasemissionen) und statische Vorteile (z.B. Reduktion des Eigengewichtes) auf; sie sind jedoch nicht immer wirtschaftlich konkurrenzfähig. Im Rahmen des laufenden durch den Schweizerischen Nationalfonds finanzierten Forschungsprojektes zum Thema Tragwerke aus Buchenholz wurde am Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich der Prototyp einer neuartigen Holz-Beton-Verbunddecke aus Buchenholz entwickelt. Die Verbunddecke besteht aus 40 bis 60 mm dicken Furnierschichtholzplatten aus Buche (Baubuche) und einer 120 bis 160mm dicken Betonschicht. Die Buchenplatten dienen zunächst als Schalung, dann als Tragelement im Verbund mit dem Beton und schliesslich bilden sie eine behagliche Deckenuntersicht. Zudem erhöht sich die Wirtschaftlichkeit der neuen Verbunddecke gegenüber herkömmlichen Holz-Beton-Verbunddecken mit Brettstapel bzw. Stahlbetonflachdecken dank der hohen mechanischen Materialeigenschaften der Buchenplatten und der damit möglichen Reduktion der Dicke des Holzquerschnittes. Als Verbund zwischen Beton und Holz können Kerben ins Holz gefräst werden, so dass eine mechanische Verzahnung in Form von Betonnocken entsteht. Die Einleitung der Schubkräfte zwischen Beton und Holz erfolgt somit punktuell. Um eine kontinuierliche Verbundwirkung zwischen Beton und Holz zu gewährleisten, wurden auch innovative wellenförmige Vertiefungen in den Buchenplatten untersucht.

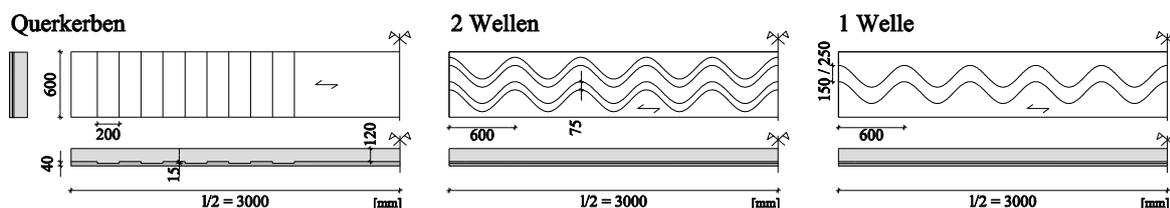


Abbildung 4: Geometrie der Versuchskörper für die Biegeversuche mit Holz-Beton-Verbundelementen aus Buche

Für die Analyse des Tragverhaltens der Holz-Beton-Verbunddecke aus Buchenholz wurde eine erste Serie von 4-Punkt Biegeversuchen in der Bauhalle der ETH Zürich durchgeführt [2]. Die Versuchskörper bestanden aus 40mm dicken Furnierschichtholzplatten mit drei Querlagen aus Buche und einer 120mm dicken Betonplatte, die mit einer Netzbewehrung zur Vermeidung von Betonschwinden bewehrt wurde. Als Verbundwirkung wurden vier unterschiedliche Varianten einer formschlüssigen mechanischen Verzahnung zwischen Beton und Holz untersucht, welche durch ins Holz 15mm tief gefräste Kerben oder wellenförmige Vertiefungen ausgebildet wurde (vgl. Abbildung 4). Die Versuchskörper mit einer Breite von 0.6m wurden als einfacher Balken (Spannweite von 6.0m) aufgelagert und ca. in den Drittelpunkten belastet. Pro Variante wurden zwei Biegeversuche durchgeführt. Alle Versuchskörper wiesen eine hohe Steifigkeit auf. Die Verbundwirkung zwischen Beton und Holz erwies sich als quasi starr, wobei die grösste Verbundsteifigkeit bei den Versuchskörpern mit Kerben festgestellt wurde. Es wurden mehrere unterschiedliche Versagensarten beobachtet. Bei den Versuchskörpern mit Kerben erfolgte bei einem Versuch ein Biegezugbruch in der Buchenplatte (vgl. Abbildung 5), bei einem anderen Versuch ein Schubversagen in der Betonplatte. Bei den Versuchskörpern mit wellenförmigen Vertiefungen wurde mit zunehmender Belastung ein Abheben bzw. Ablösen zwischen der Betonplatte und der Buchenplatte beobachtet, mit der Folge, dass sich die Schubübertragung im Auflagerbereich konzentrierte und dies zum Abscheren des Vorholzes führte (vgl. Abbildung 5). Zwei Versuchskörper wurden gegen Abheben bzw. Ablösen zwischen der Betonplatte und der Buchenplatte verstärkt und das Tragverhalten der Holz-Beton-Verbundelemente konnte damit deutlich verbessert werden. Zudem wurden

auch die wirkenden Abhebekräfte gemessen. Die höchste Bruchlast wurde beim Versuchskörper mit den Kerben gemessen, welcher infolge eines Biegezugbruchs versagte. Bei den anderen Versuchskörpern lagen die Bruchlasten ca. 20% tiefer.

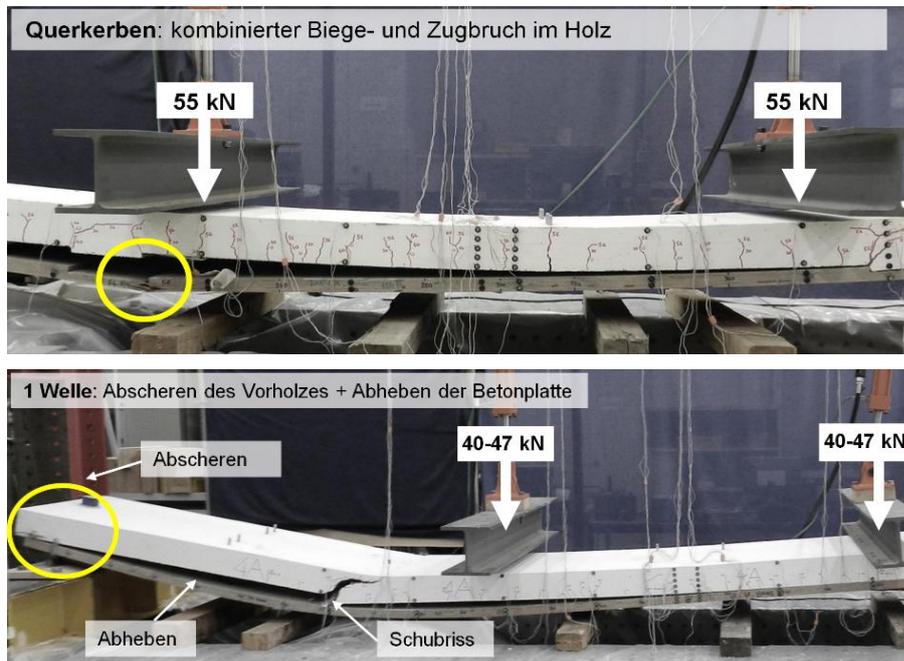


Abbildung 5: Biegeversuche an Holz-Beton-Verbundelementen aus Buche mit beobachteten Versagenarten und gemessenen Bruchlasten

Das Tragverhalten der Schubverbindung mit Kerben wurde mit einer Serie von Push-out-Versuchen experimentell untersucht. Die geprüften Kerben zeigten hohe Traglasten und Steifigkeiten, die Verbundwirkung kann als starr angenommen werden. Zudem bei den Versuchskörpern mit Stahlfaserbeton und Versuchskörpern mit einer reduzierten Breite der Kerbe wurde ein duktiles Tragverhalten im Bruchzustand beobachtet, das sich auf das Druckversagen des Vorholzes parallel zur Faserrichtung zurückzuführen lässt (vgl. Abbildung 6).

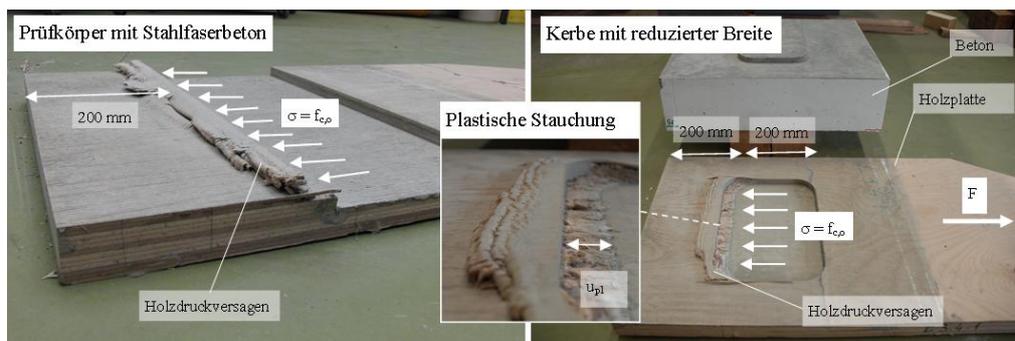


Abbildung 6: Versuchskörper mit duktilem Druckversagen des Vorholzes parallel zur Faserrichtung

Die durchgeführten Untersuchungen haben das grosse Potential und günstige Tragverhalten der Holz-Beton-Verbunddecke aus Buchenholz gezeigt. Mit der Anwendung der Buchenplatten als Schalung und Bewehrung werden sehr hohe Steifigkeiten und Tragfähigkeiten erreicht und mit der Optimierung der Geometrie der Kerbe kann zudem ein duktiles Bruchverhalten der Schubverbindungen erreicht werden.

4. Flächentragwerk aus Laubholz

Typische Decken im Holzbau tragen in der Regel die vertikalen Lasten nur in einer Richtung ab. Abbildung 7 zeigt die am Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich in Zusammenarbeit mit dem Holzbau Ingenieurbüro Josef Kolb AG entwickelte zweiachsig lastabtragende Holzdecke aus Laubholz. Die Decke besteht aus einer 5-schichtigen Brettsperrholzplatte, welche über Pfosten und die schubsteifen Auflagerbereiche mit Buchenlamellen verbunden ist. Die Fugen sind verklebt.

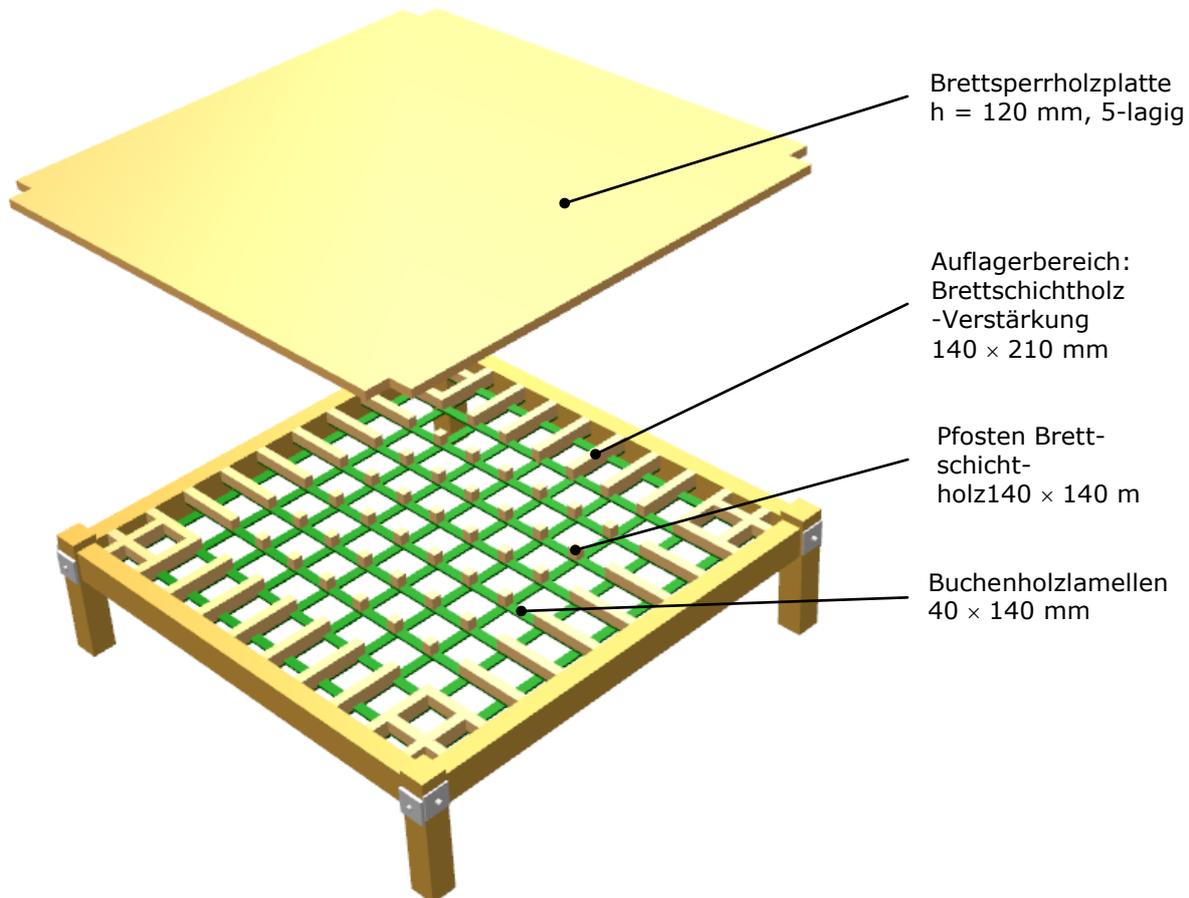


Abbildung 7: Aufbau der entwickelten zweiachsig lastabtragenden Holzdecke aus Laubholz

Für die Analyse des Tragverhaltens wurden Versuche an einem kompletten Decken-Element (6.5x6.5m) durchgeführt (vgl. Abbildung 7). Um den Einfluss der Buchenholzlamellen auf das Gesamtsystem zu beobachten, wurden bereits vor der Montage der Lamellen (an der Brettsperrholzdecke alleine) Versuche durchgeführt. So konnte gezeigt werden, dass die Buchenholzlamellen eine Erhöhung der Steifigkeit um den Faktor 3.8 bewirken. Mit dynamischen Untersuchungen konnte die Eigenfrequenz der Decke zu 11.1 Hz bestimmt werden, was für eine derart leichte Konstruktion ein sehr hoher Wert darstellt. Bei den Hauptversuchen wurde die Decke mittels vier Hydraulik-Zylinder belastet (vgl. Abbildung 8). Die Durchbiegungen der Decke und des Rahmens wurden mit Weggebern gemessen. Zudem wurden die Verformungen der Lamellen aufgezeichnet. Damit konnte die Tragwirkung der Holzdecke analysiert werden. Es zeigte sich, dass die angestrebte zweiachsige Lastabtragung gut funktioniert. Die Hauptrichtung mit den untenliegenden Buchenholzlamellen trägt etwa 60 % der Lasten ab, die Nebenrichtung übernimmt 40 % der Lasten. Weiter konnte auch gezeigt werden, wie das statische System der Decke funktioniert. Bei einer gleichmässigen Belastung mit den vier Hydraulik-Zylindern trägt die Decke die Lasten wie ein unterspannter Träger. Bei einseitiger Belastung ist jedoch auch eine beträchtliche Vierendeel-Wirkung festzustellen. Die durchgeführten Untersuchungen zeigten das günstige Tragverhalten des Flächentragwerkes aus Laubholz und dass die für den Holzbau neuartig angestrebte zweiachsige Lastabtragung erreicht werden konnte.



Abbildung 8: Experimentelle Untersuchungen an einem kompletten Deckenelement (6.5x6.5m) der entwickelten zweiachsig lastabtragenden Holzdecke aus Laubholz

5. ETH House of Natural Resources

Das viergeschossige Bürogebäude wird in Massivbau (Geschosse A und B) und in Holzbauweise (Geschosse C und D) erstellt. Das Geschoss A wird als Archiv- und Technikraum, die anderen Geschosse als Büroräume genutzt. Die Geschosse A und B werden in Stahlbeton ausgeführt, die Tragstruktur für die Geschosse C und D in Holzskelettbauweise (Stützen-Träger-Rahmenkonstruktion), die Geschosdecke C als Holzbetonverbunddecke. Für die vertikale Erschliessung wird eine Treppenanlage in Mischbauweise erstellt. Die Abmessungen des Bürogebäudes betragen etwa 21 m x 21 m. Eine bestehende Rampe schafft den Zugang für Lastwagen von der Schafmattstrasse her. Das Bürogebäude weist zudem auf dem Geschoss C eine Brücke als Verbindung zum Neubau HIA auf (vgl. Abbildung 9).

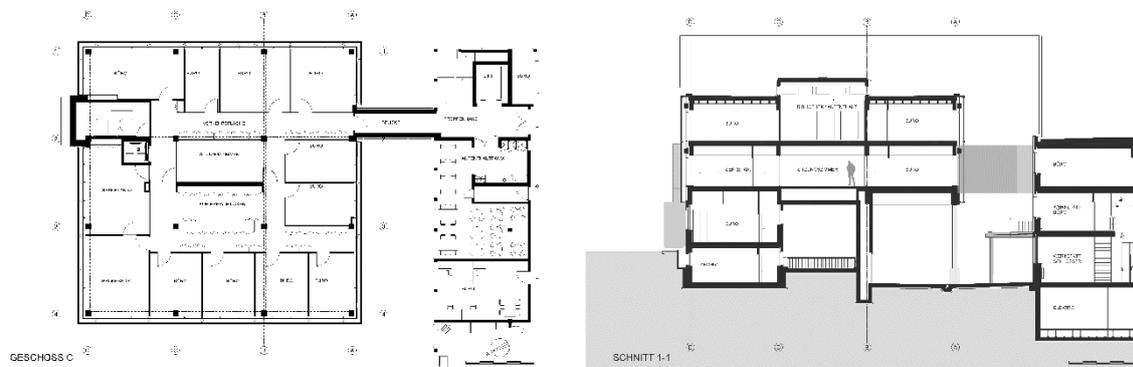


Abbildung 9: Grundriss C und Schnitt durch das ETH House of Natural Resources (mml Architekten)

Die Tragkonstruktion besteht aus einer in beiden Hauptrichtungen vorgespannten Holzrahmenkonstruktion (vgl. Abbildung 10 links). Träger sowie Stützen werden aus Brett-schichtholz (BSH) gefertigt. Bei den Stützen wird Esche verwendet, bei den Trägern Fichte mit vier unteren Lamellen aus Esche. Die Spannweite zwischen den Stützen beträgt in beiden Richtungen 6.5 m. Die Abmessungen der BSH-Bauteile betragen:

- BSH-Träger aus Fichte und Esche: 720 x 280 mm
- BSH-Stützen aus Esche: 380 x 380 mm

Die Holz-Beton Verbunddecke besteht aus 6.48 m langen Buchenurnierschichtholzplatten (Baubuche) mit 10 Längslagen und 3 Querlagen und Beton C 50/60. Die Dicke der Buchenplatten beträgt 40 mm und die Betondicke 160 mm. Der Verbund zwischen Holz und Beton erfolgt mit 15 mm tiefen rechteckigen Kerben in der Holzplatte (vgl. Abbildung 10 rechts). Die Betonplatte wird mit Betonstahl B500B unten und oben in beiden Richtungen bewehrt. Die Bewehrungsüberdeckung beträgt 15 mm. Die Bewehrung dient dem Nachweis des Feuerwiderstandes R60.

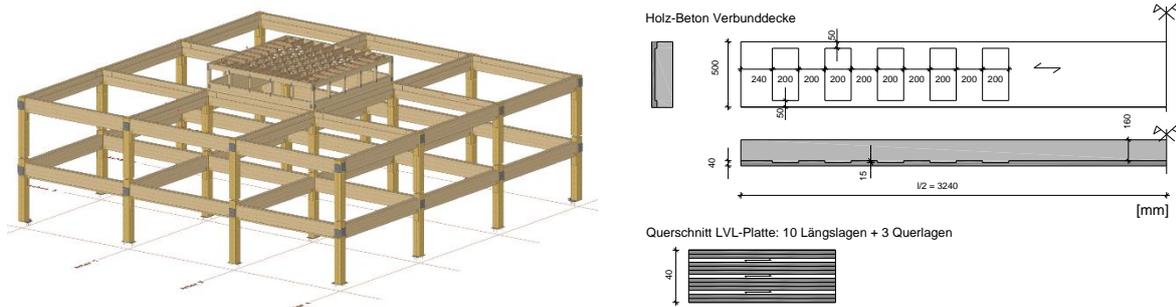


Abbildung 10: Visualisierung der vorgespannten Holzrahmenkonstruktion des ETH House of Natural Resources (links, Häring & Co. AG) und Geometrie der Holz-Beton-Verbunddecke (rechts)

Für das Dach werden vorgefertigte Hohlkastenelemente verwendet. Die obere Beplankung besteht aus einer 70mm dicken vorgefertigten Betonplatte, die mit den Rippen aus Buchenurnierschichtholz (BauBuche Träger) mit Schrauben (hb_rapid® System) befestigt wird. Die untere Beplankung besteht aus 40mm dicken Buchenplatten (BauBuche Q-Platte). Im zentralen Feld des Daches wird die entwickelte zweiachsige lastabtragende Holzdecke verwendet, wobei alle Bauteile aus Buche erstellt wurden. Die obere Platte besteht aus 5-schichtigen 120mm dicken Brettsperrholzplatten aus Buche und die anderen Bauteile (Pfosten, untere Lamellen) aus Buchenurnierschichtholz.

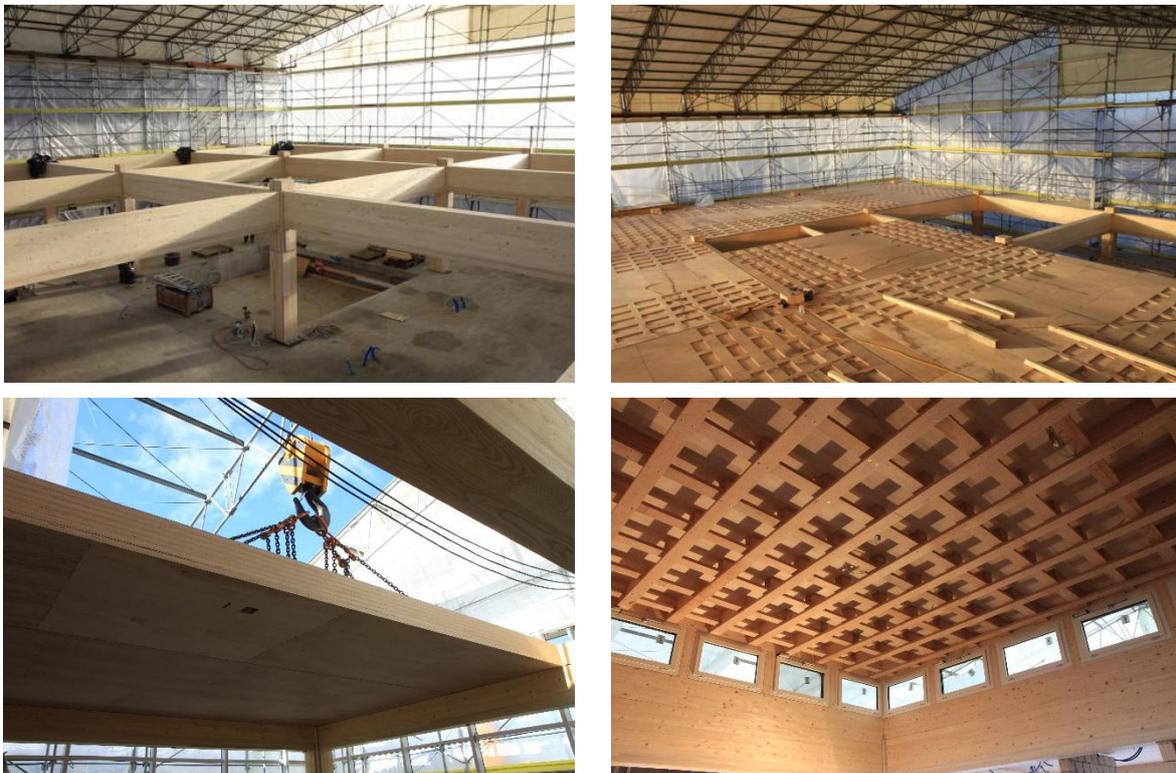


Abbildung 11: ETH House of Natural Resources im Bau: vorgespannter Holzrahmen (oben links); Buchenplatten als Schalung und Bewehrung für die Holz-Beton-Verbunddecke (oben rechts); Montage der vorgefertigten Dach-Hohlkastenelemente (unten links); Flächentragwerk aus Buchenholz im zentralen Feld des Daches (unten rechts)

Im ETH House of Natural Resources wird ein dichtes Sensornetzwerk installiert, um das Tragverhalten der Struktur während des Bauvorgangs und der Nutzung des Gebäudes zu erfassen [6]. Insbesondere werden 16 Kraftmessdosen installiert, welche die Vorspannkraft in jedem Spannkabel überwachen. Zudem werden zwei unterschiedliche optische Dehnungsmesssysteme eingebaut, welche die Dehnungsverteilung im Holzrahmen langfristig aufzeichnen. Die absoluten Verformungen des gesamten Systems werden stündlich mit einem Tachymeter aufgezeichnet. Die Feuchtigkeit in der Holzkonstruktion wird ebenfalls in regelmäßigen Zeitabständen aufgezeichnet. Das umfassende Überwachungssystem dient dazu, das Tragverhalten des Gebäudes über einen Zeitraum von mehreren Jahren zu erfassen und somit, das Langzeitverhalten dieser innovativen Holzbaukonstruktion zu quantifizieren.

6. Zusammenfassung

Der Umzug der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) auf den ETH Campus Science City am Standort Höggerberg bietet die Chance zur Erforschung, Entwicklung, Umsetzung, Prüfung und Demonstration von Innovationen im Bereich „Nachhaltiges Bauen“ mit der nachwachsenden Ressource Holz. Neben dem Neubau HIA kann das ETH House of Natural Resources (HoNR), ein viergeschossiges Pilotheus aus Laubholz erstellt werden. Das Pilotheus wird als zukunftsweisendes grossmassstäbliches und transdisziplinäres Forschungs-, Lehr- und Demonstrationsobjekt mit innovativen Bauteilen aus Laubholz wirken, das zudem durch die VAW als Bürogebäude genutzt werden kann. Dank der Nutzung durch die Forscher der VAW liegen die Forschungsergebnisse nicht nur in messbaren Grössen (Verformungen, Schwingungen, Spannungen...) vor, sondern auch in subjektiven Wahrnehmungen der Nutzer (Wohlbefinden, Behaglichkeit, Empfinden von Schwingungen, Vibrationen...), ein Mehrwert, der mit reinen Laborversuchen nicht möglich wäre. Das ETH House of Natural Resources liegt in unmittelbarer Nähe der Lehr- und Forschungsgebäude der Departemente Bau, Umwelt und Geomatik (D-BAUG) und Architektur (D-ARCH). Nach dem Bau des Pilotheuses ist es in den folgenden Jahren vorgesehen, weitere aktuelle Fragen des nachhaltigen Bauens und der Konstruktion 1:1 zu untersuchen und die Ergebnisse für Besucher und Studierenden in der Lehre unmittelbar sichtbar und „begreifbar“ zu machen.

7. Literatur

- [1] Blass H.J., Schlager M., Connections for Timber-Concrete-Composite Structures, Proc., Int. Conference on Composite Construction – Conventional and Innovative, Innsbruck, Austria, 169–174, 1997.
- [2] Boccadoro L., Frangi A., Experimental analysis on the structural behaviour of timber-concrete composite slabs made of beech-laminated veneer lumber, Journal of Performance of Constructed Facilities (ASCE), Paper in press.
- [3] Buchanan A., Deam B., Fragiaco M., Pampanin S., Palermo A., Multi-storey prestressed timber buildings in New Zealand, Structural Engineering International 2008; 18: 166–173.
- [4] Buchanan A., Palermo A., Carradine D., Pampanin S., Post-Tensioned Timber Frame Buildings, The Structural Engineer 2011; 17: 24–30.
- [5] Ceccotti A., Timber-concrete composite structures, STEP 2, Timber Engineering, Centrum Hout, The Netherlands, E13/1–12, 1995.
- [6] Leyder C., Wanninger F., Frangi A., Chatzi E., On-site tests on innovative timber structures, Proceedings of 13th World Conference on Timber Engineering (WCTE), August 10–14, 2014, Quebec City, Canada.
- [7] Wanninger F., Frangi A., Fragiaco M., Long-term behaviour of post-tensioned timber connections, Journal of Structural Engineering (ASCE), Paper in press.
- [8] Wanninger F., Frangi A., Experimental and analytical analysis of a post-tensioned timber connection under gravity loads, Engineering Structures 2014; 70: 117–129.
- [9] Yeoh D., Fragiaco M., De Franceschi M., Heng Boon K., State of the Art on Timber-Concrete Composite Structures: Literature Review, Journal of Structural Engineering (ASCE) 2011; 137: 1085–1095.

Danksagung

Den verschiedenen Institutionen (Schweizerischer Nationalfonds SNF, Kommission für Technologie und Innovation KTI, Bundesamt für Umwelt BAFU, ETH Foundation, Climate-KIC) und den beteiligten Unternehmen (Häring & Co. AG, Pollmeier Massivholz GmbH, Stahlton AG und Fagus Jura AG) sei für die Unterstützung der Forschungsprojekte und des Baus des ETH House of Natural Resources gedankt.