



*Andrea Bernasconi
Dr., Prof. für Holzbau
heig-vd, HES-SO
Yverdon-les-Bains, Schweiz*

Schnittstellen - Anschlüsse – Verankerungen

**Konzepte, Bemessung, Ausführung,
Toleranzen, Einleitung von Erbeben und
Windkräften**

Schnittstellen - Anschlüsse – Verankerungen

Konzepte, Bemessung, Ausführung, Toleranzen, Einleitung von Erbeben und Windkräften

Einleitung

Im Studium des Holzbaus werden die Verbindungsmittel häufig als eigenständiges Kapitel betrachtet und erst im Anschluss an die Grundlagen der Bemessung von Tragelementen aus Holz- und Holzwerkstoffen behandelt. Die Konzeption und die Planung der Tragstruktur folgt häufig dieser Vorgehensweise und die Bemessung der Verbindungen wird erst dann vorgenommen, wenn die Tragstruktur und die Konstruktion bereits festgelegt wurden. Die Verbindung wird als eigenständiges Einzelelement betrachtet und im Hinblick auf die Tragsicherheit bemessen und nachgewiesen. Vor wenigen Jahrzehnten, mit der systematischen Anwendung von grösseren Brettschichtholzelementen hat der Holzbau den Schritt zum Ingenieurholzbau gemacht und die Entwicklung von leistungsfähigen Verbindungen wurde rasch vorangetrieben. Dabei ginge es mehrheitlich um Einzelverbindungen, die es erlauben mussten, grosse, konzentrierte Kräfte in die massive Holzquerschnitte einzuleiten.

Später wurden grossformatige Plattenelemente aus Holz für tragende Zwecke entwickelt und den Ingenieuren zur Verfügung gestellt. Vor ca. 25 Jahren haben die grossformatigen sperrholzartigen Plattenelemente es erlaubt, dünne Flächen als Tragelement des Holzbaus einzusetzen. Später, vor etwas über 10 Jahren haben die Brettsperrholzplatten die Anwendung von grossformatigen, flächenförmigen Tragelementen aus Holz erlaubt.

Gleichzeitig hat sich der Holzhausbau vom traditionellen Ein- oder Zweifamilienhaus zum mehrgeschossigen Wohnhaus entwickelt. Obwohl häufig und in vielen Ländern die Anforderungen des Brandschutzes die Anzahl der Geschosse der Holztragstruktur begrenzen, es stehen immer häufiger Holzgebäuden mit 6 bis 10 - oder noch mehr - Geschossen zur Diskussion, zur Planung und zur Ausführung.

Derartige Konstruktionen verdienen zu Recht die Definition von Ingenieurbauwerken oder von grossen Tragstrukturen und bestehen häufig aus ebenen Flächen, die so zusammen gebunden sind, dass daraus einer dreidimensionalen, grossformatigen Raumtragstruktur entsteht. Dazu wird eine grosse Vielzahl von Verbindungen und Verbindungsmitteln eingesetzt. Die Anschlüsse und die Verbindungen bekommen dabei eine wesentliche Bedeutung.

Verbindungen in den Holzstrukturen und im Holzhausbau

Mehrgeschossige Holzgebäude werden heutzutage hauptsächlich in zwei verschiedenen Tragsystemen hergestellt: die moderne Fassung - dem Mehrgeschossbau angepassten - der Holzrahmenbauweise und die Brettsperrholzbauweise. Die häufig umgesetzte Holzrahmenbauweise besteht aus grossen Stützen und aus den Beplankungen, die für die Aussteifung und für die Abtragung der Schubkräfte zuständig sind. Bei Brettsperrholzsystemen bestehen Wände und Decken aus BSP-Platten, die passend zusammen gefügt werden müssen.

Diese Tragwerke des mehrgeschossigen Hausbaus können, so wie Grosstragwerke aus BSH-Elementen als "grössere Ingenieurstrukturen" bezeichnet werden. Im Hinblick auf die Bedeutung der Verbindungen und der Anschlüsse kann man leicht feststellen, dass im Fall der grossen BSH-Tragstrukturen, die Verbindungen als punktuelle Einzelelemente betrachtet werden können; bei der mehrgeschossigen Tragstruktur aus flächenförmigen Elementen entstehen Verbindungen, die bedeutend grösser sowohl in der Geometrie als auch in der Anzahl der eingesetzten Verbindungsmitteln sind. Die Aufgabe der Verbindung kann also nicht mehr als die einfache Übertragung einer Kraft betrachtet werden, sondern es geht darum, aus vielen Wänden und Decken eine möglichst einheitliche, räumliche Tragstruktur zu bilden. Diese Auf-

gabe ist relativ neu, da derartige Tragstrukturen ebenfalls relativ neu sind. Die modernsten Verbindungsmittel des Holzbaus bilden eine zweckmässige Grundlage zu dieser Aufgabe.

Die Hauptaufgabe einer Verbindung liegt darin, den Kräftefluss von einem Tragelement zum Anderen zu gewährleisten. Jedes Stahlbauhandbuch und jedes Manuskript zur Stahlbauvorlesung fügt aber gleich bei der Einleitung zum Kapitel "Verbindungen" hinzu, dass die Verbindung auch eine ausreichende Steifigkeit im Gebrauchszustand aufweisen muss: dabei wird sowohl an die Anforderungen der Gebrauchstauglichkeit erinnert, als auch auf die möglichen Einflüsse der Verbindungen bei den Effekten zweiter Ordnung aufmerksam gemacht. Als dritte Bedingung wird noch häufig an die Verformungen im Bruchzustand erinnert, im Sinne dass die Verbindungen keine Einschränkung des geplanten und erwarteten Tragverhaltens des gesamten Tragwerkes verursachen dürfen. Diese zusätzlichen Aspekte können auch im modernen Holzbau eine wesentliche Rolle spielen.

Verbindungen als Tragelemente

Bei der Bemessung der Verbindung wird häufig lediglich die Tragfähigkeit betrachtet und diese als einziges Kriterium oder Kennwert der Verbindung angesehen. In der Wirklichkeit stellt aber eine Holzbauverbindung ein eigenständiges Tragelement vor und sein Tragverhalten hängt von vielen Parametern ab.

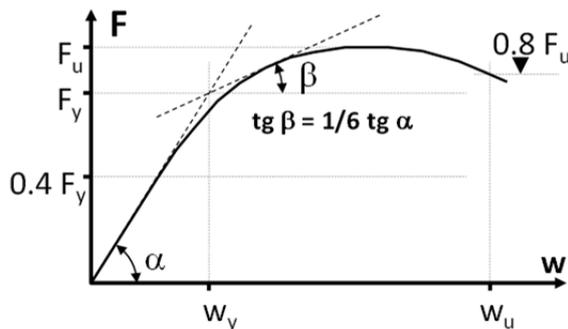


Abbildung 1: Definition des Tragverhaltens einer Verbindung

Die Definitionen des Tragverhaltens der Verbindung sind in der Abbildung 1 dargestellt und werden durch zwei Grössen ausgedrückt:

- das Duktilitätsindex gibt eine Angabe über das Plastifizierungsvermögen der Verbindung und wird als Quotient zwischen der elastischen Verformung w_y und der Verformung im Bruchzustand w_u :

$$D_s = \frac{w_u}{w_y}$$

- das Verschiebungsmodul gibt die Steifigkeit der Verbindung im elastischen Bereich an:

$$K_{\text{ser}} = \frac{F_y}{w_y}$$

Bei Werten von D_s grösser als 3 werden die Verbindungen nach SIA 265 als duktil betrachtet, bei geringeren Werten - definitionsgemäss zwischen 1 und 2 - werden die Verbindungen als spröde betrachtet. Es kann noch hinzugefügt werden, dass die Einteilung der verschiedenen Verbindungsmittel in der Kategorie der höheren Duktilität als Grundlage für die Erdbebenbetrachtung der Tragstrukturen dient und dass dafür in den europäischen Normangaben detaillierteren Hinweise zu finden sind.

Die Ergänzung und Vervollständigung der Definition führt zur Beschreibung des Verschiebungsmoduls im Bruchzustand und zur Betrachtung des allfälligen Spiels der Verbindung bei der Bestimmung des Verschiebungsmoduls, wie in Abbildung 2 dargestellt.

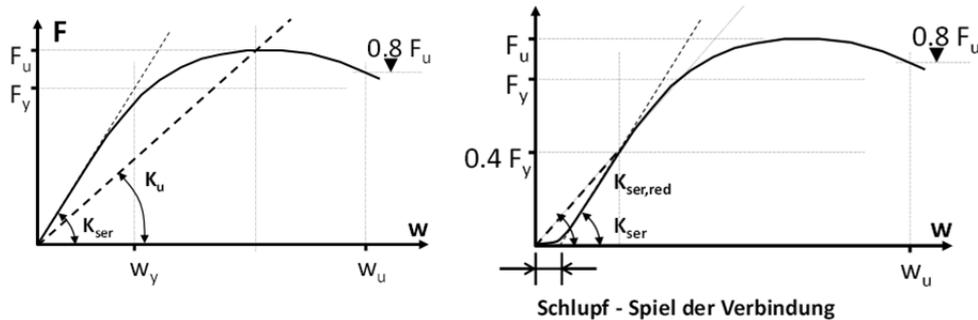


Abbildung 2: Kenngrößen der Verbindungen im bruchzustand und bei einem Verbindungsspiel

Der Wert des Verschiebungsmodul im Bruchzustand K_u wird für die Betrachtung des Tragverhaltens im Bruchzustand verwendet und er wird häufig in vereinfachter Form zu $2/3$ des Wertes von K_{ser} gleich gesetzt. Die Verwendung dieses reduzierten Wertes ist angebracht und korrekt, wenn das mechanische Verhalten im Bruchzustand der betrachteten Tragstruktur von einzelnen Verbindungen bestimmt wird, d.h. wenn diese Verbindungen auch effektiv sich im Bruchzustand befinden. Bei Tragwerken mit vielen Verbindungen - wie bei grösseren Gebäuden aus Holz praktisch immer der Fall ist - muss aber davon ausgegangen werden, dass lediglich eine sehr geringe Anzahl an Verbindungen davon betroffen ist, während die meisten Verbindungen weitgehend im elastischen Bereich sich befinden. Aus diesem Grund werden Tragwerksanalysen von komplizierten Tragstrukturen von Gebäuden aus Holz in der Regel unter Verwendung der Werte K_{ser} durchgeführt. Das wesentliche Beispiel dafür ist die Analyse des Tragverhaltens im Erdbebenfall.

Die Bestimmung der Tragfähigkeit einer Verbindung erfolgt aufgrund der dazu vorgesehenen Bemessungsmodelle und ist nicht Gegenstand der vorliegenden Ausführungen. Die Bestimmung der Steifigkeit der Verbindungen erfolgt grundsätzlich auch aufgrund der verfügbaren Kennzahlen, die aus den Normen, aus der wissenschaftlichen Literatur oder auch aus den Zertifizierungs- und Zulassungsdokumenten entnommen werden können. So ist es möglich, fast jeder Verbindung eine Steifigkeit zuzuordnen und sie als elastisches Tragelement darzustellen. Dabei werden Verbindungen als elastische Federelemente modelliert. Die elastische Federkonstante ist durch das Verschiebungsmodul gegeben.

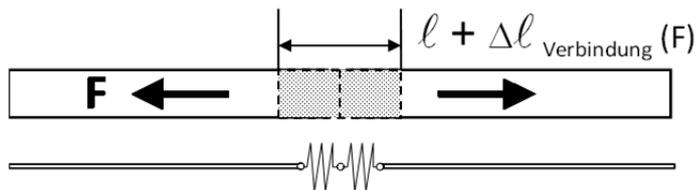


Abbildung 3: Verbindungselement mit elastischen Federelementen

Die Bestimmung der Federkonstante für auf abscheren beanspruchte, stabförmige Verbindungsmittel ist in der Norm SIA 265 angegeben. Für auf herausziehen beanspruchte Schrauben, wie sie in den letzten Zeiten immer häufiger eingesetzt werden, sind in einigen Zulassungsdokumente Angaben über Steifigkeitsannahmen verfügbar. Aus den Steifigkeitskennwerte der einzelnen Verbindungen können bei Bedarf auch die Steifigkeiten komplizierteren Verbindungen hergeleitet werden, indem die verschiedenen Komponenten der Verbindung nach den Regeln der Mechanik zusammengesetzt werden.

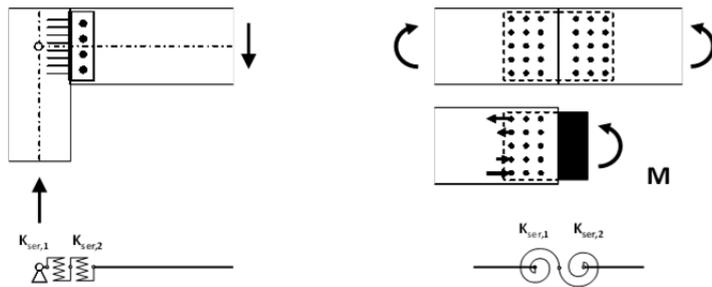


Abbildung 4: Elastische Ersatzelemente für zusammengesetzte Verbindungen

Auswirkungen der Verbindung auf das gesamte Tragsystem

Das Tragverhalten der Verbindung, und insbesondere deren Steifigkeit kann einen nicht unwesentlichen Einfluss auf das Tragverhalten des gesamten Tragwerkes haben. Dies gilt insbesondere dann, wenn das Tragsystem aus einer grossen Anzahl von Verbindungsmitteln und Verbindungen besteht. Das ist der Fall bei grösseren und mehrgeschossigen Gebäuden aus Holz. Bereits die einfache Holzrahmenbauwand besteht aus mehreren Elementen, die in der Regel durch mechanische Verbindungsmittel zusammengesetzt werden.

Diese Einflüsse können anhand einer einfachen Wand dargestellt werden. In der Abbildung 5 ist eine zweigeschossige Wand dargestellt, die als horizontale Aussteifung - oder als Windverband - eingesetzt wird. Die Bestimmung des Tragverhaltens der Wand und insbesondere die Bemessung der dazu notwendigen Verbindungsmittel und Verankerungen erfolgt in der Regel durch die Bestimmung der aus der Windlast resultierenden Beanspruchungen zwischen der Beplankung und den vertikalen Holzständern, sowie aufgrund der daraus entstehenden Verankerungskräfte. Eine nähere Betrachtung des Tragverhaltens der Wand verlangt die Betrachtung des Tragverhaltens der Steifigkeiten der Verbindungen.

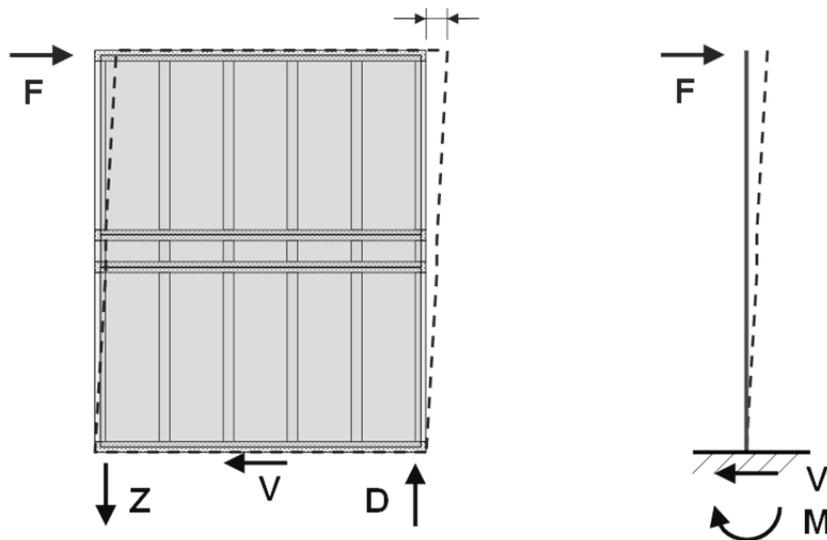


Abbildung 5: Eingespannter Kragarm statischen System der vertikalen Wand

In der Abbildung 5 ist das einfache Tragsystem zu dieser Wand dargestellt, wie es den meisten Berechnungen und Bemessungen zu Grunde gelegt wird: der unten, im Fundament, eingespannte Kragarm. Die Steifigkeitswerte des als Rechenmodell verwendeten Ersatzbalkens können aus den Steifigkeiten der einzelnen Komponenten der Tragstruktur gewonnen werden. Aus den Holzsteifigkeiten lassen sich die Biege- und die Schubsteifigkeit des Balkens ermitteln: die Dehnsteifigkeit der Ständer und die Schubsteifigkeit der Beplankung stellen hier die Ausgangswerte vor, wie in den Abbildungen 6 und 7 dargestellt.

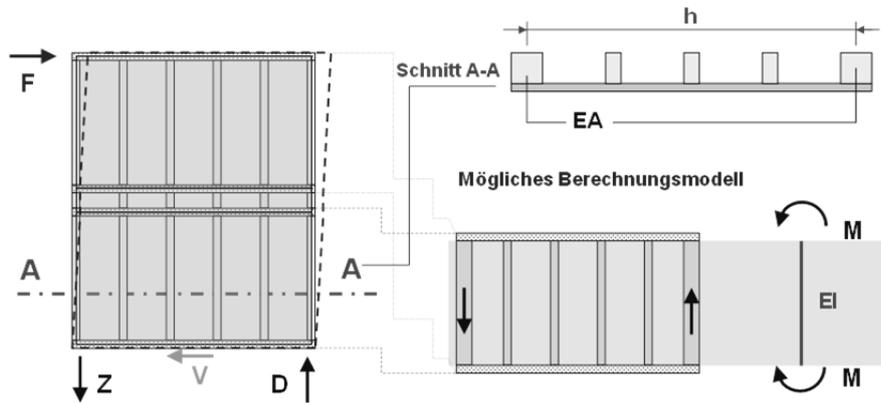


Abbildung 6: Biegesteifigkeit des Ersatzbalkens

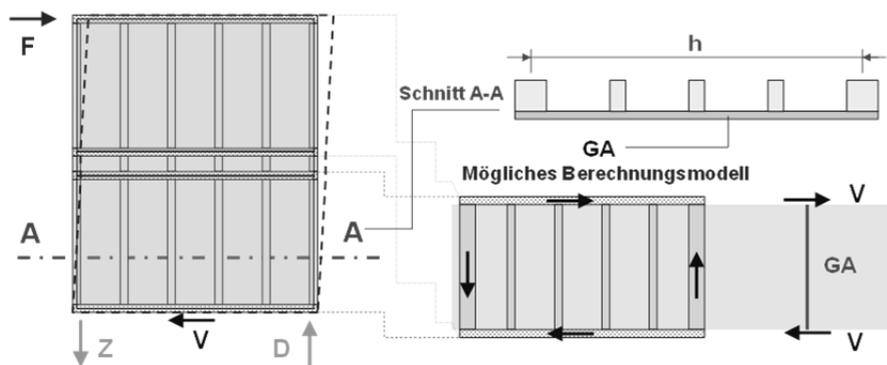


Abbildung 7: Schubsteifigkeit des Ersatzbalkens

Der Einfluss der Verbindungen macht sich in verschiedenen Bereichen bemerkbar und kann ebenfalls "schrittweise" eingeführt werden. Die Verbindung der vertikalen Ständer über der Holzdecke wirkt sich auf die Biegesteifigkeit des Modells aus. Diese Verbindung wird praktisch immer als Druckverbindung für die Übertragung der nach unten gerichteten Kräfte ausgeführt. Bei einer geringen Anzahl Geschosse kann über die Schwellen- und Deckenelemente eine Querbeanspruchung des Holzes in Kauf genommen werden; bei grösseren Anzahl Geschosse - d.h. in der Regel ab 3 Geschossen - wird diese Kontaktverbindung durch direkten Kontakt der Hirnhölzern der Ständer ausgeführt, um die lokalen Querpressungen zu vermeiden. Es ist naheliegend, dass die Steifigkeit dieser Verbindung für diese zwei Fälle wesentlich unterschiedlich sein wird. Für die allfällig entstehenden Zugkräfte muss die Verbindung anders ausgebildet werden: je nach Grösse der Kräfte kommen unterschiedliche Lösungen zum Einsatz, die zu einer jeweils unterschiedlichen Steifigkeit führen. Es entsteht aber in allen Fällen eine Verbindung mit unterschiedlichem Tragverhalten auf Zug und auf Druck. Daraus ergibt sich eine rechnerische Modellierung, die unterschiedliche Steifigkeitseigenschaften in Abhängigkeit der Krafrichtung aufweisen müsste. Die Betrachtung der Steifigkeiten und deren Übertragung ins Tragmodell ist schematisch in der Abbildung 8 dargestellt und ergibt eine elastische Biegeverbindung zwischen den unteren und den oberen Stabelementen.

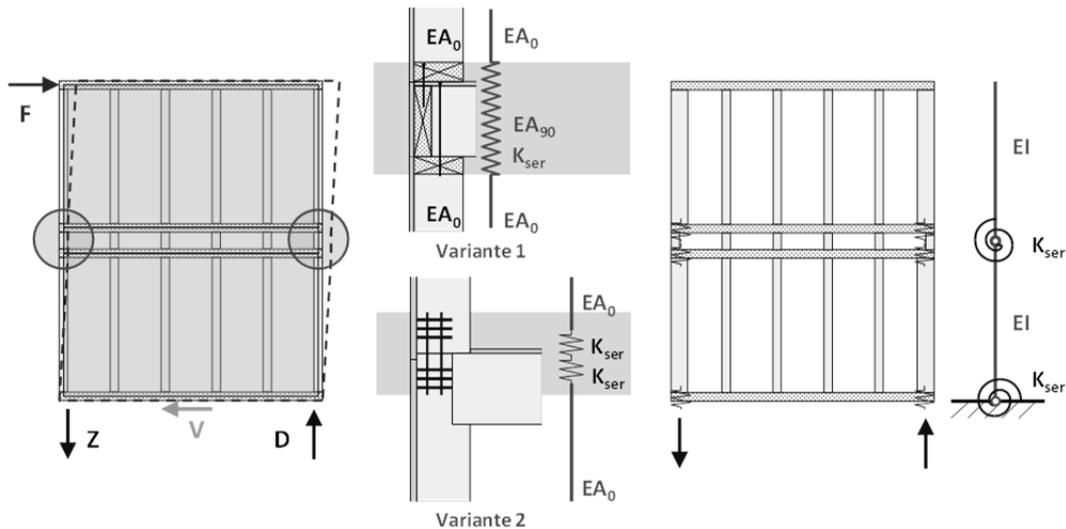


Abbildung 8: Steifigkeit der Verbindungen der äusseren Ständer: Biegesteifigkeit des Knoten im Modell

Die Verformbarkeit der Verbindungen ist auch bei den Schubverbindungen zu berücksichtigen. Diese befinden sich bei den Wandrändern, wo die Beplankung mit den Ständern mechanisch verbunden ist, sowie bei jedem Plattenstoss der Beplankung. Auf die gleiche Art und Weise erfolgen die Verbindungen zwischen der Beplankung des unteren Geschosses und der Beplankung des oberen Geschosses über mechanische Verbindungsmitteln, die je nach Ausführungsweise und verwendetem Deckensystem anders ausgebildet werden können. Die Nachgiebigkeit auf Schub der Verbindungen kann ebenfalls durch elastische Federelemente modelliert werden, die ins Modell des Tragsystems eingeführt werden.

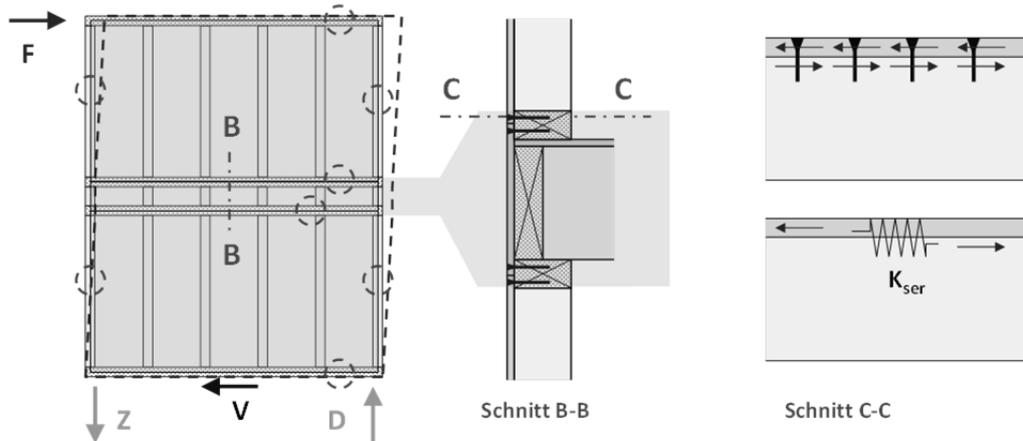


Abbildung 9: Einfluss der Verformbarkeit der Verbindungen auf die Schubsteifigkeit der Wand

Das mögliche Stabtragwerk zur Modellierung der zweigeschossigen Wand ist in der Abbildung 10 dargestellt. Die Anzahl erforderlicher Federelemente ist relativ gross und gilt auch als Zeichen für die Komplexität einer exakten Modellierung derartiger Systeme. Die reine numerische Betrachtung erlaubt verschiedene Vereinfachungen, wie die direkte Einbindung der Steifigkeit der Verbindungen in die Steifigkeitswerte der Holzelemente, um das Modell und insbesondere dessen Berechnung zu optimieren.

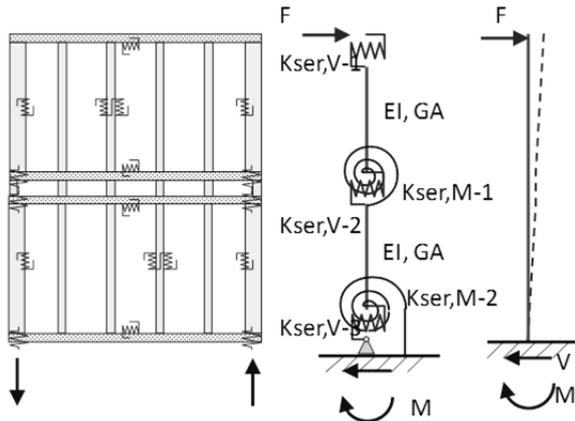


Abbildung 10: Statisches Stabmodell zur Berechnung der zweigeschossigen Wand mit elastischen Federelementen zur Betrachtung der Nachgiebigkeit der Verbindungen

Eine derartige Modellierung des Tragsystems eines Gebäudes kann auf den ersten Blick als aufwendig und kompliziert erscheinen; die Frage nach Sinn und Notwendigkeit dieser Betrachtung kann gestellt werden. Die Erweiterung der Überlegung, die gerade für eine Einzelwand aufgestellt wurde, auf ein System mit mehreren Wänden zeigt welche Auswirkungen sich ergeben können. Unter der Annahme, dass die Decken als unendlich steife Elementen angenommen werden können, erfolgt die Aufteilung der horizontalen Kräfte auf die verschiedenen Wandelemente nach dem Verhältnis der Steifigkeit der einzelnen Wänden. In der Abbildung 11 ist ein aus mehreren Wandelementen bestehendes Gebäudesystem dargestellt. Die horizontalen Lasten sind durch die Kräfte F dargestellt und können als bekannt vorausgesetzt werden. Die Verteilung dieser Kräfte auf die verschiedenen Wandelemente ist nicht nur zur Bemessung der Verbindungsmittel der Wandkonstruktion, sondern auch uns insbesondere für die Bestimmung der erforderlichen Verankerung der äusseren Ständer in die Fundamente erforderlich.

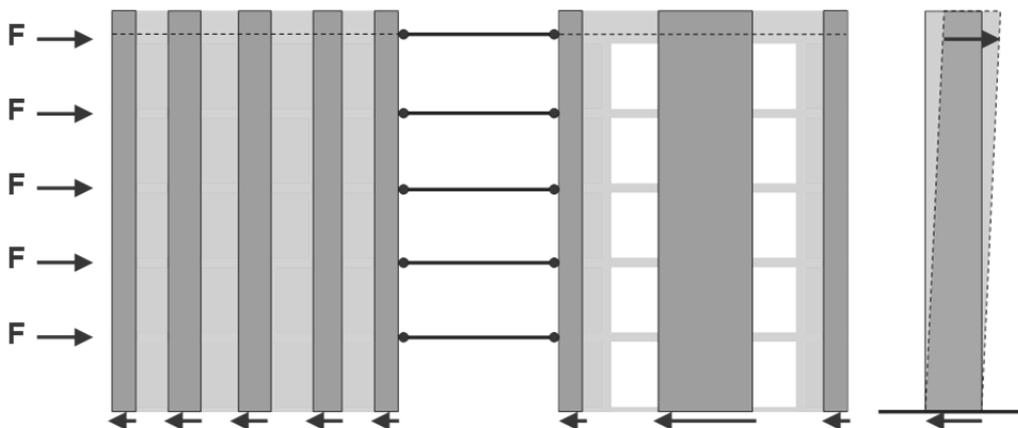


Abbildung 11: System aus zwei Gebäudewänden, jeweils aus mehreren Teilwänden bestehend

Die für gewöhnliche Holzbauten in Rahmenbauweise übliche Aufteilung der Kräfte setzt voraus, dass die Steifigkeit der Wände massgebend von der Schubsteifigkeit der Wandkonstruktion abhängig ist. Daraus ergibt sich eine Verteilung der Kräfte, die proportional zur jeweiligen Länge der Wandelemente ist. Dieses Prinzip ist in der Abbildung 12 dargestellt. Dabei wird angenommen, dass die Biegesteifigkeit des Wandelementes in dieser Hinsicht vernachlässigt werden kann, weil sein Anteil zur Gesamtverformung w des Systems sehr gering ist. Dies ist bei Systemen mit grossem Grundriss und geringer Anzahl Geschosse eindeutig der Fall.

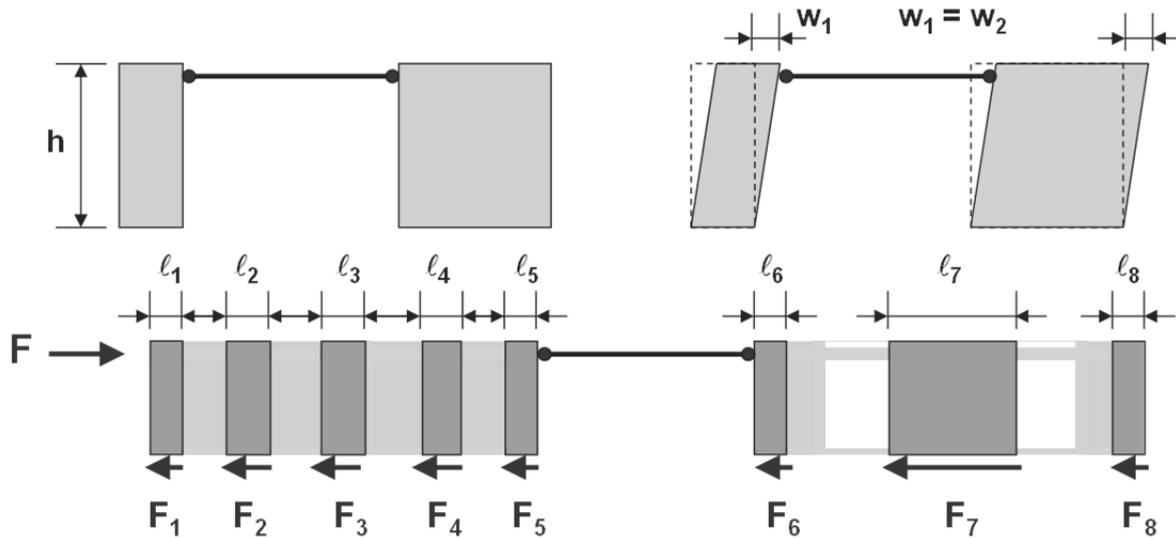


Abbildung 12: Kräfteaufteilung in die Wandelemente nach der Schubsteifigkeit

Bei einer grösseren Anzahl Geschosse kann aber auch die Biegeverformung der Wände einen durchaus grösseren Einfluss aufweisen, insbesondere dann, wenn die Wandelemente eine geringe Länge im Verhältnis zur Gebäudehöhe aufweisen. Die Betrachtung der Biegesteifigkeit der Wände führt zu einer Verteilung der Kräfte in den verschiedenen Wandelementen, die mindestens proportional zum Quadrat der Länge der Wandelemente ist. Die Biegesteifigkeit ergibt sich nämlich aus dem Abstand der äusseren Ständer im Quadrat. Bei steiferen Wandkonstruktionen, oder bei massiven Wandelementen kann die dritte Potenz der Wandlänge als Parameter gelten. Eine genaue Bestimmung der Kräfte in den einzelnen Wandelementen kann nur dann ermittelt werden, wenn sämtliche Steifigkeitsparameter der Tragstruktur bekannt sind: dies beinhaltet sowohl die Kennwerte der eingesetzten Materialien, als auch die Kennwerte der eingesetzten Verbindungsmittel. Das dazugehörige Tragmodell muss dementsprechend zusammengestellt werden: ein Ausschnitt davon ist in der Abbildung 13 dargestellt.

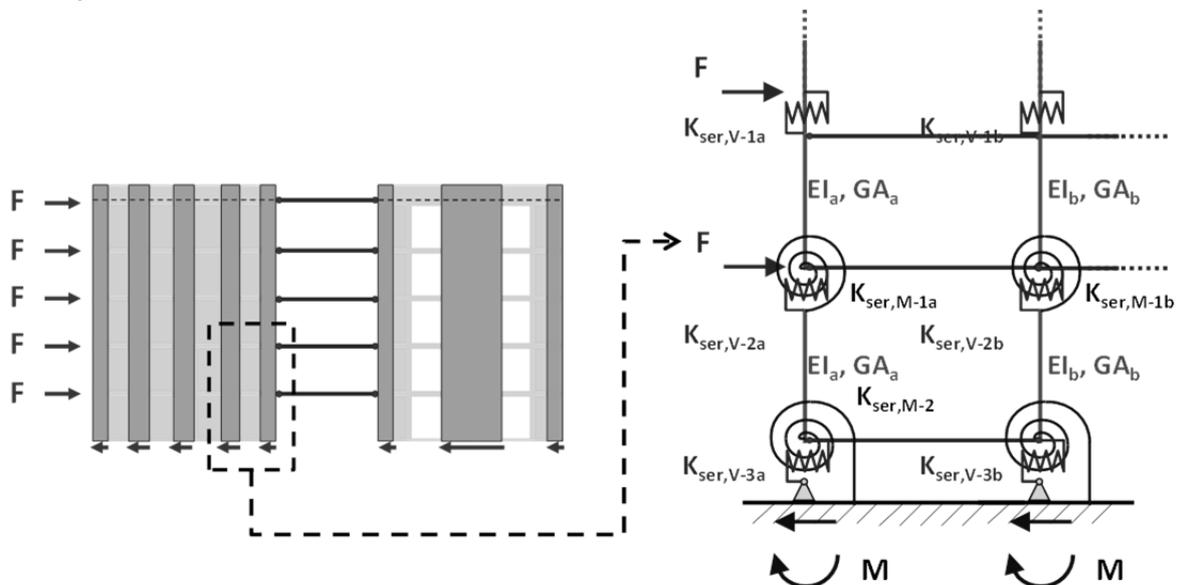


Abbildung 13: Ausschnitt aus dem Tragmodell des gesamten Gebäudes

Die Berechnung des gesamten, vollständigen Tragsystems

Das in Abbildung 13 dargestellte Tragsystem kann so erweitert und vervollständigt werden, dass nahezu alle Gebäudestrukturen zu einem theoretischen Tragsystem zusammengefasst werden können. Das gezeigte System besteht aus Stabelementen zur Modellierung der Wände und aus linearen, elastischen Federelementen zur Modellierung der Verbindungen. Die Anzahl an Steifigkeitsparametern in einem solchen Modell ist enorm gross. Die heutigen Rechensysteme erlauben es zwar, derartige Systeme rechnerisch zuverlässig zu lösen, machen aber keine zuverlässige Aussage über die Korrektheit der angenommenen Steifigkeitsparametern der einzelnen Komponenten.

Die kritische Betrachtung des Modells, die eigentlich als Bestandteil jeder statischen Berechnung sein sollte, müsste folgende Aspekte betrachten:

- die Steifigkeitskennzahlen der Holzelemente sind Schwankungen unterworfen, die in der Regel durch die Betrachtung von Mittelwerten erfasst werden; das Auftreten von Extremwerten in einzelnen Bauteilen kann die gemachten Annahmen aber in Frage stellen und einen Einfluss auf die Endergebnisse haben;
- die Steifigkeitskennzahlen der Verbindungen können zwar in vielen Fällen aus Normangaben hergeleitet werden; es handelt sich aber häufig um theoretische Werte, die versuchsmässig für einzelne, bestimmte Verbindungsmittel und Verbindungen an einzelnen Ausführungsvarianten ermittelt und dann verallgemeinert wurden; häufig sind diese Werte zum Zweck der Berechnung von Verformungen von Einzelverbindungen ermittelt worden;
- die Ausführung der Holzkonstruktion ist bei der statischen Berechnung in der Regel zwar vollständig konzipiert, bemessen und nachgewiesen; bei der Ausarbeitung der Ausführungsplanung kommen aber häufig weitere Überlegungen hinzu, die zu Modifikationen der ursprünglichen Planung führen; die Entscheidung, einzelne Wandelemente über zwei Geschosse als Einzelstück anzufertigen kann bereits zu einer Modifikation des Tragmodells führen;
- die einfache Verwendung von alternativen Verbindungsmitteln, unter der üblichen Bedingung dass die zu übertragenden Kräfte nachgewiesen werden müssen und somit die Tragsicherheit der Struktur gewährleistet ist, wird in der Regel problemlos akzeptiert; dabei entstehen andere Kennwerte der Steifigkeiten, die "die Exaktheit" des verwendeten Tragmodells in Frage stellen können;
- die Tatsache, dass die hier gezeigten Überlegungen nicht nur für die Wände des Gebäudes, sondern auch für die Decken gelten, macht die gesamte Betrachtung noch anfälliger auf Ungenauigkeiten der rechnerischen Erfassung der Einzelkomponenten.

Diese einfachen Bemerkungen zeigen, wie viele Unsicherheiten und weniger erfassten Einflussgrößen in den Rechenannahmen enthalten sein können. Das soll aber nicht heissen, dass die detaillierte Erfassung der Tragstruktur in ein numerisches Rechenmodell sinnlos oder gar unbrauchbar sein muss. Es geht vielmehr darum, die "scheinbare Genauigkeit" der zahlenmässigen Angaben nicht zu überbewerten und in angebrachter Art und Weise zu hinterfragen. Dies gilt insbesondere dann, wenn derartige Betrachtungen dazu dienen, die maximalen Beanspruchungen festzulegen und daraus die Tragfähigkeit der Struktur nachzuweisen. Bei derartig aufwendigen Tragmodellen, haben die Steifigkeitsparameter der verschiedenen Elemente einen direkten Einfluss auf die Bestimmung der Schnittkräfte, während die in der Berechnung eingesetzten Rechenwerte der Steifigkeiten ursprünglich zur Bestimmung von Verformungen - zumindest teilweise - definiert wurden.

Die Frage nach einer geeigneten Methode zur Erfassung und zur Berechnung derartiger, komplexer Tragsysteme kann nicht eindeutig und definitiv beantwortet werden, obwohl Ansätze und Modelle dazu vorliegend sind. Bei grösseren Gebäuden aus Holz, wie heute in verschiedenen Ländern geplant und gebaut werden, muss man davon ausgehen, dass die daraus entstehende Tragstruktur als grösseres Ingenieurtragwerk betrachtet werden muss und

dass dabei die heutige Erfahrung noch sehr begrenzt ist. Der Einfluss der Verbindungen auf das gesamte Tragwerk scheint auf jeden Fall mehr als wichtig zu sein. Die Tatsache, dass grössere Gebäude aus Holz in der Regel aus Wand- und Deckenelementen bestehen, die eine räumliche Tragstruktur bilden, ohne dass eine Kontinuität des Materials von einem Element zum Anderen vorliegt, ist und bleibt eine Besonderheit des Holzbaus, mit der im Bau von grösseren Tragstrukturen lediglich die ersten Schritte gemacht werden.

Eine Betrachtung von Grenzwerten, oder die Betrachtung einer Variation der wesentlichen Kenngrössen kann somit dringend empfohlen werden, wenn das gesamte Tragsystem die gewöhnlichen und "eingeübten" Grössen und geometrischen Proportionen übersteigt.

Beispiele - Umsetzung

Anhand zwei konkreter Beispiele wird die Umsetzung der dargestellten Überlegungen erläutert. Es handelt sich um zwei Gebäuden, die aufgrund der Anzahl Geschosse und der absoluten Dimensionen als unüblich dargestellt werden können. Es werden lediglich Einzelaspekte dargestellt.

6.1 Ein besonderes 6-geschossiges Gebäude

Ein 6-geschossiges Gebäude wurde in reiner Holzbauweise hergestellt. Die Konstruktion wurde als Holzrahmenbau entwickelt und realisiert. Mit einem Grundriss von 12,4 auf 12,4 m und einer Gesamthöhe von fast 18 m kann das Gebäude als Turm, oder zumindest als schlank definiert werden. Eine schematische Darstellung der Konstruktion und des Grundrisses sind in der Abbildung 14 dargestellt.

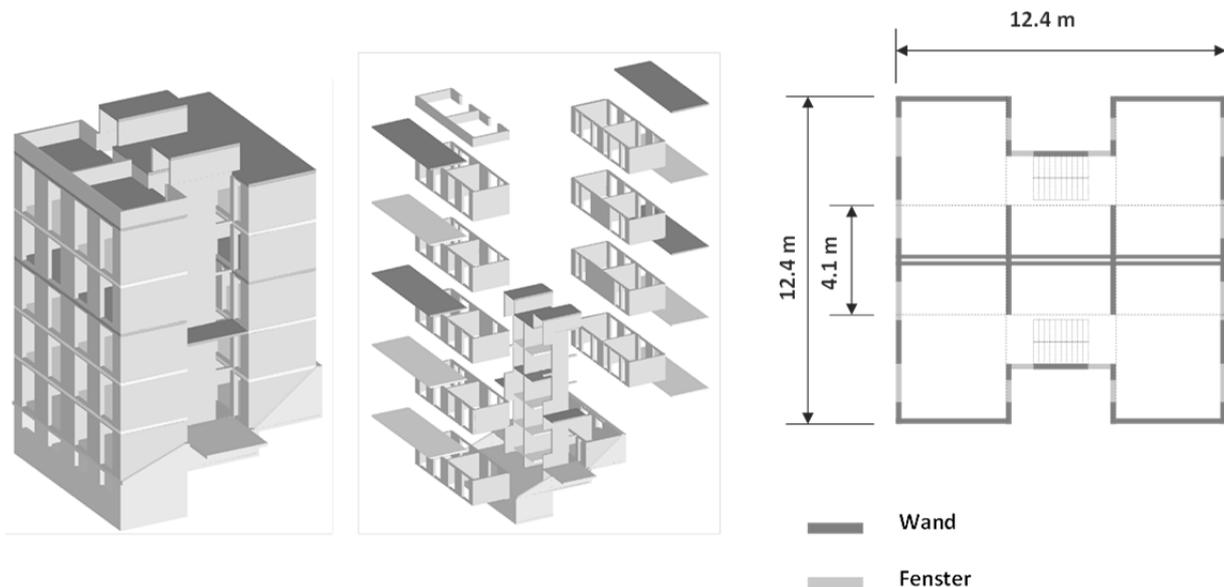


Abbildung 14: Übersicht und Grundriss des Gebäudes

Die Tragstruktur ist durch die Regelmässigkeit im Grundriss und in der Höhe gekennzeichnet. Die Wände haben unterschiedliche Länge und erstrecken sich über die Gesamthöhe des Gebäudes. Die gesamte Struktur ist symmetrisch und regelmässig aufgebaut. In der Abbildung 15 sind die Wandaufbauten dargestellt; es kann davon ausgegangen werden, dass die Tragstruktur des Gebäudes aus Wandstreifen besteht, die durch die Decken steif untereinander verbunden sind. Die einzelnen Wandelemente wurden teilweise über zwei oder drei Geschosse kontinuierlich ausgeführt, da dies als die einfachste Lösung im Hinblick auf Produktion und Transport sich erwiesen hat; dies wurde erst im Rahmen der Ausführungsplanung entschieden. Zur Abtragung der Horizontalkräfte aus Wind und Erdbeben wurden sämtliche Wandelemente berücksichtigt.

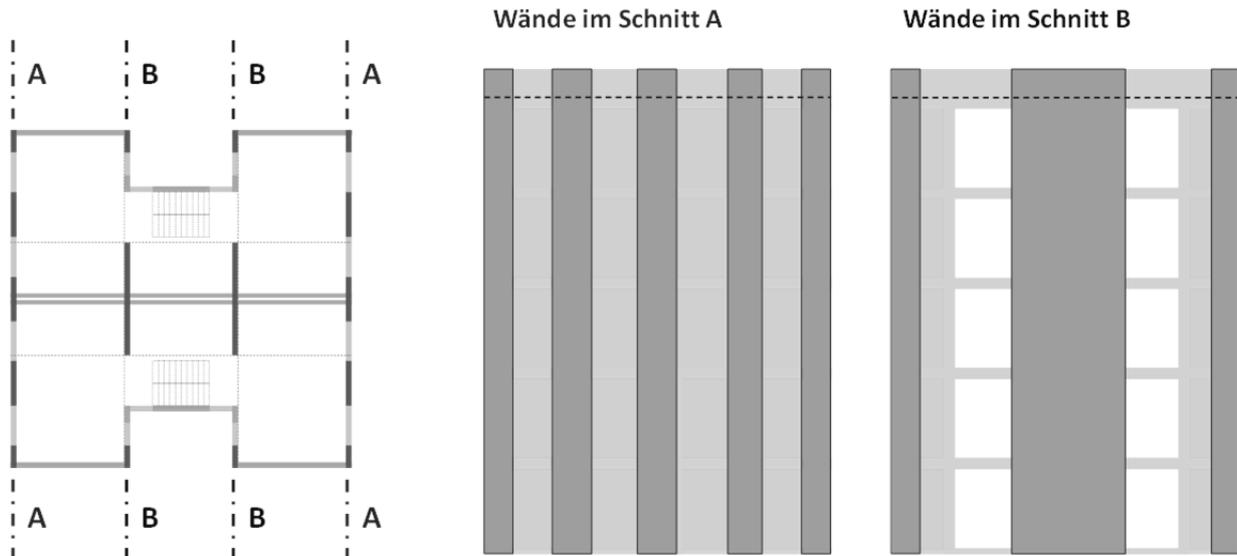


Abbildung 15: Aufbau der Wände in mehreren Wandelementen

Die Aufteilung der Kräfte auf die jeweiligen Wandelemente erfolgte zunächst unter der Betrachtung der zwei in Kapitel 5 beschriebenen Grenzfälle, d.h. durch die getrennte Betrachtung der Annahme der Vernachlässigung der Biege- bzw. der Schubsteifigkeit der Wände. Dies wurde durch die teilweise sehr schlanken Wänden - hohe Biegeverformungen - und teilweise durch den unterschiedlichen Aufbau der Wandelemente - Elemente aus einer, zwei und drei Geschosshöhen - begründet. Jedes Wandelement wurde für den massgebenden, ungünstigen aus diesen zwei Fällen bemessen. Damit wurden sowohl die Wandbeplankungen und deren Verbindungen bemessen, als auch die Verankerungen im Fundament. Die Verankerungen im Fundament für die grösseren Wänden, die eine Länge von ca. 4,1 m aufweisen, müssen für eine Zugkraft von 330 kN ausgelegt werden, die aus der Annahme der grossen Biegesteifigkeit der Wand sich ergeben hat. Bei den schmalsten Wänden, die eine statische Wandlänge von ca. 90 cm aufwies, ergeben sich geringere Zugkräfte, die jedoch zu einer Bemessungskraft der Zuganschlüsse von ca. 90 kN geführt hat. Die Verbindungen wurden mit selbstbohrenden Stabdübeln und Stahllaschen ausgeführt, damit die Montageungenauigkeiten direkt bei der Herstellung der Verbindung ausgeglichen werden konnten.

Eine detailliertere Modellierung der Tragstruktur erlaubt zwar eine leichte "Optimierung" der auftretenden Kräfte und möglicherweise eine Reduktion einzelner Verbindungen und Tragelemente. Die Anzahl unbekannter Parameter führte in diesem Fall dazu, dass sämtliche Tragelemente aufgrund der einfachen Betrachtung konzipiert und bemessen wurden.

Obwohl es für Eingeweihte nahe liegt, scheint es an dieser Stelle wichtig darauf hinzuweisen, dass am Fusspunkt jedes Wandelementes derartiger Konstruktionen mit einer beträchtlichen Zugkraft zu rechnen ist. Diese Kräfte müssen konsequent in die Fundamente eingeleitet und verankert werden.

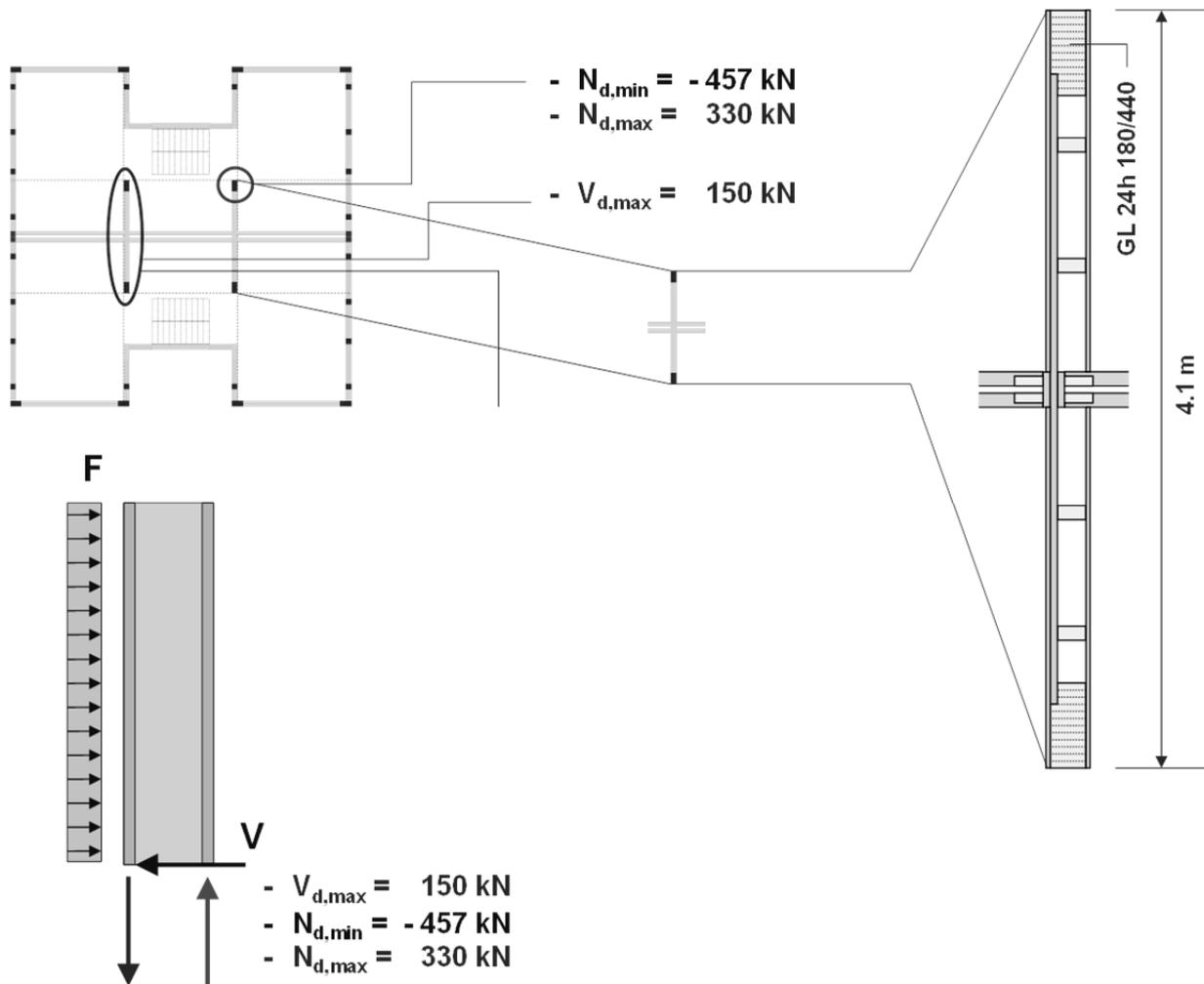


Abbildung 16: Verankerungskräfte am Fuss der zentralen Wand

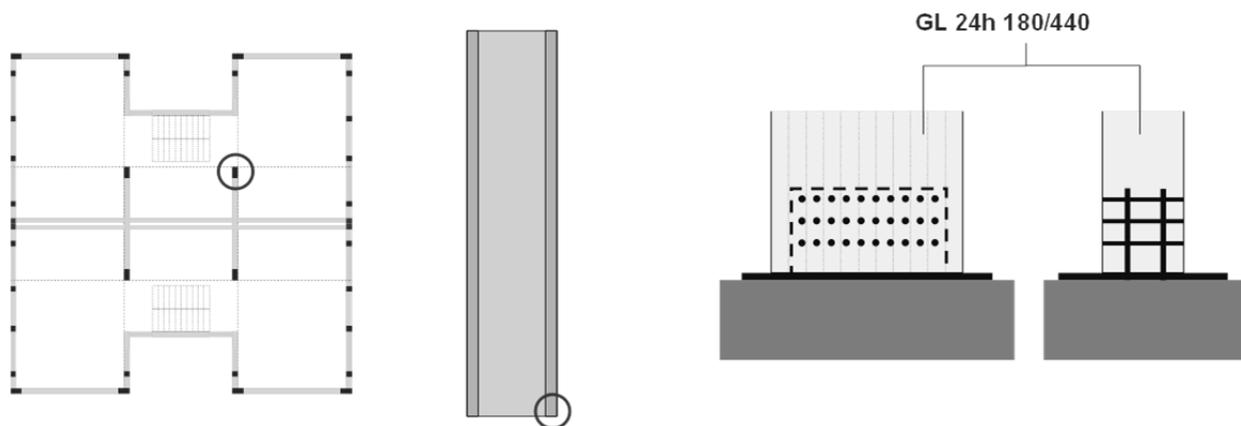


Abbildung 17: Ausbildung des Anschlusses am Fusspunkt

Mehrgeschossiges Gebäude aus BSP-Elementen

Die Tragstruktur eines mehrgeschossigen Gebäudes im städtischen Gebiet besteht aus BSP Wand- und Deckenelementen. Die vom Fundament bis zum obersten und neunten Geschoss durchgehenden Wänden bilden zusammen mit den Decken eine geschlossene, räumliche Tragstruktur. Weitere Bestandteile der Haupttragstruktur, wie etwa durchgehende Stützen oder rahmenartige Elemente sind nicht vorhanden. Bei einer Gesamthöhe von knapp 30 m Höhe und aus konstruktiven Überlegungen werden die Wandelemente jeweils mit der Ge-

schosshöhe hergestellt. Bei jeder Geschossdecke sind die Wände also unterbrochen und müssen gestossen werden. Das Gebäude befindet sich in einem Erdbebengebiet und auch in diesem Fall gelten die Prinzipien der Regelmässigkeit der Struktur sowohl im Grundriss, als auch in der Höhe. Mit einem Grundriss von ca. 14 auf 20 m kann das Gebäude als Turm beschrieben werden. Im Grundriss besteht die Tragstruktur aus drei Wandebenen in einer Richtung und 4 Wandebenen in die andere Richtung. In der Abbildung 18 ist die Geometrie des Gebäudes schematisch dargestellt.

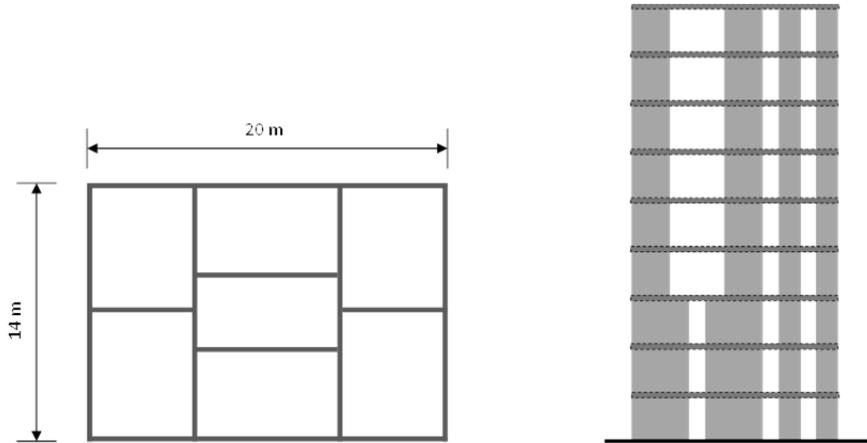


Abbildung 18: Grundriss und Ansicht einer Fassade

Von besonderem Interesse bei derartigen Konstruktionen ist das Tragverhalten bei den horizontalen Belastungen, wie Wind und Erdbeben. Die maximale, horizontale Last aus der Windbeanspruchung wird mit dem dazugehörigen Anteil an ständigen Lasten kombiniert. Das Gesamteinspannmoment im Fundament kann somit auf sehr einfache Art und Weise bestimmt werden. Diese Betrachtung zeigt, dass die durch die Windlast verursachten Exzentrizität der Vertikallast aus dem Gewicht des Gebäudes sehr gering ist und bei einer steifen, räumlichen Konstruktion zu keiner Zugkraft in den Wandelementen und in den dazu gehörigen Verbindungen führen würde. In Wirklichkeit besteht die Tragstruktur aus einer Vielzahl von Wandelementen, die einfach aufeinander gelegt sind und erst durch die Wirkung der Verbindungsmittel zu einer räumlichen Tragstruktur werden. Die Betrachtung der einzelnen Wandstreifen, wie im Kapitel 5 beschrieben, führt zu einem ganz anderen Ergebnis und die Einspannmomente am Fusspunkt der Einzelwandelemente ergeben sehr grosse Zugkräfte.

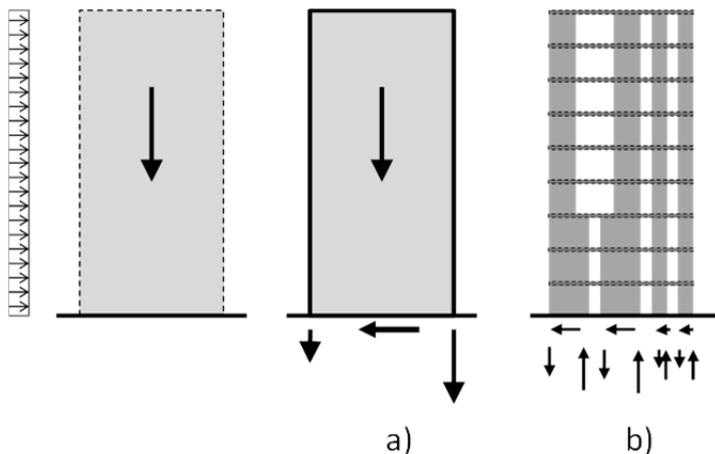


Abbildung 19: a) Steife, räumliche Struktur - b) getrennte Wandstreifen

Die effektive räumliche Tragwirkung der gesamten Struktur befindet sich zwischen diesen zwei Extremfällen und hängt direkt von der Wirkung der Verbindungen ab. Dabei gilt die Steifigkeit der Verbindung als Hauptparameter; anders ausgedrückt die Beanspruchungen in den verschiedenen Elementen der Struktur sind direkt von der Steifigkeit der Verbindungen abhängig und die einfache Bemessung der Verbindungen auf der Basis der entstehenden Kräfte und des Nachweises der Tragfähigkeit kann nicht als einzelnes Bemessungskriterium gelten. Die Steifigkeit der Verbindungen wird somit zum zentralen Bestandteil der Analyse der Tragsystems und zur Bemessung der gesamten Konstruktion. Die oben bereits dargestellten Bemerkungen zur Genauigkeit der diesbezüglich vorhandenen Angaben stellen die Frage nach der Zuverlässigkeit der Modellierung und der sich daraus ergebenden Ergebnissen.

Im vorliegenden Fall wurden zuerst einigen Grundtypen von Verbindungen festgelegt, die im Hinblick auf die erwarteten Kräfte und auf die Abmessungen der Wandelemente zweckmässig erschienen. Dabei wurde auf die häufig bei den üblichen Gebäudekonstruktionen aus BSP eingesetzten Verbindungssystemen, basierend auf punktuellen, exzentrischen Winkelprofilen und seitliche Verankerung der Zugkräfte, verzichtet. Die Grösse der anzuschliessenden Kräfte und die Anforderung, einen möglichst kontinuierlichen Kraftfluss zu gewährleisten, aber insbesondere auch die Anforderung auch bei der Steifigkeit der gesamten Tragstruktur Diskontinuitäten und Unregelmässigkeiten zu vermeiden, hat zum Vorschlag von gleichmässig über die Gesamtlänge der Stossfugen verteilten Verbindungen geführt. Eine Abstufung der Verbindungen erfolgt sowohl entlang der Stossfugen als auch über die Geschosshöhe; zudem müssen die Verbindungen an die unterschiedlichen Dicken der Wandelemente angepasst werden, die abnehmend bei zunehmender Gebäudehöhe gewählt wurden. In der Abbildung 20 ist eine Auswahl der betrachteten Verbindungssysteme dargestellt.

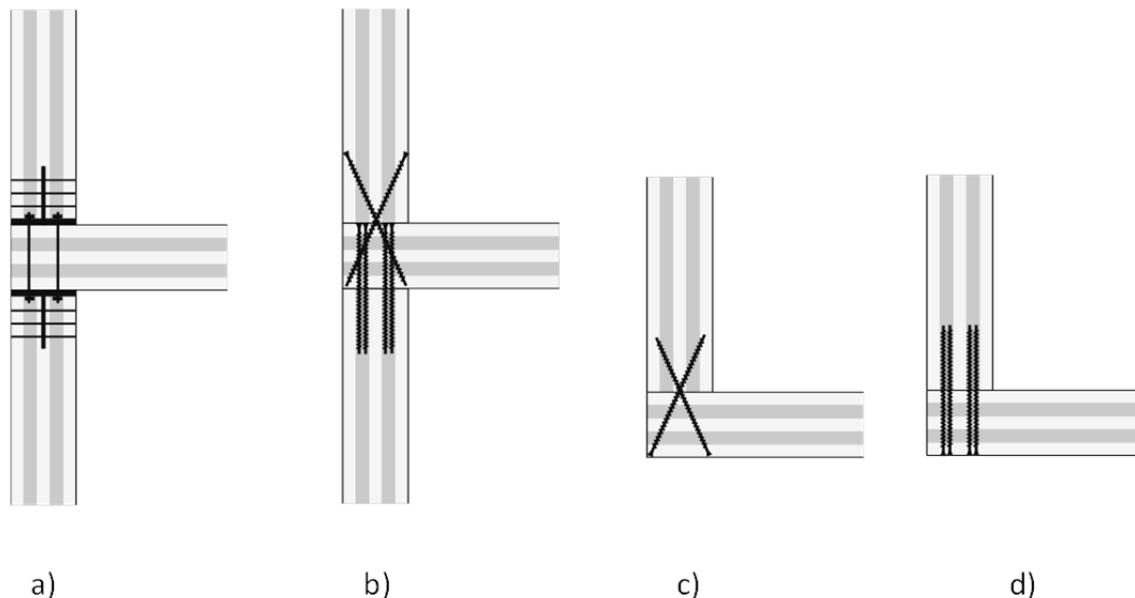


Abbildung 20: Grundtypen der Verbindungen: a) Stabdübel und Stahlteile, b) Schrauben, c) und d) Eckverbindungen

Die Steifigkeiten dieser Grundtypen von Verbindungen wurden aufgrund der verfügbaren Unterlagen definiert und numerisch dargestellt. Das numerische Modell zur Tragwerksanalyse wurde dreidimensional anhand von Flächenelementen aufgebaut. Die Abmessungen der Wand- und Deckenelementen wurden auf die üblichen Herstellungs- und Lieferbedingungen angepasst; dabei wurde auf eine möglichst geringe Anzahl von Montagestössen geachtet, um die Gesamtsteifigkeit nicht unnötig negativ zu beeinflussen. In der Abbildung 21 ist die schematische Darstellung eines Stosses Wand-Decke-Wand mit den dazugehörigen elastischen Verbindungselementen angegeben, so wie diese in die Modellierung eingeführt wurden.

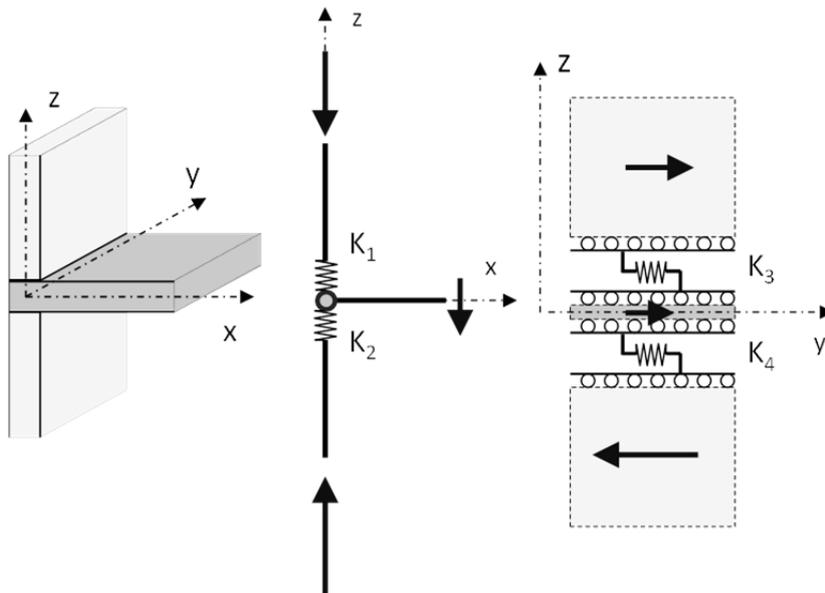


Abbildung 21: Tragmodell zur Verbindung Wand-Decke-Wand

Um die Analyse durchsichtig zu behalten, aber auch um die Empfindlichkeit des Gesamtsystems auf die wesentlichen Parameter der Verbindungen abschätzen zu können, sind die berechneten Kennwerte der Steifigkeit der Verbindungen als Parameter betrachtet worden. Diese Kennwerte wurden somit über einen Bereich variiert, das die Steifigkeitswerte aller eingesetzten Verbindungen abdeckt. Als Basis für die Überprüfung und für den Sicherheitsnachweis der Tragelemente wurden die Extremwerte aus dieser Betrachtung angenommen. Die Analyse des Erdbebenfalls wurde unter den gleichen Annahmen, d.h. an mehreren Systemvarianten mit jeweils unterschiedlichen Steifigkeiten der Verbindungen, durchgeführt.

Die somit durchgeführte Analyse und Bemessung der Tragstruktur dieses grossen Gebäudes hat gezeigt, dass derartige Tragstrukturen aus Holzelementen als grosse Tragwerke betrachtet werden können und müssen. Insbesondere die Tatsache, dass die Verbindungen als Haupttragelement betrachtet und deren Steifigkeit als wesentlicher Bemessungskriterium verwendet werden müssen, scheint ein wichtiges Erkenntnis und ein weiter zu entwickelndes Thema zu sein.

Schlussfolgerungen

Die dargestellten Überlegungen stellen lediglich einen stark zusammengefassten Überblick in die Thematik der Verbindungen des Holzbaus im Hinblick auf die aktuelle Entwicklung im Bereich der Herstellung von grossen, mehrgeschossigen Gebäuden und die sich daraus ergebenden Anforderungen dar. Es ist interessant zu beobachten, wie die starke Entwicklung des Holzhausbaus der letzten Jahre möglicherweise vor neue Aufgaben in diesem Zusammenhang stellt.

Dass Holzgebäuden auch zu negativen, d.h. auf Zug wirkenden Auflagerkräften bei Windbeanspruchung geführt haben und dass die entsprechenden Verankerungen erforderlich sind, stellt mit Bestimmtheit keine Neuigkeit dar. Bei grösseren Gebäuden, zum Beispiel wenn die hohe Anzahl Geschosse mit geringen Abmessungen in Querschnitt oder mit grossen Öffnungen in den Wänden kombiniert wird, können diese Kräfte auch sehr gross werden und eine aufmerksame Betrachtung verlangen. Die Notwendigkeit einer detaillierten Analyse des Tragsystems, um das dynamische Verhalten im Erdbebenfall zu erfassen und in die Bemessung zu integrieren, verlangt nach einer präzisen Modellierung der Verbindungen und deren Steifigkeitskennwerte. Die Auslegung von Verbindungen mit einer ausreichenden Tragfähigkeit stellt in der Regel kein grosses Problem dar. Die Erfassung der Steifigkeit dieser Verbindungen

basiert hingegen auf wenigen Grundlagen, die in der Regel für Einzelverbindungen hergeleitet wurden, während jetzt diese Grundlagen auf eine grössere Anzahl von Verbindungen und Verbindungsmitteln umgesetzt werden.

Noch wichtiger scheint aber die Tatsache zu sein, dass bei grösseren Gebäuden die räumliche Tragwirkung in Anspruch genommen wird. Insbesondere bei der Verwendung von BSP-Elementen werden räumliche Tragstrukturen aus relativ dünnen Wand- und Deckenelementen ausgebildet, die zu einer räumlichen Tragstruktur nur dann werden, wenn die dazwischen wirkenden Verbindungen eine ausreichende Steifigkeit aufweisen. Bei diesen Konstruktionen kann zu Recht hinterfragt werden, ob die bei einfacheren Gebäuden des Holzbaus übliche, punktförmige Anordnung der Verbindungen ausreichend und zweckmässig ist; bei dynamischen Beanspruchungen und bei grösseren Tragstrukturen dürfte dies kaum der Fall sein. Ferner stellt sich die grundsätzliche Frage des Entwurfes und der Bemessung der Verbindungen in solchen Fällen: die Steifigkeit der Verbindungen spielt eine wesentlichere Rolle bei der Gesamttragwirkung, als ihre Festigkeit.

Bisher liegen noch relativ wenige Erfahrungen auf diesem Gebiet vor. Der erfahrene Ingenieur und Tragwerksplaner kann jedoch in der Regel diese Aspekte rasch erkennen und zumindest die sich daraus ergebenden Fragestellungen korrekt und zielstrebig eingrenzen. Die moderne Holztechnologie kann zweckmässige Verbindungslösungen anbieten und umsetzen. Die pragmatische, ingenieurmässige Herangehensweise empfiehlt die Bestimmung der jeweils maximal auftretenden Kräfte anhand von einfachen Modellen. Diese führen zwar häufig zu einer Überbemessung der Tragfähigkeit der Verbindungen, aber auch in der Regel zu einer ausreichenden Steifigkeit derselben. Auf die punktuelle Übertragung der Kräfte soll im Zweifelsfall verzichtet werden. Die numerische Erfassung der Steifigkeit der Verbindungen soll im Hinblick auf deren Unsicherheiten betrachtet werden und ggf. in angebrachter Art und Weise verringert oder vergrössert werden, um die Auswirkungen dieser Parameter auf das Gesamtergebnis einzubinden.

Diese Vorgehensweise wird es erlauben, die nötigen Erfahrungen mit diesen Tragsystemen, mit deren Analyse und mit deren praktischen Herstellung zu sammeln, um erfolgreich auch den Bereich der mehrgeschossigen und anspruchsvollen Tragwerke des Hochbaus durch die moderne Holzbauweise rasch zu gewinnen.