

Robustheitskriterien für den mehrgeschossigen Holzbau

Andreas Müller
Professor für Holzbau u. Baukonstruktion
Bernser Fachhochschule
Architektur, Holz und Bau
Biel/Bienne, Schweiz

Holzbauexperten GmbH
Biel/Bienne, Schweiz



Robustheitskriterien für den mehrgeschossigen Holzbau

Holz als Baustoff hat eine sehr lange Tradition. Noch vor 200 – 300 Jahren wurden fast alle Gebäude aus Holz errichtet. Mit Eintritt in das 19. Jahrhundert wurde aus Gründen der veränderten gestalterischen Anforderungen, aber auch unter dem Eindruck grosser Brandkatastrophen, der Baustoff Holz sowohl bei öffentlichen Gebäuden wie auch im Bereich des Wohnungsbaus immer weiter zurückgedrängt.

Durch die gestiegenen Anforderungen an ein energieeffizientes und nachhaltiges Bauen aber auch durch das Bewusstsein, mit Holz den einzig nachwachsenden und nachhaltig erzeugbaren Werkstoff einzusetzen, wenden sich heute wieder vermehrt private wie auch öffentliche Bauherren dem Holzbau zu. Sie vertrauen der Holzbauweise, die in besonderer Weise alle an sie gestellten technischen und ökonomischen Anforderungen erfüllt.

Die in Holz gebauten Gebäude erfüllen bereits heute die Anforderungen der Zukunft. Der Klimawandel, die hohe (Wohn-) Qualität aber auch die bereits heute umgesetzten hohen Standards bezüglich der Energieeffizienz und der Nachhaltigkeit haben zu einer erhöhten Nachfrage geführt. Die im Holzbau üblichen digitalen Planungsprozesse und die bereits weitgehend industrialisierten Fertigungsprozesse haben sowohl die Qualität wie auch die Wirtschaftlichkeit der Holzbauweise weiter erhöhen.

Bei mehrgeschossigen Gebäuden steigen mit der Anzahl der Geschosse die Anforderungen an die statische Nachweisführung. Hier sind im Besonderen die Nachweise zur Gebäudeaussteifung bzw. der Gebäudestabilisierung zu nennen. Dem Verformungsverhalten muss besondere Beachtung geschenkt werden.

Neben der Tragsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit müssen die Gebäudestrukturen langfristig zuverlässig und in einem hohen Masse robust sein. Den Versagensmechanismen z.B. bei Stützensausfall durch aussergewöhnliche Einwirkungen gemäss EN 1991-1-7 [1] muss beim Entwurf Beachtung geschenkt werden. Alternative Lastwege müssen aufgezeigt und bemessen werden. Anhand der durchgeführten Studien im Projekt «Jenga» [2] kann dies anschaulich aufgezeigt werden.



Abbildung 1: HolzHochHaus «Jenga» (Bild: Berner Fachhochschule/MA Architektur/MWT) [2]

1. Robustheit

1.1. Was versteht man unter Robustheit

Unter Robustheit versteht man in Bezug auf die Tragsicherheit eines Gebäudes, «die Unempfindlichkeit eines Tragwerkes gegenüber einem lokalen Versagen» [3]. D.h. ein Lokales Versagen, z.B. der Ausfall einer Stütze im Erdgeschoss, führt nicht zum Einsturz bzw. Kollaps des gesamten Bauwerkes.

Damit ist die Robustheit aber auch die Fähigkeit einer Tragkonstruktion, unvorhergesehene, aussergewöhnlichen Ereignissen und Einwirkungen Widerstand zu leisten. Hierzu ist eine gewisse Redundanz notwendig.

Als Synonyme für Robustheit wird aber auch «Beständigkeit, Festigkeit, Härte, Stabilität und Widerstandsfähigkeit» genannt [4]. Robustheit ist auch mit Unempfindlichkeit und Dauerhaftigkeit zu umschreiben. Die Robustheit stellt nach [5] ein umfassendes Qualitätsmerkmal dar.

1.2. Kriterien für die Planung robuster Bauwerke

Die von Plötzl [5] aufgestellten Robustheitskriterien werden nachfolgend spezifisch für den Holzbau kommentiert und erweitert:

- Vermeidung von ungünstigen Einflüssen auf die Lebensdauer:
Ein sehr guter baulicher Schutz und ein gutes Austrocknungsvermögen einer Holzkonstruktion und deren Knotenpunkte tragen zur Robustheit bei. Die Kontrollierbarkeit ist hierbei ein wichtiges Kriterium. Nichtkontrollierbare Hohlkastensysteme sind deshalb unter diesem Gesichtspunkt weniger robust als Vollwandträger
- Vermeidung eines unangekündigten Systemversagens:
Sicherheitsrelevante Schäden müssen so frühzeitig erkennbar sein, dass Sicherungs- und Schutzmassnahmen möglich sind
- Erhöhung der Redundanz der Konstruktion:
Redundanz bedeutet, dass mehr gleichgerichtete, funktionsfähige Komponenten vorhanden sind, als zur Erfüllung der Tragsicherheit notwendig sind. Dies kann jedoch im Widerspruch zum ingenieurmässigen Wunsch stehen, Bauteile und Querschnitte zu optimieren
- Erhöhung der Duktilität der Konstruktion:
Duktilität ist ein Merkmal für Robustheit, als dadurch systemimmanente Tragreserven, wie bei statisch unbestimmten Systemen im Regelfall vorliegen, überhaupt mobilisiert werden können. Voraussetzung ist hierbei aber, dass diese Reserven nicht bereits bei der Bemessung durch plastische Berechnungsverfahren «aufgezehrt» wurden

Bei allen biegebeanspruchten Bauteilen führt bei stat. unbestimmten Systemen (Durchlaufsysteme) das Versagen eines Abschnittes meist nicht zum Totalausfall bzw. Versagen des gesamten Trägers. Sie sind daher in der Regel in Bezug auf den Schadensverlauf günstiger/unempfindlicher als stat. bestimmte Systeme wie z.B. Einfeldträger. Gemäss VDI 6200:2010 [6] können Tragwerke in Robustheitsklassen eingeteilt werden. Diese sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Robustheitsklassen für Bauwerke gemäss VDI 6200:2010 [6]

Robustheitsklasse	Bauwerk/Nutzung	Beispielhafte Tragwerke
RC 1	statisch bestimmte Tragwerke ohne Systemreserven Fertigteilkonstruktionen ohne redundante Verbindungen Imperfektionsempfindliche Systeme Tragwerke mit sprödem Verformungsverhalten	Einfeldträger stützenstabilisierte Hallentragwerke ohne Kopplungen schlanke Schalentragwerke Tragwerke aus Glas Tragwerke mit Gussbauteilen

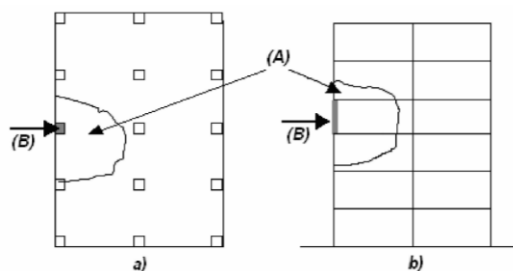
RC 2	statisch unbestimmte Konstruktionen mit Systemreserven elastisch-plastisches Tragverhalten	Durchlaufträger eingeschossige Rahmenkonstruktionen Stahlkonstruktionen
RC 3	Konstruktionen mit grosser Systemredundanz Tragwerksverhalten und/oder Konstruktionen mit grossen plastischen Systemreserven fehlerunempfindliche Systeme	mehrgeschossige Rahmenkonstruktionen vielfach statisch unbestimmte Systeme seilverspannte Konstruktionen überschüttete Bogentragwerke
RC 4	Tragwerke, bei denen alternativ berücksichtigte Gefährdungsszenarien und Versagensanalysen ausreichende Robustheit zeigen	Bemessung für Stützenausfall Bemessung auf Lastfall Flugzeugabsturz

1.3. Normative Grundlagen

Die EN 1991-1-7 klassifiziert Gebäude für unfallbedingte Einwirkungen in die «Versagensfolgeklassen» 1, 2a, 2b und 3. Je höher die Gebäudeklasse ist, desto mehr Menschen sind im Falle eines Einsturzes gefährdet. Die Klasse 1 erfordert keine besonderen Vorschriften. Klasse 2A erfordert eine horizontale Verankerung und Klasse 2B zusätzlich eine vertikale Verankerung. Für Klasse 3 ist zusätzlich eine systematische Risikobewertung erforderlich. Bei Klasse 2B kann anstelle der Verankerung auch die fiktive Entfernung von Elementen verwendet werden.

Für Gebäude der Versagensfolgeklasse 3 gibt EN 1991.1.7:2006 vor, dass eine systematische Risikobewertung des Gebäudes vorgenommen werden muss, bei der sowohl vorhersehbare als auch unvorhersehbare Gefahren berücksichtigt werden.

Die Grenze des lokalen Versagens kann bei jedem Gebäudetyp unterschiedlich sein. Der empfohlene Wert beträgt 15 % des Geschossflächen oder 100 m², je nachdem, welcher Wert kleiner ist, in jedem der beiden angrenzenden Stockwerke gemäß Abbildung 34. Die Bauteile deren Entfernung eine größere Einsturzausdehnung verursachen würde, sollen als «Schlüsselemente» ausgelegt werden.



Legende

- (A) Lokaler Schaden unter 15 % der Geschossfläche, gleichzeitig in zwei angrenzenden Geschossen
- (B) Stütze, die rechnerisch entfernt wird
- a) Aufsicht
- b) Ansicht mit Schnitt

Abbildung 2: Empfohlene Begrenzung eines akzeptablen Schadens nach Bild A.1 [1]

Tabelle 2: Zuordnung zu Versagensfolgeklassen nach Tabelle A.1 [1]

Versagensfolgeklasse	Beispiel für Zusammenhang von Gebäudetyp und -Nutzung
1	Einfamilienhäuser mit bis zu 4 Stockwerken. Landwirtschaftliche Gebäude. Gebäude, die selten von Personen betreten werden, wenn der Abstand zu anderen Gebäuden oder Flächen mit häufiger Nutzung durch Personen mindestens das 1,5-fache der Gebäudehöhe beträgt.
2a Untere Risiko- gruppe	5-stöckige Gebäude mit einheitlicher Nutzung. Hotels mit bis 4 Stockwerken. Wohn- u. Apartmentgebäude mit bis 4 Stockwerken. Bürogebäude mit bis 4 Stockwerken. Industriebauten mit bis 3 Stockwerken. Einzelhandelsgeschäfte mit bis 3 Stockwerken und bis 1000 m ² Geschossfläche in jedem Geschoss. Einstöckige Schulgebäude. Alle Gebäude mit bis zu 3 Stockwerken mit Publikumsverkehr und Geschossflächen bis 2000 m ² in jedem Geschoss.
2b Obere Risiko- gruppe	Hotels, Wohn- und Apartmentgebäude mit mehr als 4 und bis 15 Stockwerken. Schulgebäude mit mehr als einem und bis 15 Stockwerken. Einzelhandelsgeschäfte mit mehr als 3 und bis 15 Stockwerken. Krankenhäuser mit bis 3 Stockwerken. Bürogebäude mit mehr als 4 und bis zu 15 Stockwerken. Alle Gebäude mit Publikumsverkehr und Geschossflächen von mehr als 2000 m ² und bis 5000m ² in jedem Geschoss. Parkhäuser mit bis 6 Stockwerken.
3	Alle Gebäude, die die Stockwerksanzahl und Flächengrenzen der Klasse 2 übersteigen. Alle Gebäude mit starkem Publikumsverkehr. Stadien mit mehr als 5000 Zuschauern. Gebäude mit lagernden Gefahrgütern oder gefährlichen Verfahren

2. Robustheitskriterien beim Entwurf

Beim Entwurf robuster Tragstrukturen wird zwischen indirekten und direkten Methoden zur Sicherstellung der Robustheit unterschieden.

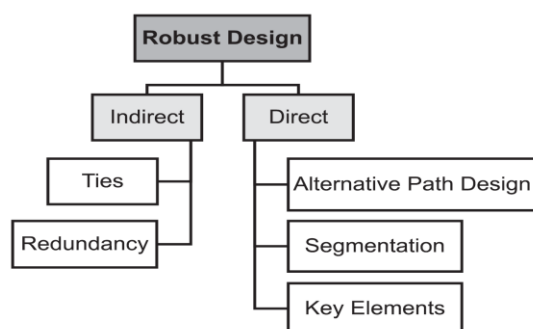


Abb. 3: Übersicht direkte und indirekte Entwurfsmethoden für die Robustheit nach [7]

2.1. Direkte Methoden – Alternativer Lastpfadentwurf

Der alternative Lastpfadentwurf sieht alternative Lastpfade in der Struktur nach der Entfernung eines Elements vor, um die Anforderungen an das zulässige Einsturzausmaß zu erfüllen. Zwei der Hauptmechanismen der Lastverteilung, die für diese Methode verwendet werden können, sind die Kettenwirkung und die Membranwirkung. Bei der Kettenwirkung verhalten sich die Träger über einem ausgefallenen Element wie eine Kette, um die verbleibende Struktur zu stützen (Abbildung 4). Bei der Membranwirkung bilden die Deckenplatten oder Bodenmembranen über einem versagenden Element eine Membran und

stützen das übrige Tragwerk (Abbildung 5). Beide Mechanismen erfordern eine ausreichende Zugtragfähigkeit in den Bauteilen und eine Kapazität für große Verformungen ohne Bruch in den Verbindungen. Um alternative Belastungspfade zu ermöglichen, ist daher die Auslegung der Verbindungen entscheidend, insbesondere ihr duktiles Verhalten bei Überlast [8].

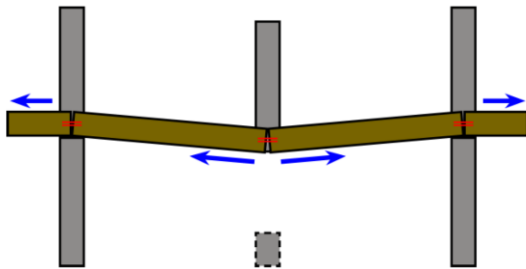


Abbildung 4: Überleitungseinwirkung [8]

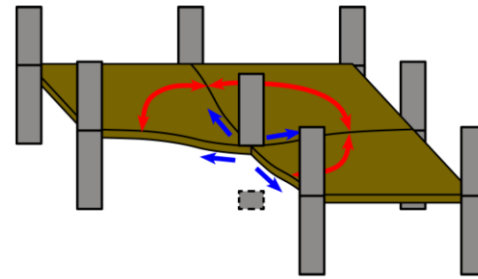


Abbildung 5: Membraneinwirkung [8]

2.2. Baupraktische Überlegungen zum Entwurf robuster Tragstrukturen

Eine gute Gebäudeaussteifung führt i.d.R. zu sehr robusten mehrgeschossigen Gebäudestrukturen. Laut Wenk [9] sind die Merkmale eines im Hinblick auf die Erdbebensicherheit robusten Gebäudes die Einfachheit, die Regelmässigkeit und die Redundanz. Umgesetzt für mehrgeschossige Gebäude in Holz entsteht so ein Tragsystem mit über alle Geschosse durchgehenden tragenden bzw. aussteifenden Wandscheiben. Eine Reduktion der Steifigkeit der Gesamtstruktur kann nur nach oben hin z.B. im obersten Geschoss vertreten werden. Ferner ist bei der Grundrissgestaltung zu beachten, dass der Schwerpunkt der Steifigkeiten aller aussteifenden Bauteile etwa identisch ist mit dem Massenschwerpunkt des Gebäudes respektive der Geschosse. Nur so ist das Gebäude weitgehend torsionssteif. Voraussetzung ist aber auch hier, dass die Deckenscheiben möglichst steif sein müssen. Sollte dies nicht der Fall sein, muss umso mehr auf die möglichst symmetrische und gleichmässige Verteilung der aussteifenden Wände über die Grundfläche hinweg sichergestellt werden. Die Horizontallastverteilung erfolgt bei sehr weichen Deckenscheiben nicht mehr abhängig von der Steifigkeit der aussteifenden Elemente, sondern verbunden mit grösseren und über die Grundfläche sehr unterschiedliche Verformungen über die angrenzenden Lasteinzugsflächen (Abbildung 6 und 7).

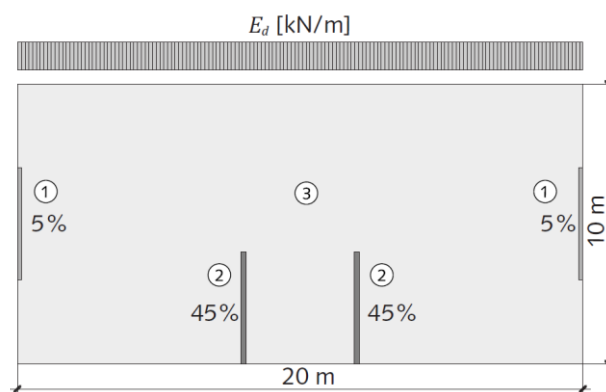


Abbildung 6: Aufteilung der horizontalen Einwirkungen auf die aussteifenden Wände unter Berücksichtigung der Steifigkeit einer Holz-Beton-Verbunddecke [10]

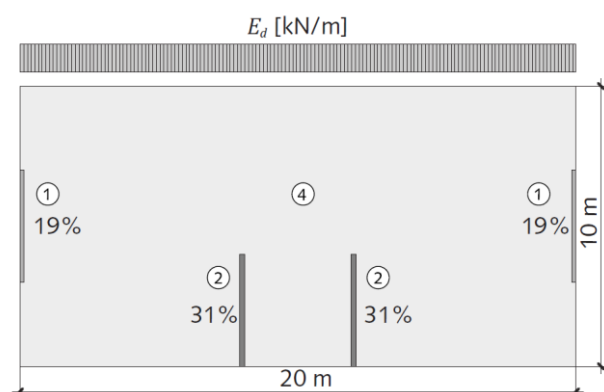


Abbildung 7: Aufteilung der horizontalen Einwirkungen auf die aussteifenden Wände unter Berücksichtigung der Steifigkeit einer Rippendecke in Holzrahmenbauweise [10]

Dies führt zu hohen Anforderungen an die raumseitige Beplankung und wie bei einer Analyse von mehrgeschossigen Gebäuden im Zuge eines Forschungsprojektes festgestellt, ist dies oft Ursache von Rissen in den Innenbekleidungen bzw. dem Auf- bzw. Abreißen der Beplankungsfugen besonders in den Raumecken oder an den «Sollbruchstellen» an Versätzen oder (Vor-) Sprüngen in den Flächen (Abbildung 8 und 9).



Abbildung 8: Innenecke mit geschlossener Fuge



Abbildung 9: Innenecke mit geöffneter Fuge

3. HolzHochHaus Jenga

3.1. Wettbewerb

Studierende aus dem Master Architektur und dem Master Wood Technology (MWT) der Berner Fachhochschule (BFH) haben im Rahmen eines interdisziplinären Projekts innovative Holzhochhäuser entworfen. Im internen Wettbewerb wurde das Projekt «Jenga» zur Weiterbearbeitung empfohlen, um gemeinsam mit Holzbau Schweiz und Industriepartnern Teile davon als 1:1-Modell auf der Fachmesse Swissbau zu präsentieren. Das Bauwerk stapelt volumetrisch gleiche Holzmodule in unterschiedlichen Richtungen aufeinander und fasziniert durch das Zusammenspiel von Konstruktion, einzigartigem Raumerlebnis sowie durch Klarheit [2].

Umfangreiche Dokumentationen zum Entwurfsprozess und zu den weiteren Planungs- und Hochhausprojekten ermöglichen eine vertiefte Reflexion über die Perspektiven und die Vielfalt des mehrgeschossigen Holzbaus. Für die Studierenden der MWT-Vertiefung «Complex Timber Structures» war das Projekt Jenga eine willkommene Herausforderung sich sehr anwendungsorientiert und grundlegend mit dem Thema Robustheit bei Holz-HochHäuser intensiv auseinanderzusetzen [11].

3.2. Robustheitskonzepte bei HolzHochHäusern

Alternativer Lastpfadentwurf eines regulären Bauwerks

Die Methode der alternativen Lastwege (z.B. nach Huber et al. [8]) ist heute bei Holz-HochHäusern eine zielführende Methode zur Sicherstellung der Robustheit. Bei sehr strukturiert in einem holzbaugerechten Raster aufgebauten Gebäude (Abbildung 10 und 11) kann ein Kollaps des Gesamtgebäudes durch die Wahl eines Deckensystem vermieden werden, welches bei diesem aussergewöhnlichen Bemessungsfall durchgehend zugbeansprucht werden kann. Im Falle eines Stützensausfalls wirken die Platten dann als Zugband und verteilen die Last auf die benachbarten Stützen. Die roten Pfeile zeigen den Kraftfluss der Druckkräfte und die blauen Pfeile den Kraftfluss der Zugkräfte. Dieses System funktioniert, solange sich auf beiden Seiten der ausfallenden Stütze benachbarte Stützen befinden. Wenn die Eckstütze kollabiert, hat dieses System Schwäche bzw. ein partielles Versagen der Eckstruktur ist nicht zu vermeiden.

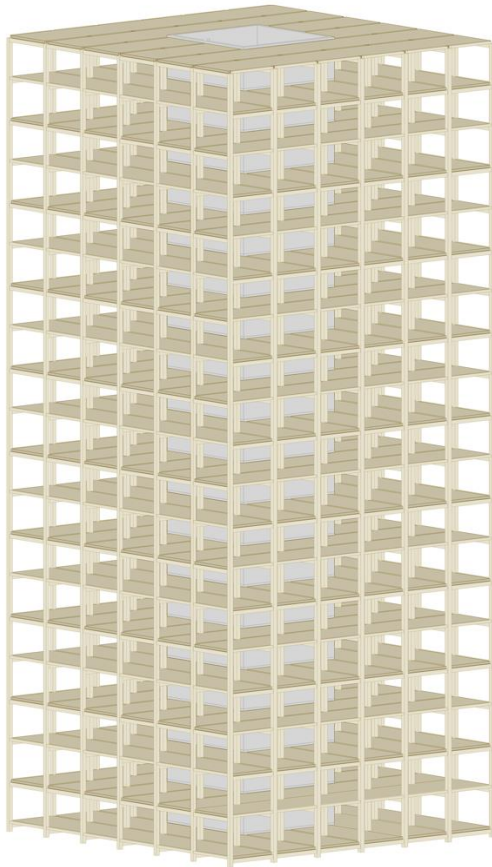


Abbildung 10: Normale Hochhausstruktur [11]

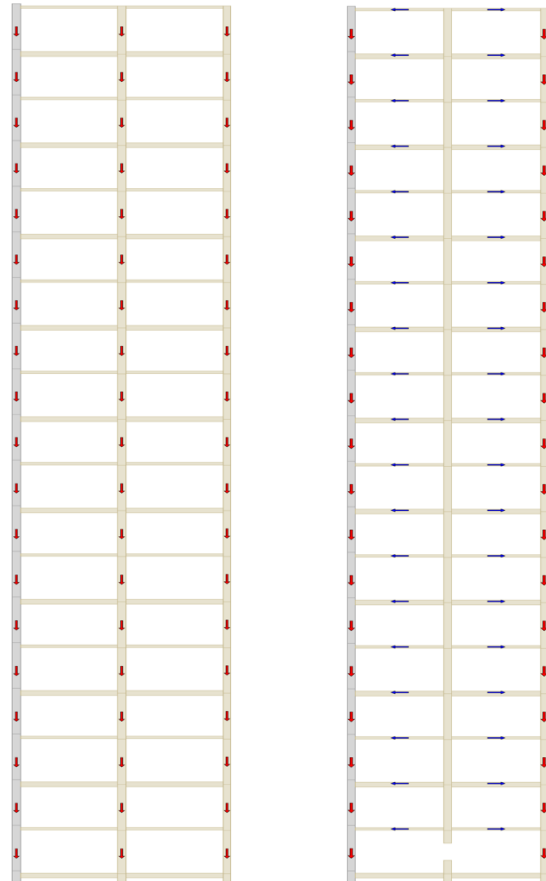


Abbildung 11: Kraftverteilung eines strukturiert auf einem regelmässigen Raster aufgebauten Hochhauses (links); Kraftverteilung bei Stützenversagen (rechts) [11]

Alternativer Lastpfadentwurf des Projekt Jenga

Nach Prüfung verschiedener Varianten kam das Planungsteam zum Entschluss, dass die Sicherstellung einer Redundanz in der Struktur die wirkungsvollste und am besten realisierbare Lösung ist, um die geforderte Robustheit zu erreichen. Das erstellte Konzept bei der Jenga-Struktur sieht vor, dass die Vertikallast der ausgefallenen Stütze durch die bereits vorhandenen Diagonalen in die Aussenwandebene hoch- bzw. zurückgehängt wird. Zusätzliche Fachwerkstrukturen in jeder zweiten Auswandebene sind in der Lage diese Zusatzlast aufzunehmen und in die angrenzenden intakten Strukturbereiche zu übertragen. (Abbildungen 12+13). Aufgrund der alternierenden Spannrichtung des Bindersystems und der Redundanz der Binder in der gesamten Fassade kann die Kraft vom 1. bis zum 19. Stockwerk in jedem zweiten Stockwerk verteilt werden (Abbildung 15). Dieses Konzept erfordert duktile Verbindungen. Erfreulicherweise können mit dieser Konstruktion an der Fassade Balkone angebracht werden, sofern genügend Fachwerkssysteme in der Aussenwandstruktur vorhanden sind, welche die Kräfte im Falle eines Stützensausfalles verteilen können [11].

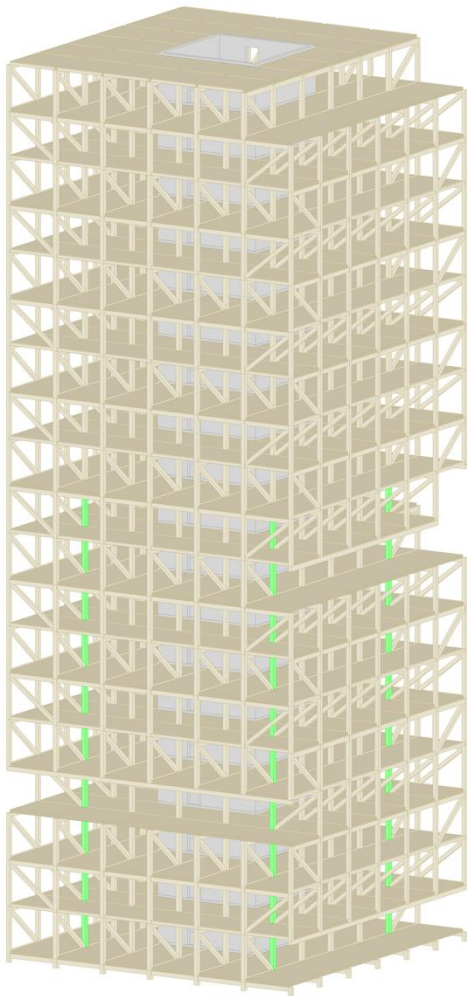


Abbildung 12: Jenga-Hochhausstruktur [11]

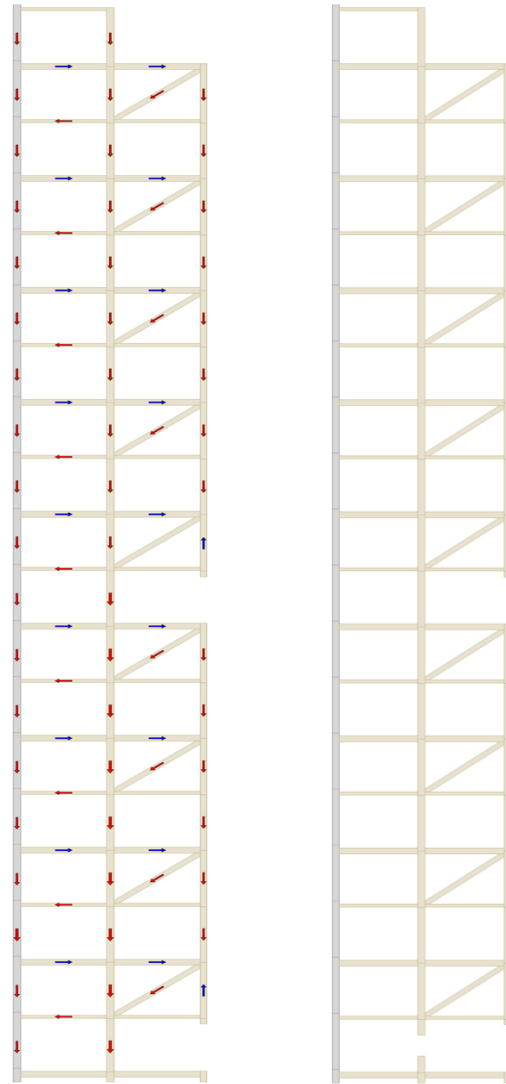


Abbildung 13: Kraftverteilung des Jenga-Hochhauses (links); Kraftverteilung bei Stützenversagen (rechts) [11]

In der besonderen Situation, in der sich zwei Einschnitte in aufeinanderfolgenden Etagen befinden, hat das gewählte Konzept für die Eckstützen noch Schwächen. Ein Lösungsansatz hierfür ist, diese Stützen als sog. «Schlüsselemente» auszubilden. Um die Robustheit auf der Materialebene zu erreichen, ist die Ausbildung von Verbundstützen eine Möglichkeit. Die Idee ist, eine Stahlstütze zu verwenden, die in einen Holzquerschnitt eingebettet ist. Beide Materialien wirken im Verbund für den Gebrauchszustand und für den Robustheitslastfall mit Stützenausfall muss jeder Einzelquerschnitt bzw. Material in der Lage sein, die Tragsicherheit sicherzustellen. Zusätzlich muss die Verbindung der Stützen zwischen den einzelnen Stockwerken überdimensioniert sein.

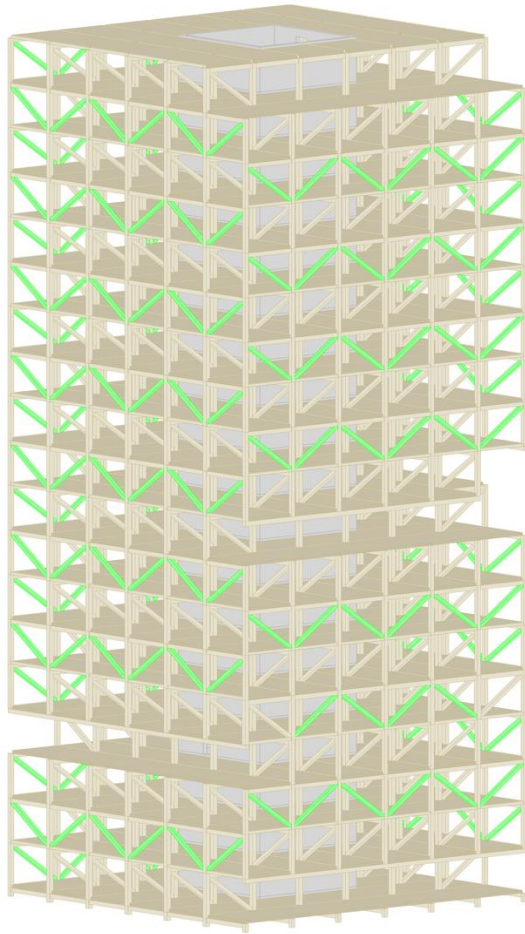


Abbildung 14: Jenga-Hochhausstruktur [11]

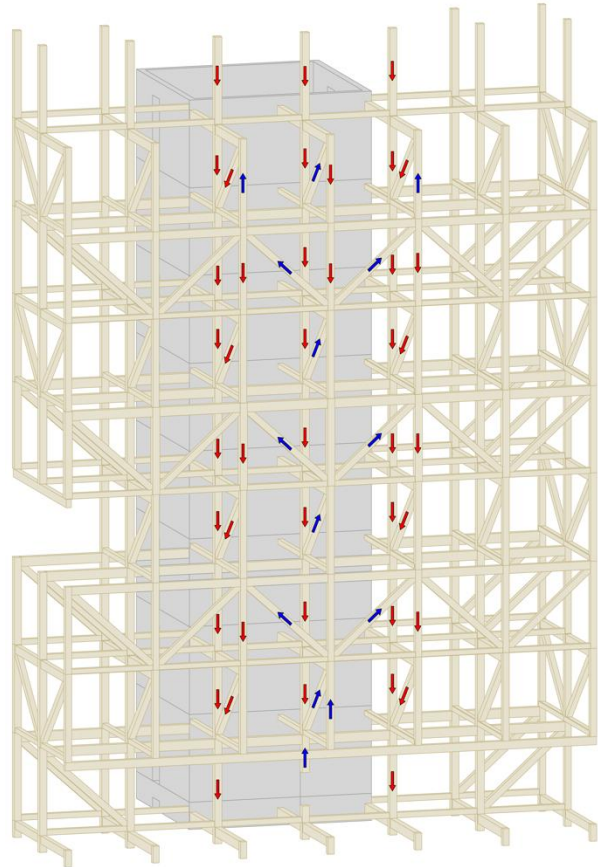


Abbildung 15: Kraftverteilung des Jenga-Hochhauses bei Stützenausfall [11]

4. Bauphysikalisch robust

Aus bauphysikalischer und baukonstruktiver Sicht hat eine robuste Konstruktion ein gutes Austrocknungsvermögen, ist wärmebrückenfrei und sollte generell wenig fehleranfällig sein. Dies sind im Holzbau konsequent diffusionsoffene Aufbauten, die eine Austrocknen in der Regel nach aussen, aber auch ein gewisses Austrocknungsvermögen nach innen sicherstellen. Aufbauten mit umlaufend aussenliegender Wärmedämmung gemäss Abbildung 16 gelten als robust und wenig fehleranfällig.

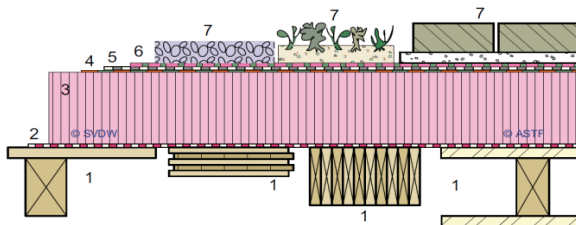


Abbildung 16: Nicht durchlüftete Konstruktion - Wärmedämmung auf der Tragkonstruktion [12]

Sowohl im Flachdach wie auch in den Bauteilen gegen Erdreich ist der konstruktive Wand-, Decken- und Dachaufbau nicht «warmseitig der Konstruktion (z.B. nach SIA 271:2007 [13])» angeordnet. Dies gilt insbesondere für Flachdächer, die auch heute noch meist wenig robust konstruiert werden und daher überdurchschnittlich häufig an Schäden an Gebäuden beteiligt sind. Diesbezüglich ist von Aufbauten wie in Abbildung 17 abzuraten. Deutlich robuster wird selbst dieser Aufbau mit der heute üblichen zusätzlichen Überdämmung durch eine «Aufdachdämmung» an der Kaltseite. Diese kann auch nachträglich als sog. Umkehrdach nachgerüstet werden.

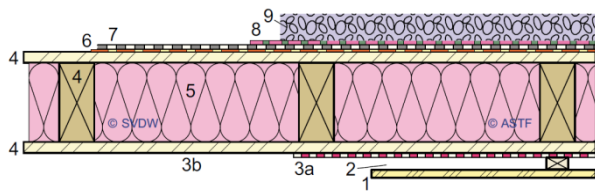


Abbildung 17: Nicht durchlüftete Konstruktion – Tragkonstruktion in der Wärmedämmebene [12]

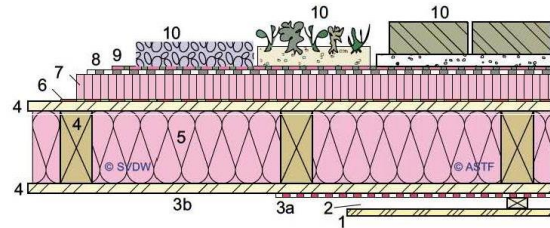


Abbildung 17a: Nicht durchlüftete Konstruktion mit Zusatzdämmschicht an der Kaltseite [12]

Die Robustheit von hinterlüfteten Flachdachaufbauten (Abbildung 18) wird oft überschätzt. Der konstruktive Aufbau kann zwar diffusionsoffen realisiert werden, aber die notwendigen Lüftungsquerschnitte für eine ausreichende Luftwechselrate sind oft zu gering und werden aus formalen (architektonischen) Gründen am Ein- und Auslass an den Dachrändern nicht mit dem nach SIA 271:2007 [13] geforderten 50 % des erforderlichen Lüftungsquerschnitt der Dachfläche eingehalten. Hinzu kommt, dass beim Flachdach ein Luftwechsel nur durch den Staudruck des Windes ausgelöst wird und dadurch erheblich von den Windverhältnissen abhängt.

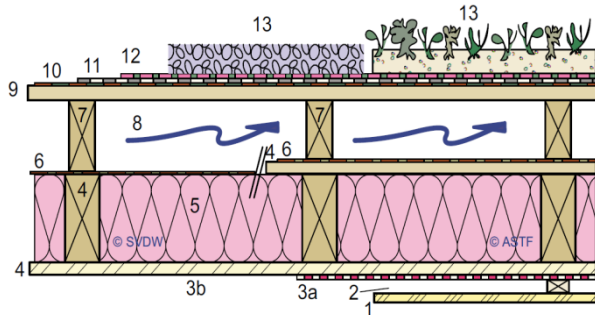


Abbildung 18: Hinterlüfteter Flachdachaufbau [12]

Durch die Verwendung von feuchteadaptiven Dampfbremsen und kapillaraktiven Dämmstoffen werden Baukonstruktionen in der Regel robuster (dauerhafter). Sie sind aber auch kein «Rettungsmittel» für misslungene Baukonstruktionen. Die Verwendbarkeit ist hier in der Regel durch instationäre Berechnungen des Feuchtetransports und des Austrocknungsvermögens abzusichern.

Unkontrollierbare Hohl- bzw. Zwischenräume, Durchdringungen der Luftdichtheitsebenen etc. sind zu vermeiden.

5. Werterhalt durch regelmässige Überprüfung

Erfreulicherweise sind sich die meisten Gebäudebesitzer inzwischen wieder ihrer Verantwortung hinsichtlich des notwendigen Unterhalts und der Wartung ihrer Gebäude bewusst. Sie wissen, dass rechtzeitig erkannte Mängel mit einem vergleichsweise geringen Kostenaufwand wieder Instand gesetzt werden können. Dies senkt neben der bereits erwähnten robusten Bauweise die Unterhaltskosten von Gebäuden erheblich.

Die SIA 269:2011 [14] unterscheidet bei bestehenden Gebäuden in Betriebliche Erhaltungsmaßnahmen (u.a. Überwachung, Monitoring) und Überprüfung des Tragwerkes (Zustandserfassung).

5.1. Überwachung

Die Überwachung umfasst die Besichtigung des Bauwerks auf offensichtliche Mängel oder Schädigungen und deren Dokumentation. Am Tragwerk, das heisst an allen tragenden Bauteilen wie Stützen, Wänden, Decken, Deckenträgern sowie Dachbindern, sind dies vor allem Verformungen, Schiefstellungen, Risse, Durchfeuchtungen, Ausblühungen und Korrosion [14]. Eine solche Überprüfung sollte mindestens alle 12 Monate durch den Eigentümer / Hauswart erfolgen.

5.2. Überprüfung

Die Überprüfung des Tragwerkes erfolgt stufenweise mit zunehmender Vertiefung. Eine generelle Überprüfung erstreckt sich auf das gesamte Tragwerk und sollte in einem 2-5-jährigen Rhythmus durchgeführt werden. Sollte es hierbei zu Auffälligkeiten kommen, ist eine detaillierte Überprüfung durchzuführen. Diese Überprüfungen sollten durch eine fachkundige Person durchgeführt werden.

5.3. Monitoringsysteme

Fest installierte Monitoringsysteme mit und ohne permanente Daten-Fernübertragung haben sich für eine rechtzeitige Schadensfrüherkennung sehr bewährt. Abbildung 19 zeigt einen Auszug eines Klima- und Holzfeuchtemonitorings. So können durch rechtzeitige Vorwarnung die notwendigen Massnahmen meist noch sehr kostengünstig durchgeführt werden.

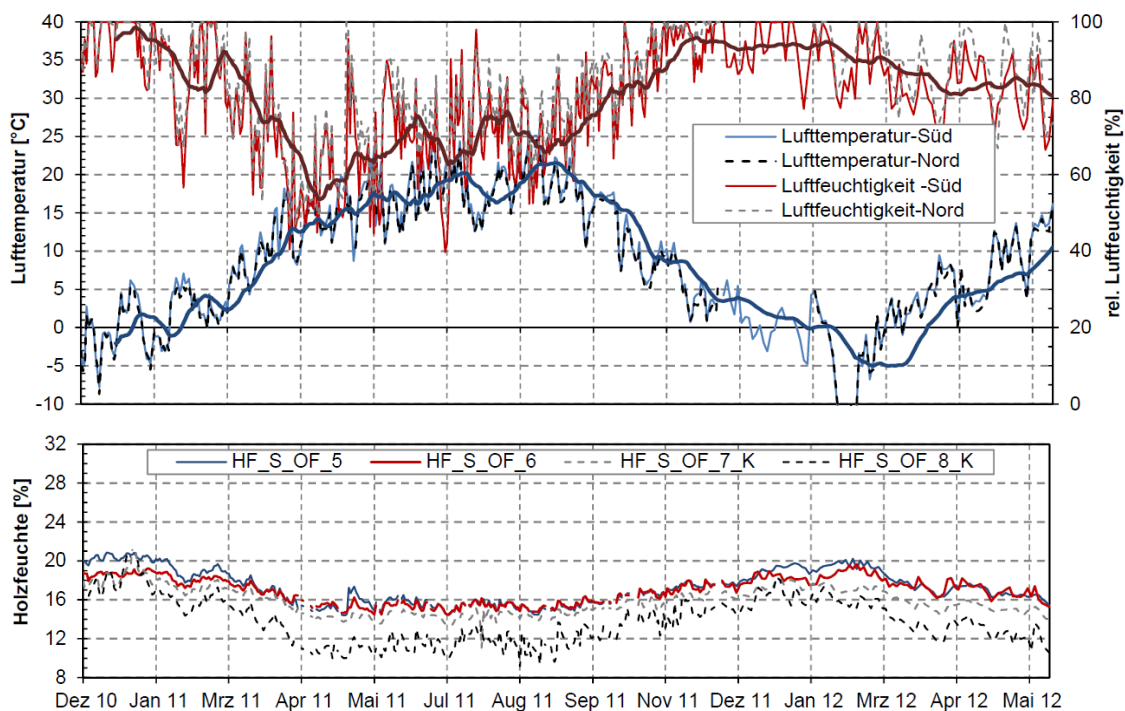


Abbildung 2: Auswertung einer Klima- und Holzfeuchtemessung eines Monitoringsystems

Da die Holzfeuchte einen wesentlichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und die Dauerhaftigkeit von Holzbauten hat, ist der Einbau von Feuchteüberwachungssystemen bei mehrgeschossigen Gebäuden heute Standard.

In verschiedenen Projekten der BFH konnte aufgezeigt werden, dass die Funktionstüchtigkeit der Abdichtung z.B. in Nasszellen heute zuverlässig mit leitfähigen Glasvliesen oder mit Bandsensoren überwacht werden kann.

In mehrgeschossigen Holzbauten können Monitoringsysteme zusätzlich dazu genutzt werden, nähere Informationen über das hygroskopische Verhalten in der Nutzung zu erhalten. Gerade die Unterschiede zwischen Bauphase und Nutzung können weitere Informationen hierzu generieren. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens an der Berner Fachhochschule wurde die Holzfeuchte eines neuen Hohlkastenwandelementes an einem Mustergebäude aufgezeichnet und ausgewertet. Hierzu wurde die dementsprechende Messtechnik bereits in Rahmen der Vorfertigung eingebaut (Abbildung und Abbildung). Am Feuchteverlauf lassen sich die Auswirkungen der jeweiligen Nutzungsphase auf die Holzfeuchte gut erklären (Abbildung).

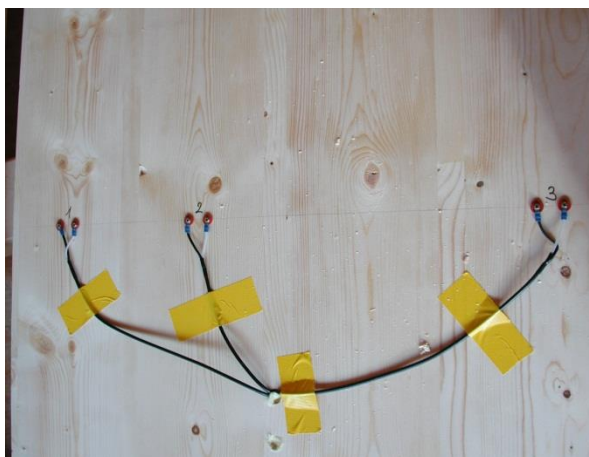


Abbildung 20: Eingebaute Messsonden an einem Hohlkastenelement

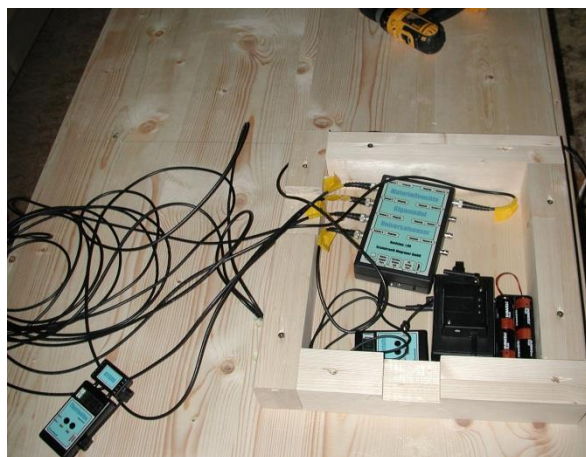


Abbildung 21: Messtechnik für Holzfeuchte- und Klimamessung inkl. Fernübertragung

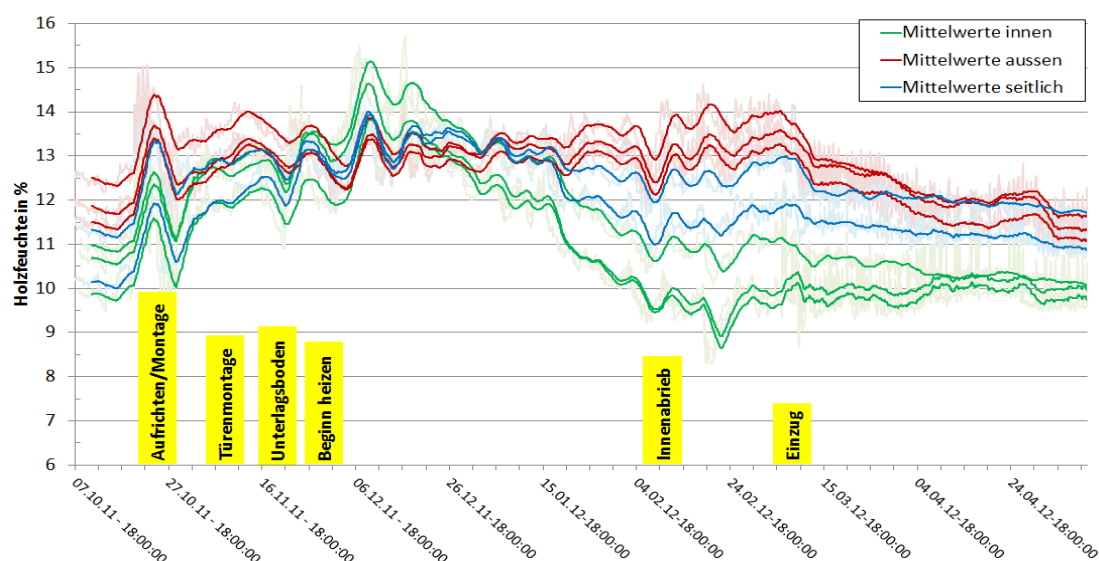


Abbildung 22: Auswertung eines Holzfeuchtemonitorings eines Wandelementes

6. Zusammenfassung

Die in Holz gebauten Gebäude erfüllen bereits heute die Anforderungen der Zukunft. Die hohe (Wohn-) Qualität aber auch die bereits heute umgesetzten hohen Standards bezüglich der Nachhaltigkeit werden zu einer anhaltenden hohen Nachfrage führen. Die stetige Weiterentwicklung der Planungs- und Fertigungsprozesse führen neben einer erhöhten Wirtschaftlichkeit auch zu einem überdurchschnittlichen (hohen) Massstab in der Qualitätssicherung der Gebäude über den gesamten Lebenszyklus.

Die Ansprüche an den Tragwerksentwurf und die statische Nachweisführung der Bauteile steigen. Neben der Tragsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit müssen für die Holz-Hochhäuser Nachweise zur Robustheit und Dauerhaftigkeit erbracht werden. Die beim Projekt Jenga aufgezeigten Methoden zeigen anschaulich anwendungsorientierte Lösungsansätze auf. Gleichwohl erfordert ein HolzHochHaus immer eine gute interdisziplinäre Zusammenarbeit bereits im Entwurf und auch später bei der Umsetzung.

Robuste Bau- und Tragkonstruktionen führen in der Regel zu geringeren Unterhaltskosten. Dies setzt jedoch eine regelmässige Überwachung, Überprüfung und Instandhaltung voraus. Fest installierte Monitoringsysteme sind effizient und haben sich als Frühwarnsystem zum Erkennen von eingetretener Veränderung sehr bewährt. Idealerweise werden diese bereits in der Planungsphase vorgesehen.

7. Literatur

- [1] EN 1991-1-7:2006, Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-7: Allgemeine Einwirkungen – Aussergewöhnliche Einwirkungen, CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel
- [2] Jurybericht «HolzHochHaus» FS 21 Atelier Architektur & Holz, Master Architektur und Master Wood Technology, Berner Fachhochschule in Kooperation mit Branchenverband Holzbau Schweiz
- [3] Starossek, U., Progressive collapse of structures: Nomenclature and procedures, Structural Engineering International 16 (2006) Nr. 2, 113-117
- [4] <http://www.duden.de/node/684018/revisions/1165320/view>
- [5] Pötzl, M., Robuste Tragwerke – Vorschläge zu Entwurf und Konstruktion, Bauingenieur 71 (1996) 481-488, Springer-Verlag 1996
- [6] VDI 6200, Standsicherheit von Bauwerken – Regelmässige Überprüfung, Verein Deutscher Ingenieure, 2010
- [7] Johannes A. J. Huber, Mats Ekevad, Ulf Arne Girhammar & Sven Berg (2019) Structural robustness and timber buildings – a review, Wood Material Science & Engineering, 14:2, 107-128, DOI: 10.1080/17480272.2018.1446052
- [8] Huber, J., Ekevad, Girhammar, Berg (2018): «Structural Robustness of Timber Buildings», WCTE 2018, Seoul, South Korea
- [9] Wenk, T., Erdbeben – auch eine Gefahr in der Schweiz?, Holzbautag Biel 2013
- [10] Lignatec 23/2008, Erdbebengerechtes Entwerfen und Konstruieren von mehrgeschossigen Holzbauten, Zürich, 2008
- [11] Räber, V., Wacker, J., Furrer, L. (2021): «Assignment Report MBW 3044 Jenga-Weg nach Basel», Master of Science in Wood Technology (MWT), Specialization Complex Timber Structures, Bern University of Applied Sciences
- [12] Schnyder, H., Sahli, H., Merkblatt Feuchteschutz bei Flachdächern in Holzbauweise, Gebäudehülle Schweiz, 2007
- [13] SIA 271:2007: Abdichtungen im Hochbau
- [14] SIA 269:2011: Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken
- [15] Starossek U., Haberland M.: Disproportionate Collapse: Terminology and Procedures. Journal of Performance of Constructed Facilities, 24(6):519-528, 2010.