Mehrgeschossiger Holzhochbau – gibt es Grenzen nach oben? Interaktion von Statik, Brandschutz, Bauphysik und Wirtschaftlichkeit

Carsten Hein
Arup Deutschland GmbH
Berlin, Deutschland

Mehrgeschossiger Holzhochbau – gibt es Grenzen nach oben? Interaktion von Statik, Brandschutz, Bauphysik und Wirtschaftlichkeit

1. Definition von Tall Timber oder Holzhochbau

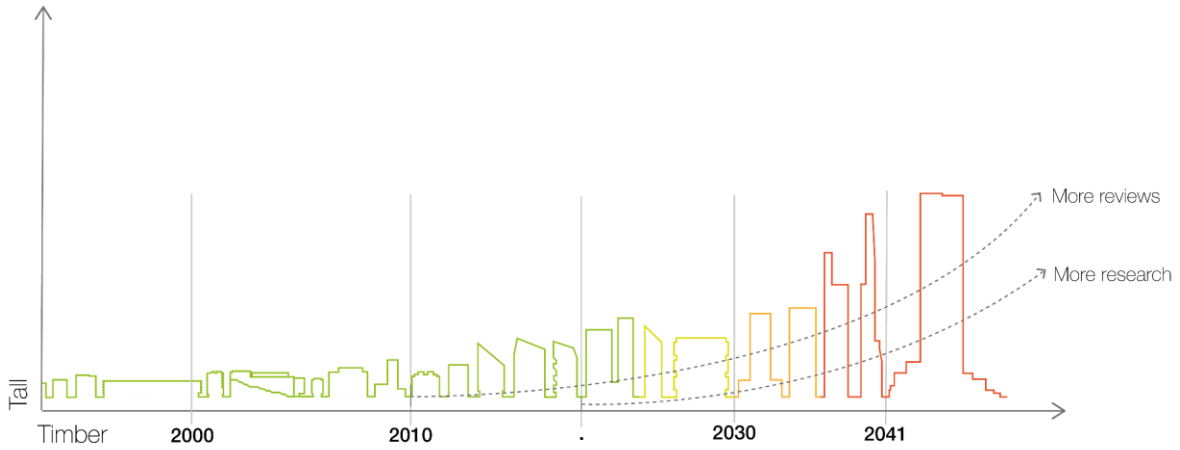

Abbildung 1: Podiumsdiskussion CTBUH Oktober 2018, Tall Timber Track, Dubai

Was ist die Definition von hohen Holzgebäuden, wie hoch kann man in Holz bauen? Das wurde im Oktober diesen Jahres ausgiebig auf der CTBUH Konferenz in Dubai diskutiert, die zum ersten Mal eine Vortragreihe ausschließlich zu Tall Timber organisiert hatte.

Zum einen wurde es deutlich, dass die Unterscheidung zwischen reinem Holzbau und Holz-Hybridbau nötig ist, weil die beiden Konstruktionstypen sich so eindeutig unterschiedlich verhalten. Als Holzbau werden Gebäude charakterisiert, deren Tragwerk so konstruiert ist, dass alle horizontalen und vertikalen Lasten überwiegend durch Holzelemente abgetragen werden. Die Holz-Beton-Verbunddecke ist dabei die erlaubte Ausnahme.

Im Folgenden soll auf die zweite Gruppe der Holz-Hybrid Bauwerke eingegangen werden.

2. Gibt es Grenzen nach oben?

Die Grafik oben zeigt die «Zusammenfassung» der Diskussionen. Für geringe Gebäudehöhen bis 8 oder 10 Geschosse gibt es inzwischen typisierte Konstruktionen und die meisten Normen decken Gebäudehöhen bis ca. 30 m ab. Soweit ist also alles im grünen Bereich.

Aktuell befinden sich einige Gebäude im Bau oder in Planung, die 20 Geschosse oder höher sind. Das HoHo in Wien, das Projekt HAUT in Amsterdam und die beiden Projekte Treet und Mjøstårnet in Norwegen. Das Forschungsprojekt LifeCycleTower von 2010 hatte sich bereits mit der Bauweise für einen 20-Geschosser beschäftigt.

Projekte mit 30, 50 oder gar 70 Geschossen werden aktuell entwickelt. Die Grafik oben zeigt aber die Voraussetzungen dafür: Es wird mehr Forschung erforderlich sein und, wie man an den oben genannten «kleinen» Hochhäusern sieht, mehr Reviews der Projekte durch externe Partner.

Wo also liegt die Grenze im Holz (-Hybrid) Hochbau?

3. Entwurfsparameter im Holzhochbau

Zur Klärung der Frage, wie hoch Holzhochhäuser sein können, ist es erforderlich sich die Bemessungskriterien vor Augen zu führen, die hierfür maßgebend sind. Welches also sind die Entwurfsparameter im Holzbau/Holz-Hybridbau? Besonders beim Bauen mit Holz sind neben der reinen Statik weitere Entwurfsparameter wichtig:

- Holz ist ein brennbarer Baustoff, hier gilt es, bereits konstruktiv Vorkehrungen zu treffen, um im Brandfall die Ausbreitung des Feuers über die Brandabschnitte hinaus zu vermeiden und die Brandweiterleitung im Abschnitt zu minimieren.
- Holz ist ein ausgezeichneter Baustoff – das Verhältnis von Tragfähigkeit/Gewicht ist unerreicht. Aber geringes Gewicht bedeutet auch geringe akustische Masse und verlangt sorgfältige Planung im Schallschutz und in der Dynamik (hier Schwingung der Decken).
- Holz ist ein sehr haltbarer Baustoff – wie viele historische Gebäude belegen – aber der konstruktive Holzschutz hat bei höheren Gebäude besondere Bedeutung. Bewittertes Holz hat eine reduzierte Lebensdauer, im Innenraum ist die Haltbarkeit nahezu unbegrenzt. Zum konstruktiven Holzschutz gehört auch die Vermeidung von Durchdringung der Gebäudehülle mit tragenden Bauteilen. Bauteile, die ohne Trennung im Außen- und Innenraum eigesetzt sind, sind einer besonders hohen klimatischen Belastung ausgesetzt. Feuchteunterschiede können schnell zu Schäden der Konstruktion führen.
- Holz ist «weicher» als Stahl oder Beton, daher sind bei der Gebäudeaussteifung sorgfältige Planung und Berücksichtigung der Materialeigenschaften nötig, besonders wenn hybride Stabilitätssystem herangezogen werden.

Das Thema Aussteifung in hohen Gebäuden soll anhand von einigen Beispielen genauer untersucht werden.

4. Aussteifungssysteme im Holzhochbau anhand von Beispielen

4.1. LifeCycleTower 2010

Das erste Beispiel ist ein Forschungsprojekt, das wir 2010 mit der Firma Rhomberg und dem Architekten Hermann Kaufmann begonnen haben, um die Machbarkeit eines 20-geschossigen Holzhochhauses zu untersuchen. Begonnen als 100% Holzkonstruktion war nach etwas mehr als einer Woche klar, dass die Decken Holz-Beton-Verbund Konstruktionen sein würden (siehe oben).

Das Aussteifungssytem wurde aus Brettschichtholzelementen entwickelt. Für die Aussteifung wollten wir max. Tragfähigkeit in vertikaler Richtung erreichen, Brettsperrholz oder Furnierschichtholz schied also aus. Mit den im BSH Bau nicht ungewöhnlichen Elementabmessungen von 2,5 m Breite und ca. 32 m Länge/Höhe konnten wir die erforderlichen Montagestöße auf zwei reduzieren.

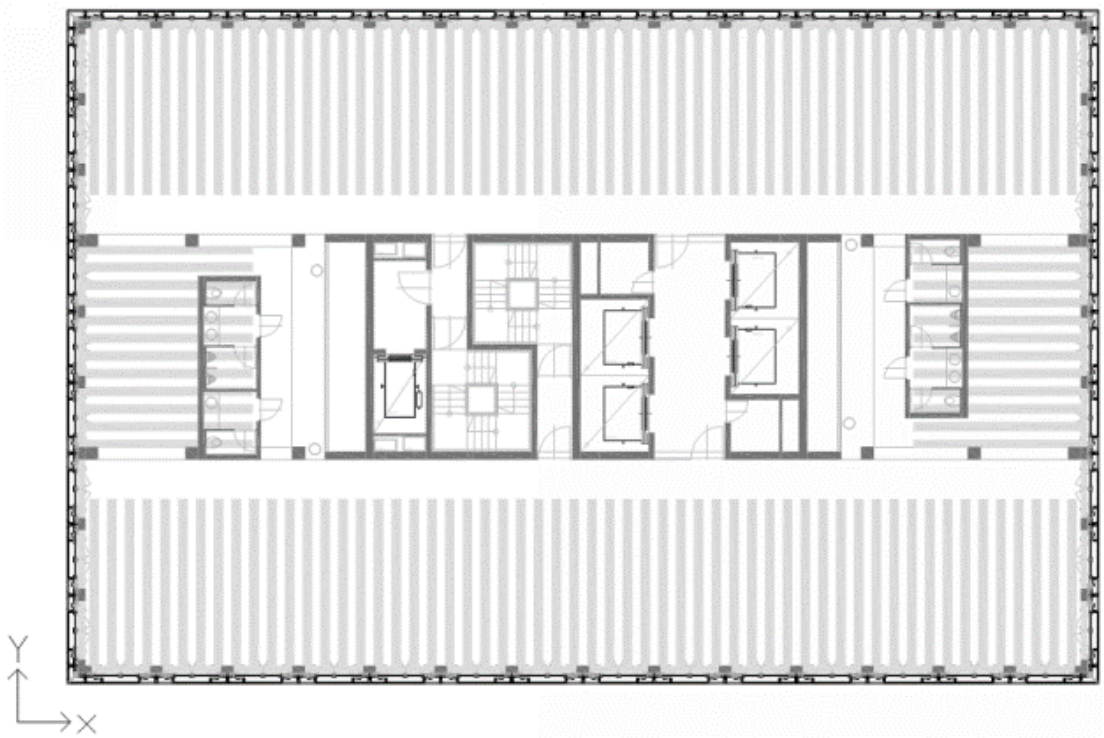

Abbildung 2: Schematischer Grundriss des LifeCycleTowers

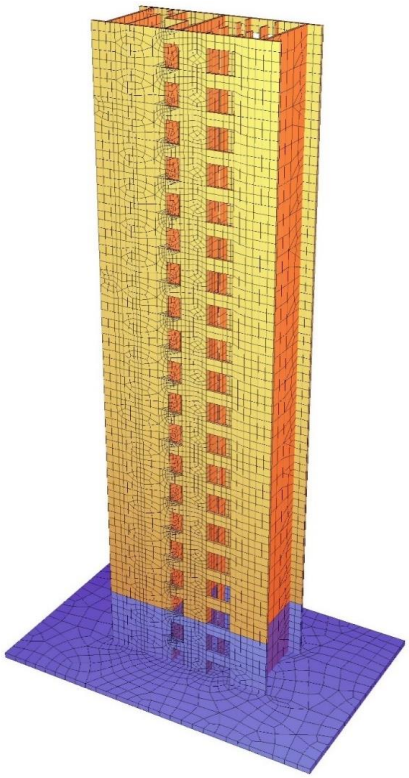

Abbildung 3: Aussteifungssystem des LCT (LifeCycleTower), 2 Geschosse Stahlbetonsockel, 18 Geschosse Brettschichtholz.

Es wurde zwei Modelle gerechnet. Das erste berücksichtigte keinerlei Koppelung zwischen den einzelnen Wandabschnitten, das zweite eine starre Koppelung.

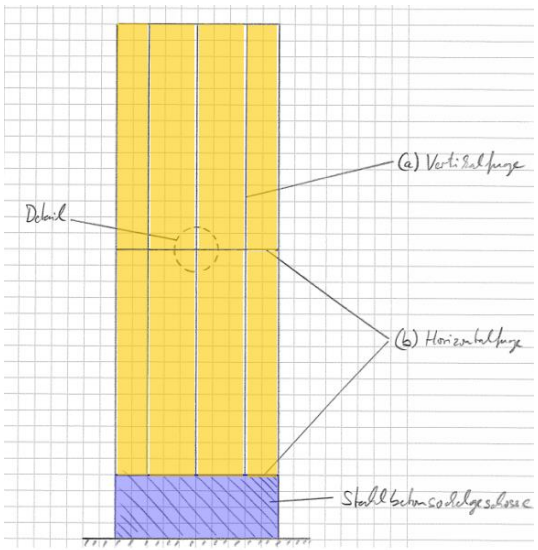

Abbildung 4: Schematische Kernwandansicht mit vertikalen und horizontalen Fugen.

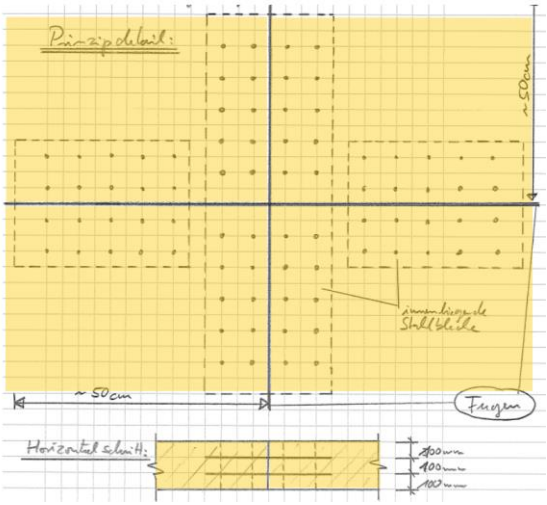

Abbildung 5: Anschlussdetail in Ebene 10 des 20-Geschossers

Die beiden Grenzwertbetrachtungen sind ein erster Ansatz, um die Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel zu erfassen.

Für die beiden Varianten wurden Zeit-Schritt-Berechnungen durchgeführt für eine 30 sec Belastung unter max. Windlast als Windbö. Schon die nicht-gekoppelte Fuge erfüllte zu ca. 90% die Schwingungsbegrenzungen nach ISO 6897.

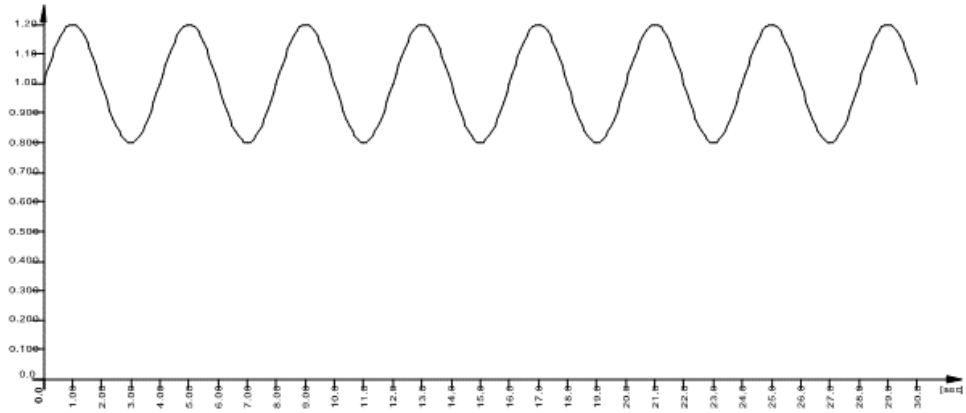

Abbildung 6: Verlauf der Windkraft relativ zur mittleren Windkraft über einen Zeitraum von 30 Sekunden.

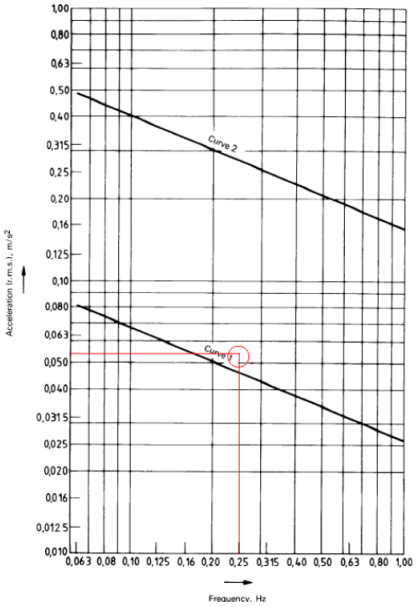

Abbildung 7: Auswertung nach ISO 6897

Das letztlich gewählte Verbindungssystem mit eingeschlitzten Blechen erreicht spielend die erforderliche Koppelsteifigkeit. Die Bleche werden mit horizontalen Langlöchern ausgeführt, um ein zwängungsfreies Schrumpfen der BSH Querschnitte zuzulassen.

Für den Brandschutz war diese Konstruktion komplett zu kapseln, da die Brandschutzvorschriften keine brennbaren Materialien in den Rettungswegen zulassen.

Zusammenfassung für Beispiel 1: Ein Vollholzkern für 20 Geschosse erfüllt die Anforderungen an die Aussteifung in statischer und dynamischer Sicht. Die vollständige Kapselung führt aber dazu, diese Ausführung nicht zu empfehlen. Der Holzbau wäre nicht sichtbar gewesen und mit der zusätzlichen Kapselung ist diese Holzbaulösung nicht mehr wirtschaftlich.

Für Beispiel 2 wurde eine Ausführung mit Stahlbetonkern empfohlen.

4.2. LCT ONE

In der Folge des Forschungsprojektes wurde der Prototyp LCT ONE gebaut (Die Leistungen der Tragwerksplanung wurden von Merz Kley und Partner übernommen).

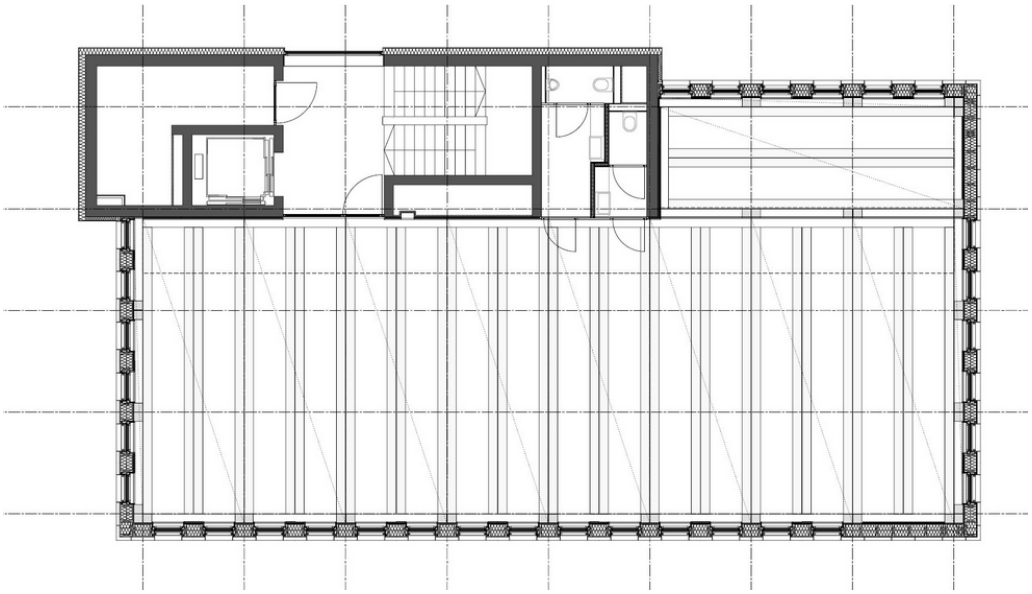

Abbildung 8: Grundriss des LCT ONE → Viertelgrundriss des Forschungsprojektes

Der Prototyp war ideal, um weitere Untersuchungen zur Aussteifung anzustellen. Das Gebäude wurde mit einem Stahlbetonkern gebaut, der allein für die Aussteifung herangezogen wurde.

Das fertige Projekt wurde dann von einem Team der Universität Bath auf sein Schwingungsverhalten vermessen.

Im Anschluss wurden Berechnungsmodell und gemessenes Schwingungsverhalten verglichen.

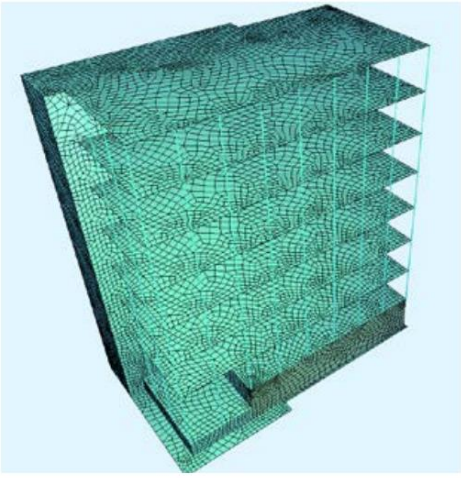

Figure 9: *Dynamic FE model, non-deformed*

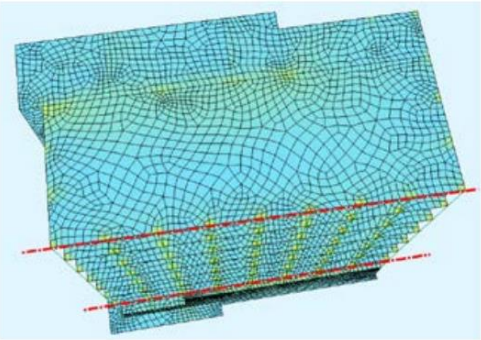

Figure 10: *First eigenmode*

Abbildung 9: FE Modelle nach den Ausführungsplänen LCT ONE

Die Computersimulation zeigte, wie bei der exzentrischen Kernanordnung zu erwarten, bei den ersten Eigenformen ein Schwingungsverhalten mit Torsionsanteilen. Die folgende Tabelle zeigt die Unterschiede zwischen Berechnung und Messung.

Tabelle 1: Vergleich Berechnung/Messung

LCT ONE	Rechenmodell	gemessenes Stabilitäts-Verhalten
Eigenfrequenz	1,30 Hz	1,84 Hz
Dämpfung	1,00%	2,10%
Torsion bei den Eigenformen	teilweise	nein

Aus diesen Untersuchungen folgerten wir, dass die Holzkonstruktion des LCT ONE zur Aussteifung beiträgt, auch ohne dafür bemessen worden zu sein.

Hier kommt also eine Hybrid-Konstruktion zum Einsatz, ohne dass die Holzkonstruktion explizit für die Aussteifung ausgelegt worden ist.

4.3. HAUT

Detaillierte Information zum Projekt HAUT werden gerade noch zusammengestellt für die Präsentation in Garmisch.

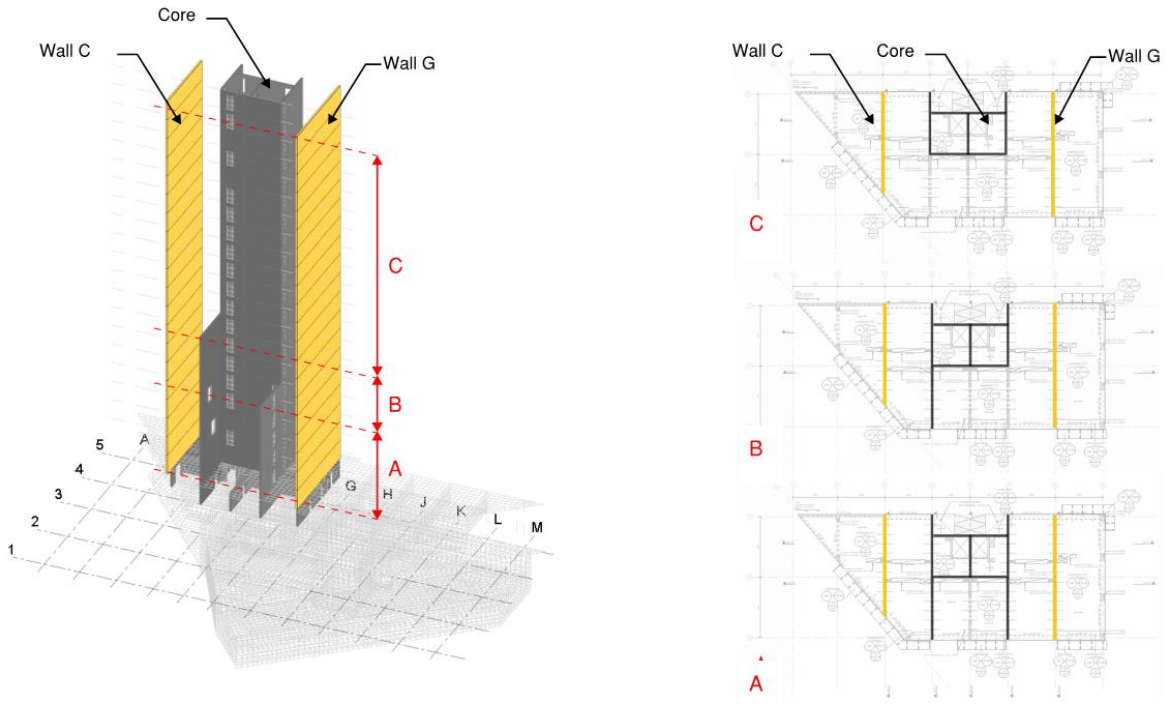

Abbildung 10 Das Aussteifungssystem des Projektes HAUT ist ein Hybridsystem aus Stahlbetonkern und Brettsperrholzwänden

4.4. Mjøstårnet

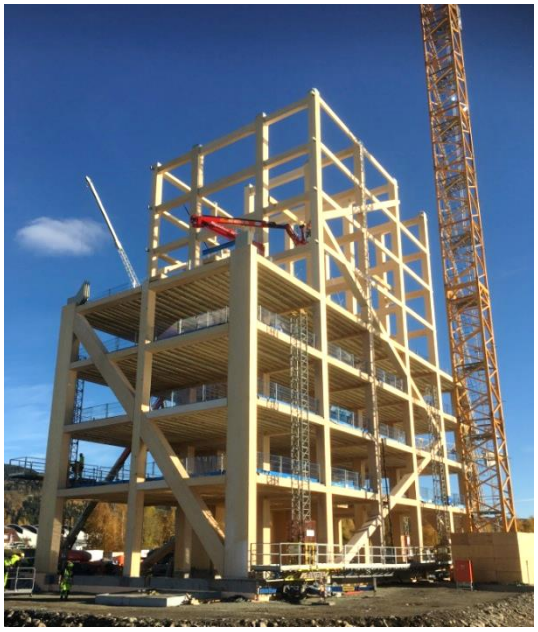

Abbildung 11: Aussteifungssystem des Mjøstårnet im Bau

Das Aussteifungssystem für das Projekt Mjøstårnet ist eine reine Holzkonstruktion. Allerdings wird hier zusätzlich Masse durch Aufbeton eingesetzt, um das Schwingungsverhalten «zu tunen». Auch hier ist der Autor um weitere Projektangaben bemüht.

4.5. HoHo

Beim HoHo in Wien kommt ein reiner Stahlbetonkern zur Aussteifung zum Einsatz.

5. Hybridkonstruktionen für höhere Holzgebäude

Für die drei Beispiele HAUT, HoHo und Mjøstårnet werden noch ergänzende Informationen zusammengetragen. Die Untersuchung der Beispiele zeigt aber schon jetzt, dass der Einsatz von Hybriden Konstruktionen für die Aussteifung sinnvoll ist. Die Verwendung von zwei unterschiedlich Systemen erlaubt es, die Eigenschaften gegeneinander «zu tunen», also durch die Koppelung der Systeme eine bessere Aussteifung zu erreichen als die Summe der Einzelsysteme dies ermöglicht.

Aus Sicht des Statikers gibt es kaum eine Grenze nach oben. Höhen begrenzende Aspekte sind hier vor allem der Brandschutz und die Aussteifung.

Bei der Detaillierung von Verbindungen gibt es noch einiges zu untersuchen und zu entwickeln. Holzbetonverbundkonstruktionen, Brandschutz und die sehr unterschiedlichen Materialeigenschaften von Holz im Vergleich zu den in den Hybridsystemen eingesetzten Materialien Beton und Stahl verlangen nach materialgerechten Weiterentwicklungen.

Aktuell sind alle Gebäude über 10 Geschossen «Verhandlungssache», weil die geltenden Normen über 10 Geschossen nicht greifen. An den vorliegenden Beispielen sieht man, dass jedes Ingenieurteam einen eigenen Weg zur Lösung der Aussteifung eingeschlagen hat. In Zukunft ist es sicher interessant die gebauten Gebäude auf ihre Aussteifung zu messen und daraus für das nächsthöhere Tall Timber Gebäude zu lernen.

6. Quellen und Querverweise

- Prof. Volker Schmid, Tobias Nettekoven und Melf Sutter – Hochhäuser in Holzbauweise – Konstruktionsprinzipien, dynamisches Verhalten, Verbundbau, Garmisch 2018
- Robert M. Foster, Thomas P.S. Reynolds and Michael H. Ramage - Proposal for defining a tall, timber building
- CTBUH Tall Timber Working Group, chairs: Robert M. Foster, Carsten Hein
- Arup Berlin, Forschungsvorhaben LCT (LifeCycleTower) 2010, mit CREE by Rhomberg, Hermann Kaufmann, Wiehag
- CREE by Rhomberg – LCT ONE, mit Hermann Kaufmann, Merz Kley und Partner
- Wen-Shao Chang, Senior Lecturer in Architectural Structure at The University of Sheffield and Angela Silja Feldmann B.Sc. - Master'sThesis in Timber Engineering: Dynamic Properties of Tall Timber Structures under Wind-induced Vibration
- Arup Amsterdam, HAUT – weitere Informationen folgen
- Rune Abrahamson, Treet und Mjöstarnet – weitere Informationen folgen
- Rüdiger Lainer, Oliver Sterl, HoHo – Anfrage zum HoHo läuft noch