

Skelett-/Rahmen- und Brettsperrholzbauweise im direkten Vergleich

Pirmin Jung
Pirmin Jung Ingenieure AG
Rain, Schweiz



Skelett-/Rahmen- und Brettsperrholzbauweise im direkten Vergleich

1. Einleitung

Vor 36 Jahren wurde der IBM Personal Computer am Markt eingeführt und war der Ursprung für die dritte industrielle Revolution. IBM wählte als Betriebssystem MS-DOS von Microsoft. Drei Jahre später hat Apple seinen Macintosh gelauncht. Im Unterschied zum PC von IBM funktionierte der Macintosh mit dem eigenen Betriebssystem. Damit war der Kampf der Computergiganten eröffnet – zwischen Microsoft und Apple. Die Konkurrenz hat die Innovation und die Vermarktung vorangetrieben, die Welt wurde grundlegend verändert.



Abbildung 1: Mit dem 1981 eingeführten IBM-PC, der mit dem Betriebssystem MS-DOS funktionierte und mit dem 1984 eingeführten Macintosh von Apple wurde die dritte industrielle Revolution gestartet.

Wie bei den Computern werden heute mehrgeschossige Holzbauten mit zwei unterschiedlichen Wandsystemen realisiert: Mit der Skelett/Rahmenbauweise auf der einen – und mit der Brettsperrholzbauweise auf der anderen Seite. Beide Wandsysteme können mit den unterschiedlichsten Deckensystemen kombiniert werden: mit Massivholzdecken, mit Holzbetonverbunddecken aller Art, mit Hohlkasten- und Rippendecken und aber auch mit vorgefertigten Betonelementdecken oder mit vor Ort gegossenen Betondecken.

2. Skelett/Rahmenbauweise

Als in der Schweiz 1999 das erste viergeschossige Genossenschaftsgebäude der Allgemeinen Wohnbaugenossenschaft in Zug in Holzbauweise geplant werden durfte, zeigten sich bei der Holzrahmenbauweise, wie sie aus Amerika bekannt war und in Europa für den Einfamilienhausbau immer mehr Fuss fasste, Schwachstellen:

- Das Querholz der Schwellen- und Kopfhölzer sowie der Geschosdecken hätte unter den Einwirkungen zu grossen Verformungen und in Kombination mit den steifen, betonierte Treppenhaukernen zu absehbaren Bauschäden geführt.
- Die Lastausbreitung in den Aussenwänden erfolgte neben den Fenstern sehr konzentriert, in den Flächen ergaben sich aufgrund der durchlaufenden Kopfhölzer kaum Normalkraftbeanspruchungen.
- Die Kopfhölzer ergaben über den Fenstern, in Kombination mit den gewünschten Rafflamellenstoren, zu hohe Sturzelemente.

Die Stärke der Holzrahmenbauweise wurden mit den Stärken der Skelettbauweise kombiniert. So wurde für dieses Projekt die Skelett-/Rahmenbauweise entwickelt und zum ersten Mal umgesetzt. Dieses System ist inzwischen die Standardkonstruktion für Mehrfamilienhäuser in der Schweiz.

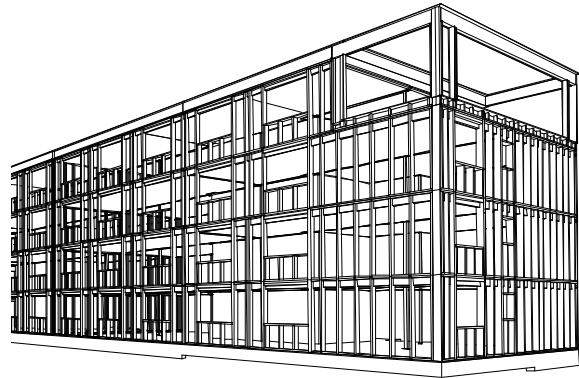


Abbildung 2: Für den 4-geschossigen Genossenschaftsbau AWZ in Zug (Schweiz) wurde 1999 die Skelett/Rahmenbauweise entwickelt, um die Schwachstellen der Rahmenbauweise für den mehrgeschossigen Holzbau zu eliminieren.

Das System baut auf einem Skelett aus primären Stützen und dem Kerto-Kopfholz auf. Die Stützen werden dort angeordnet, wo sie architektonisch möglich sind – beidseits der Fenster, an den Wandenden und vereinzelt in den geschlossenen Wandflächen. Der L-förmige Kopfholzträger läuft als Durchlaufträger über das gesamte Wandelement durch, er wird in Ausschnitten der Stützen eingelegt. Bei der Detailausbildung der Stützen wird darauf geachtet, dass kein Querholz belastet wird: Die primären Stützen stehen immer «Stirne auf Stirne» aufeinander, am Fuss stehen die Stützen direkt auf dem Beton – sie werden hier sauber untergossen. Mit diesem System können Vertikalverformungen maximal reduziert werden – und brandschutztechnisch sind nur die Hauptstützen und das Kopfholz nachzuweisen. Die Felder zwischen den Fenstern werden mit möglichst schlanken Ständern und mit Dämmung ausgefüllt. Die Ständer haben «nur» die Funktion, die Dämmung zu halten und die Windlasten an die Decken abzutragen.

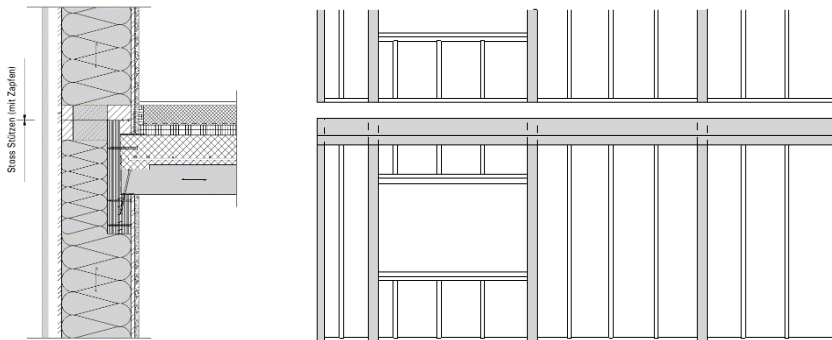


Abbildung 3: Skelett-/Rahmenbauelement mit den Hauptstützen und dem L-förmigen, durchlaufenden Kopfholz. Die Lastübertragung von Stützen zu Stütze funktioniert immer über Stirnholz, längs zur Faser.

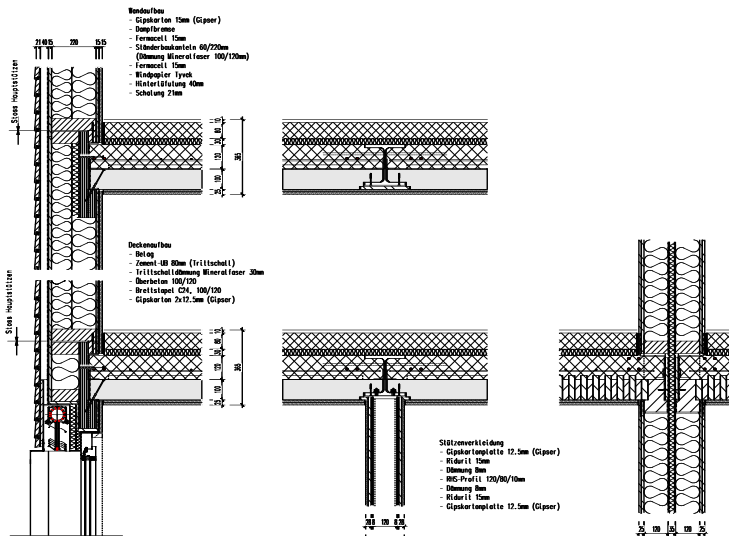


Abbildung 4: Auf dem Skelett-/Rahmenbau aufgebaute Standarddetails in Kombination mit Stahlträgern als Unterzugsystem und mit Holzbeton-Verbunddecken.

Das System ist auch kombinierbar mit allen anderen Deckensystemen wie mit Hohlkastern, mit Massivholzdecken oder mit Betondecken.

3. Brettsperrholzbauweise

Das Brettsperrholz wurde in Österreich entwickelt und erreichte nach der ersten Pionier- und Entwicklungsphase im 2008 eine Produktionsgrösse von 100'000 m³. In den meisten Ländern ausserhalb Zentraleuropas werden mehrgeschossige Holzbauten in der Brettsperrholzbauweise realisiert.

3.1. Brettsperrholz als Spezialbauteil

Der Entwurf unseres 2003 gebauten Bürogebäudes basiert auf einer «Holzkiste», die auf einem Betonsockel liegt und beidseitig 5,0m auskragt. Diese Auskragung wurde statisch mit Brettsperrholzwänden gelöst, die im Wohngeschoss angeordnet sind, beidseitig auskragen und über die darüber liegende Holzbetonverbunddecke zusammengeschlossen.

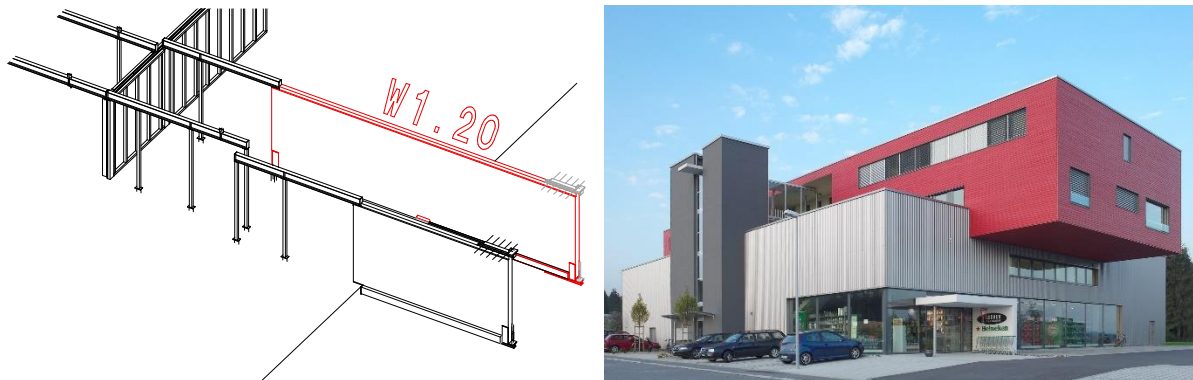


Abbildung 5: Unser Bürogebäude mit beidseitig um 5,0m auskragendem Holzbauteil. Diese Auskragung wurde mit wandartigen Trägern aus Brettsperrholz gelöst.

Die zwei primären Tragwände (je Auskragung eine) bestehen aus 202mm starken und 3.00m hohen 5-Schichtigen Brettsperrholzplatten. Die Lastweiterleitung von 1'260 kN von der schlanken Platte auf die Betonwand beim mittleren Auflager wurde mit eingeklebten Gewindestäben (GSA-Technologie der Neuen Holzbau AG) gelöst. Da diese Verbindung normativ nicht geregelt war wurde deren Funktionieren mit Versuchen bestätigt.

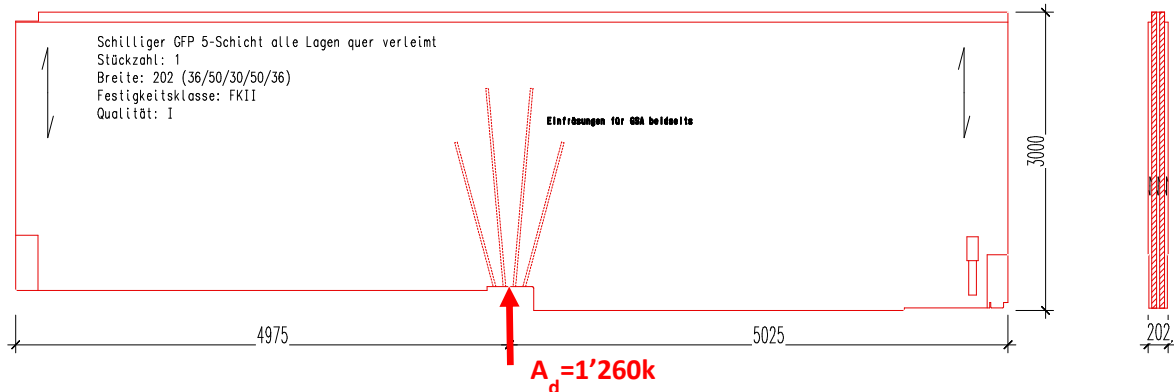


Abbildung 6: Brettsperrholzplatte als auskragende Wand. Die Auflagerkraft von 1'260kN wurde mit 8 eingeklebten Gewindestangen M20-10.9 in die Platte eingeleitet. Eine alternative Stahlplatte (Stahlsattel) wäre rund 1,00m lang gewesen, die Lasteinleitung auf diese Länge weniger kontrollierbar.

3.2. Brettsperrholzbau als Aussenwandssystem

Das 8-geschossige Mehrfamilienhaus Bridport Place in London war eines der ersten mehrgeschossigen Wohnbauprojekte in Brettsperrholzbauweise, welches durch unsere Firma bearbeitet werden durfte. Insbesondere ausserhalb der Schweiz sind wir seither immer wieder mit dieser Bauweise beschäftigt – insbesondere im mehrgeschossigen Wohnungsbau.

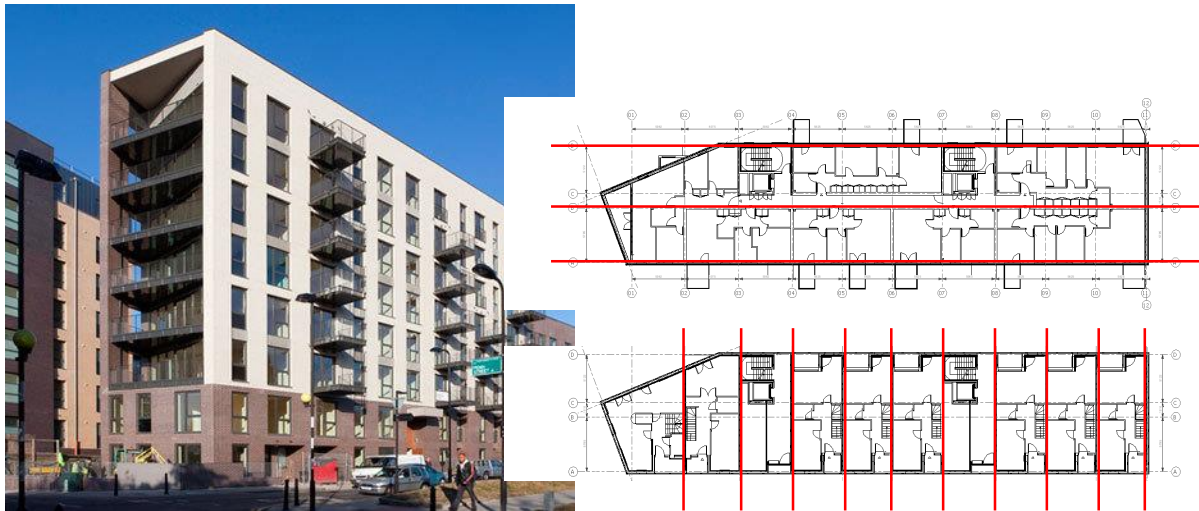


Abbildung 7: 8-geschossiges Mehrfamilienhaus Bridport Place in London.

Oben: Grundriss des 2. bis 7. Obergeschoss, Unten: Grundriss Erdgeschoss und 1. Obergeschoss

Eine erste Spezialität war die Änderung der primären Tragachsen über dem 1. Obergeschoss. Dies wurde notwendig, da im Erd- und im 1. Obergeschoss Maisonettwohnungen gewünscht waren, in den oberen Stockwerken Geschosswohnungen. Die Decken wurden in Brettsperrholz $t=182\text{mm}$ ausgeführt, die Innen- und Aussenwände mit Brettsperrholz $t=161\text{mm}$.

Bei den Tragwänden (Innen und Aussen) haben wir die Gedanken bezüglich dem «nicht Belasten» von Querholz wie bei der Skelett-/Rahmenbauweise verfolgt, weil wir Vertikalverformungen möglichst vermeiden wollten. Insbesondere in Kombination mit betonierten Erschliessungskernen und mit über die Geschosse durchlaufenden Lift- und Erschliessungskernen in Brettsperrholz erachten wir dieses System als das Sicherste.

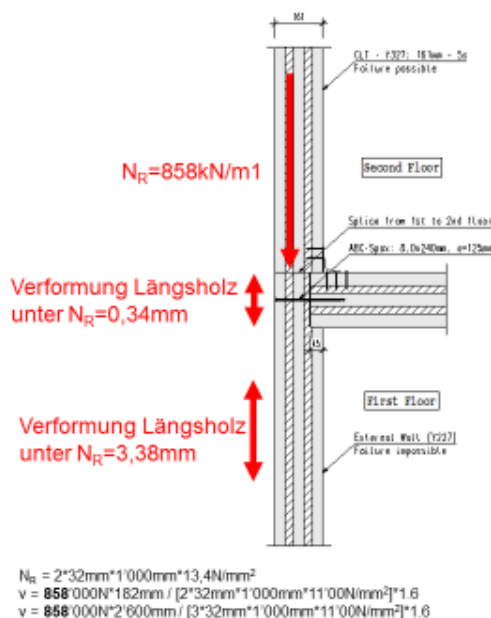


Abbildung 8: Konstruktionssystem mit Lastabtragung nur über Längsholz. Die max. Traglast bei den verbauten 161mm starken Wänden beträgt **858kN**, die daraus resultierende Vertikalverformung eines Geschosses (Decke plus Wand) 3,72mm.

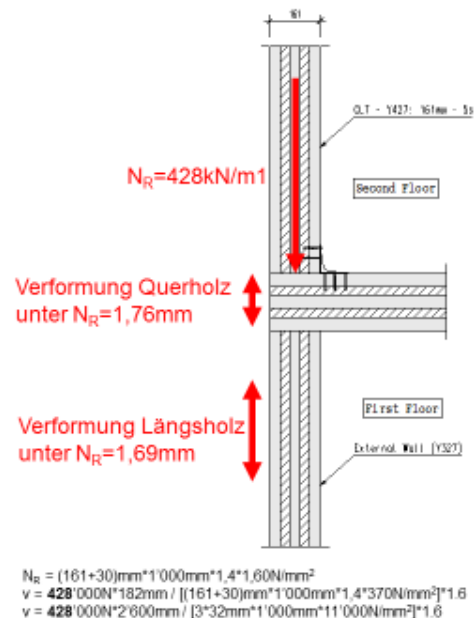


Abbildung 9: Konstruktionssystem mit Belastetem Querholz der Decken zwischen den Tragwänden. Die Maximale Traglast beträgt bei 161mm starken Wänden **428kN**, die daraus resultierende Vertikalverformung eines Geschosses (Decke plus Wand) 3,45mm.

Mit dem gewählten Konstruktionssystem konnte die Traglast bei fast gleicher Langzeitverformung verdoppelt werden. Dasselbe Konstruktionsprinzip der Lastweiterleitung nur über Längsholz wurde auch bei den tragenden Innenwänden angewendet. Mit den heute im Einsatz stehenden Abbundanlagen können solche Bearbeitungen in einer hohen Präzision und damit baupraktisch sicher ausgeführt werden.

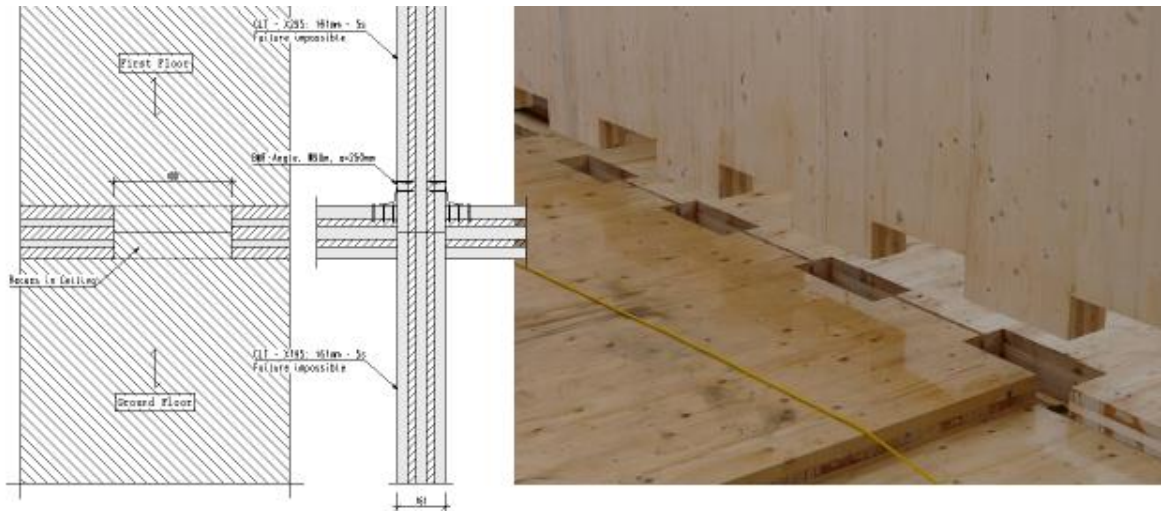


Abbildung 10: Geschossübergang bei den tragenden Innenwänden: Die Decken liegen auf den Tragwänden auf, die Tragwände stehen «Stirne auf Stirne» aufeinander und garantieren so minimalste Vertikalverformungen.

4. Vergleich der Systeme

Aus Sicht von uns Ingenieuren, welche bei der täglichen Arbeit sowohl Skelett-/Rahmenbauten als auch Brettsperrholzbauten bearbeiten, sehen wir zwischen den zwei Systemen folgende Unterschiede:

4.1. Vorfertigung und Wertschöpfung



Abbildung 11: Die Skelett-/Rahmenbauweise erlaubt eine weitgehende Vorfertigung in den klimatisierten Hallen der Holzbauer und damit kurze Montage- und Ausbaueiten auf der Baustelle.



Abbildung 12: Brettsperrholzbauten werden in den meisten Fällen wie herkömmliche Ziegelsteinbauten auf der Baustelle montiert. Die Ausbauarbeiten mit Dämmungen, Dichtungen, Platten und Verkleidungen usw. erfolgen unter Baustellenbedingungen auf der Baustelle.

4.2. Materialeinsatz

Holz ist der nachwachsende, nachhaltige Baustoff schlechthin. Mit dem Trend zum mehrgeschossigen Holzbau wird die Nachfrage bezüglich dem Rohstoff Holz zunehmen. Entsprechend interessiert es zukünftig, wieviel Holz für die Erbringung einer Leistung erforderlich ist. Beim Projekt Bridport Place wurden die Aussenwände in Brettsperrholz in Einzelteilen konstruiert: Raumhohe, eher schmale Wandelemente und zwischen die Wandelemente eingehängte Sturzelemente.

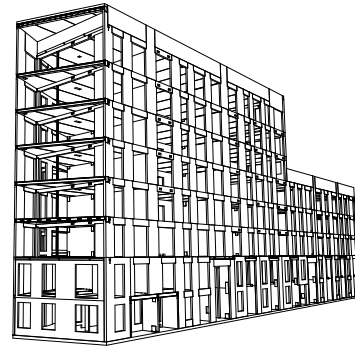


Abbildung 13: Aussenwände Bridport Place London, 2013

Für die Wandkonstruktionen (Aussen- und Innenwände, tragend und nichttragend) wurden rund 840 m³ Brettsperrholz verbaut. Mit einer alternativen Skelett-/Rahmenbaukonstruktion hätten rund 280m³ Holz (Rahmenkante, Brettschicht- und Furnierschichtholz) verbaut werden müssen. Daneben wären die Aussenwände bei gleichem U-Wert von 0,16W/m²K um ca. 60mm schlanker geworden.

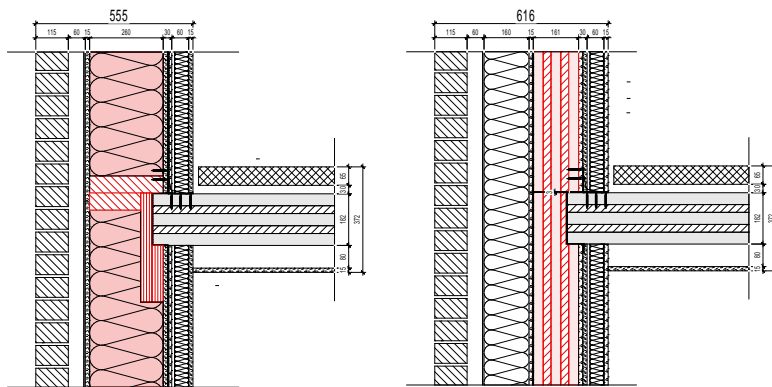


Abbildung 14: Rechts: ausgeführte Aussenwand in Brettsperrholz, Links eine alternative Skelett-/Rahmenbaukonstruktion mit identischem U-Wert und identischer statischer Leistungsfähigkeit.

Bei einem aktuell laufenden Brettsperrholz-Projekt werden die Wände nicht mehr segmentartig ausgeführt. Die Fenster werden aus den Wänden ausgeschnitten, weil dies produktionstechnisch einfacher und wirtschaftlicher ist, als das Wandelement segmentartig wieder zu einem Element zusammenzubauen. Trotz der relativ kleinen Fensterflächen gibt es einen relativ grossen Verschnitt von hochwertigem Baumaterial, der aus unserer Sicht zukünftig in irgendeiner Form vermieden werden sollte.



Abbildung 15: Verschnitt von 18,4% des für die Produktion der Aussenwände erforderlichen Brettsperrholzes bei einem von PJI aktuell bearbeiteten Projektes. Bei den 5 geplanten MFH's ergeben sich 131,5m³ Ausschnitt.

4.3. Schallschutz

Der Schallschutz von Innen- und von Wohnungstrennwänden der zwei Bausysteme unterscheidet sich wie folgt:

Gipsfaserplatte 15mm
 Holzständerwerk 120mm
 . Mineralfaserdämmung
 Gipsfaserplatte 15mm
 $R'w+(C) = 44+(-2) = 42 \text{ dB}$
 (Laborwerte)

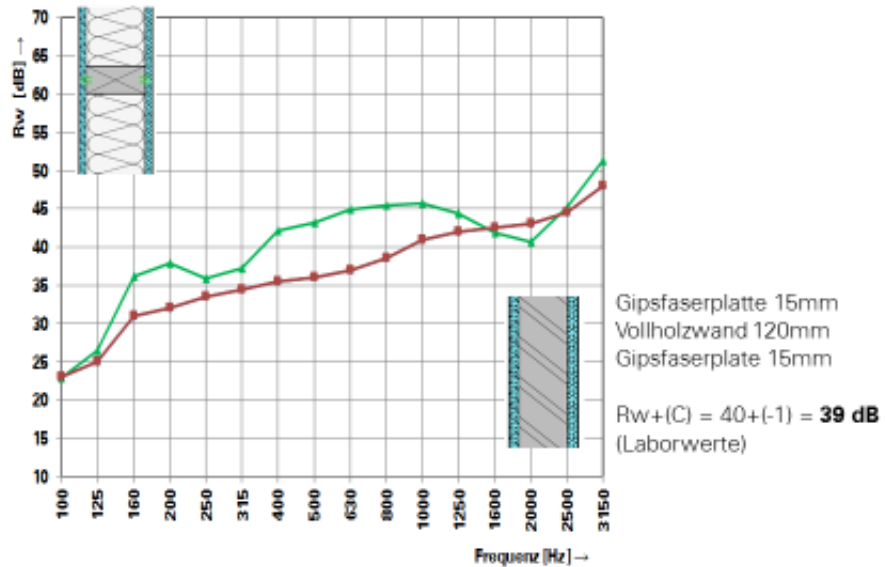
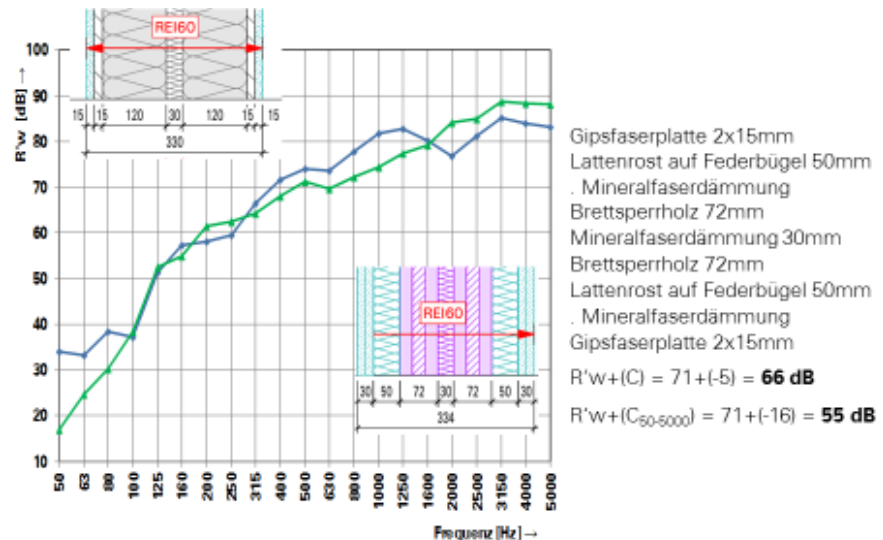


Abbildung 16: Schalldämmwert von Innenwänden in Rahmenbau- und in Massivbauweise mit je einem 120mm starken Kern. Dargestellt sind Laborwerte.

Gipsfaserplatte 2x15mm
 Holzständerwerk 120mm
 . Mineralfaserdämmung
 Mineralfaserdämmung 30mm
 Holzständerwerk 120mm
 . Mineralfaserdämmung
 Gipsfaserplatte 2x15mm
 $R'w+(C) = 71+(-6) = 65 \text{ dB}$
 $R'w+(C_{50-5000}) = 71+(-7) = 64 \text{ dB}$



Beide Wände erfüllen die erhöhten Anforderungen nach der Norm SIA 181
 jedoch ist die Vollholzwand im Tieftonbereich deutlich schlechter, wegen **Hohlraumresonanzen**

Abbildung 17: Schalldämmerte von am Bau gemessenen Wohnungstrennwänden – oben die zweischalige Skelett-/Rahmenbauwand, unten die zweischalige Brettsperrholzwand. Beide Wände erfüllen die erhöhten Anforderungen nach Norm SIA 181, jedoch ist die Vollholzwand im Tieftonbereich deutlich schlechter, wegen auftretenden Hohlraumresonanzen.

Bei der Massivholzwand sind insbesondere die Hohlraumresonanzen kritisch. Die Wand würde dieselben Werte wie die leichte Skelett-/Rahmenbauwand erreichen, wenn die Massivholzplatten auf **80mm Stärke** erhöht und auf einen **Abstand von 120mm** montiert würden. Die 50mm Vorsatzschalen könnten in dem Falle weggelassen werden – die doppelte Gipsfaserbeplankung könnte direkt auf die Massivholzwand erfolgen.

4.4. Statische Bemessung

Die Skelett-/Rahmenbauweise basiert auf linearen Bauteilen, welche über einfache statische Modelle nachgewiesen werden können. Demgegenüber sind statische Nachweise von Brettsperrholzwänden, die mit Öffnungen versetzt sind, nur mit Finite-Element-Programmen genügend genau machbar. In den folgenden Zeichnungen sind insbesondere die kritischen Bereiche direkt neben den Fenstern zu erkennen, die bei der Brettsperrholzbauweise für die Stärke der Wandplatten massgebend sind. Bei der Skelett-/Rahmenbauweise werden diese Bereiche mit stärkeren BSH-Stützen gelöst. Die übrige Wand kann dann wieder «leicht» konstruiert werden.

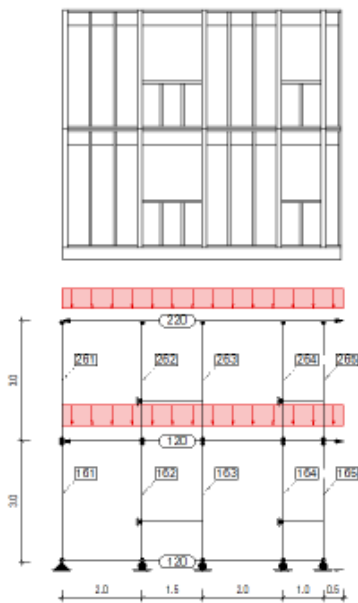


Abbildung 18: Ansicht und statisches System einer Skelett-/Rahmenbauwand. Die Bauteile können über einfache statische Nachweise dimensioniert werden.

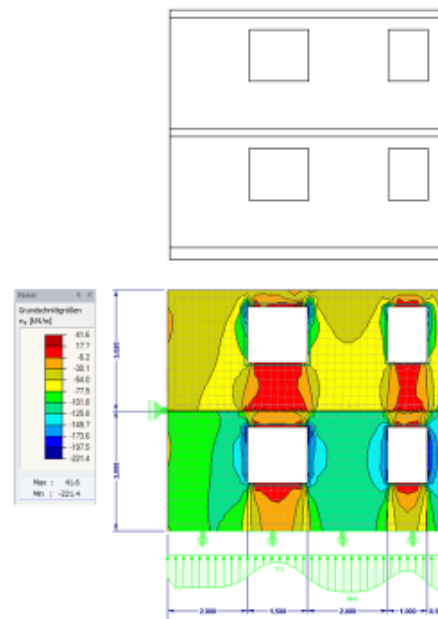


Abbildung 19: Ansicht und FE-Ausgabe des statischen Nachweises einer Brettsperrholzwand. Die plattenförmigen Wandelemente mit Öffnungen sind nur mit FE-Programmen hinreichend zu dimensionieren.

5. Ausblick zu Hochhäusern

Die Zukunft des Holzbaus liegt auch im Bauen von Gebäuden über der Hochhausgrenze. Aufgrund der auftretenden Kräfte und einer möglichst ressourcenoptimierten Bauweise erachten wir die Skelettbauweise, wie sie auch beim C13 in Berlin umgesetzt wurde, als eine sinnvolle Konstruktionsweise für Häuser über der 30m Grenze.

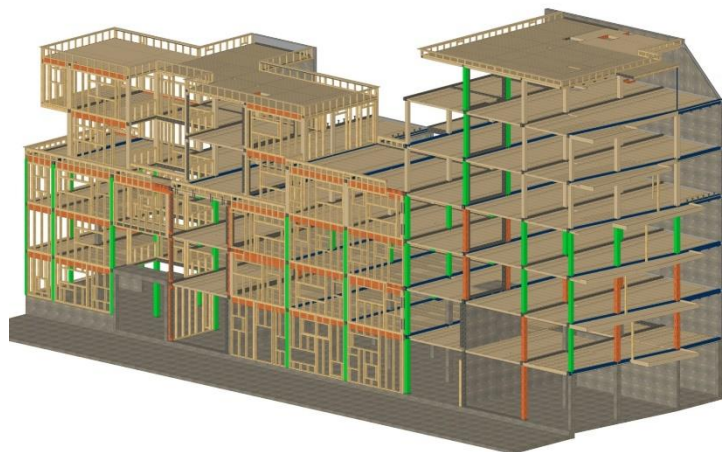


Abbildung 20: C13 in Skelettbauweise mit Unterzug-Stützenkonstruktion und nichttragenden Aussenwänden in Rahmenbauweise (5-geschossigen Teil) und in Brettsperrholzbauweise (7-geschossiger Teil).

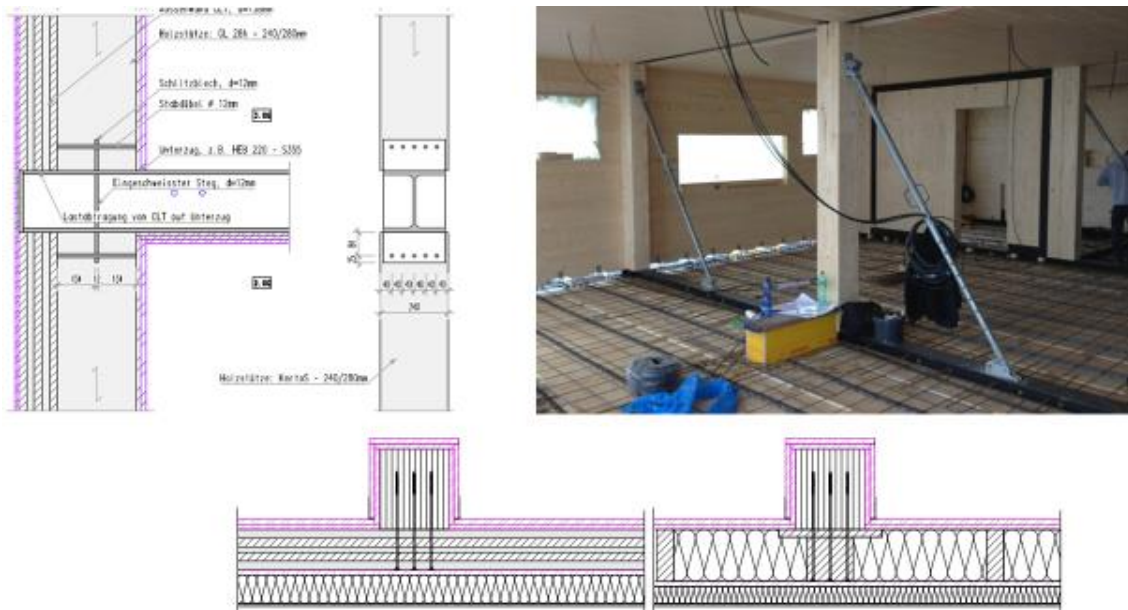


Abbildung 21: Konstruktionsprinzip beim C13 mit der tragenden Skelettkonstruktion und den nichttragenden Aussenwänden. Rechts eine Bild im Montagezustand.

Als Konstruktionsprinzip beim C13 wurde eine Primäre Skelettkonstruktion mit BSH-Stützen und Stahl-Unterzügen zwecks Ausbildung einer Flachdecke und frei gestaltbaren Grundrissen gewählt. Die Aussenwände wurden im 7-Geschossigen Bereich «Hohlraumfrei» in Brettsperrholzbauweise mit aussenliegender Dämmung ausgeführt, im restlichen Gebäudeteil mit ausgedämmten Holzrahmenbauelementen. Die nichttragenden Aussenwandelemente liegen immer in den Gebäudeachsen auf den leicht auskragenden Unterzügen auf, womit auch die Montage einfach gestaltet werden konnte.

Die Gebäudeaussteifung beim C13 erfolgte in Gebäudelängsrichtung über die betonierte Gebäudeabschlusswand REI90. In Querrichtung steifen Brettsperrholzplatten das Gebäude aus:



Abbildung 22: Links: Baustellenfoto mit einer in den Hauptstützen und in den Unterzügen eingespannten Brettsperrholzplatte. Rechts: Auszug aus der statischen Bemessung bezüglich der Bemessung dieser aussteifenden Wand, die ein Teil des horizontalen Tragwerkskonzeptes ist.

6. Zusammenfassung

Die zwei vorgestellten Bausysteme können wie folgt zusammengefasst werden:

Rahmen-Skelettbau



- Mehr Arbeit in der Werkstatt
- Weniger Holzverbrauch
- Stabstatik
- Schlankere Wände
- Viele BSH-Lieferanten

Brettsperrholzbau



- Mehr Arbeit am Bau
- Mehr Holzverbrauch
- Finite Element Statik FEM
- Stärkere Wände
- Wenige CLT-Lieferanten

Bewährte Systeme mit vergleichbarer
Tragsicherheit
Schalldämmung
Brandsicherheit
Dauerhaftigkeit

Es gibt kein richtig und kein falsch! Je nach Bauaufgabe, Vorliebe der Planer, Bauherren und Holzbauer und insbesondere nach dem mehr oder weniger weit entwickelten vorgefertigten Holzbau am Ort der Baurealisierung wird das eine oder das andere System zum Einsatz kommen. Damit die zukünftigen Bauaufgaben mit qualitativ hochstehendem Holzbau bedient werden können, müssen wir ressourcenoptimierte Konstruktionen ausführen, die Leute in der Planung und in der Ausführung maximal möglich schulen und entwickeln und wir müssen die gewaltigen Möglichkeiten, die uns die Industrie 4.0 bietet, maximal ausschöpfen – nicht nur in der Produktion und Bereitstellung der Baumaterialien wie Brettsperrholz und Brettschichtholz, sondern insbesondere in der Realisierung der gesamten Bauprojekte. Gegenüber der Konkurrenz liegen insbesondere in diesem Bereich die Möglichkeiten und das Potential beim Holzbau.

